

ARTICLE INFO

Received 08 September 2023
Revised 16 October 2023
Accepted 21 October 2023
Published 31 December 2023

CONFIGURAZIONI SPAZIALI NELL'ANALISI AMBIENTALE URBANA

Il contributo dell'isola di calore

SPATIAL CONFIGURATIONS IN URBAN ENVIRONMENTAL ANALYSIS

The role of the heat island effect

Adriano Magliocco, Gabriele Oneto

ABSTRACT

Il modulo, unità dimensionale di un sistema, è uno strumento ancora oggi utile per interrogare e pianificare le città. Il fenomeno dell'isola di calore è l'occasione di interrogarsi su come si possano costruire metodologie di lettura e analisi dei sistemi urbani che seguano principi ripetibili e univoci. Partendo dai dati ambientali di temperatura, spesso rappresentativi di porzioni di griglia quadrata delle città, vengono proposte alcune metodologie di analisi spaziale applicate su due città europee: Genova e Monaco. Attraverso le Local Climate Zones viene effettuata una prima mappa a scala urbana con un modulo quadrato. Le mappe successive interrogano il sistema infrastrutturale e morfologico in termini di grafo e tassellazione. Il pianificatore che lavora sui sistemi complessi può adattare questi strumenti alle proprie analisi, verificando e interrogando gli ambienti urbani.

The module, a system's unit of dimension, is a concept that is still useful in analysing and planning cities. The Heat Island Effect is the occasion for inquiring about how to develop methodologies for reading and understanding urban systems by following reproducible and univocal principles. Starting from environmental temperature data, often representative of portions of squared urban grids, some spatial analytical methodologies are proposed and applied to two European cities: Genoa and Munich. Using the Local Climate Zones, a first map is defined at the urban level using a squared module. Subsequent maps question the infrastructural and morphological systems using graphs and tessellations. The urban planner that operates on complex systems can place these tools beside their analyses, verifying and examining urban environments.

KEYWORDS

forma urbana, cambiamento climatico, morfologia urbana, sistemi complessi, analisi satellitare

urban form, climate change, urban morphology, complex systems, satellite analysis

Adriano Magliocco, Architect and PhD, is a Full Professor and vice-Director at the Department of Architecture and Design at the University of Genoa (Italy). His research topics revolve around environmental sustainability in architecture at different design scales. E-mail: adriano.magliocco@unige.it

Gabriele Oneto, Architect, is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Design at the University of Genoa (Italy). His main research interests include computational design, nature-based solutions, environmental analysis in urban systems and adaptation to climate change, focusing on digital strategies for the urban heat island effect and urban floodings, and complexity urban theory. E-mail: gabriele.oneto@edu.unige.it



L'effetto isola di calore urbano è, secondo la Royal Meteorological Society (2017), un fenomeno che descrive le temperature elevate percepite nelle città rispetto ai dintorni rurali, particolarmente quelle avvertite di notte, poiché il calore trattenuto dalle superfici artificiali viene rilasciato lentamente, mantenendo le temperature più alte che in campagna; tale fenomeno è combinato con altri impatti come il ridotto effetto di raffreddamento della vegetazione nelle aree urbane e il calore antropogenico. L'apparente semplicità della definizione viene contraddetta dai numerosissimi studi che da decenni vengono svolti rilevando differenze nella definizione, nella misurazione e nella ampiezza dei valori di temperatura attribuibili alle isole di calore. Anche l'attribuzione dei termini 'urbano' e 'rurale' mostra alcune differenze, con conseguenze sulla validità e comparabilità dei risultati (Stewart, 2011).

In generale l'intensità dell'isola di calore varia con le dimensioni e le caratteristiche topografiche dell'insediamento ed è esacerbata dal cambiamento climatico (Manoli et alii, 2019; Sangiorgio, Fiorito and Santamouris, 2020). Sebbene molti studi scientifici si occupino del fenomeno in sé, concentrandosi sulle metodologie di rilevamento a prescindere dalle motivazioni, è bene ricordare che l'obiettivo principale di uno studio sull'effetto isola di calore dovrebbe essere quello di determinare quando e con quale estensione tale fenomeno determini condizioni di disagio termico per i cittadini in un'area urbana. Infatti, un effetto diretto sulla salute dell'uomo è il rischio legato ai colpi di calore, in particolare durante le ondate di caldo nella stagione estiva nella popolazione anziana, rischio che potrebbe aumentare in futuro a causa dell'aumento dell'urbanizzazione e dell'età media della popolazione (Heaviside, Macintyre and Vardoulakis, 2017; Tuholske et alii, 2021).

La descrizione dell'isola di calore e della vulnerabilità all'aumento localizzato delle temperature è possibile e facilitata da una griglia. Al fine di individuare le zone soggette a isola di calore in un'area urbana è necessario quindi mappare le differenze di temperatura tra aree rurali immediatamente adiacenti e aree centrali. In molti studi la Temperatura della Superficie Terrestre, o Land Surface Temperature (LST), è utilizzata come principale indicatore per mappare l'isola di calore, ottenuta prevalentemente in formato raster da sistemi di rilevamento satellitari. L'aspetto critico della analisi di queste informazioni, che provengono quindi da una griglia di pixel, consiste nel modo in cui sono integrate con i parametri morfologici (Equeer, Mirzaei and Riffat, 2020). Una mappatura del dato climatico non è prerogativa di strumenti satellitari: si può intervenire anche attraverso misurazioni dirette, come nel caso di Rotterdam.

Nel 2014 è stata fatta una estesa campagna di rilevamento delle temperature; le informazioni sono state inserite su una griglia con celle di 100 mq, utilizzando sia le temperature dell'aria rilevate direttamente sia le temperature superficiali da dati satellitari; si è passati, cioè, da una mappatura puntuale (le temperature rilevate direttamente) a una griglia regolare (van der Hoeven and Wandl, 2015). Le modalità di rilevamento, indirette e dirette, producono mappature diverse a seconda del grado di definizione e risoluzione, ma soprattutto a seconda della morfologia del modulo adottato, ovvero la dimensione corrispondente alla cella più piccola di una griglia che non necessariamente appare co-

me una struttura di celle ordinate. Nel caso della griglia quadrata l'approccio è naturale, perché rappresenta contemporaneamente il dato da analizzare, come nel caso dei pixel delle immagini satellitari, e il linguaggio con cui esprimere e rappresentare il fenomeno, cioè la mappatura (Gallo and Xian, 2014; Dong et alii, 2021).

Per quanto rapido e pragmatico il criterio sacrificia la rappresentazione della disomogeneità e complessità del sistema sottostante in virtù di una schematizzazione arbitraria, nata dalla risoluzione del dato che si deve modellare. Sebbene l'uso dei big data e delle mappe satellitari permetta di affrontare analisi di aree molto ampie, è molto complesso tenere in considerazione variabili morfologiche: la scelta del metodo di calcolo e di rappresentazione deve quindi tenere conto degli obiettivi per cui si compie l'analisi (Valmassoi and Keller, 2021). Interpretare fedelmente l'eterogeneità del sistema urbano nella pluralità delle scale rappresenta spesso la criticità e la limitazione di numerose rappresentazioni (Wang, 2022). Una prima soluzione può essere quella di considerare come suddivisione della forma urbana le perimetrazioni amministrative dei quartieri, a cui associare i dati delle temperature satellitari (Abrar et alii, 2022).

La ricerca di una corrispondenza più esplicita tra città e fenomeno di surriscaldamento porta a interrogarsi su nuove possibili suddivisioni della rappresentazione delle città, cioè su nuove configurazioni spaziali e moduli. Principi innovativi di aggregazione e di analisi dati riflettono la rilevanza della densità e della morfologia degli spazi urbani nella modellazione e nella rappresentazione (Arribas-Bel and Fleischmann, 2022). Lo studio e l'analisi della struttura e della morfologia urbana si è evoluto anche grazie all'individuazione di tipi, ovvero di connotati ripetibili che possono identificare un particolare territorio (Muratori, 1960; Caniggia and Maffei, 1982); oggi, la definizione di nuovi tipi e di nuove forme ripetibili per misurare e descrivere le città può essere svolta facendo leva sulla modellazione digitale.

