

UPLanD

Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design



Research & experimentation
Ricerca e sperimentazione

THE METROPOLIS RESEARCH. EXPERIMENTAL MODELS AND DECISION-MAKING PROCESSES FOR THE ADAPTIVE ENVIRONMENTAL DESIGN IN CLIMATE CHANGE

Valeria D'Ambrosio, Ferdinando Di Martino

Department of Architecture, University of Naples, Federico II, IT

HIGHLIGHTS

- Development of analytic models and spatial models to draw maps of the physical and social systems' vulnerability to heat waves and pluvial flooding.
- Application of geo-computational processes to simulate hazard scenarios based on climate change models.
- Testing of a decision-making process on the adaptive capacity of the urban system and identification of adaptation solution in urban rehabilitation resilient to climate change.

ABSTRACT

The state of knowledge on climate change adaptation at the international level shows several experiences both in the field of research and urban politics that aim at defining methods and procedures, adaptation plans and guidelines for action. However, the specificity of the issues at the local scale requires further experimentations to implement suitable actions based on downscaling processes. Within the Metropolis project, the research group of the Department of Architecture at the Federico II University of Naples has carried out research work aimed at assessing the capacity of the urban system to adapt to the effects of climate change. The research work resulted in the development of a model of knowledge on the vulnerability to heat waves and pluvial flooding based on the study of the information about the features of the social and physical system. By developing downscaling experimental models, hazard scenarios have been built at the local scale based on the IPCC scenarios on CO₂ emissions - Intergovernmental Panel on Climate Change. Finally, a decision-making process has been developed to assess the adaptive capacity of the urban system. It allows the making of a long term adaptive design oriented towards processes of urban rehabilitation that are resilient to climate change. The adaptation solutions have been selected grading by their compatibility with the specific context and evaluated for the correspondence to the technological and environmental requirements, to the socio-economic conditions and the effects on the ecosystem.

ARTICLE HISTORY

Received: November 08, 2016
Reviewed: December 10, 2016
Accepted: December 12, 2016
On line: December 22, 2016

KEYWORDS

Urban regeneration
Resilience
Adaptive design
Environmental design
Geospatial decision analysis
processes

Copyright 2016 Valeria D'Ambrosio, Ferdinando Di Martino
valeria.dambrosio@unina.it, fdimarti@unina.it

ISSN online 2531-9906 | Open access article under [CC-BY-NC-ND 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

1. ENVIRONMENTAL DESIGN AND CLIMATE CHANGE IMPACTS

The climate agreement signed by 180 countries in Paris has enshrined the increasing commitment to reduce climate changing emissions in order to limit the temperature rise to 2°C between now and 2100. With COP 22 UN climate change conference in Marrakech the 196 participating States have set in 2018 the deadline to complete the rule book for operationalizing last year Cop 21 Paris Agreement. Following the international commitments, several international studies and experimental projects have been started to draw up plans, strategies and guidelines to adapt to *climate change* impacts.

Due to the intensified international debate on the subject, also in our country's cities we feel the necessity to implement those actions because of the worsening of the effects of the different aggravating factors such as land use, pollution and high population density whose 90% resides in urban settlements as revealed by last ISTAT census. At the international level, the state of knowledge on climate change adaptation shows several experiences both in the field of research and urban politics that aim at defining methods and procedures, adaptation plans and guidelines for action (Sgobbo, 2016). The specificity of the issues at the local scale requires further experimentations to implement suitable actions based on *downscaling* processes (Castellari et al, 2014). In the last three years, the DiARC research group - Department of Architecture at the Federico II University of Naples - has carried out a research work aimed at assessing the capacity of the urban system to adapt to the effects of *climate change*, simulating scenarios of vulnerability reduction through the application of technical/typological solutions of *adaptive design*. The research work is part of the research project called METROPOLIS – acronym for *Integrated and Sustainable Methodologies and Technologies for the adaptation and safety of urban systems*, that aims to achieve a supporting platform to decision-making for the integrated management of natural and human risks with a specific reference to seismic, hydrogeological and climate related risks. The project is implemented as part of the High Tec District for sustainable constructions STRESS S.c.a.r.l. financed by Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività 2007-2013.

The research work resulted in the development of a model of knowledge of the vulnerability to heat waves and *pluvial flooding* based on the study of the information about the features of the social and physical system collected from institutional databases, direct analysis and observations elaborated at different scales, referred to complex urban elements, residential units, buildings and open spaces (D'Ambrosio, Leone, 2015). The research approach required classification of typologies and sampling based on the recurring types/morphologies and building techniques, in order to have a sampling of urban elements and similar buildings referred to characterized urban contexts. This kind of approach allowed to interface point data with databases that for their general nature do not have the appropriate depth to make the data useful for knowledge processes with detailed *downscaling*. Therefore, the correlation between different categories of data has allowed to get extensive mapping, where urban elements and buildings belonging to the same class have been listed analogically by common characteristics. The amount of data has fulfilled the normalization and saturation of the data referred to the urban fabrics based on the implemented classifications, thus providing a wide and homogeneous base to develop the model of knowledge.

The templates of knowledge have been set in compliance with the disciplinary approach of environmental design through the control of information, actions and strategic choices that have been framed in consideration of system and process relationships with experimental approaches of analysis and design (Schiaffonati F. et al, 2011). The assessment of the scenarios on the impact of heat waves and *pluvial flooding* has been referred to the population that is directly involved in terms of health, well-being and safety. For every phenomenon that has been studied, sensitive populations have been

taken into account, such as the “weak” ones i.e. children and elderly or those exposed to specific conditions of *fuel poverty*. The impact scenarios have been developed starting from the analysis of the urban system's degree of inherent vulnerability and related to the degree of exposure to hazard. The analysis of the hazard scenarios has been an experiment at the local scale, including the collection of climate forecast data developed by specialized research institutes based on IPCC scenarios on CO₂ emissions - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 4.5 – 8.5). The cooperation with specialized industrial partners in the field of remote-sensing has allowed testing a model that can deliver spatial climate data. The different research phases have used analytic-deductive methodologies besides the experimental and simulative ones, all finalized to the development of a model of knowledge of the vulnerability and adaptation capacity of the urban system – meaning its building components, open spaces and social component – and has conferred the management of the complex information system to GIS spatial analysis processes. The model has been conceived to be applied also to different national contexts and to assess its functioning, experimental approaches and methodologies have been tested in East Naples. The selection of the areas of study (from the outskirts of the Historic Centre to Ponticelli district in East Naples and from Fuorigrotta district to Bagnoli in the western area of the city) has been determined by the presence of different urban fabrics characterized by geomorphology, buildings and spaces and by the consistency of urban parts (historic city, consolidated city, contemporary planned expansions and “informal” parts of the city).

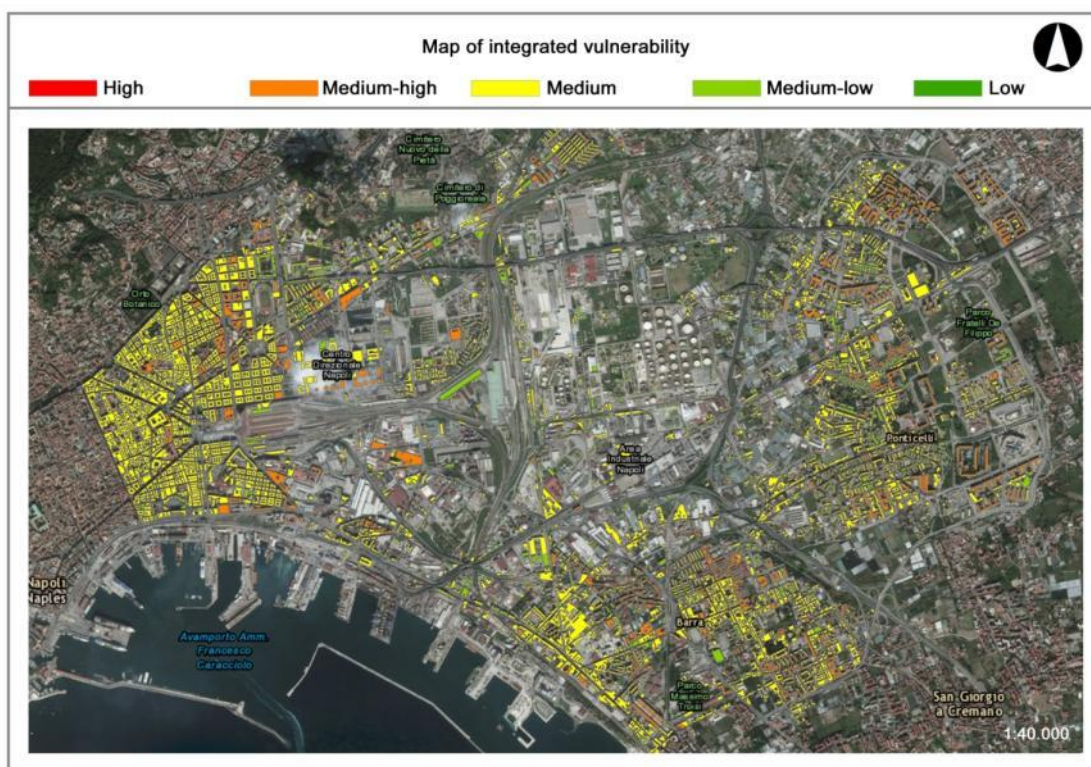


Figure 1: Vulnerability thematic map of the urban system to heat wave in the East area of Naples. It is obtained by integrating the vulnerability maps for residential buildings, open spaces and population

2. URBAN VULNERABILITY TO HEAT WAVES

The hierarchy model developed within the Metropolis research project has generated the map of physical vulnerability of residential buildings and open spaces to heat waves (Adger, 2006; Füssel, 2007). The starting point has been the processing of specific indices of exposure and sensitivity to heat waves, determined by the construction characteristics of parts and elements of the physical system. The indices express the degree of exposure to heat waves and the degree of sensitivity affecting the system (IPCC, 2012). A properly calibrated weight has been assigned to every index to determine the impact of the index on the degree of overall vulnerability of the two systems (buildings and open spaces) that have been separately analysed and then integrated in relation to the extent the adjacent open space affects the building's vulnerability. Afterwards, a resident population and a vulnerable section of the population have been assigned to every building proportionally to the volume, to analyse the subsequent impact scenarios on the inhabitants provided by integrated vulnerability and hazard scenarios.

The table below shows the indices used to assess the vulnerability of the physical system formed by residential buildings and open spaces, the characteristics used to assess the indices and the data source. Thermal lag and attenuation indices have been developed starting from the analysis of the envelope performance and assessing the features of the recurring technical solutions in the area.

Table 1: Indices used in assessing the vulnerability of residential buildings

Parts and elements of the urban system	Vulnerability index	Characteristics	Sources
Residential buildings	Thermal lag	Construction technique Construction age	2011 ISTAT census /direct observations
	Attenuation factor	Building technique Age of building	2011 ISTAT census /direct observations
	Sunshine	Mean Hillshade for the roof (in the range 0 -255) Mean Hillshade for the facades (in the range 0 - 255)	LIDAR DTM/DSM
	Volume	Mean high Covered surface	LIDAR DTM/DSM
Open spaces	NDVI	Mean Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (in the range 0-1)	Remote sensing image (Rapideye)
	Sky View Factor	Mean Sky View Factor (SVF) (in the range 0-1)	Remote sensing image (Landsat 8)
	Albedo	Mean Albedo (in the range 0-1)	Dato telerilevato (Rapideye)
	Sunshine	Mean Hillshade value (in the range 0 -255)	LIDAR DTM/DSM

Thermal lag and attenuation indices have been conveniently calibrated on the values calculated for façades and roofing, based on the building's average height and shape factor. Sunshine characteristics have been processed by calculating the average *hillshade* of façades and roofing. This value comes from the application of different weights in relation to the different time *hillshade* at the different times of the day deriving from DTM (*Digital Terrain Model*) and DSM (*Digital Surface Model*) raster detected by LIDAR remote-sensing (*Light Detection and Ranging*) 1x1m resolution, and considering the different azimuth values and sun height during the day hours in a summer day in the area of study. DTM and DSM raster have also been used to provide estimation of the buildings' heights. The indices on open

spaces have been elaborated mainly collecting satellite data (LIDAR, Landsat 8, Rapideye) and processed through algorithms of spatial analysis and zonal statistics developed by the information technology partners of the research.

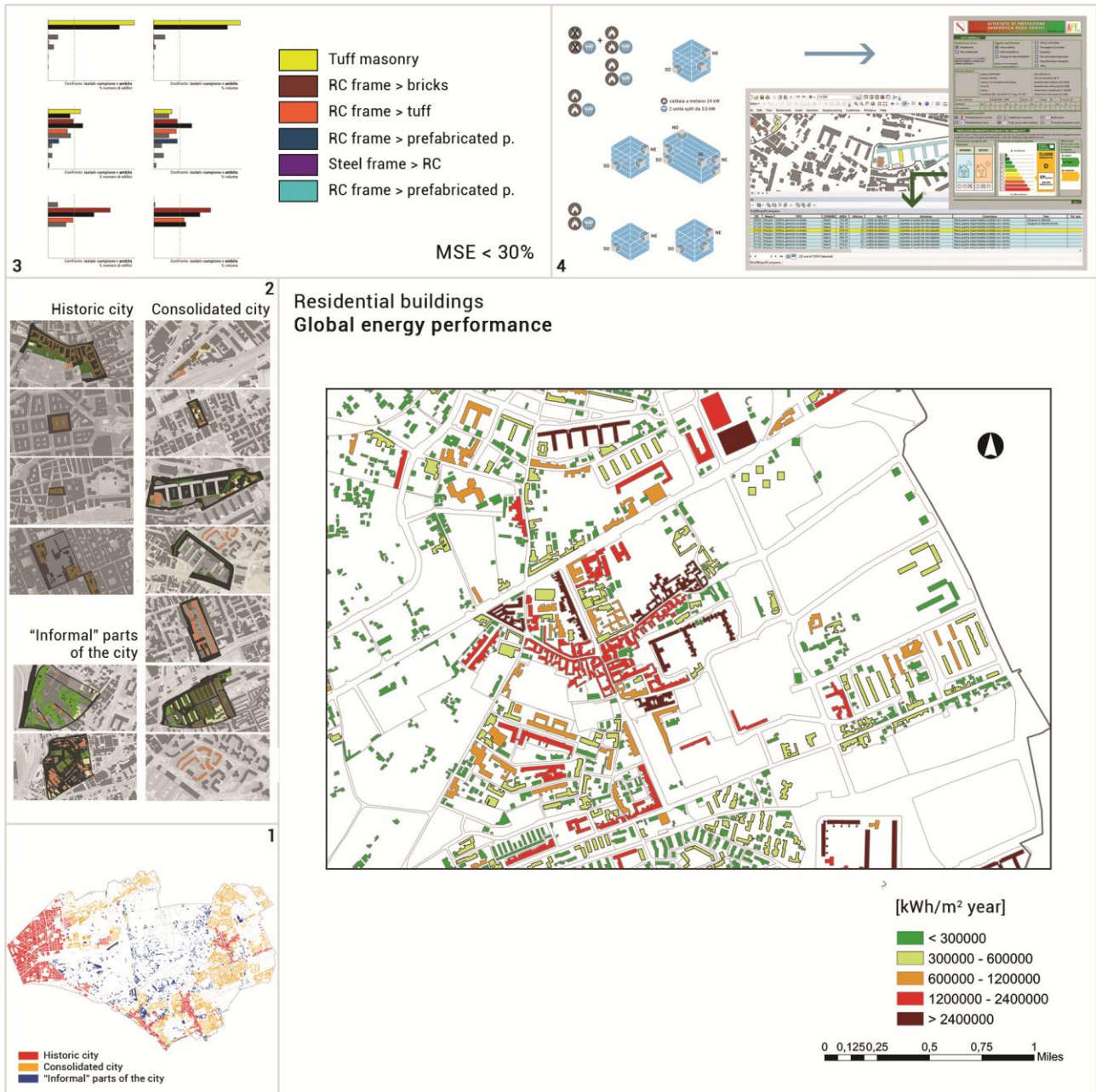


Figure 2: Map of the global energy performance of the buildings in the sample area of East Naples (1 - Thematic map showing the urban fabrics distribution; 2 - Examples of city blocks in different urban fabrics; 3 - Histograms showing the frequency of buildings built with a construction techniques in each city block; 4 - Example of Energy Certification for a building in the sample)

The analysis of the residential buildings requiring urgent retrofitting to improve adaptive capacity

has been achieved through the estimation of the resident population and the proportional vulnerable section of the population for every building, being the assessment of the harm caused by heat waves related to the resident population. The reliable computation has been developed starting from ISTAT databases referred to the 2011 population census and calculating the estimate of the resident population in every building in proportion to the volume of the building compared to the sum of the volumes of all the buildings in the same census area. The resulting maps of the inhabitants' potential vulnerability to the effects of heat waves show areas that are more exposed to the risk when related to *hazard scenarios*. Therefore, working at multiple levels of information, the developed model allows to assess urban system vulnerability that can be consequently improved with *adaptive design* solutions whose contribution can be evaluated by checking the values of the vulnerability indices in the simulation processes. Relevant scenarios have been simulated of the energy requirement of a statistically significant sample of buildings selected by construction techniques. The characterization of the annual energy requirement of the built heritage has been calculated on the basis of the different urban fabrics (compact, consolidated and informal city) and of the main typologies of built up areas (continuous facade, city blocks, single buildings and single- two-family buildings) in the area of study. This classification applied to all the buildings and urban elements allows to assess the contribution to mitigating the causes that affect *climate change* with regard to CO₂ emission reduction.

3. SPATIAL ANALYSIS MODEL FOR EVALUATING HAZARD SCENARIOS

To assess how much can be intensified and last over time phenomena of heat waves during the summer months by climate change have been taken into consideration climatic characteristics that determine a possible danger of occurrence of the phenomenon and characterize a hazard scenario. A scenario of hazard related to a phenomenon is represented by a distribution on the area of study of characteristics that connote the danger, detected as a result of the pursued specific climatic factors of particular intensity (Smith, 2001).

For the extraction of the features that characterize a hazard scenario for a heat wave phenomena are considered the following daily climatic parameters:

- Maximum daily air temperature;
- Minimum daily temperature;
- Daily Heat Index;
- Daily surface temperature gradient between day and night hours.

The daily maximum and minimum temperature are the maximum and minimum temperatures encountered during the 24 hours. The Heat Index is an indicator set up by the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), based on the temperature and the percentage of relative humidity, which estimates the actual temperature perceived by the population, varying the maximum temperature and relative humidity. The US National Weather Service continuously monitors the distribution of this parameter on the overall country, and reports alarm incidents in areas in which it exceeds the threshold value. The Heat Index is based on a formula that takes into account different factors, such as vapor pressure, the actual speed of the wind, the size of an individual sample, internal body temperature and perspiration rate, represented by means of numerical coefficients. HI The calculation is based on the following equation (NWS-NOAA, 2):

$$HI = -42.379 + 2.04901523 \cdot T + 10.14333127 \cdot RH - 0.22475541 \cdot T \cdot RH - 0.00683783 \cdot T^2 - 0.05481717 \cdot RH^2 + 0.00122874 \cdot T^2 \cdot RH + 0.00085282 \cdot T \cdot RH^2 - 0.00000199 \cdot T^2 \cdot RH^2$$

where HI is the Heat Index in °F, T is the maximum daily temperature in °F and RH is the relative humidity in %.

The surface temperature gradient is a parameter that measures the surface temperature difference between day and night hours. It is related to the absorption and the thermal emissions of the material that composes the surface during the day in dependence of its heat capacity. A hazard scenario is characterized by a time span in which on the concerned urban fabric insists the heat wave phenomenon; the longer this period is the most intense is the heat wave phenomenon. In order to determine a hazard scenario is necessary, therefore, to establish, on the basis of the climatic parameters previously described, when the combination of a higher intensity of a parameter greater than a specific threshold with a duration of more than a certain number of consecutive days it produces the phenomenon. For each of the four parameters it was therefore defined a hazard characteristic having a threshold value for the parameter and for the number of consecutive days in which it must be greater than the threshold. The combination of the four characteristics for a number of consecutive days exceeding a predetermined number of days determines the unleashing of a heat wave phenomenon.

In Table 2 are shown the four hazard characteristics, the correspondent thresholds and the minimum number of consecutive days in which this value is reached or exceeded

Table 2: Hazard characteristics for the heat wave phenomenon

Hazard characteristic	Parameter	Threshold value	Consecutive days
p1	T_{\max}	$\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	> 3
p2	T_{\min}	$\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	> 3
p3	<i>Heat index</i>	$\geq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$	> 3
p4	Surface temperature gradient Δ_T ($^{\circ}\text{C}$)	$< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	> 3

The threshold value of the maximum temperature refers to the maximum temperature threshold identified in (Greco et al., 2006) for the detection of heat wave phenomena. The minimum temperature threshold refers to the minimum temperature threshold in heat wave defined by the World Meteorological Organization (WMO, 2012). For the surface temperature gradient, there are no studies in scientific literature on trends in day-night temperature gradients during phenomena of heat waves; the threshold value has been so formed by means of a calibration process implemented on a thermal imager measurement campaign of the surface temperatures in urban area on surfaces with different materials; measurements were performed during a period of heat wave (July 3, 2015, 12.00 and 23.00).

To obtain estimates of future hazard scenarios of heat waves were considered simulations of the performance of the characteristics based on estimates of the impacts caused by climate change on the minimum and maximum temperatures and on the relative humidity with daily projections up to 2100. As regards the surface temperature gradient, since the area of study concerns an urban context, it is reasonably assumed that over time there are no mutations to the type and use of the soils, for which it is considered that the distribution of the surface temperature gradient in the study area of study during a heat wave does not vary over time.

The projections over time of maximum and minimum daily temperatures and relative humidity were obtained from the results of a search entrusted to the Euro-Mediterranean Centre on Climate Change (CMCC) (see Bucchignani et al. 2015, Zollo et al. 2015), in which two of the four scenarios selected by 'the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (see IPCC 2013, IPCC were considered 2014) on the trend until 2100 of greenhouse gas emissions and concentrations (GHG):

- the RCP4.5 model in which there is a stabilization of emissions;

- the RCP8.5 model in which a steady increase in emissions is expected until 2100.

In the following figure is schematically shown the model that has been developed to the calculus of the hazard characteristics and the subsequent derivation of the hazard scenarios.

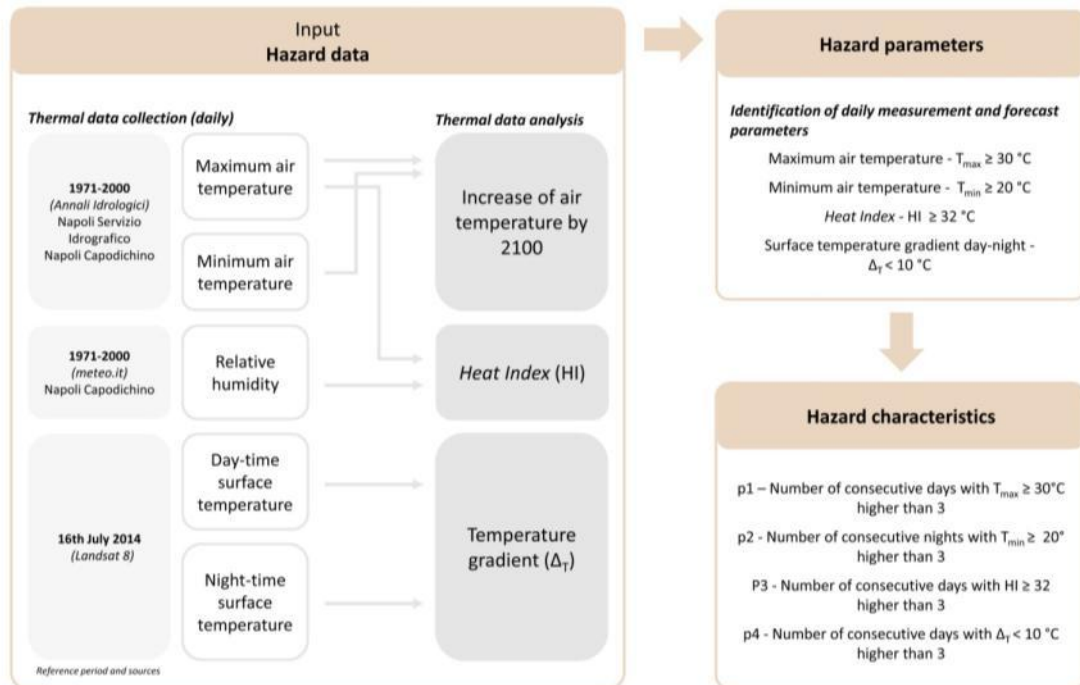


Figure 3: The model used to the derivation of the hazard scenario

Projections were obtained from daily measurements of maximum temperature, minimum temperature and relative humidity available from Naples Hydrographic Service (T_{max} , T_{min} and P) and Naples Capodichino stations for the period 1971-2000.

The distribution of the surface temperature gradient on the area of study was obtained through the acquisition in day and night hours of the surface temperature maps starting from shooting from the satellite Landsat 8 in July-19-2015 during a heat wave.

The hazard scenario is achieved by spatial analysis processes from the distribution in the area of study of the characteristics.

The distribution of the three climate parameters maximum temperature, minimum temperature and heat index can be obtained as raster information resulting from spatial interpolation processes from point of input data provided geo-locating the individual control units. In the present experiments we were used climate data measured from the Capodichino weather station and it was assumed that the climate values measured are uniform throughout the study area, identified with the Ponticelli district. This assumption is reasonable, since the study area circumscribed to an East Naples neighborhood with limited variations in height.

The spatial distribution of the surface temperature gradient has been obtained by the application of spatial analysis algorithms to the two satellite images in corresponding to the input surface temperatures in the daytime and night time in the heat wave.

For the two climate change models have been developed to hazard scenarios extraction algorithms, corresponding periods exceeding three consecutive days in which the values of the three climate parameters maximum temperature, minimum temperature and heat index, exceed the corresponding

thresholds simultaneously.

The next figure shows the trend of the number of consecutive days in the presence of heat wave from 2017 to 2100 based on the results of the forecasts. The horizontal bar in red indicates the threshold of 3 consecutive days.

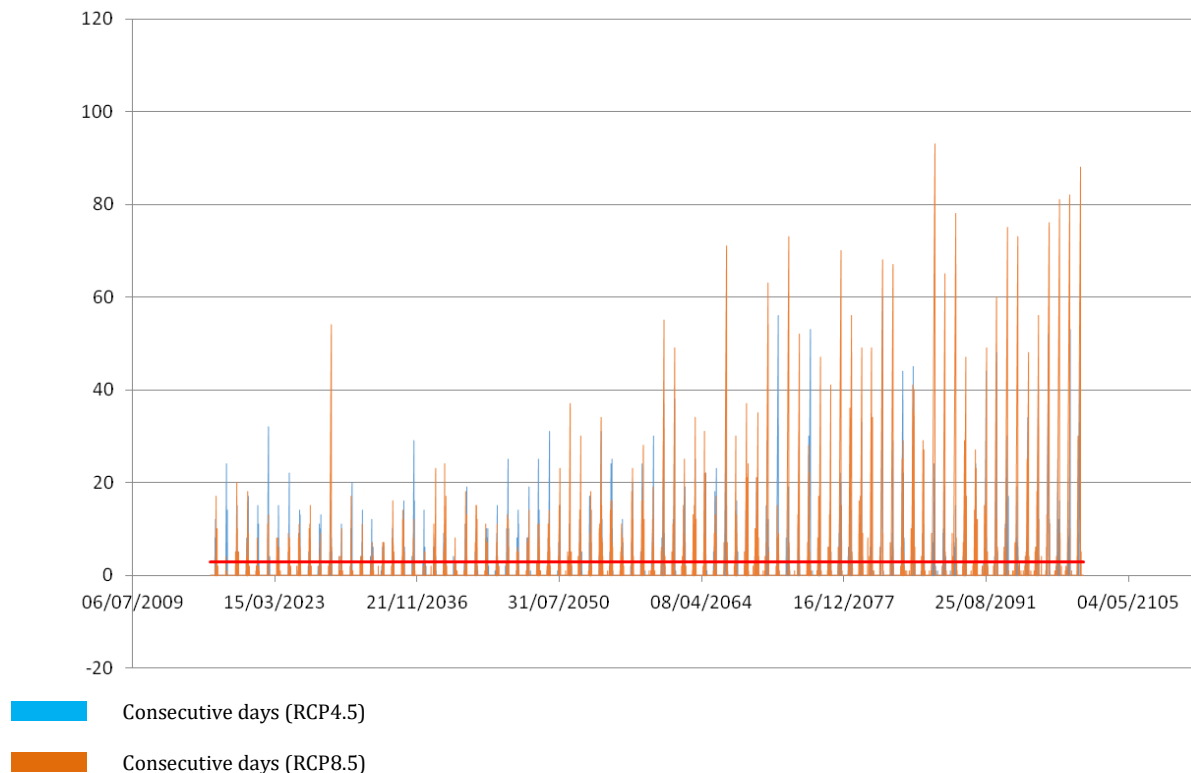


Figure 4: Trend of the consecutive days of heat wave

In fig. 4 arise peaks of heat waves in RPC4.5 model (in blue) over 50 consecutive days and in RPC8.5 model (in red) over 90 consecutive days.