In questo articolo verranno analizzate le principali differenze e potenzialità di alcune teorie contemporanee applicate ai fenomeni di surriscaldamento dello spazio urbano; ciascun approccio rappresenta un diverso principio con cui gli elementi della città interagiscono, generando principi formali e quindi moduli. Attraverso i metodi dell'analisi spaziale, della analisi dei grafi e della morfogenesi, gli stessi casi studio produrranno mappe sensibilmente diverse: la forma del surriscaldamento della città non è quindi solo una griglia di quadretti di colore oscillante su uno spettro tra il rosso e il verde; le forme possibili sono anche reti di assi e nodi, tasselli poligonali: suddivisioni ripetibili, modulari e riconoscibili dal contesto costruito, sociale economico ed ecologico al di sotto dell'analisi ambientale. Il ruolo dell'Architetto e del Pianificatore consiste quindi nello sviluppare criticamente l'analisi dell'ambiente urbano e trarre opportune letture e relazioni delle criticità rilevate.

L'articolo tratta i casi di due città europee, Genova e Monaco di Baviera, due contesti geografici differenti: l'una bagnata dal Mare Mediterraneo e l'altra alle spalle della catena Alpina, la prima gode di una temperatura mite, mentre la seconda segue il regime continentale. Ciononostante entrambe le città possiedono un tessuto complesso, intrecciato da un passato industriale e un presente

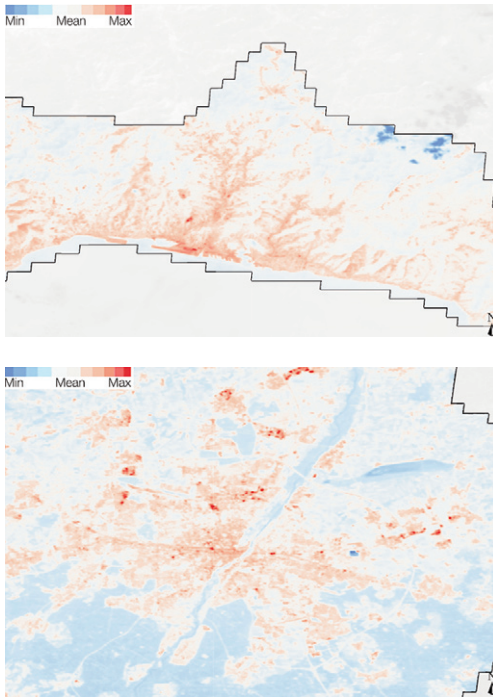
eterogeneo con aree dismesse e tentativi di riqualificazione urbana. In questa generale complessità, metodi d'indagine innovativi e su misura possono comportare risultati altrimenti difficilmente apprezzabili; per entrambe le città è stato scelto un caso studio emblematico del problema.

Materiali e metodologia | La scelta dei casi studio si è basata su due criteri: il primo legato alla manifestazione di una pronunciata differenza di temperatura rispetto al tessuto urbano limitrofo; il secondo identificato dall'eterogeneità della forma e delle funzioni del quartiere. Affrontare aree ad alta complessità potrebbe infatti permettere di ottenere forme di sintesi più efficaci, altrimenti non facilmente deducibili. I poli così definiti sono stati circoscritti secondo un criterio che possa tenere conto della reale vivibilità dell'area, ovvero la percorribilità a piedi. È stato scelto un tempo di quindici minuti, rappresentativo dell'abitare quotidiano nel quartiere, oltre a ulteriori cinque minuti per osservare l'effetto al bordo del tessuto urbano. Per definire la distanza lineare, nel rispetto della letteratura scientifica (Gralls-Garrido et alii, 2021) è stato selezionato un passo percorribile di 4,5 km/h, utilizzato quindi nella componente computazionale.

L'analisi termica urbana verte sull'analisi dello storico tra gli anni 2015 e 2022 di mappe fornite dal satellite Landsat-8, disponibili sulle piattaforme dell'Agenzia Spaziale Europea¹ e di Copernicus²; in assenza di rumore (le nuvole) le mappe forniscono informazioni a scala di 30 metri su diverse letture spettrali. Attraverso il metodo dello Split Window con opportune correzioni (Rozenstein et alii, 2014) è possibile definire l'intensità del fenomeno isola di calore dallo scarto tra la temperatura superficiale della cella nel perimetro urbano e nell'ambiente rurale limitrofo.

L'operazione è stata eseguita per le Città di Genova e Monaco di Germania (Figg. 1, 2), utilizzando come perimetrazione le Aree Urbane Funzionali, un criterio di individuazione delle porzioni di territorio urbano secondo indici di densità abitativa e sviluppo economico definito dalla Comunità Europea (Joint Research Centre of the European Commission et alii, 2019). La verifica della traccia termodinamica urbana basata sulla temperatura superficiale è stata ottenuta incrociando la lettura con i dati della temperatura dell'aria forniti da Copernicus nel periodo 2008-2017 (Hooyberghs et alii, 2019): questa lettura ha permesso di validare la corretta implementazione delle mappe satellitari (Figg. 3, 4).

La rimessa del trasporto pubblico in Via Paolo Reti si inserisce in un contesto densamente abitato: il quartiere di Sampierdarena; proveniente da un recente passato industriale e in corso di ristrutturazione urbana, questo quartiere residenziale di periferia è attraversato da arterie principali di mobilità autoveicolare e ferroviaria (Fig. 5). Condizioni simili di eterogeneità urbana si trovano nel polo identificato dal Strassenbahndepot (deposito dei tram) di Monaco, situato in Einstein Strasse: di nuovo l'infrastruttura pesante e il deposito del trasporto pubblico sono collocati in vicinanza a quartieri densamente abitati, in questo caso caratterizzati da case a corte (Fig. 6). In entrambi i casi, le maglie e griglie urbane sono mescolate e frammentate dalla grande rete viaria, generando microcosmi di complessità che possono essere analizzati con strumenti diversi.



Figg. 1, 2 | Mean distribution of Land Surface Temperature (LST) during 2015-2022, Functional Urban Areas of Genoa and Munich, scale 1:100,000 (credits: G. Oneto, 2023).

Le Local Climate Zones (LCZ), o zone climatiche locali, forniscono un quadro di ricerca per gli studi sulle isole di calore urbane proponendo uno standard mondiale di classificazione del territorio (Stewart and Oke 2012). Il sistema LCZ si basa sul concetto di struttura urbana, definito dai caratteri fisici della superficie della città e dalle attività che si svolgono. Il sistema adotta 17 categorie, variando dai centri urbani altamente densi alle aree rurali; in particolare il sistema è stato frequentemente adottato per identificare le aree ad alto stress termico e sviluppare strategie per mitigare i diversi impatti indotti dai surriscaldamenti urbani (Aslam and Rana, 2022).

Definire oggi le LCZ in un contesto urbano è possibile attraverso l'applicativo LCZ-Generator (Demuzere, Kittner and Bechtel, 2021): attraverso delle linee guida, un algoritmo di riconoscimento delle immagini satellitari riceve le istruzioni di un tecnico, permettendo di rappresentare la copertura LCZ di una data area geografica. L'operazione non è completamente automatica, perché richiede la conoscenza del sistema di classificazione e una prima mappatura analogica per istruire il riconoscimento.

Le LCZ sono significative a una scala urbana, pertanto la forma originata su Genova può aiutare a comprendere il contesto in cui l'area in esame si colloca, ma declina ad altre rappresentazioni uno studio più approfondito. L'area di Sampierdarena si mostra quindi prevalentemente come tessuto denso, basso e compatto (classe 3), limitrofo alla zona industriale portuale (classe 10). Ciononostante la connotazione lineare della città costiera mette in crisi questa rappresentazione a maglia quadrata; per esempio, l'ampia fascia industriale che connota tutto il litorale maschera in realtà un tessuto residenziale storicizzato, coinvolgendo con lo stesso colore l'antica Darsena e il Molo (Fig. 7).