To analyze the variation over time of the hazard distribution of the phenomenon in the area of study of Ponticelli were considered for each of the three models, three types of hazard scenario:

- A mean dimension hazard scenario including those provided within ten years;
- A mean dimension hazard scenario among all scenarios planned until 2100;
- The worst hazard scenario provided by the forecast.

Table 3: Hazard scenarios identified for the two forecasting models

Hazard scenarios			
RCP 4.5 model		RCP 8.5 model	
Ending date	Duration (days)	Ending date	Duration (days)
08/07/2020	8	11/08/2019	10
21/08/2049	31	26/08/2049	55
15/09/2081	60	15/09/2081	93

Table 3 shows the three identified scenarios considering each of the two models. In the table in addition to the number of consecutive days in which insists the phenomenon it shows also the end date of the expected phenomenon.

In order to obtain the hazard distribution related to a scenario and build the hazard thematic map for the area of study of Ponticelli, it was taken into account the spatial distribution of the temperature gradient measured at the date 07/19/2015 during a heat wave. Through the use of zonal statistics algorithms for each residential building polygon has been produced the estimate of the mean value of the surface temperature gradient and was produced a suitably calibrated thematic map of the average gradient of the surface temperature of the buildings, by using the following thematic classes:

Table 4: Thematic classification of the residential buildings surface temperature gradient

Interval of Δ_T (°C)	Class	Description
$\Delta_T > 20$	5	Low
$15 < \Delta_T \leq 20$	4	Mean-low
$10 < \Delta_T \leq 15$	3	Mean
$7 < \Delta_T \leq 10$	2	Mean-high
$\Delta_T \leq 7$	1	High

The worst classes (1 – High and 2 – medium-high) are set by considering a threshold value for the surface temperature gradient $\Delta_T = 10$.

Starting from this thematic classification it was addressed a study in the literature to analyze a possible correlation between the increase of the number of consecutive days in heat waves and the increase of damages caused on the resident population and its health condition. As shown in (Pinna, 2004; Castellari et al., 2014a), results from studies in urban areas show a close correlation between the duration of the heat wave and the daily number of deaths. Compared to a minimum duration of heat wave (<6 days), a greater duration of heat waves produce a greater number of deaths in a proportional relationship to the average duration of the same phenomenon. This trend was observed particularly for older people, who have died because of the persistence of the phenomenon.

Table 5: Change of the hazard classes on varying the hazard scenario

Duration < 6 consecutive days		Duration 30 consecutive days		Duration 60 consecutive days	
Class	Description	Class	Description	Class	Description
5	Low	4	Medium-low	2	Medium-high
4	Medium-low	3	Medium	1	High
3	Medium	2	Medium-high	1	High
2	Medium-high	1	High	1	High
1	High	1	High	1	High

Correlating the duration of the phenomenon to the performance of the average number of deaths in high density urban settlements, it was produced a procedure to allow to classify the hazard on residential buildings in terms of hazard to human life for the 6 scenarios examined. This process has been calibrated according to the hazard classification for a heat wave with minimum duration in which

the thematic map of dangerousness is that produced by considering the thematic map of the surface temperature gradient. Compared to a hazard scenario for a heat wave of minimum duration, the hazard class assigned to a residential building for a heat wave with a specific duration worsens by a factor of 1 when the ratio between the average number of deaths estimated in the presence of this heat wave and the number of deaths estimated in the presence of a minimum wave it is equal to 10. In the following table there is shown the variation of the class of hazard with respect to three hazard scenarios which provide a duration of heat waves, respectively, less than six days, amounting to 30 consecutive days and equal to 60 consecutive days.

Table 5 shows that, when the scenario get worse with respect to the minimum one, for duration of about 30 consecutive days the hazard class attributed to a residential building decreases by one unit, while for duration equal to about 60 consecutive days, the hazard class decreases by 3 units; in the latter case even to a residential building which is associated a low hazard class in scenarios with a minimum duration of heat waves it will be associated a medium-high hazard class for scenarios which provide a duration of heat waves of 60 consecutive days.

4. RESULTS OBTAINED APPLYING THE MODEL ON THE TEST AREA

As mentioned earlier, the experimental model has been applied on an area of study comprising the Ponticelli district. Below are shown the thematic maps related to the six hazard scenarios shown in tab. 3, obtained considering the two climatic foresight models.

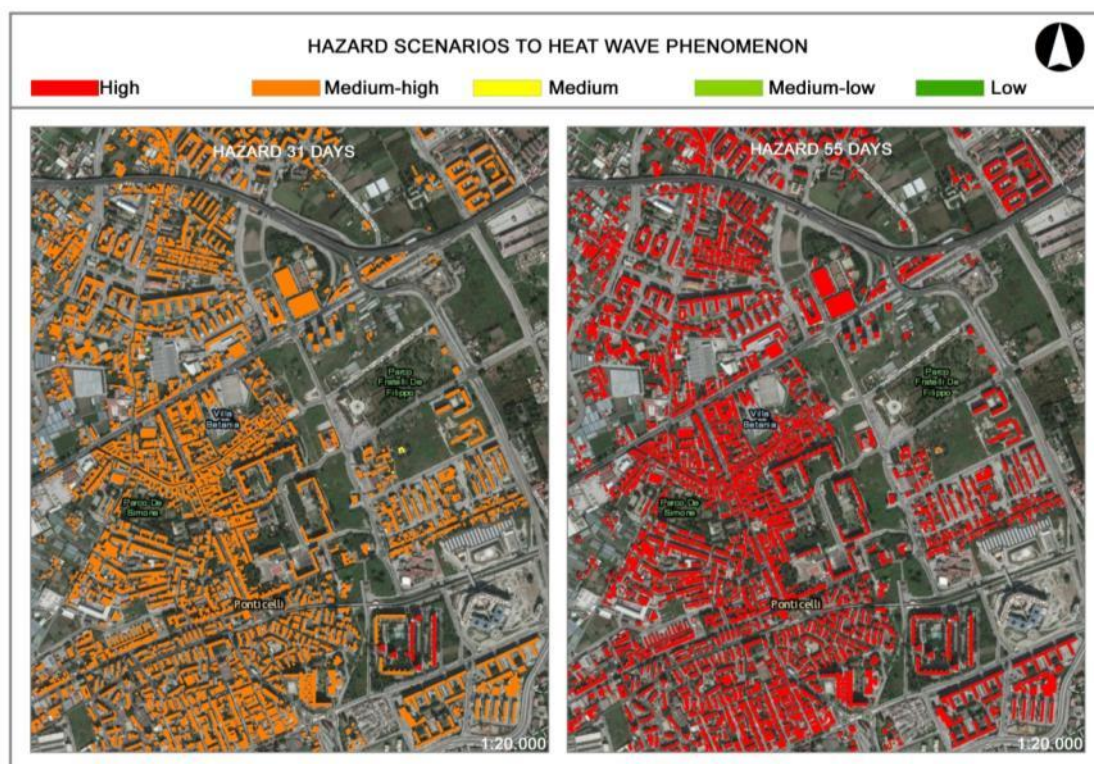


Figure 5: Hazard thematic map for the residential buildings – prevision models RCP 4.5 (31 days) and RCP 8.5 (55 days)

The results show that for scenarios involving phenomena of minimum duration of heat waves, or scenarios provided in a close period, the hazard levels for residential buildings are almost the average over the entire area of study, while for future scenarios involving waves of heat insisting for more than 50 consecutive days, the hazard levels are high for all residential buildings.

These findings corroborate the need to plan retrofits interventions on the most vulnerable residential buildings in anticipation of an increasing hazard that by 2100 will become high for all residential buildings in the district, regardless of the climate change model predicted. In order to ascertain what might be the priorities for retrofit interventions, it has been considered the resident population as the entity exposed to the damage caused by a prolonged heat wave phenomenon on residential buildings. For this purpose it was produced a thematic map of the distribution of the population living in residential buildings based on the volumes. It is shown in the next figure.

This map shows that in some residential buildings the resident population exceeds 250 units and a high vulnerability to the phenomenon in these buildings is an index of a possible damage produced on the resident population in a future scenario, if are not planned retrofit interventions increasing the adaptive capacity in these buildings.

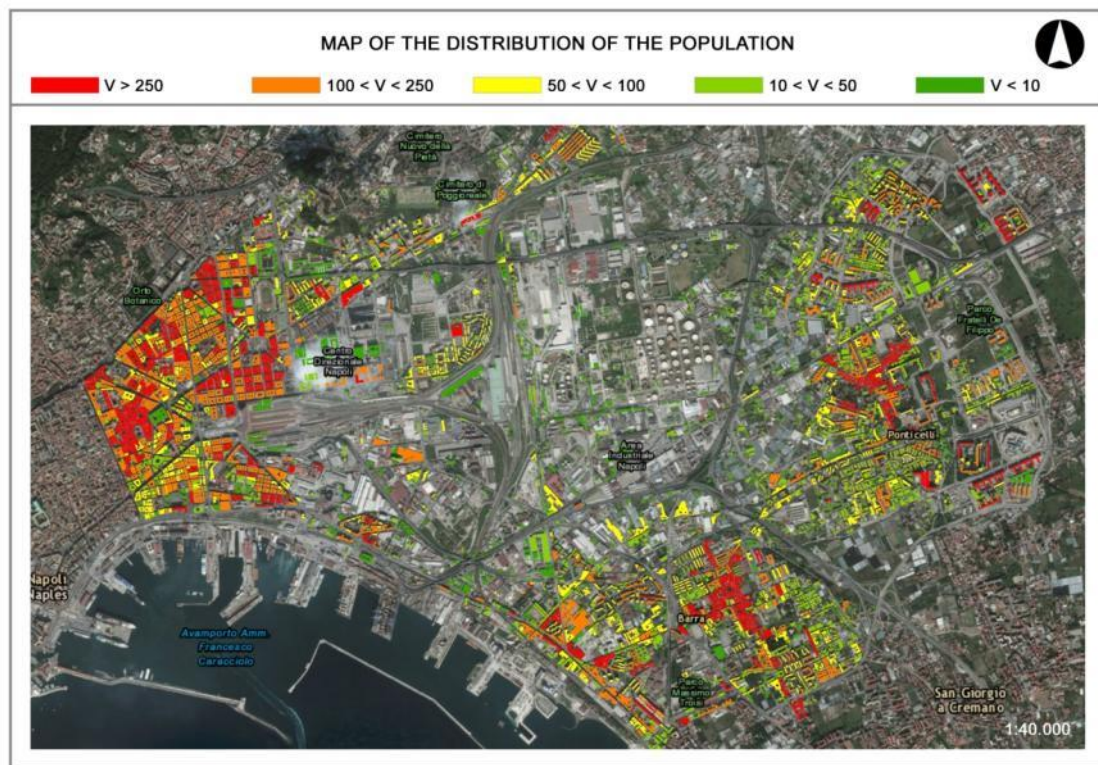


Figure 6: Thematic map of the distribution of the population assigned to the residential buildings by considering their volumes.

5. IMPACT SCENARIOS AND DECISION-MAKING PROCESSES FOR THE ADAPTIVE CAPACITY OF THE URBAN SYSTEM

In the definition of impact scenarios, the first step is the integration of the class of the urban system vulnerability to heat waves with the risk class determined by a specific hazard scenario, considering the resident population and the vulnerable section as values exposed to the damage caused by the phenomenon. In this way, it is possible to determine which residential buildings need urgent actions and solutions of adaptive design to improve adaptive capacity.

To assess the urban system's adaptive capacity a so called top down strategy has been developed on the basis of the map of the physical system's vulnerability to the studied phenomenon, considering the hazard scenario and the inhabitants' distribution. The decision maker can set a threshold to the vulnerability index and evaluate which adaptive design solutions can be adopted to improve the adaptive capacity of a vulnerable urban or building element that has been assigned a vulnerability index below the threshold.

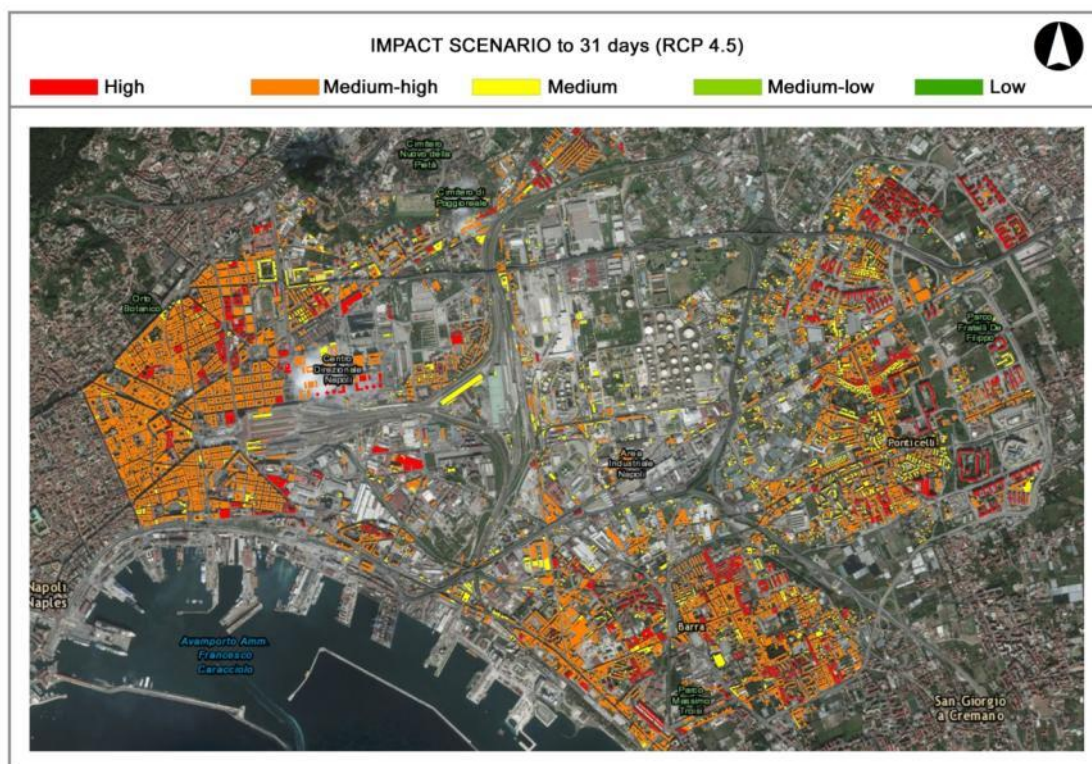


Figure 7: Impact scenario of a heat wave hazard forecasted for the year 2049 extended on 31 days (as per model RCP 4.5). The map shows the classification of the impacts on the inhabitants in anticipation of a 20-year average scenario. The buildings with high and mid/high-impact classes are those buildings where adaptation actions should be implemented with priority.

Working the vulnerability model backwards, it is possible to assess which characteristics of the system's element affect its level of vulnerability harder. This allows the identification of a set of retrofitting technologies to improve adaptive capacity. Moreover, through the cross-reference with further context maps (for instance based on urban and environmental planning constraints) the

developed process allows to assess, on the geo-computational platform, what retrofitting actions can be applied and with what benefits on vulnerability reduction.

The result of this process provides on the one hand an adaptive capacity map that shows the system vulnerability and the suggested retrofit solutions, on the other hand another map of the potential adaptive capacity that shows the improved vulnerability that the system could acquire if all the retrofitting solutions can be implemented in accordance with both the constraints and the risks analysed in the context maps. The model is a support to decisions that allows a long term adaptive design oriented towards processes of climate-resilient urban rehabilitation. The final map of adaptive capacity, integrated with the impact scenario where the vulnerability classes of the physical system are represented, with the risk level deriving from the *hazard* scenario and the distribution of equivalent inhabitants, is a tool for the *decision maker* to determine typology and priority of actions and schedule the adaptation work.

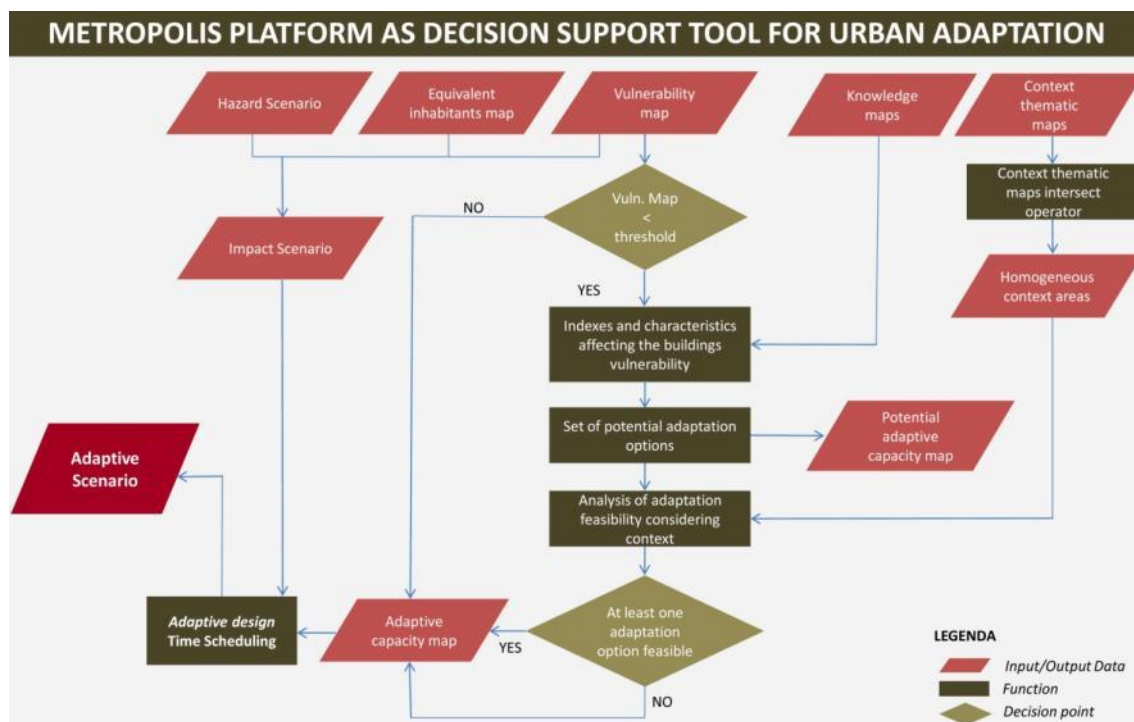


Figure 8: Flow chart of the decision-making process to assess the adaptive capacity of the urban system to a given climate phenomenon.

The context maps show areas representing constraint or risk zones, areas of great historic or architectural interest etc. The integration of single context maps through processes of spatial intersection provides homogeneous areas of the whole context. The feasibility study of the actions considers all the characteristics of the homogeneous context area where the system to be adapted is and checks the feasibility referring to the compatibility with the local features of the environment, the buildings and the urban fabric.

Finally, the adaptive capacity map shows the reduction of the vulnerability of the system's elements in response to a set of compatible adaptive solutions adequately assessed in relation to the estimated performance improvement and the co-benefits in terms of compliance with the environmental technological requirements, socio-economic conditions and repercussions on ecosystems. Following

the analysis of the impact scenario, the *decision maker* can evaluate the priorities of actions and determine which elements of the physical system need urgent adaptive solutions to be scheduled.

PARTS OF THE URBAN SYSTEM		INDEX	ADAPTATION SOLUTIONS																	
RESIDENTIAL BUILDINGS		Volume																		
		Sunshine																		
		Thermal lag																		
		Attenuation factor																		
OPEN SPACES		Sunshine																		
		SVF																		
		Albedo																		
		NDVI																		

Legend:

- | | | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| 1. Sloping roof addition | 11. Solar shading | 21. Grassed open joint paving |
| 2. Solar heating | 12. External insulation | 22. Porous surface |
| 3. Ventilated façade | 13. Sloping roof insulation (ventilated roof) | 23. Cool paving |
| 4. Green façade (green wall) | 14. Flat roof insulation (warm roof) | 24. Cool paving painting |
| 5. Green façade (climbing plants) | 15. Fixed coverings | 25. Green areas |
| 6. Green roof (extensive) | 16. Removable coverings | 26. Bioswale |
| 7. Green roof (intensive) | 17. Tree row | 27. Basins and fountains |
| 8. Cool roof | 18. Green pergolas | 28. Watersquares |
| 9. Ventilated flat roof | 19. Natural aggregates | |
| 10. Selective glass | 20. Open joint paving | |

LA RICERCA METROPOLIS. MODELLI SPERIMENTALI E PROCESSI DECISIONALI PER IL PROGETTO AMBIENTALE ADATTIVO IN REGIME DI *CLIMATE CHANGE*

1. PROGETTAZIONE AMBIENTALE E IMPATTI DEL *CLIMATE CHANGE*

L'accordo sul clima siglato a Parigi tra 180 Paesi alla fine del 2015 ha sancito un impegno progressivo di riduzione delle emissioni climalteranti finalizzato al contenimento dell'incremento della temperatura entro i 2 °C fino al 2100. Con la Conferenza Onu sul clima di Marrakech Cop 22, i 196 Stati partecipanti hanno indicato entro il 2018 la definizione del regolamento per l'attuazione dell'Accordo di Parigi Cop 21 dello scorso anno. Alla luce degli impegni internazionali, si sono intensificati a scala internazionale numerosi studi e progetti sperimentali orientati alla elaborazione di piani, strategie e linee di indirizzo finalizzate all'adattamento agli impatti dovuti al *climate change*.

A valle del progressivo intensificarsi del dibattito internazionale sul tema, anche nelle città del nostro paese, in particolare, si registra la necessità di attuare tali azioni a causa dell'accentuarsi degli effetti legati alle diverse condizioni costitutive aggravanti quali consumo di suolo, inquinamento e densità abitativa, che, come emerge dai dati dell'ultimo censimento ISTAT, risiede per il 90% negli insediamenti urbani. A livello internazionale lo stato delle conoscenze sul tema dell'adattamento al cambiamento climatico vede numerose esperienze sia nel campo della ricerca che delle politiche urbane tese a definire metodi e procedure, piani di adattamento e linee guida per gli interventi (Sgobbo, 2016). La specificità delle problematiche alla scala locale rende necessarie ulteriori sperimentazioni in grado di attuare azioni adeguate basate su processi di *downscaling* (Castellari et al, 2014).

Il gruppo di ricerca del DiARC - Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II, ha svolto nell'ultimo triennio un'attività di ricerca finalizzata a valutare la capacità di adattamento del sistema urbano agli effetti del *climate change* attraverso la simulazione di scenari di riduzione della vulnerabilità mediante l'applicazione di soluzioni tecnico/tipologiche e progettuali di *adaptive design*. L'attività di ricerca è condotta nel progetto di ricerca METROPOLIS - *MEtologie e Tecnologie integRate e sOstenibili Per l'adattamentO e La sicurezza di Sistemi urbani* finalizzato alla realizzazione di una Piattaforma di supporto alle decisioni per la gestione integrata dei rischi naturali e antropici con particolare riferimento a quello sismico, idrogeologico e climatico. Il progetto è attuato nell'ambito del Distretto ad Alta tecnologia per le costruzioni Sostenibili STRESS S.c.a.r.l. su finanziamento del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività 2007-2013.

Il lavoro di ricerca ha avuto come esito lo sviluppo di un modello di conoscenza della vulnerabilità ai fenomeni di ondata di calore e di *pluvial flooding* incentrato sull'approfondimento delle informazioni sulle caratteristiche del sistema fisico e sociale costruite attraverso banche dati istituzionali, analisi e osservazioni dirette ed elaborate a differenti scale, da quella riferita agli elementi urbani complessi fino alle unità residenziali, agli edifici e agli spazi aperti (D'Ambrosio, Leone 2015). L'impostazione della ricerca ha previsto classificazioni tipologiche e campionature in relazione alle ricorrenze tipomorfologiche e costruttive in modo da avere una campionatura di elementi urbani ed edifici di impianto analogo riferiti a tessuti urbani caratterizzati. Questo approccio ha consentito di interfacciare dati puntuali con banche dati che, per il loro carattere di generalità, non presentano l'appropriato grado di approfondimento per rendere utilizzabili i dati stessi in processi di conoscenza in condizioni di un dettagliato *downscaling*. La correlazione fra differenti categorie di dati ha consentito quindi di ottenere mappature estese in cui sono stati riportati, con ripetizione analogica sulla base di

caratteristiche comuni, elementi urbani ed edifici appartenenti a una stessa classe. L'estensione dei dati ha permesso una normalizzazione e una saturazione dei dati relativi ai tessuti urbani in base alle classificazioni attuate, avendo in tal modo una estesa base omogenea per lo sviluppo del modello di conoscenza. Le modalità della conoscenza sono state impostate secondo gli indirizzi disciplinari della progettazione ambientale, attraverso il controllo delle informazioni, delle azioni e delle scelte strategiche inquadrare secondo relazioni di tipo sistemico e processuale con approcci sperimentali sia analitici che progettuali (Schiaffonati F. et al 2011). La valutazione degli scenari di impatto dei fenomeni di ondata di calore e di *pluvial flooding* è stata riferita alla popolazione direttamente coinvolta in termini di salute, benessere e sicurezza considerando, in base ai differenti fenomeni indagati, fasce di popolazione più sensibili come quelle "deboli" - ovvero bambini e anziani - o esposte a particolari condizioni di "povertà energetica" (*fuel poverty*). Gli scenari di impatto sono stati elaborati a partire dall'analisi del grado di vulnerabilità intrinseca del sistema urbano e correlati al grado di esposizione alle condizioni di pericolosità (*hazard*). L'analisi degli scenari di pericolosità è stata condotta in maniera sperimentale alla scala locale a partire dall'acquisizione di dati di previsioni climatiche sviluppati da Enti di ricerca specializzati sulla base degli scenari dell'IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* sulle emissioni di CO₂ (IPCC 4.5 - 8.5). La collaborazione con i partner industriali specializzati nel settore del telerilevamento ha permesso di attuare la sperimentazione di un modello in grado restituire spazialmente i dati climatici.