Monaco invece permette di dilatare la classificazione decomprimendo lo spazio della città; di

conseguenza la frammentazione quadrata si articola su un tessuto comunque compatto, ma formato da edifici di media altezza (classe 2). L'area in esame coinvolge anche aree aperte (classe 4), composte da isolati più larghi e con ampie corti e l'analisi aiuta nella definizione del confine tra centro urbano e periferia, rimarcando differenze spaziali indotte dall'attività antropica (Fig. 8).

La seconda mappa insiste sulla complessità del sistema infrastrutturale, affiancato a quello della mobilità lenta che caratterizza la vita quotidiana dei quartieri residenziali; attraverso l'effetto canyon, ovvero quel rapporto di larghezza del manto stradale e altezza degli edifici che connota una forma a corridoio, le strade sono spesso causa di disagio termico locale per le persone. Fare leva sulla teoria dei grafi per analizzare la rete stradale in relazione ai fenomeni di surriscaldamento permette di evidenziare i rapporti tra i diversi elementi in termini di relazioni matematiche (Mohamed et alii, 2021).

Un grafo, ovvero un sistema caratterizzato da oggetti, nodi e relazioni in forma di segmenti orientabili, può dare segno della propria robustezza e resilienza attraverso l'analisi della sua centralità; essa rappresenta l'importanza di un nodo nella rete, e in particolare la centralità dei nodi valuta il numero di percorsi più brevi che passano attraverso ogni nodo o segmento (Barthélemy, 2004). La centralità massima in una rete è un indice di resilienza del sistema, ovvero la sua capacità di trovare percorsi alternativi se uno di questi dovesse essere scartato; in pratica questo significa che di fronte a una scelta di una strada da percorrere, un sistema maggiormente resiliente permette al pedone di scegliere la strada meno calda. La libreria Python OSMNX (Boeing, 2017) consente di operare sui sistemi di tutte le città del mondo e calcolare queste dimensioni; la mappa rappresenta quindi con un gradiente le strade che ricadono in territori più esposti al calore urbano, e in ogni nodo è indicata la resilienza locale attraverso il calcolo delle centralità.

Il caso genovese mostra la differenza tra l'antico quartiere residenziale periferico e le nuove strade di percorrenza rapida; questo rapporto si mantiene costante grazie alla presenza di una maglia che segue l'andamento del terreno e del fiume Polcevera. La traccia termica rappresenta un problema secondario per la mobilità lenta: le strade piccole, residenziali, sono mediamente meno esposte a temperature elevate e sono connesse da nodi con alta centralità (Fig. 9).

L'espansione urbana è invece il contesto in cui si legge la rete stradale del caso di Monaco: grandi arterie longitudinali costeggiano il sistema su rotaia che taglia l'area analizzata, sulle quali si innestano i quartieri residenziali. Mediamente si nota come allontanandosi radialmente dal deposito dei tram le strade assumono una dimensione di maggiore comfort. La rappresentazione della centralità permette di individuare facilmente i percorsi preferenziali, in cui il contesto e il particolare orientamento degli assi stradali assumono un ruolo fondamentale (Fig. 10).

La terza mappatura si basa sulla tassellazione del tessuto urbano rispetto al principio formale, ovvero i connotati delle strade e edifici che rappresentano il costruito, e al grado di differenza termica dovuto dalla temperatura superficiale. La tassellazione chiusa è stata sviluppata in contesto inglese per analizzare ambienti complessi, formando dei

moduli spaziali poligonali ottenuti da dati della morfologia e delle caratteristiche funzionali del territorio (Fleischmann and Arribas-Bel, 2022). In questa logica, l'algoritmo generativo del criterio pesa e mette a sistema i dati eterogenei, suggerendo una suddivisione della città seguendo barriere umane come strade, fiumi e ferrovie, ma anche connotati del territorio come la boscosità o il traffico. I tasselli vengono quindi raggruppati formando le tracce spaziali, un numero di raggruppamenti specifico per il caso in esame, rappresentativi di categorie omogenee dello spazio urbano.

Nei casi di Genova e Monaco sono state calcolate le tassellazioni chiuse derivando i dati urbani da banche date pubbliche come Open Street Maps³ e Copernicus⁴; invece di ibridare le qualità formali con quelle funzionali, come la presenza di ristoranti sul territorio, sono state invece realizzate le tracce spaziali con le temperature superficiali. Su entrambe le mappe è stato esteso lo studio su un diametro doppio rispetto a quello dell'area di analisi, al fine di ottenere risultati maggiormente rappresentativi del contesto.

Il caso genovese ha prodotto dodici raggruppamenti omogenei per forma e risposta all'esposizione termica: è subito significativo il fatto che l'autorimessa, ipotizzata inizialmente come sede locale di un particolare disagio termico, ricade insieme al tessuto storico del quartiere (cluster I). Le porzioni che invece incidono maggiormente sul surriscaldamento sono imputabili all'ex tessuto industriale siderurgico, oggi riconvertito in grande magazzino (cluster B); questo esempio pone l'attenzione sull'effettivo rischio di trarre conclusioni affrettate riguardo il tipo edilizio, senza tenere in considerazione il contesto in cui si colloca (Fig. 11).

Il caso di Monaco ha prodotto un numero inferiore di raggruppamenti rispetto a Genova, ovvero nove; la maggiore regolarità può derivare dalla minore densità del tessuto cittadino, permettendo isolati più larghi, parchi e spazi di ampio respiro. La rappresentazione omologa la rete infrastrutturale con i depositi e le aree aperte cementificate (cluster O, N); di contro si pone l'attenzione sulla frammentarietà del tessuto alle spalle (cluster M, P, Q, R), composto da diverse realtà edilizie che, per materiali, forma e utilizzo del verde, hanno una risposta molto diversa all'esposizione al calore (Fig. 12).

Le tre diverse tecniche di rappresentazione sono composte ciascuna da diverse regole: questi principi raccolgono la complessità del tessuto urbano, lo analizzano e sintetizzano e producono tre diverse logiche in forma di geometrie e attributi (Tab. 1). La corrispondenza dei risultati è stata ottenuta dal confronto con le precedenti mappe di temperatura aerea (Hooyberghs et alii, 2019). La ripetizione di contesti omogenei ha come risultato un'immagine per forza analoga, che permette quindi di mettere in paragone città diverse, provenienti da zone della Terra diverse: un modulo è dimensione e misura della ripetizione, e come tale è regolato appunto da regole e principi. Riconoscere e aprire queste logiche, a volte lasciate acriticamente in mano a tecnici, permette invece ad Architetti e Pianificatori di toccare con mano la complessità delle città, mentre le zone climatiche locali possono avere rilevanza nel dettare le regole a vasta scala, altri strumenti sono richiesti quando si lavora a livello di quartiere.

I grafi sono molto utilizzati nelle analisi urbane, ogni volta in cui l'elemento strada e le sue carat-

teristiche diventano particolarmente rilevanti ai fini dell'analisi. L'utilizzo di strumenti informatici per l'analisi della rete infrastrutturale permette di mettere maggiormente in evidenza le relazioni e rapporti, altrimenti difficilmente apprezzabili. Le tassellazioni, invece, sono una grande famiglia di suddivisioni dello spazio di cui anche la griglia quadrata fa parte. Il criterio spartiacque è l'arbitrarietà della definizione della poligonale che definisce un tassello: le tassellazioni chiuse riescono a ibridare l'effettiva forma del territorio con dati eterogenei, che arricchiscono e colorano il mosaico di tracce spaziali che si genera.

Conclusioni | Il modulo per l'Architetto e il Pianificatore è un criterio dimensionale di classificazione del sistema urbano, riconoscibile, riproducibile e costituito da principi e relazioni. L'analisi affrontata nei due casi di Genova e Monaco pone l'attenzione sull'esistenza di strumenti che un professionista può adottare per spingere l'analisi e la verifica delle sue ipotesi sui tessuti urbani. Il supporto alle Amministrazioni locali spesso si muove attraverso ingenti spese e simulazioni, a volte sovradimensionate rispetto ai reali obiettivi.