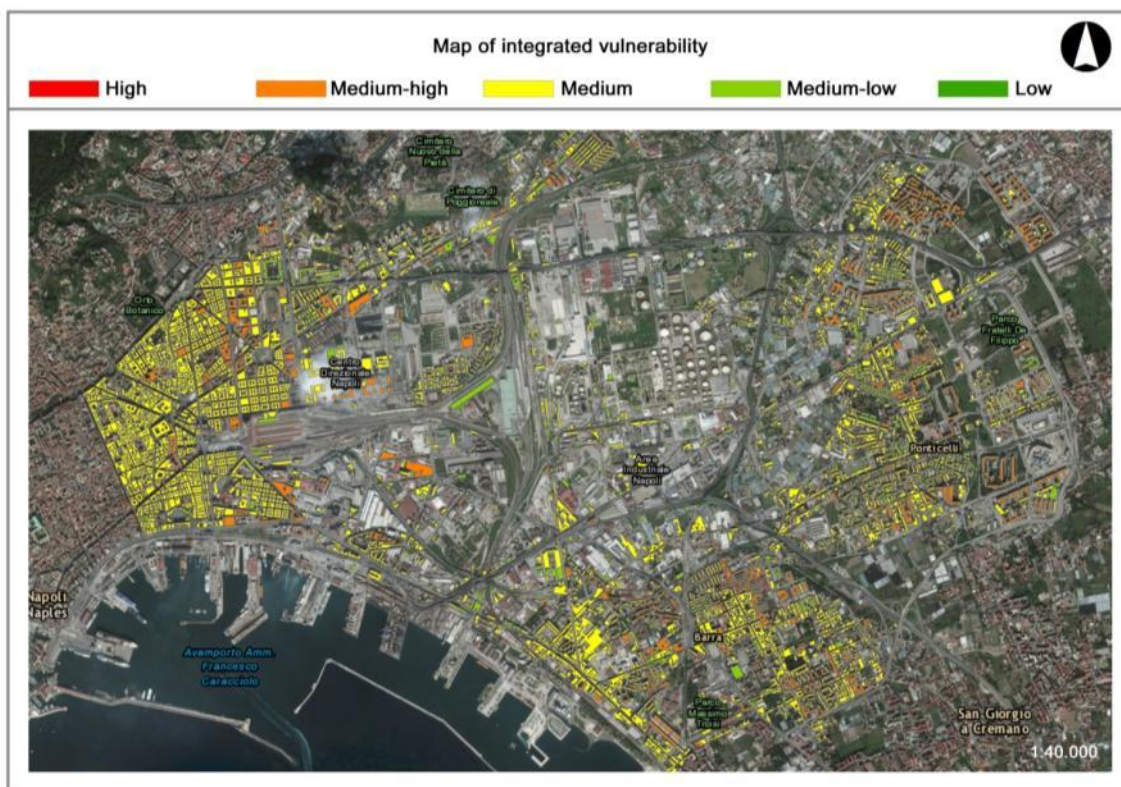


Figura 1: Carta tematica della vulnerabilità integrata del sistema urbano (edifici residenziali, spazi aperti e popolazione) all'ondata di calore nell'area di Napoli est

Le diverse fasi della ricerca hanno visto l'applicazione di metodologie di tipo analitico-deduttivo oltre che di tipo sperimentale e simulativo finalizzate alla costruzione di un modello di conoscenza della vulnerabilità e della capacità adattiva del sistema urbano - articolato nelle sue componenti

edilizie, degli spazi aperti e della componente sociale - affidando la gestione del complesso sistema di informazioni a processi di analisi spaziale in ambiente GIS. Il modello è stato concepito per poter essere applicato anche in differenti contesti nazionali e, per valutarne il funzionamento, gli approcci sperimentali e le metodologie sono stati testati nel contesto orientale della città di Napoli. La scelta delle aree di studio (dal margine del Centro Antico fino al quartiere di Ponticelli a Napoli est e da Fuorigrotta a Bagnoli nell'area ovest della città) è stata dettata dalla presenza di tessuti urbani diversamente caratterizzati in base alle condizioni geomorfologiche, edilizie e spaziali nonché alla omogeneità delle parti urbane (città storica, città consolidata, espansioni contemporanee pianificate e parti di città "informale").

2. VULNERABILITÀ DEL SISTEMA URBANO ALL'ONDATA DI CALORE

Mediante l'utilizzo di un modello gerarchico sviluppato nel progetto è stata prodotta la carta tematica di vulnerabilità fisica all'ondata di calore degli edifici residenziali e degli spazi aperti (Adger, 2006; Füssel, 2007). Essa è stata ottenuta a partire dall'elaborazione di specifici indicatori di esposizione e sensibilità all'ondata di calore, determinati in base alle caratteristiche costitutive di parti ed elementi del sistema fisico. Gli indicatori esprimono il grado di esposizione (*exposure*) ai fenomeni dell'ondata di calore e il grado di sensibilità (*sensitivity*) secondo cui è colpito il sistema (IPCC, 2012). Ad ogni indicatore è stato assegnato un peso, opportunamente tarato, per determinare il grado di impatto dell'indicatore sulla vulnerabilità complessiva dei due sistemi (edifici e spazi aperti) analizzati prima separatamente e successivamente integrati. In seguito, è stata assegnata su base volumetrica una popolazione residente e una popolazione residente di fascia debole equivalente ad ogni edificio per consentire, successivamente, di analizzare scenari di impatto del fenomeno sulla popolazione residente, fornita dalla vulnerabilità integrata e dagli scenari di pericolosità.

Tabella 1: Indicatori utilizzati per la stima della vulnerabilità degli edifici residenziali

Parts and elements of the urban system	Vulnerability index	Characteristics	Sources
Residential buildings	Thermal lag	Construction technique Construction age	2011 ISTAT census /direct observations
	Attenuation factor	Building technique Age of building	2011 ISTAT census /direct observations
	Sunshine	Mean Hillshade for the roof (in the range 0 -255) Mean Hillshade for the facades (in the range 0 - 255)	LIDAR DTM/DSM
	Volume	Mean high Covered surface	LIDAR DTM/DSM
Open spaces	NDVI	Mean Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (in the range 0-1)	Remote sensing image (Rapideye)
	Sky View Factor	Mean Sky View Factor (SVF) (in the range 0-1)	Remote sensing image (Landsat 8)
	Albedo	Mean Albedo (in the range 0-1)	Dato telerilevato (Rapideye)
	Sunshine	Mean Hillshade value (in the range 0 -255)	LIDAR DTM/DSM

La tabella 1 riporta gli indicatori utilizzati per la stima della vulnerabilità del sistema fisico nelle componenti degli edifici residenziali e degli spazi aperti, le caratteristiche utilizzate per la stima degli indicatori e la fonte da cui sono state elaborate. In particolare, gli indicatori di sfasamento e attenuazione sono stati elaborati a partire da un'analisi delle prestazioni dell'involucro, valutando le caratteristiche delle soluzioni tecniche ricorrenti nel contesto locale.

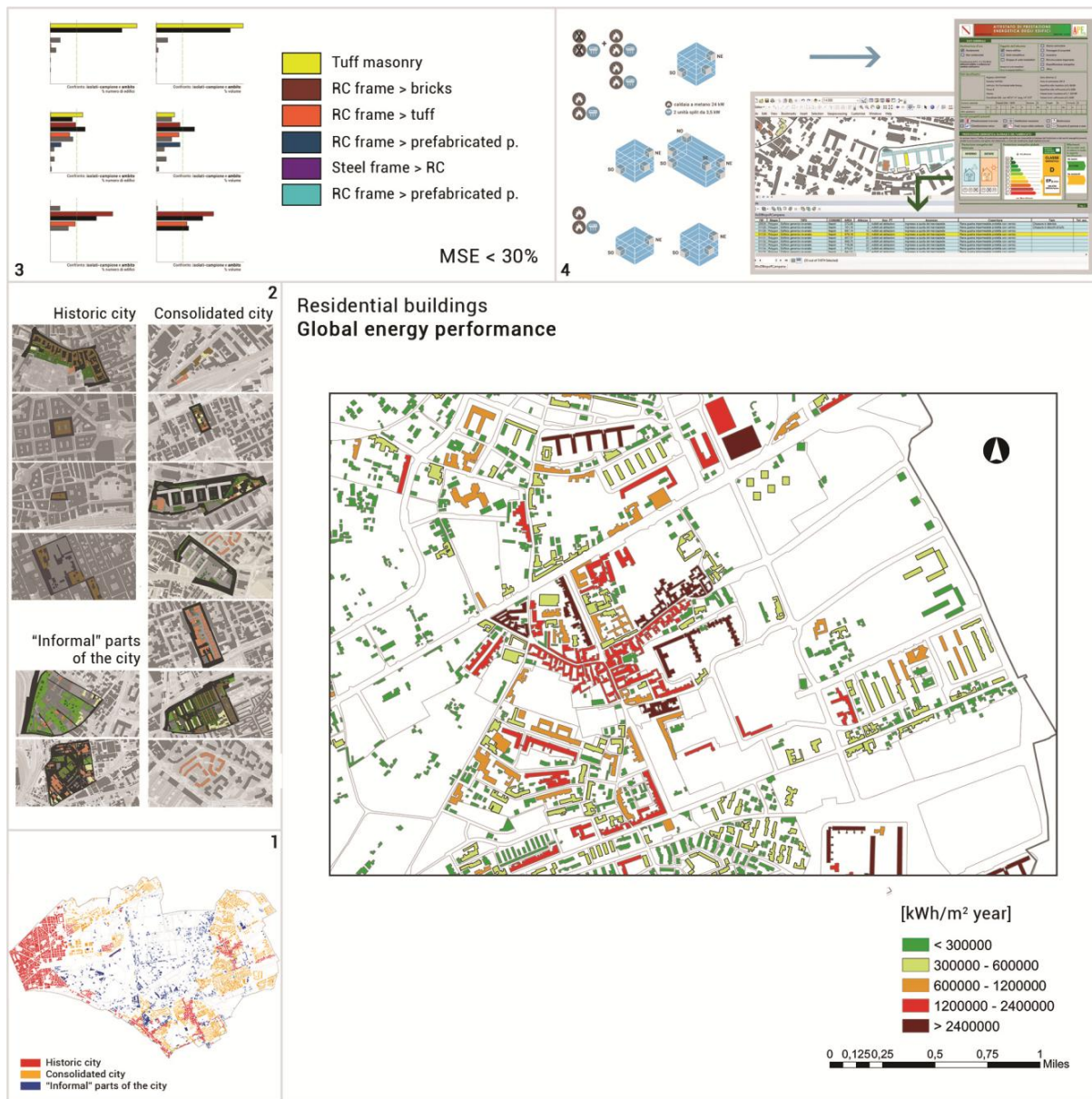


Figura 2: Carta tematica relativa alla prestazione energetica globale degli edifici dell'area campione di Napoli est (1 - Mappa tematica che mostra la distribuzione dei tessuti urbani; 2 - Esempio di isolate presenti in differenti tessuti urbani; 3 - Istogrammi che mostrano le frequenze di edifici costruiti con una specifica tecnica costruttiva in ciascun isolato; 4 - Esempio di Certificazione Energetica per un edificio del campione)

Gli indicatori *sfasamento* e *attenuazione* sono stati tarati in base ai valori ottenuti per le facciate e le

coperture, considerando l'altezza media e il fattore di forma dell'edificio. Le caratteristiche di soleggiamento sono state elaborate attraverso il calcolo dell'*hillshade* medio delle facciate e della copertura. Tale valore è stato ottenuto applicando pesi differenziati in relazione ai differenti valori dell'*hillshade* orario nelle varie ore del giorno ricavati, in ambiente GIS, a partire dai raster DTM (*Digital Terrain Model*) e DSM (*Digital Surface Model*) ottenuti mediante la tecnica di telerilevamento LIDAR (*Light Detection and Ranging*) a risoluzione 1x1m, considerando i diversi valori di azimuth e altezza della sorgente solare durante le ore del giorno in una giornata estiva nell'area di studio. I raster DTM e DSM sono stati inoltre utilizzati per produrre le stime delle altezze medie degli edifici. Gli indicatori sugli spazi aperti sono stati elaborati prevalentemente mediante l'acquisizione di dati satellitari (LIDAR, Landsat 8, Rapideye) e processati mediante algoritmi di analisi spaziale e statistica zonale sviluppati dai partner informatici della ricerca.

L'analisi degli edifici residenziali che presentano una maggiore priorità di intervento di retrofit tecnologico per accrescerne la capacità adattiva, è stata prodotta attraverso una stima della popolazione, residente e residente di fascia debole equivalente, per ciascun edificio in considerazione del fatto che la valutazione del danno producibile dal fenomeno dell'ondata di calore è legata alla popolazione ivi residente. Il calcolo è stato sviluppato a partire dalle banche dati ISTAT relative al censimento 2011 sulla popolazione valutando, per ciascun edificio, una stima della popolazione residente in rapporto al volume dell'edificio rispetto alla somma dei volumi di tutti gli edifici ricadenti nella zona di censimento. In tal modo sono state prodotte carte di vulnerabilità potenziale della popolazione agli effetti legati alle ondate di calore, individuando aree più esposte al rischio quando correlate agli scenari di *hazard*.

In tal modo il modello elaborato, operando su molteplici livelli di informazioni, consente di effettuare valutazioni sulla vulnerabilità del sistema urbano, che si prevede di migliorare attraverso l'utilizzo di soluzioni di *adaptive design* stimandone l'apporto attraverso il controllo dei valori degli indicatori di vulnerabilità in base a processi di simulazione. Sono stati inoltre simulati opportuni scenari del fabbisogno energetico di un campione di edifici, selezionandolo in maniera statisticamente significativa in relazione alle tecniche costruttive. La caratterizzazione del fabbisogno energetico annuo del patrimonio edilizio è stata calcolata in relazione ai diversi tessuti urbani (città compatta, consolidata e informale) e alle principali tipologie degli aggregati edilizi (cortina, isolato urbano, corpi liberi ed edifici uni-bifamiliari) presenti nell'area di studio. Questa classificazione, estesa a tutti gli edifici ed elementi urbani delle aree studio, consente di valutare il contributo alla mitigazione delle cause che incidono sul *climate change* in termini di riduzione di emissione di CO₂.

3. MODELLO DI HAZARD ALL'ONDATA DI CALORE

Per valutare quanto possano intensificarsi e succedersi nel tempo fenomeni di ondate di calore nei mesi estivi in virtù di cambiamenti climatici sono state prese in considerazione quelle caratteristiche climatiche che determinano un possibile pericolo di accadimento del fenomeno e connotano uno scenario di *hazard* (Smith, 2001).

Uno scenario di *hazard* relativamente ad un fenomeno è rappresentato da una distribuzione lungo l'area di studio di caratteristiche che connotano il pericolo, individuate in conseguenza del perseguirsi di specifici fattori climatici di particolare intensità.

Per l'estrazione delle caratteristiche che connotano uno scenario di *hazard* per un fenomeno dell'ondata di calore sono stati presi in considerazione i seguenti parametri climatici giornalieri:

- Temperatura massima giornaliera dell'aria;
- Temperatura minima giornaliera dell'aria;

- *Heat Index* giornaliero;
- Gradiente di temperatura superficiale tra ore diurne e notturne.