La capacità di trarre in maniera diretta dei risultati da dati disponibili apertamente e validati dalla comunità scientifica permette da un lato di migliorare la competitività, dall'altro di dimostrare trasparenza e oggettività di analisi; infatti, i dati adoperati nell'articolo provengono interamente da banche dati validate dall'Unione Europea. L'oggettività delle rappresentazioni è invece data dal rigore con cui queste regole vengono fissate e seguite; questo deve permettere e accettare, a volte, piccole aberrazioni grafiche, prodotte da sovrapposizioni, effetti al bordo o errori negli stessi dati. L'apporto di uno studioso del costruito è in questo caso di nuovo strumentale, perché è capace di fornire una risposta multiscalare e multidisciplinare al problema.

Le principali limitazioni dello studio sono di natura computazionale, quindi per limitare la complessità e i tempi di calcolo, sono state selezionate

delle regioni limitate di spazio: è immaginabile che l'estensione dell'area di studio potrebbe generare delle classi omogenee diverse, portando a una narrazione visiva differente. Maggiore rilevanza inoltre potrebbe essere data al contesto funzionale del territorio, come l'uso del territorio e le attività antropiche all'interno. Questi aspetti potrebbero arricchire le classificazioni, dimostrando delle relazioni che da queste mappe non è possibile evincere.

Se le zone climatiche locali sono uno strumento tipico dello studio delle isole di calore, grafi e tracce spaziali possono essere sfruttate interrogando le città su problematiche differenti; per esempio il fenomeno delle inondazioni improvvise dovute all'incremento delle piovosità può essere analizzato con logiche analoghe. Inoltre l'applicazione di tematiche ambientali ed ecologiche, come la connettività degli habitat, può diventare nuova regola generativa dei moduli di analisi urbana, andando così incontro a logiche di sostenibilità che reclamano le nostre città veri e propri ambienti urbani. Nel prevedere un proseguo della ricerca utilizzando grafi e tassellazioni per indagare gli ambienti urbani si perseguiranno due condizioni: la prima riguarda la qualità dei dati, ovvero una selezione maggiormente descrittiva dell'eterogeneità urbana specialmente di carattere socioeconomico; la seconda riguarda la modellazione, ovvero l'estensione dei metodi precedenti a casi studio più ampi e di conseguenza più complessi; in questa seconda fase sarà eseguito il processo di validazione e verifica dell'applicazione delle diverse metodologie.

impacts such as the reduced cooling effect of vegetation in urban areas and anthropogenic heat. The apparent simplicity of this definition is contradicted by numerous studies that have been carried out for decades, detecting differences in interpretation, measurement, and amplitude of temperature values attributable to heat islands. The assignment of the terms 'urban' and 'rural' also shows some disparities, with consequences on the validity and comparability of the results (Steward, 2011).

Generally speaking, the intensity of the heat island varies depending on the size and topographical characteristics of the settlement and is exacerbated by climate change (Manoli et alii, 2019; Sangiorgio, Fiorito and Santamouris, 2020). Although many scientific studies deal with the phenomenon itself by focusing on detention methodologies regardless of the motivations, it is good to remember that the main objective of a study on heat islands should be to determine the conditions of thermal discomfort for citizens in a set urban area. In fact, one direct effect on human health is the risk of heat strokes, particularly in the elderly population during heat waves in the summer season, a risk which could increase in the future due to the increment of urbanisation and the average age of the population (Heaviside, Macintyre and Vardoulakis, 2017; Tuholske et alii, 2021).

The description of heat islands and the vulnerability to localised increases in temperature is possible and facilitated by a grid. In order to identify the areas subject to heat islands in cities, it is, therefore, necessary to map the temperature differences between immediately adjacent rural areas and central areas. In many studies, the Land Surface Temperature (LST) is the leading indicator to map the heat island, obtained mainly in raster format from satellite remote detection systems. The critical aspect of analysing this information, which consequently comes from a grid of pixels, lies in how it is integrated with the morphological parameters (Equere, Mirzaei and Riffat, 2020). Mapping climate data is different from the prerog-

The Urban Heat Island Effect is, according to the Royal Meteorological Society (2017), a phenomenon that describes the peak of temperature perceived in cities as compared to rural areas, especially at nighttime, because the heat retained by artificial surfaces is released slowly, therefore keeping temperatures higher than in the countryside. This phenomenon is combined with other

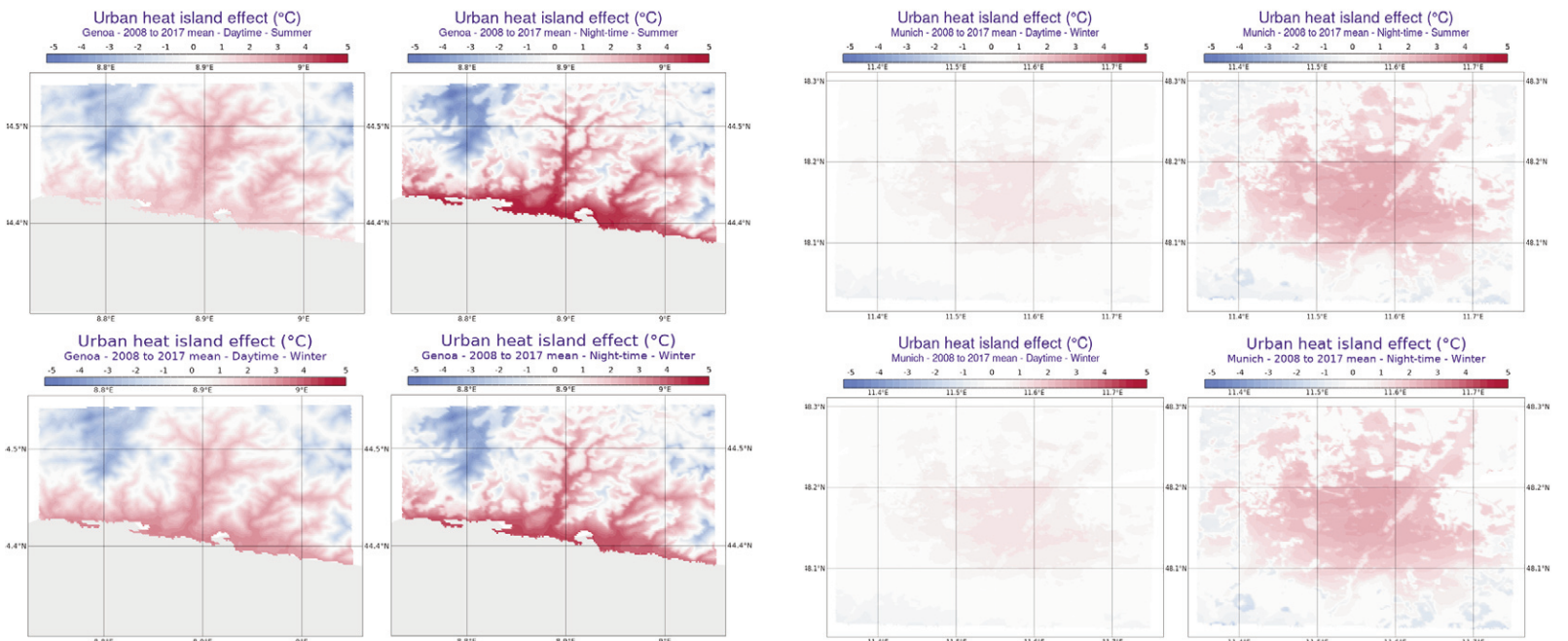


Fig. 3, 4 | Urban Heat Island Effect during 2008-2017, Genoa and Munich (source: Hooyberghs et alii, 2019).



Fig. 5 | Genoa case study: 20-minute walking boundary from the local hotspot (credit: G. Oneto, 2023).