Le temperatura massima e minima giornaliere sono le temperature massime e minime riscontrate durate le 24 ore. L'*Heat Index* è un indicatore messo a punto dal *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) degli Stati Uniti basato sulla temperatura e sulla percentuale di umidità relativa dell'aria, che stima la reale temperatura percepita dalla popolazione, al variare della temperatura massima e dell'umidità relativa. Il *National Weather Service* statunitense monitora con continuità la distribuzione di questo parametro su tutto il territorio nazionale e segnala situazioni d'allarme nei luoghi in cui supera valori di soglia. L'*Heat Index* si basa su una formula che tiene conto di diversi fattori, quali pressione di vapore, velocità effettiva del vento, dimensioni di un individuo campione, temperatura interna del corpo e tasso di sudorazione, rappresentati mediante coefficienti numerici. Il calcolo dell'HI si basa sulla seguente equazione (NWS-NOAA, 2):

$$HI = -42.379 + 2.04901523 \cdot T + 10.14333127 \cdot RH - 0.22475541 \cdot T \cdot RH - 0.00683783 \cdot T^2 - 0.05481717 \cdot RH^2 + 0.00122874 \cdot T^2 \cdot RH + 0.00085282 \cdot T \cdot RH^2 - 0.00000199 \cdot T^2 \cdot RH^2$$

con HI = *Heat Index* calcolato in °F, T = temperatura massima giornaliera dell'aria in °F ed RH = umidità relativa in %.

Il gradiente di temperatura superficiale è un parametro che misura la differenza di temperatura superficiale tra ore del giorno e della notte. Esso è correlato agli assorbimenti e alle emissioni termiche del materiale che compone la superficie durante l'arco della giornata in dipendenza della sua capacità termica.

Uno scenario di *hazard* è caratterizzato da un arco temporale in cui sul tessuto urbano in esame insiste il fenomeno dell'ondata di calore; più lungo è questo periodo più intenso è il fenomeno di ondata di calore. Al fine di determinare uno scenario di *hazard* è necessario, quindi, stabilire, in base ai parametri climatici precedentemente descritti, quando la concomitanza di una intensità di un parametro superiore ad una specifica soglia con una durata e durata superiore a un certo numero di giorni consecutivi produce il fenomeno. Per ognuno dei quattro parametri è stata quindi definita una caratteristica di *hazard* con un valore di soglia per il parametro e per il numero di giorni consecutivi in cui esso deve risultare superiore alla soglia. La concomitanza delle quattro caratteristiche per un numero di giorni consecutivi superiore a un numero di giorni prefissato determina lo scatenarsi di un fenomeno di ondata di calore.

In tabella 2 sono indicate le quattro caratteristiche di *hazard* e le relative soglie del valore di soglia e del numero minimo di giorni consecutivi in cui tale valore è raggiunto o superato.

Tabella 2: Caratteristiche di hazard per il fenomeno dell'ondata di calore

Hazard characteristic	Parameter	Threshold value	Consecutive days
p1	T _{max}	≥ 30 °C	> 3
p2	T _{min}	≥ 20 °C	> 3
p3	<i>Heat index</i>	≥ 32 °C	> 3
p4	Surface temperature gradient Δ _T (°C)	< 10 °C	> 3

Per la temperatura massima, il valore di soglia fa riferimento alla soglia di temperatura massima individuata per l'individuazione di fenomeni di ondata di calore (Greco et al., 2006). Per la temperatura minima, il valore di soglia fa riferimento alla soglia di temperatura minima in ondata di calore definita dal *World Meteorological Organization* (WMO, 2012). Per il gradiente di temperatura superficiale, non esistono in letteratura scientifica studi sugli andamenti dei gradienti di temperatura

giorno-notte durante fenomeni di ondate di calore; il valore di soglia è stato così ricavato mediante un processo di calibrazione attuato su una campagna di misurazione mediante termocamera delle temperature superficiali in area urbana su superfici urbane realizzazione con materiali differenti; le misurazioni sono state eseguite durante un periodo di ondata di calore (3 luglio 2015, ore 12.00 e ore 23.00).

Per ottenere le stime di scenari futuri di *hazard* per l'ondata di calore sono state prodotte simulazioni degli andamenti delle prime caratteristiche basate su stime degli impatti indotti dal cambiamento climatico sulle temperature massime e minima e sull'umidità relativa giornaliera con proiezioni fino al 2100. Per quanto concerne il gradiente di temperatura superficiale, poiché l'area di studio riguarda un contesto urbano, si è ragionevolmente supposto che nel tempo non ci siano mutazioni alla tipologia e all'utilizzo dei suoli, per cui si è considerato che la distribuzione del gradiente di temperatura superficiale nell'area di studio tra giorno e notte in un periodo estivo in cui è presente un'ondata di calore non vari nel tempo.

Le proiezioni nel tempo delle temperature massima e minima e dell'umidità relativa giornaliera sono state ottenute dai risultati di una ricerca affidata al Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) (Bucchignani et al. 2015, Zollo et al. 2015), in cui sono stati considerati due dei quattro scenari sull'andamento di emissioni e concentrazioni di gas serra (GHG), al 2100 selezionate dal IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC 2013, IPCC 2014):

- Il modello RCP4.5 in cui è prevista una stabilizzazione delle emissioni;
- lo scenario RCP8.5 in cui è previsto un incremento costante delle emissioni fino al 2100.

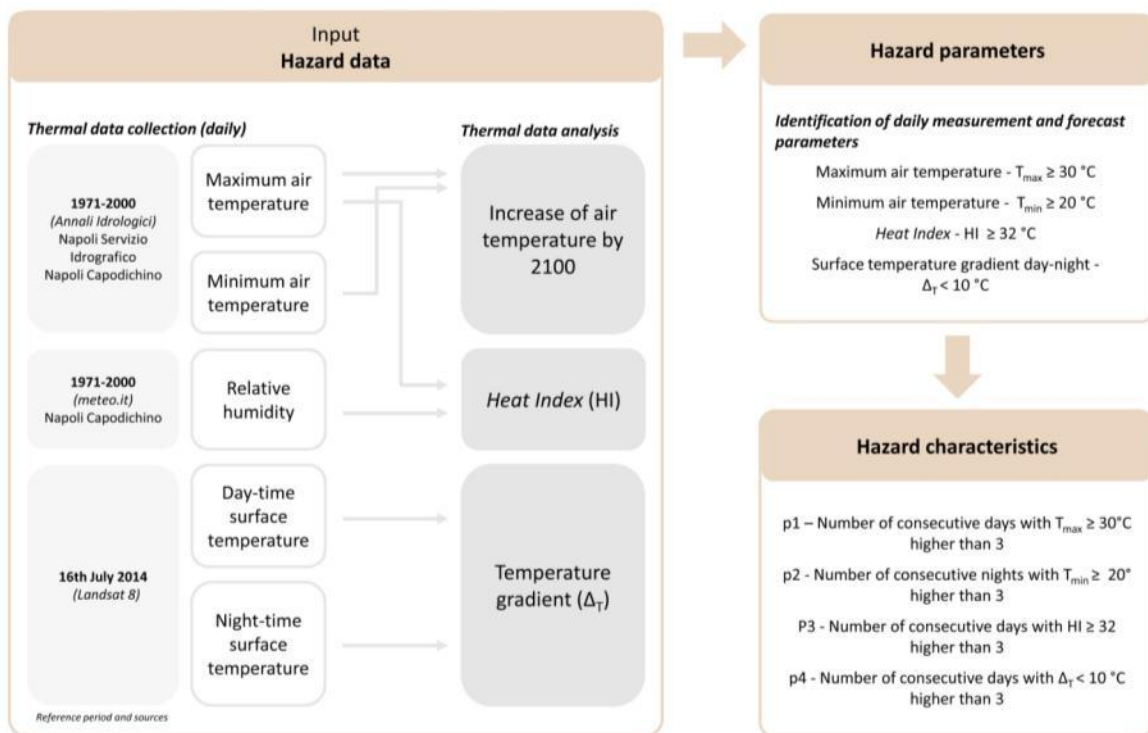


Figura 3: Modello applicato per la caratterizzazione dell'hazard

Le proiezioni sono state ottenute a partire dalle misurazioni giornaliere di temperatura massima, temperatura minima e umidità relativa disponibili per le stazioni di Napoli Servizio Idrografico (T_{max} , T_{min} e P) e Napoli Capodichino per il periodo 1971-2000.

La distribuzione sull'area di studio del gradiente di temperatura superficiale è stata ottenuta mediante l'acquisizione delle mappe di temperatura superficiale diurna e notturna elaborate a partire dalle riprese dal satellite Landsat 8 nel giorno 19 luglio 2015 durante una ondata di calore.

Nella figura seguente è schematizzato il modello che è stato messo a punto per la determinazione delle caratteristiche di *hazard* e la successiva derivazione degli scenari di *hazard*.

Uno scenario di *hazard* è ottenuto mediante processi di analisi spaziale a partire dalla distribuzione sull'area urbana di studio delle caratteristiche.

La distribuzione dei tre parametri climatici temperatura massima, temperatura minima e *heat index* può essere ottenuta come informazione raster risultante da processi di interpolazione spaziale a partire da dati di input puntuali forniti geo-localizzando le singole centraline. Nella sperimentazione in esame sono stati utilizzati i dati climatici misurati dalla stazione meteo di Capodichino e si è supposto che tali valori climatici siano uniformi lungo l'area di studio, identificata con il quartiere di Ponticelli. Questa supposizione è ragionevole, poichè l'area di studio circoscritta ad un quartiere di Napoli Est con limitate variazioni altimetriche.

La distribuzione spaziale del gradiente di temperatura superficiale è stata ottenuta applicando algoritmi di analisi spaziale alle due immagini satellitari in input corrispondenti alle temperature superficiali in orario diurno e notturno in ondata di calore.

Per i due modelli di variazione climatica sono stati elaborati algoritmi di estrazione di scenari di *hazard*, corrispondenti periodi superiori a tre giorni consecutivi in cui i valori dei tre parametri climatici temperatura massima, temperatura minima e *heat index* superano contemporaneamente le soglie corrispondenti.

La figura successiva mostra l'andamento del numero di giorni consecutivi in presenza di ondata di calore dal 2017 al 2100 in base ai risultati delle previsioni. La barra orizzontale in rosso indica la soglia di 3 giorni consecutivi.

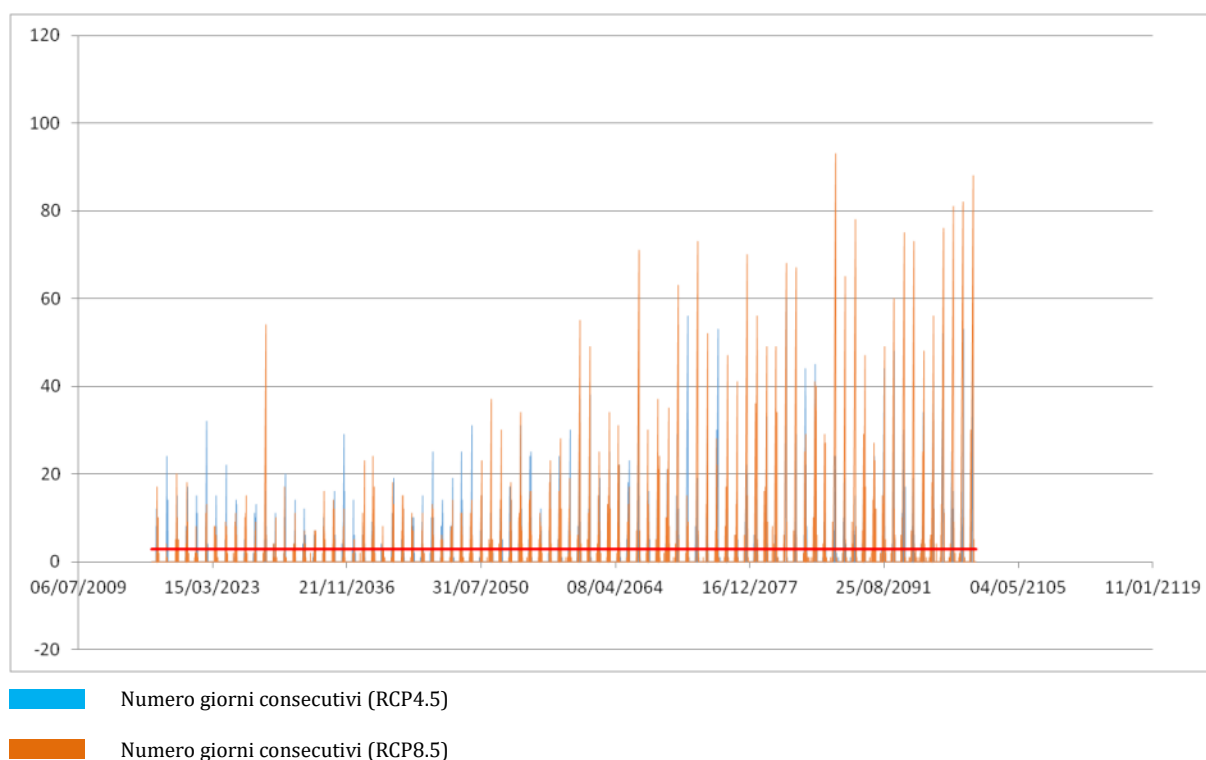


Figura 4: Andamento del numero di giorni consecutivi in ondata di calore

Nella figura emergono picchi di ondate di calore che nel modello RPC4.5 (in azzurro) superano i 50 giorni consecutivi e nel modello RPC8.5 (in rosso) superano i 90 giorni consecutivi.

Per analizzare la variazione nel tempo della distribuzione della pericolosità del fenomeno nell'area di studio di Ponticelli sono stati considerati per ognuno dei tre modelli, tre tipologie di scenario di hazard:

- uno scenario di *hazard* di media entità tra quelli previsti entro dieci anni;
- uno scenario di *hazard* di media entità tra tutti quelli che previsti fino al 2100;
- lo scenario di *hazard* peggiore fornito dalle previsioni.

La tabella successiva riporta i tre scenari individuati considerando ognuno dei due modelli. In tabella oltre al numero di giorni consecutivi in cui insiste il fenomeno è riportata anche la data di terminazione del fenomeno prevista.