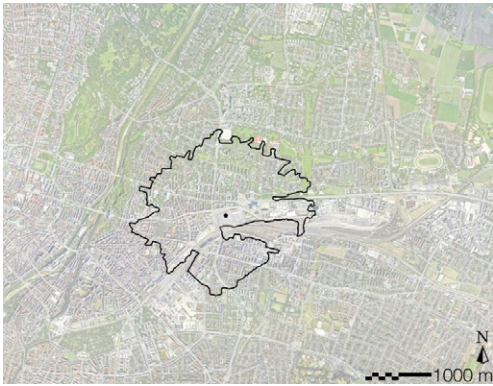


Fig. 6 | Munich case study: 20-minute walking boundary from the local hotspot (credit: G. Oneto, 2023).

ative of satellite instruments: it can also be done through direct measurements, as in the case of Rotterdam.

In 2014, an extensive temperature measurement campaign was carried out. The information was entered on a grid formed by 100 sqm cells, using both air temperatures measured directly and surface temperatures from satellite data; thus, we have moved from punctual mapping (temperatures measured directly) to a regular grid (van der Hoeven and Wandl, 2015). The indirect and direct detection methods produce different mappings depending on the degree of definition and resolution, but above all relatively to the morphology of the adopted module, i.e. the dimension corresponding to the smallest cell on a grid which does not necessarily appear as a structure of sorted cells. In the case of the square grid, the approach is natural because it simultaneously represents the data to be analysed, as in the case of the pixels of satellite images, and the interpretation with which the phenomenon is expressed and represented, i.e. mapping (Gallo and Xian, 2014; Dong et alii, 2021).

Insofar as rapid and pragmatic, the criterion sacrifices the representation of the underlying system's non-homogeneity and complexity by an arbitrary schematisation generated from the data resolution that must be modelled. Although the use of big data and satellite maps allows analyses of very large areas to be conducted, considering morphological variables is very complex: the choice of the calculation and representation method must, therefore, take into account the objectives for which the analysis is carried out (Valmassoi and Keller, 2021). Faithfully interpreting the heterogeneity of the urban system, in the plurality of scales, often exemplifies

the criticality and limitation of numerous representations (Wang, 2022). A first solution could be to consider the administrative perimeters of the neighbourhoods as a subdivision of the urban form, to which satellite temperature data can be associated (Abrar et alii, 2022).

The search for a more explicit correspondence between the city and the overheating phenomenon leads to questions about new subdivisions of the representation of cities, that is, about new spatial configurations and modules. Innovative data aggregation and analysis principles reflect the relevance of urban spaces' density and morphology in modelling and representation (Arribas-Bel and Fleischmann, 2022). The study and analysis of urban structure and morphology have also evolved thanks to identifying type or repeatable characteristics that can identify a particular territory (Muratori, 1960; Caniggia and Mafferi, 1982). Today, the definition of new types and new repeatable forms to measure and describe cities can be carried out by leveraging digital modelling.

In this article, the main differences and potential of some contemporary theories applied to the overheating of urban space will be analysed; each approach represents a different principle with which the elements of the city interact, generating formal principles and modules. The same case studies will produce significantly different maps through the methods of spatial analysis, graph analysis and morphogenesis. The shape of a city's overheating is, therefore, not just a grid of coloured squares oscillating on a spectrum between red and green; the possible forms are also networks of axes and nodes, polygonal tiles: repeatable, modular, and recognisable patterns of the built, social, economic, and ecological context beneath the environmental analysis. Therefore, the architect and the urban planner's role is critically developing the analysis of the urban environment and drawing appropriate readings and reports of the critical issues detected.

This article deals with the cases of two European cities, Genoa and Munich, which come from two different geographical contexts: one lapped by the Mediterranean Sea and the other behind the Alpine chain, the former enjoying a mild temperature while the latter follows the continental regime. Nonetheless, both cities have a complex fabric intertwined with an industrial past and a heterogeneous present with brownfield areas and attempts at urban redevelopment. In this general complexity, innovative and tailor-made investigation methods can bring results that would otherwise be difficult to appreciate. For both cities, a case study emblematic of the problem was chosen.

Materials and methodology | The choice of case studies was based on two criteria: the first linked to the manifestation of a pronounced difference in temperature compared to the surrounding urban fabric; the second identified by the heterogeneity of the form and functions of the district. Addressing areas of high complexity would allow us to obtain more effective forms of synthesis, which would otherwise not be easily deducible. The hubs thus defined have been circumscribed according to a criterion that can consider the real liveability of the area, i.e. accessibility on foot. A time of fifteen minutes was chosen, representative of daily living in the neighbourhood, as well as

an additional five minutes to observe the effect at the edge of the urban fabric. To define the linear distance, in compliance with the scientific literature (Graells-Garrido et alii, 2021), a walkable pace of 4.5 km/h was selected and used in the computational component.

The urban thermal analysis focuses on the analysis of the history of maps provided by the Landsat-8 satellite between the years 2015 and 2022, available on the European Space Agency¹ and Copernicus² platforms; in the absence of noise (clouds), the maps provide information at a 30-metre scale on different spectral readings. Using the Split Window method with appropriate corrections (Rozenstein et alii, 2014), it is possible to define the intensity of the heat island phenomenon from the difference between the surface temperature of the cell in the urban perimeter and the surrounding rural environment.

The operation was carried out for the cities of Genoa in Italy and Munich in Germany (Fig. 1, 2), using the Functional Urban Areas as a perimeter, a criterion for identifying portions of urban territory according to indices of population density and economic development defined by the European Community (Joint Research Centre of the European Commission et alii, 2019). Verification of the urban thermodynamic trace based on the surface temperature was obtained by crossing the reading with the air temperature data provided by Copernicus in the period 2008-2017 (Hooyberghs et alii, 2019): this reading allowed us to validate the correct implementation of the satellite maps (Fig. 3, 4).

The public transport garage in Via Paolo Reti is part of a densely populated context: the Sampierdarena district. Coming from a recent industrial past and in the process of urban restructuring, this suburban residential neighbourhood is crossed by main vehicular and railway arteries (Fig. 5). Similar conditions of urban heterogeneity are found in the hub identified by the Strassenbahndepot (tram depot) of Munich, located in Einstein Strasse: again the heavy infrastructure and the public transport depot are located close to densely inhabited neighbourhoods, in this case characterised by courtyard houses (Fig. 6). In both cases, the urban networks and grids are mixed and fragmented by the extensive road network, generating microcosms of complexity that can be analysed using different tools.

Local Climate Zones (LCZs) provide a research framework for studies on urban heat islands by proposing a global land classification standard (Stewart and Oke, 2012). The LCZ system is based on the concept of urban structure, defined by the physical characteristics of the city surface and the activities that take place. The system employs 17 categories, ranging from highly dense urban centres to rural areas; in particular, the system has been frequently adopted to identify areas of high thermal stress and develop strategies to mitigate the different impacts induced by urban overheating (Aslam and Rana, 2022).

Defining LCZs in an urban context today is possible through the LCZ-Generator application (Demuzere, Kittner and Bechtel, 2021); through guidelines, a satellite image recognition algorithm receives instructions from a technician, allowing it to represent the LCZ coverage for a given geographical area. The operation is partially automat-

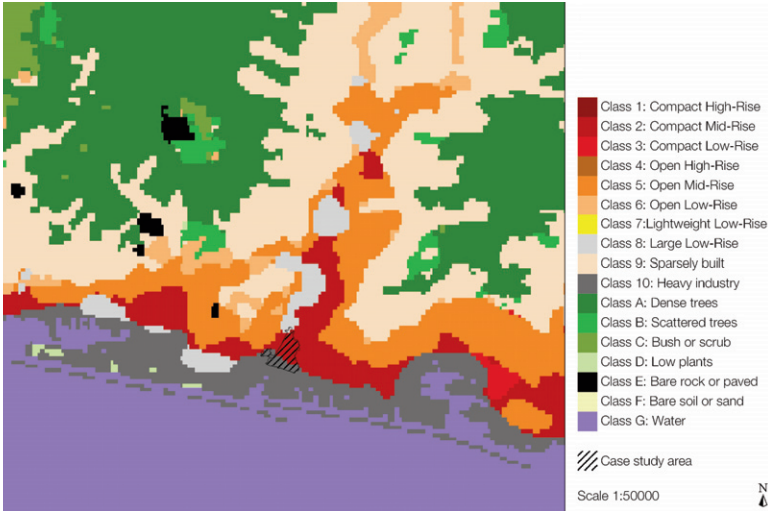


Fig. 7 | Genoa case study: Local Climate Zones map (credit: G. Oneto, 2023).

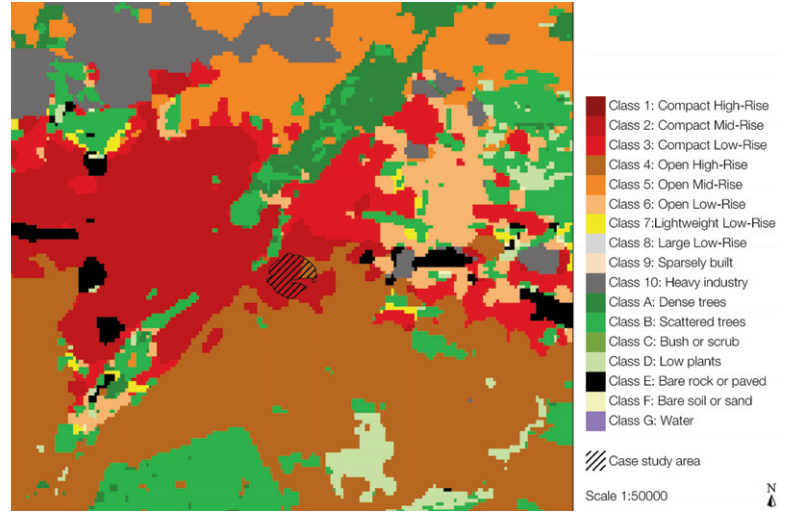


Fig. 8 | Munich case study: Local Climate Zones map (credit: G. Oneto, 2023).

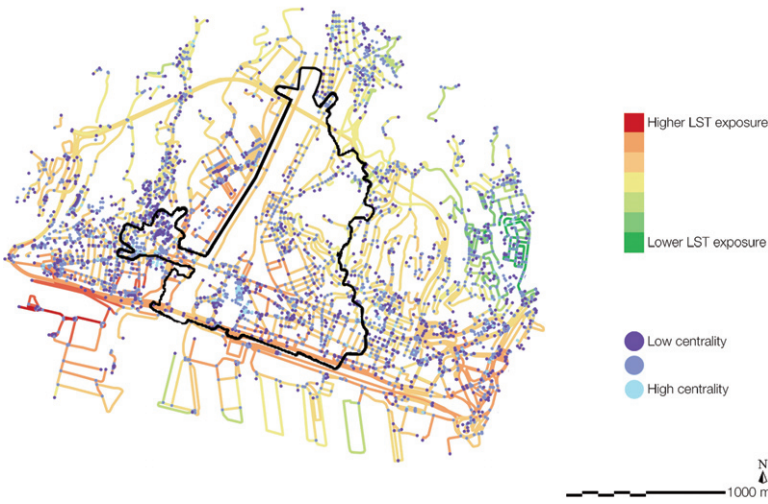


Fig. 9 | Genoa case study: street graph with LST impact and Between Centrality analysis (credit: G. Oneto, 2023).

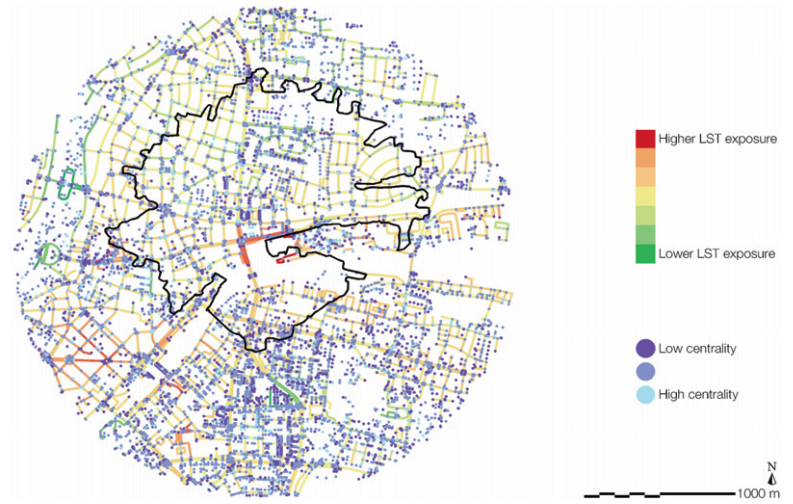


Fig. 10 | Munich case study: street graph with LST impact and Between Centrality analysis (credit: G. Oneto, 2023).

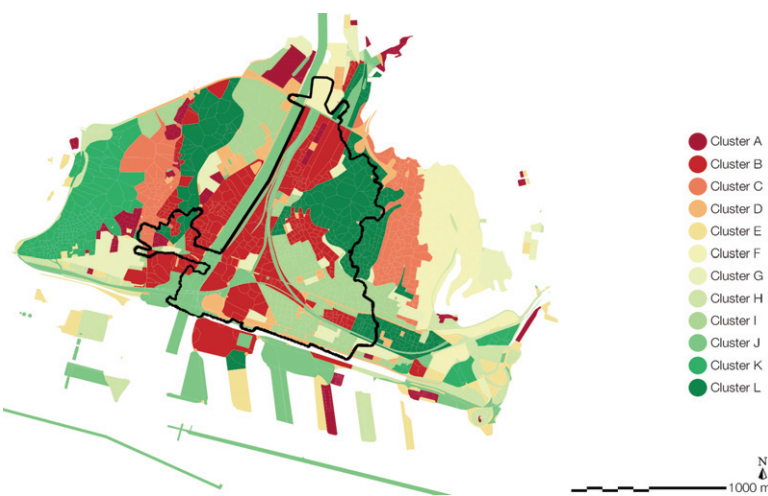


Fig. 11 | Genoa case study: LST Spatial Signatures over 'enclosed tessellation' (credit: G. Oneto, 2023).

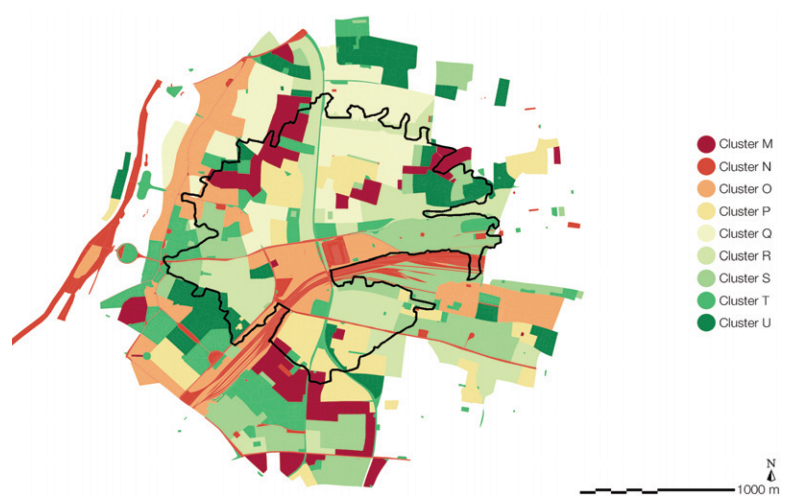


Fig. 12 | Munich case study: LST Spatial Signatures over 'enclosed tessellation' (credit: G. Oneto, 2023).

ic because it requires knowledge of the classification system and initial analogue mapping to instruct the recognition.