Tabella 3: Scenari di hazard individuati per i due modelli previsionali

Hazard scenarios			
RCP 4.5 model		RCP 8.5 model	
Ending date	Duration (days)	Ending date	Duration (days)
08/07/2020	8	11/08/2019	10
21/08/2049	31	26/08/2049	55
15/09/2081	60	15/09/2081	93

Al fine di determinare la distribuzione dell'*hazard*, relativamente ad uno scenario fissato e costruire quindi la mappa tematica di *hazard* relativa sull'area di Ponticelli è stata presa in considerazione la distribuzione spaziale del gradiente di temperatura misurata in data 19/07/2015 durante l'ondata di calore. Mediante l'utilizzo di algoritmi di *zonal statistics* per ogni poligono edificio residenziale è stata prodotta la stima del valore medio di gradiente di temperatura superficiale ed è stata prodotta una mappa tematica opportunamente tarata sul gradiente medio di temperatura superficiale degli edifici, considerando le seguenti classi tematiche.

Tabella 4: Mappa tematica del gradiente di temperatura superficiale degli edifici

Interval of Δ_T (°C)	Class	Description
$\Delta_T > 20$	5	Low
$15 < \Delta_T \leq 20$	4	Mean-low
$10 < \Delta_T \leq 15$	3	Mean
$7 < \Delta_T \leq 10$	2	Mean-high
$\Delta_T \leq 7$	1	High

Le classi peggiori (1-Alta e 2-Medio-alta) sono definite considerando il valore di soglia del gradiente di temperatura superficiale di 10 °C.

Partendo da questa classificazione tematica è stato affrontato uno studio in letteratura analizzare una eventuale correlazione tra il prolungarsi del numero di giorni consecutivi in ondate di calore e il maggior danno provocato sulla popolazione residente e sulla sua condizione di salute. Come evidenziato in (Pinna, 2004; Castellari et al., 2014a), risultati di studi in agglomerati urbani mostrano una correlazione stretta tra la durata dell'ondata di calore e il numero giornaliero di morti. Rispetto ad

una ondata di calore di durata inferiore a 6 giorni, quelle di maggiore durata producono un numero di morti maggiore in un rapporto mediamente proporzionale alla durata stessa del fenomeno. Tale andamento è stato riscontrato soprattutto per i soggetti più esposti, che sono deceduti a causa del perdurarsi del fenomeno.

Correlando la durata del fenomeno all'andamento del numero medio di morti in insediamenti urbani a densità elevata, è stata prodotta una procedura che ha permesso di classificare l'*hazard* sugli edifici residenziali in termini di pericolosità per la vita umana per i 6 scenari esaminati. Questo processo è stato tarato in base alla classificazione dell'*hazard* in presenza di una ondata di calore di durata minima in cui la mappa tematica di pericolosità è quella prodotta dalla mappa tematica del gradiente di temperatura superficiale. Rispetto ad uno scenario di *hazard* in presenza di una ondata di calore di durata minima, la classe di pericolosità assegnata ad un edificio residenziale in presenza di una ondata di calore di una specifica durata peggiora di un fattore 1 quando il rapporto tra il numero medio stimato di decessi in presenza di questa ondata di calore e il numero di decessi stimato in presenza di una ondata minima è pari a 10. Nella tabella successiva è mostrata la variazione della classe di pericolosità rispetto a tre scenari di *hazard* che prevedono ondate di calore di durata, rispettivamente, minore di 6 giorni, pari a 30 giorni consecutivi e pari a 60 giorni consecutivi.

Tabella 5: Variazione classe di pericolosità al variare dello scenario di hazard

Duration < 6 consecutive days		Duration 30 consecutive days		Duration 60 consecutive days	
Class	Description	Class	Description	Class	Description
5	Low	4	Medium -low	2	Medium -high
4	Medium-low	3	Medium	1	High
3	Mean	2	Medium -high	1	High
2	Medium -high	1	High	1	High
1	High	1	High	1	High

Dalla tabella si evince che al peggiorare dello scenario rispetto a quello minimo, per scenari di durata pari a circa 30 giorni consecutivi la classe di pericolosità attribuita ad un edificio residenziale diminuisce di una unità, mentre per scenari di durata pari a circa 60 giorni consecutivi, la classe di pericolosità diminuisce di ben 3 unità; in quest'ultimo caso anche ad un edificio residenziale cui è associata una pericolosità bassa per scenari di *hazard* con ondate di calore di durata minima sarà associata una pericolosità medio-alta in scenari di *hazard* che prevedono ondate di calore di durata di 60 giorni consecutivi.

4. RISULTATI DEL MODELLO SPERIMENTALE SULL'AREA CAMPIONE

Come indicato in precedenza, il modello sperimentale è stato applicato su un'area di studio comprendente il quartiere di Ponticelli. Di seguito sono mostrati le mappe tematiche relative ai sei scenari di *hazard* indicati in tabella 3, ottenuti considerando i due modelli di previsione tematica.

I risultati mostrano che per scenari che prevedono fenomeni di ondate di calore di durata minima, ovvero scenari previsti in un arco temporale vicino, i livelli di pericolosità per gli edifici residenziali sono pressoché medi sull'intera area, mentre per scenari futuri che prevedono ondate di calore che insistono per oltre 50 giorni consecutivi, i livelli di pericolosità sono elevati per tutti gli edifici residenziali.

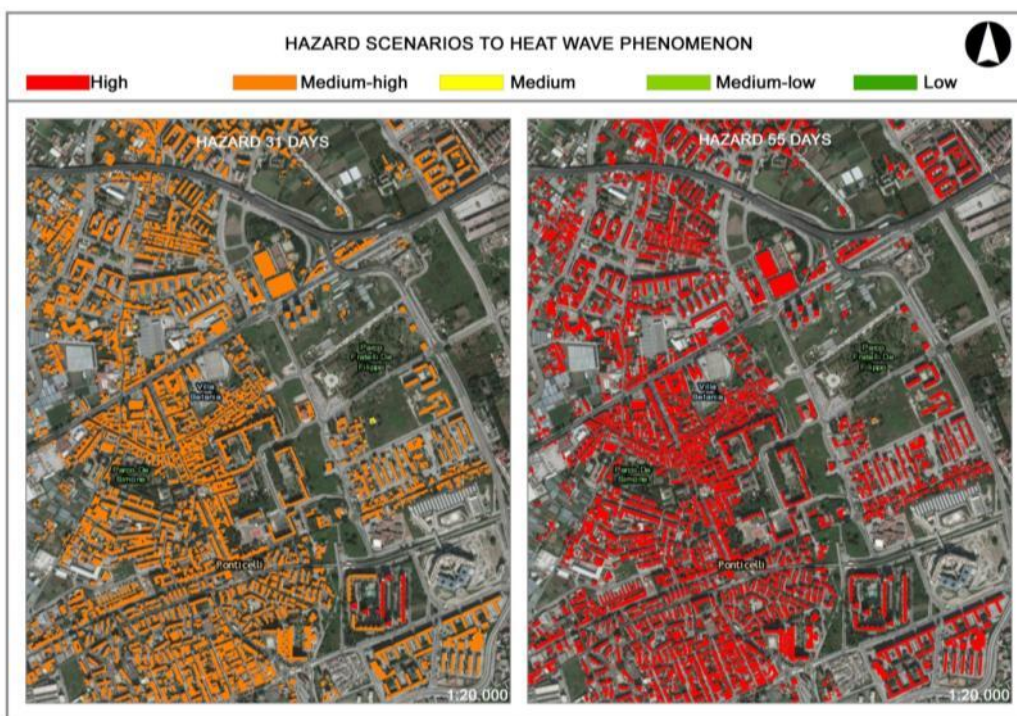


Figura 5: Mappa tematica di hazard per gli edifici residenziali modelli di previsione RCP 4.5 (31 gg) e RCP 8.5 (55gg)

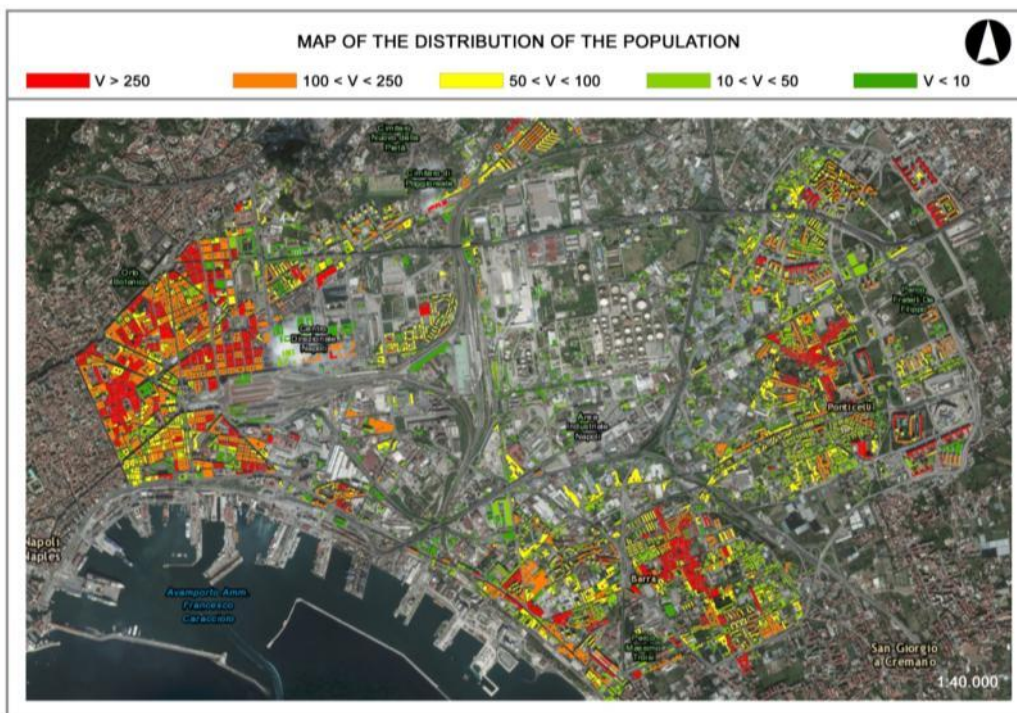


Figura 6: Carta tematica della distribuzione della popolazione sugli edifici residenziali in base ai volumi

Queste conclusioni avvalorano la necessità di pianificare interventi di retrofit tecnologico sugli edifici residenziali maggiormente vulnerabili in previsione di una pericolosità sempre maggiore che entro il 2100 diventerà elevata per tutti gli edifici residenziali del quartiere, indipendentemente dal modello di cambiamento climatico previsto.

Al fine di verificare quali potessero essere le priorità d'intervento nelle azioni di retrofit, è stata presa in considerazione la popolazione residente come soggetto sottoposto al danno provocato da un fenomeno prolungato di ondata di calore sugli edifici residenziali. A tale scopo è stata prodotta una mappa tematica relativa alla distribuzione della popolazione residente negli edifici residenziali in base ai volumi. La mappa evidenzia che in alcuni edifici residenziali la popolazione residente supera le 250 unità e un'elevata vulnerabilità al fenomeno in questi edifici è indice di un possibile danno prodotto sulla popolazione residente in uno scenario futuro, qualora non si pianifichi un'azione di retrofit che accresca la capacità adattiva degli edifici suddetti.

5. SCENARI DI IMPATTO E PROCESSI DECISIONALI PER LA CAPACITÀ ADATTIVA DEL SISTEMA URBANO

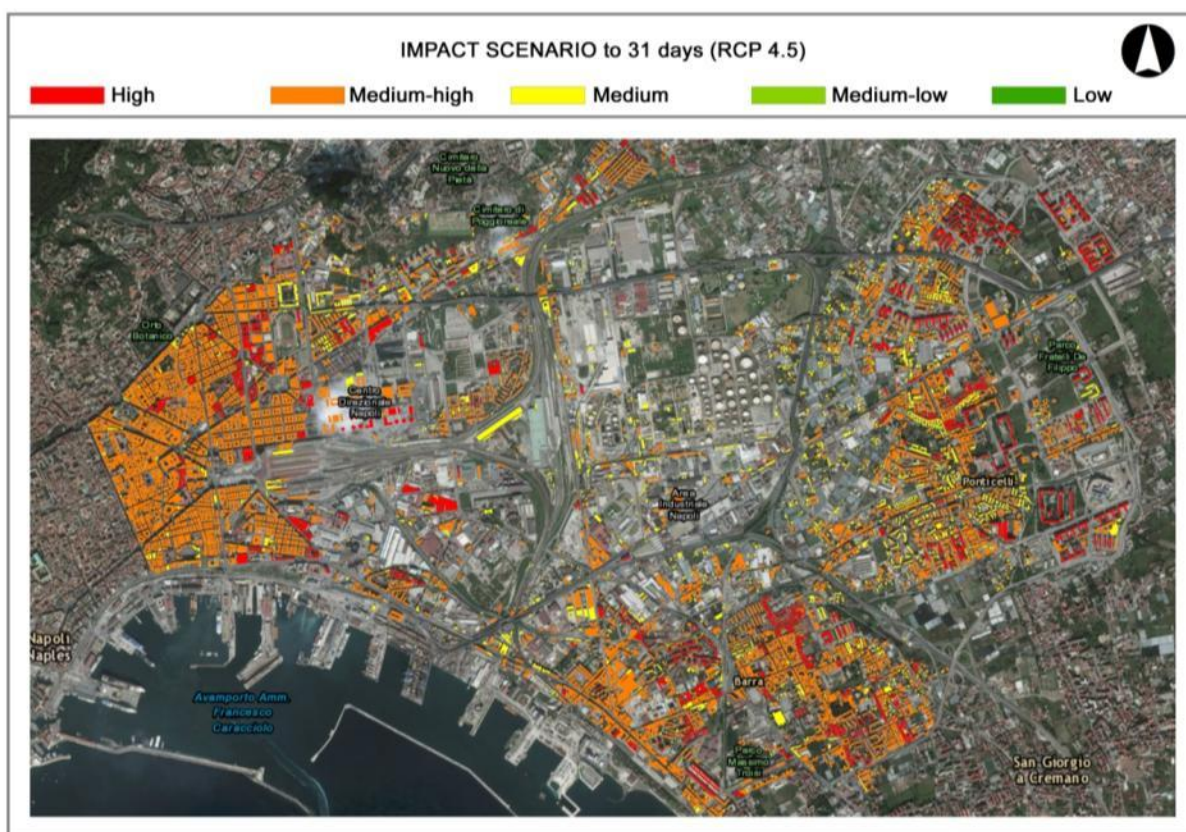


Figura 7: Scenario di impatto prodotto da un hazard all'ondata di calore previsto al 2049 della durata di 31 gg (in base al modello RCP 4.5). La carta tematica mostra la classificazione degli impatti sulla popolazione residente in previsione di uno scenario medio a 20 anni. Gli edifici con classe di impatto alta e medio-alta rappresentano quegli edifici sui quali concentrare prioritariamente gli interventi di adattamento

Nella definizione degli scenari di impatto un primo passaggio riguarda l'integrazione della classe di vulnerabilità del sistema urbano all'ondata di calore con la classe di pericolosità determinata da uno specifico scenario di *hazard*, considerando la popolazione residente e quella di fascia debole quali valore esposto al danno prodotto dal fenomeno. In tal modo è possibile determinare quali sono gli edifici residenziali per i quali è necessario programmare prioritariamente azioni e soluzioni di *adaptive design* per ridurre la vulnerabilità e aumentarne la capacità adattiva.

Per valutare la capacità adattiva del sistema urbano si è elaborata una strategia di tipo *top down* partendo dalla carta di vulnerabilità del sistema fisico al fenomeno indagato e considerando uno scenario di *hazard* unitamente alla distribuzione della popolazione residente. Il *decision maker* potrà così fissare una soglia di indice di vulnerabilità e valutare quali soluzioni di *adaptive design* sono possibili per accrescere la capacità adattiva di un elemento urbano o edificio vulnerabile per il quale è stato valutato un indice di vulnerabilità inferiore alla soglia.

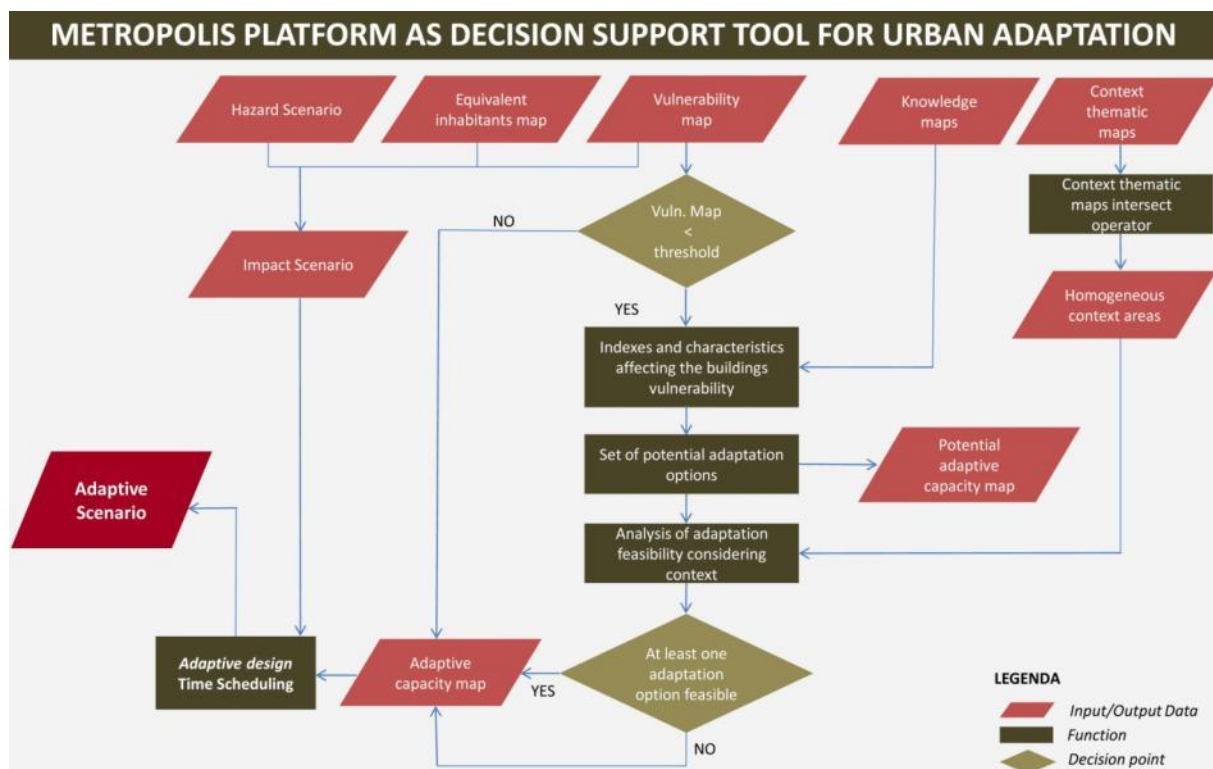


Figura 8: Diagramma di flusso del processo decisionale per l'individuazione della capacità adattiva del sistema urbano a un dato fenomeno climatico

Mediante l'uso del modello di vulnerabilità è possibile valutare quali caratteristiche dell'elemento del sistema incidono maggiormente sul suo grado di vulnerabilità. Ciò consente di individuare un set di azioni di retrofit tecnologico per il miglioramento della capacità adattiva. Il processo elaborato consente inoltre, attraverso il confronto con ulteriori carte tematiche descrittive del contesto (che fanno riferimento, per esempio, a condizioni di vincolo urbanistico, ambientale, ecc.), di valutare nella piattaforma geocomputazionale quali siano le azioni di retrofit perseguibili e con quali benefici sulla riduzione della vulnerabilità. Il risultato di questo processo porta, da un lato, a realizzare una carta tematica di capacità adattiva - che mostra la vulnerabilità del sistema migliorata con le soluzioni di retrofit previste, - dall'altra una carta tematica della capacità adattiva potenziale, che individua la vulnerabilità migliorata che avrebbe il sistema se le soluzioni di retrofit fossero tutte attuabili nel

rispetto dei vincoli e dei rischi analizzati nelle mappe di contesto. Il modello costituisce un supporto decisionale che consente di costruire una progettazione adattiva di lungo termine orientata a processi di rigenerazione urbana resiliente al *climate change*. La carta finale di capacità adattiva, integrata con lo scenario di impatto in cui sono rappresentate le classi di vulnerabilità del sistema fisico, il grado di pericolosità derivante dallo scenario di *hazard* e la distribuzione della popolazione equivalente, è di supporto al *decision maker* per stabilire tipologie e priorità di intervento nonché programmare *step* temporali di azioni di adattamento.

Le carte tematiche di contesto sono costituite da elementi areali che rappresentano zone di vincolo o rischio, aree di particolare interesse storico-architettonico, ecc. L'integrazione delle singole carte di contesto mediante processi di intersezione spaziale fornisce aree omogenee relative all'insieme dei temi di contesto considerati. Il processo di analisi di fattibilità degli interventi prende in considerazione tutte le caratteristiche dell'area omogenea di contesto in cui il sistema oggetto dell'intervento ricade e ne verifica la fattibilità in base alla compatibilità con le specificità locali di tipo ambientale, edilizio e urbano.

PARTS OF THE URBAN SYSTEM		INDEX	ADAPTATION SOLUTIONS																			
RESIDENTIAL BUILDINGS		Volume	1																			
		Sunshine	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11										
		Thermal lag	3	4	5	12	6	7	1	9	13	14										
		Attenuation factor	3	4	5	12	6	7	1	9	13	14										
OPEN SPACES		Sunshine	15	16	17	18																
		SVF	7	15	16	17	18															
		Albedo	6	7	8	19	20	21	22	23	24	25	18	26	27	28						
		NDVI	4	5	6	7	21	25	17	18												

- Legend:
- 1. Sloping roof addition
 - 2. Solar heating
 - 3. Ventilated façade
 - 4. Green façade (green wall)
 - 5. Green façade (climbing plants)
 - 6. Green roof (extensive)
 - 7. Green roof (intensive)
 - 8. Cool roof
 - 9. Ventilated flat roof
 - 10. Selective glass
 - 11. Solar shading
 - 12. External insulation
 - 13. Sloping roof insulation (ventilated roof)
 - 14. Flat roof insulation (warm roof)
 - 15. Fixed coverings
 - 16. Removable coverings
 - 17. Tree row
 - 18. Green pergolas
 - 19. Natural aggregates
 - 20. Open joint paving
 - 21. Grassed open joint paving
 - 22. Porous surface
 - 23. Cool paving
 - 24. Cool paving painting
 - 25. Green areas
 - 26. Bioswale
 - 27. Basins and fountains
 - 28. Watersquares

La carta della capacità adattiva, infine, mostra la riduzione della vulnerabilità degli elementi del sistema a fronte di un *set* di soluzioni compatibili di adattamento opportunamente valutate in base all'incremento prestazionale offerto e ai cobenefit apportati in termini di rispondenza a requisiti tecnologico-ambientali, a condizioni socio-economiche e di ricadute sull'ecosistema. Il *decision maker*, analizzando lo scenario di impatto, può in tal modo valutare le priorità degli interventi, individuando per quali elementi del sistema fisico è urgente adottare soluzioni adattive e definisce un loro schedulazione temporale.

ACKNOWLEDGEMENT

To the four-year METROPOLIS project between 2013 and 2016 have contributed: the Federico II University of Naples and the University of Sannio, research centres and industrial partners, regional and local authorities and institutions that have given an important support to research activities (Naples City Council, Campania 2 Basin Authority, Civil Protection and Campania Region).

General scientific coordination by G. Verderame, DIST – Department of Structural Engineering for Engineering and Architecture. Coordination for the STRESS Scarl implementing body by V. James. The scientific and industrial partners are AMRA Scarl Analisi e Monitoraggio del rischio ambientale, D'Appolonia s.p.a., ETT s.p.a., Geoslab s.r.l., ICIE Istituto Cooperativo per l'Innovazione, Tecno in s.p.a., Tecnosistem s.p.a.

The Research Group of the METROPOLIS project within the Department of Architecture of the Federico II University of Naples consists of: V. D'Ambrosio (coordinator and scientific director), M. Cerreta, R. A. Genovese, M. Losasso, A. Maglio, F. D. Moccia, F. Palestino, M. Rigillo, S. Sessa, A. Sgobbo, F. Visconti; L. Boccia, F. Di Martino, C. Filagrossi, M. F. Leone, C. Aprea, A. Arena, A. Capolupo, E. Bassolino, B. Cardone, R. Mele, G. Poli, C. Sansò, C. Visconti. With the contribution of F. Abbamonte, C. Carifi, L. Conte, A. De Chiara, L. Lenoci, E. Mastroianni, V. Miraglia, R. Ruocco, M. Santaniello (DiARC); Castagna E., Castagna M., Catanese R., Lace F., Nappi N., Scandurra S., Ventre F. (Metropolis training project).

Valeria D'Ambrosio is the author of Par. 1,2,5. Ferdinando Di Martino is the author of Par. 3,4.

REFERENCES

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Working Paper 38. Norwich, UK: Tyndall Centre for Climate Change Research.
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L., & Mercogliano, P. (2015). *High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: Performance evaluation and climate projections for the 21st century*. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.4379.
- Castellari, S., Venturini, S., Ballarin Denti, A., Bigano, A., Bindi, M., Bosello, F., Carrera, L., Chiriaco, M.V., Danovaro, R., Desiato, F., Filpa, A., Gatto, M., Gaudioso, D., Giovanardi, O., Giupponi, C., Gualdi, S., Guzzetti, F., Lapi, M., Luise, A., Marino, G., Mysiak, J., Montanari, A., Ricchiuti, A., Rudari, R., Sabbioni, C., Sciortino, M., Sinisi, L., Valentini, R., Viaroli, P., Vurro, M., & Zavatarelli, M., (eds.) (2014). *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, MATTM - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.
- Castellari, S., Venturini, S., Giordano, F., Ballarin Denti, A., Bigano, A., Bindi, M., Bosello, F., Carrera, L., Chiriaco, M.V., Danovaro, R., Desiato, F., Filpa, A., Fusani, S., Gatto, M., Gaudioso, D., Giovanardi, O., Giupponi, C., Gualdi, S., Guzzetti, F., Lapi, M., Luise, A., Marino, G., Mysiak, J., Montanari, A., Pasella, D., Pierantonelli, L., Ricchiuti, A., Rudari, R., Sabbioni, C., Sciortino, M., Sinisi, L., Valentini, R., Viaroli, P., Vurro, M., & Zavatarelli, M. (eds.) (2014a). *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.
- D'Ambrosio, V. & Leone, M.F. (2015). Climate change risk and environmental design for resilient urban regeneration. Napoli est pilot case / Controllo dei rischi del cambiamento climatico e progettazione ambientale per una rigenerazione sostenibile. Il caso di Napoli est. *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, 10, 130-140.
- Füssel, H.-M. (2007). Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17 (2), 155-167.
- Greco, D., Biggeri, A., Bisanti, L., Cadum, E., Conti, S., De Martino, A., Dotti, C., Michelozzi, P., Palummeri, E., Di Silvestre, R., Antontelli, & Incalzi, R. (2006). *Linee guida per preparare piani di sorveglianza e risposta verso gli*

effetti sulla salute di ondate di calore anomalo. Direzione Generale Prevenzione Sanitaria del Ministero della Salute, Centro Nazionale Prevenzione e Controllo Malattie, Roma.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Pinna, S. (2004). Le ondate di calore e i relativi incrementi della mortalità. Alcune note sull'estate 2003. *Ambiente Società Territorio, Anno XII* (4), 26-30.

Schiaffonati, F., Mussinelli, E., & Gambaro, M. (2011). Tecnologia dell'architettura per la progettazione ambientale. *Techné. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 1.

Sgobbo, A. (2016). Recycling, waste management and urban vegetable gardens. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 202, 61-72. doi:10.2495/WM160071

Smith, K. (2001). *Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster*. New York, New York, USA: Routledge.

Zollo, A.L., Rillo, V., Bucchignani, E., Montesarchio, M., & Mercogliano, P. (2015). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *Int. Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004.