LCZs are significant at the urban scale. Therefore, the form originating in Genoa can help to un-

derstand the context in which the area in question is located, but it declines a more in-depth study to other representations. The Sampierdarena area, therefore, appears predominantly as a dense, compact low-rise fabric (class 3) adjacent to the

heavily industrial port area (class 10). However, the linear connotation of the coastal city undermines this square-shaped representation; for example, the wide industrial strip that characterises the entire coast actually masks a historicised res-

Application	Local Climate Zones analysis	Graph analysis	Tessellation analysis
Generic role in Urban Heat Island modelling	Effective at urban scale, highlights the urban-rural gradient	Effective at urban and neighbourhood scale, highlights the betweenness centrality (BC) of the mobility network	Effective at urban and neighbourhood scale, highlights the interaction of 2D and 3D building environment
Via Paolo Reti Genoa (Italy)	Mostly compact low-rise built environment (C3), does not distinguish between historical blocks and portual infrastructure	Clear difference between new expansion and pre-existing urban environment with higher overall UHI resilience (higher BC)	Higher overall heterogeneous thermal response of the built environment (12 clusters)
Einstein Strasse Munich (Germany)	Mostly compact mid-rise (C2) and open mid-rise (C2) built environment	Strong difference between new infrastructure and existing built environment with slightly higher resilience (medium-high BC)	Higher overall homogeneous thermal response of the built environment (8 clusters)

Tab. 1 | Results comparison from the three methodologies on the two case studies (credit: the Authors, 2023).

idential fabric, involving the old Darsena and the Molo with the same colour (Fig. 7).

Conversely, Munich allows the classification to be expanded, decompressing the city's space; consequently, the square fragmentation is articulated on a compact fabric made up of medium-height buildings (class 2). The district in question also involves open areas (class 4), composed of larger blocks with wide courtyards. The analysis helps in defining the border between the urban centre and the periphery, highlighting spatial differences induced by anthropic activity (Fig. 8).

The second map insists on the complexity of the infrastructural system alongside that of the slow mobility that characterises the daily life of residential neighbourhoods. Through the canyon effect, i.e. that ratio of road surface width and building height that characterises a corridor shape, roads often cause local thermal discomfort for people. Leveraging graph theory to analyse the road network in relation to overheating phenomena allows us to highlight the relationships between the different elements in terms of mathematical relationships (Mohamed et alii, 2021). A graph, i.e. a system characterised by objects, nodes and relationships in the form of orientable segments, can demonstrate its robustness and resilience by analysing its centrality. Centrality represents the importance of a node in the network, and in particular, node Betweenness Centrality evaluates the number of shortest paths that pass through each node or segment (Barthélemy, 2004). The maximum centrality in a network is an index of the system's resilience, that is, its ability to find alternative paths if one of these were to be discarded: this means that when faced with choosing which route to take, a more resilient system allows the pedestrian to choose the cooler one. The OSMNX Python library (Boeing, 2017) allows systems from all cities worldwide to be operated on and calculate these dimensions. The map, therefore, represents the roads that fall in territories most exposed to urban heat with a gradient, and, in each node, the local resilience is indicated through the calculation of centralities.

The Genoese case shows the difference between the historical peripheral residential neighbourhood and the new rapid roads; this relationship remains constant thanks to a mesh that follows the contours of the terrain and the Polcevera River. The thermal signature represents a sec-

ondary problem for slow mobility: small residential streets are, on average, less exposed to high temperatures and are connected by nodes with high centrality (Fig. 9). On the other hand, urban expansion is the context in which the road network of the case of Munich can be read: large longitudinal arteries run alongside the rail system that cuts through the analysed area, onto which the residential neighbourhoods are grafted. On average, it can be seen that moving away radially from the tram depot, the streets take on a more comfortable dimension. The representation of centrality allows for easy identification of preferential routes, in which the context and the particular orientation of the road axes play a fundamental role (Fig. 10).

The third mapping is based on the tessellation of the urban fabric with respect to the formal principle, i.e. the characteristics of the streets and buildings that represent the built environment, and the degree of thermal difference due to the surface temperature. The Enclosed Tessellations were developed in the English context to analyse complex environments, forming polygonal spatial modules obtained from data on the morphology and functional characteristics of the territory (Fleischmann and Arribas-Bel, 2022). In this logic, the generative algorithm of the criterion weighs and systematises the heterogeneous data, suggesting a subdivision of the city following human barriers such as roads, rivers, and railways, but also characteristics of the territory such as woodlands or traffic. The pieces are then grouped together, forming Spatial Signatures, a number of groupings specific to the case in question, representative of homogeneous categories of urban space.

In the cases of Genoa and Munich, the Enclosed Tessellations were calculated by deriving urban data from public databases such as Open Street Maps³ and Copernicus⁴. Instead of hybridising formal qualities with functional ones, such as the presence of restaurants in the area, Spatial Signatures were instead created with surface temperatures. On both maps, the study was extended to a diameter double that of the analysis to obtain results more representative of the local context.

The Genoese case produced twelve homogeneous groupings in terms of shape and response to thermal exposure: the fact that the garage, initially hypothesised as the local site of a particular thermal discomfort, falls together with the neigh-

bourhood's historic fabric (cluster I) is immediately significant. The portions that have the greatest impact on overheating are attributable to the former industrial area, now converted into a shopping district (cluster B); this example draws attention to the real risk of drawing hasty conclusions regarding the type of building without taking into consideration the context in which it is located (Fig. 11).

The Munich case produced fewer clusters than Genoa's, i.e., nine. The greater regularity may derive from the lower density of the city fabric, allowing larger blocks, parks, and wide-ranging spaces. The representation homologises the infrastructural network with the depots and open cemented areas (cluster O, N); on the other hand, attention is paid to the fragmented nature of the fabric behind it (cluster M, P, Q, R), composed of different buildings which, due to materials, shape and use of greenery, have a very different response to exposure to heat (Fig. 12).

The three different representation techniques are each composed of different rules: these principles collect the complexity of the urban fabric, analyse, and synthesise it and produce three different logics in the form of geometries and attributes (Tab. 1). The correspondence of the results was obtained by comparison with previous air temperature maps (Hooyberghs et alii, 2019). The repetition of homogeneous contexts results in an image that is necessarily similar, allowing us to compare different cities coming from different areas of the Earth: a module is the dimension and measure of repetition, and as such it is described precisely by rules and principles. Recognising and opening up these logics, sometimes left uncritically in the hands of technicians, instead allows Architects and Urban Planners to experience the complexity of cities first-hand. While Local Climate Zones may have relevance in dictating rules on a large scale, other tools are required when working at the neighbourhood level.

Graphs are widely used in urban analyses, whenever the road element and its characteristics become particularly relevant to the analysis. Using computational tools to analyse the infrastructural network allows us to better highlight relationships and connections, which would otherwise be difficult to appreciate. On the other hand, Tessellations are a large family of space subdivisions, of which the square grid is also part. The criterion for choice is the arbitrary nature of the definition of the polygonal that defines a tessellation: Enclosed Tessellations manage to hybridise the actual shape of the territory with heterogeneous data, which enrich and colour the mosaic of Spatial Signatures that is generated.

Conclusions | The module for the Architect and the Urban Planner is a dimensional classification criterion of the urban system that is recognisable, reproducible, and made up of principles and relationships. The analysis addressed in the two cases of Genoa and Munich draws attention to the existence of tools that a professional can adopt to push the analysis and verification of their hypotheses on urban fabrics. Support for local administrations often involves huge expenses and simulations, sometimes oversized compared to the real objectives. The ability to draw results directly from openly available data and validated by the

scientific community on the one hand, allows competitiveness to be improved and on the other, the transparency and objectivity of analysis to be demonstrated; in fact, the data used in the article comes entirely from databases validated by the European Union. The objectivity of the representations is instead given by the rigour with which these rules are established and followed; this must allow and accept, at times, small graphic aberrations produced by overlaps, edge effects or errors in the data themselves. The contribution of an expert on urban systems is once again instrumental in this case because they can provide a multi-scalar and multidisciplinary response to the problem.

The main limitations of the study are computational in nature. To limit complexity and compu-

tation time, reduced regions of space were selected. It is conceivable that the extension of the study area could have generated different homogeneous classes, leading to a different visual narrative. Greater relevance could also be given to the functional context of the territory, such as the use of the territory and the anthropic activities within. These aspects could enrich the classifications, demonstrating relationships that cannot be inferred from these maps.

If Local Climate Zones are a typical tool for studying heat islands, graphs and Spatial Signatures can be exploited by interrogating cities on different issues; for example, flash flooding due to increased rainfall can be analysed with similar logic. Furthermore, applying environmental and eco-

logical themes, such as habitat connectivity, can become a new generative rule for urban analysis modules, thus meeting sustainability logic that defines our cities' real urban habitats. Two conditions will be pursued in envisaging a continuation of the research using graphs and tessellations to investigate urban environments. The former concerns the data quality, that is, a more descriptive selection of urban heterogeneity, especially of a socio-economic nature. The latter concerns modelling, i.e. the extension of previous methods to larger and, consequently, more complex case studies; in this second phase, the process of validation and verification of the application of the different methodologies will be carried out.

Acknowledgements

The research is financed by the scholarship of G. Oneto, defined by the Italian Ministerial Decree no. 351/09/04/2022. The contribution is the result of a joint reflection of the Authors. Nonetheless, the introductory paragraph is to be attributed to A. Magliocco, 'Materials and Methodology' to G. Oneto, and 'Conclusions' to A. Magliocco and G. Oneto.

Notes

1) For further information, consult the webpage: earth.esa.int/eogateway/missions/landsat [Accessed 18 October 2023].

2) For further information, consult the webpage: land.copernicus.eu/en [Accessed 18 October 2023].

3) For further information, consult the webpage: openstreetmap.org/ [Accessed 18 October 2023].

4) For further information, consult the webpage: ghsl.jrc.ec.europa.eu/copernicus.php [Accessed 18 October 2023].

References

- Abrar, R., Sarkar, S. K., Nishtha, K. T., Talukdar, S., Shahfahad, Rahman, A., Towfiqul Islam, A. R. M. and Mosavi, A. (2022), "Assessing the Spatial Mappin of Heat Vulnerability under Urban Heat Island (UHI) Effect in the Dhaka Metropolitan Area", in *Sustainability*, vol. 14, issue 9, article 4945, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14094945 [Accessed 18 October 2023].
- Arribas-Bel, D. and Fleischmann, M. (2022), "Spatial Signatures – Understanding (urban) spaces through form and function", in *Habitat International*, vol. 128, article 102641, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102641 [Accessed 18 October 2023].
- Aslam, A. and Rana, I. A. (2022), "The use of local climate zones in the urban environment – A systematic review of data sources, methods, and themes", in *Urban Climate*, vol. 42, article 101120, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101120 [Accessed 18 October 2023].
- Barthélemy, M. (2004), "Betweenness Centrality in Large Complex Networks", in *The European Physical Journal B*, vol. 38, issue 2, pp. 163-168. [Online] Available at: doi.org/10.1140/epjb/e2004-00111-4 [Accessed 18 October 2023].
- Boeing, G. (2017), "OSMnx – New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks", in *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 65, pp. 126-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compenurbysys.2017.05.004 [Accessed 18 October 2023].
- Caniggia, G. and Maffei, G. L. (1982), *Composizione architettonica e tipologia edilizia – Lettura dell'edilizia di base*, vol. 1, Marsilio, Venezia.
- Demuzere, M., Kittner, J. and Bechtel, B. (2021), "LCZ Generator – A Web Application to Create Local Climate

Zone Maps", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 9, article 637455, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455 [Accessed 18 October 2023].

Dong, P., Jiang, S., Zhan, W., Wang, C., Miao, S., Du, H., Li, J., Wang, S. and Jiang, L. (2021), "Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures", in *Building and Environment*, vol. 218, article 109105, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109105 [Accessed 18 October 2023].

Equere, V., Mirzaei, P. A. and Riffat, S. (2020), "Definition of a new morphological parameter to improve prediction of urban heat island", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 56, article 102021, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102021 [Accessed 18 October 2023].

Fleischmann, M. and Arribas-Bel, D. (2022), "Geographical characterisation of British urban form and function using the spatial signatures framework", in *Scientific Data*, vol. 9, issue 1, article 546, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41597-022-01640-8 [Accessed 18 October 2023].

Gallo, K. and Xian, G. (2014), "Application of spatially gridded temperature and land cover data sets for urban heat island analysis", in *Urban Climate*, vol. 8, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.uclim.2014.04.005 [Accessed 18 October 2023].

Graells-Garrido, E., Serra-Burriel, F., Rowe, F., Cucchiatti, F. M. and Reyes, P. (2021), "A city of cities – Measuring how 15-minutes urban accessibility shapes human mobility in Barcelona", in *PLOS ONE*, vol. 16, issue 5, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pone.0250080 [Accessed 18 October 2023].

Heaviside, C., Macintyre, H. and Vardoulakis, S. (2017), "The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment", in *Current Environmental Health Reports*, vol. 4, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3 [Accessed 18 October 2023].

Hooyberghs, H., Berckmans, J., Lauwaet, D., Lefebvre, F. and De Ridder, K. (2019), *Climate variables for cities in Europe from 2008 to 2017*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [Online] Available at: doi.org/10.24381/cds.c6459d3a [Accessed 18 October 2023].

Joint Research Centre of the European Commission, Veneri, P., Moreno-Monroy, A., Maffeni, L. and Schiavina, M. (2019), *GHS-OCED functional urban areas – Public release of GHS FUA*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2760/67415 [Accessed 18 October 2023].

Manoli, G., Faticchi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G. and Bou-Zeid, E. (2019), "Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population", in *Nature*, vol. 573, pp.

55-60. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9 [Accessed 18 October 2023].

Mohamed, M., Othman, A., Abotalib, A. Z. and Marjashi, A. (2021), "Urban heat island effects on megacities in desert environments using spatial network analysis and remote sensing data – A case study from western Saudi Arabia", in *Remote Sensing*, vol. 13, issue 10, article 1941, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/rs13101941 [Accessed 18 October 2023].

Muratori, S. (1960), *Studi per una operante storia urbana di Venezia*, Istituto Poligrafico dello Stato, Libreria dello Stato, Roma.

Royal Meteorological Society (2017), "Urban Heat Islands", in *metMatters*, 01/10/2017. [Online] Available at: rmets.org/metmatters/urban-heat-islands [Accessed 18 October 2023].

Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y. and Karnieli, A. (2014), "Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm", in *Sensors*, vol. 14, issue 4, pp. 5768-5780. [Online] Available at: doi.org/10.3390/s140405768 [Accessed 18 October 2023].

Sangiorgio, V., Fiorito, F. and Santamouris, M. (2020), "Development of a holistic urban heat island evaluation methodology", in *Scientific Reports*, vol. 10, issue 1, article 17913, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-020-75018-4 [Accessed 18 October 2023].

Stewart, I. D. (2011), *Redefining the urban heat island*, PhD Thesis, University of British Columbia Theses and Dissertations. [Online] Available at: open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0072360 [Accessed 18 October 2023].

Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012), "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies", in *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, issue 12, pp. 1879-1900. [Online] Available at: doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 [Accessed 18 October 2023].

Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C., Verdin, A., Sweeney, S., Grace, K., Peterson, P. and Evans, T. (2021), "Global urban population exposure to extreme heat", in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, issue 41, article e2024792118, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.2024792118 [Accessed 18 October 2023].

Valmassoi, A. and Keller, J. D. (2021), "How to visualize the Urban Heat Island in Gridded Datasets?", in *Advances in Sciences and Research*, vol. 18, pp. 41-49. [Online] Available at: doi.org/10.5194/asr-18-41-2021 [Accessed 18 October 2023].

van der Hoeven, F. and Wandl, A. (2015), *Rotterdam*, TU Delft Architecture and the Built Environment, Delft.

Wang, Z.-H. (2022), "Reconceptualizing urban heat island – Beyond the urban-rural dichotomy", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 77, article 103581, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.103581 [Accessed 18 October 2023].