

# Progetto Climactions. Vulnerabilità ambientale, socioeconomica e territoriale in 5 città italiane

Climactions project. Environmental, socioeconomic, and territorial vulnerability in 5 Italian cities

Chiara Badaloni<sup>1</sup>, Nicola Caranci<sup>2</sup>, Francesca de' Donato<sup>1</sup>, Manuela De Sario<sup>1</sup>, Nicolás Zengarini<sup>3</sup>, Achille Cernigliaro<sup>4,5</sup>, Andrea Ranzi<sup>6</sup>, Anna Maria Nannavecchia<sup>7</sup>, Emanuele Campese<sup>7</sup>, Lucia Bisceglia<sup>7</sup>, Valentina Adorno<sup>2</sup>, Paola Michelozzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario Regionale del Lazio, ASL Roma 1, Roma

<sup>2</sup> Settore Innovazione nei Servizi Sanitari e Sociali, Direzione Generale Cura della Persona, Salute e Welfare, Regione Emilia-Romagna, Bologna

<sup>3</sup> Servizio sovrazonale di epidemiologia ASL TO3, Grugliasco, Torino

<sup>4</sup> Dipartimento per le Attività Sanitarie e Osservatorio Epidemiologico (DASOE), Assessorato della Salute, Regione Siciliana, Palermo

<sup>5</sup> Unità Operativa Complessa di Patologia Clinica, Dipartimento dei Servizi e delle Scienze Radiologiche, Presidio Ospedaliero Sant'Antonio Abate, Azienda Sanitaria Provinciale di Trapani, Erice (TP)

<sup>6</sup> Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna

<sup>7</sup> Agenzia Strategica Regionale per la salute e il Sociale (AReSS), Puglia

**Corrispondenza:** Chiara Badaloni; c.badaloni@deplazio.it

## Riassunto

**Obiettivi:** identificare le aree caratterizzate da un'alta vulnerabilità ambientale e socioeconomica in cinque aree urbane (Torino, Bologna, Roma, Bari, Palermo) utilizzando caratteristiche ambientali e climatiche, socioeconomiche e territoriali.

**Disegno:** studio geografico.

**Setting e partecipanti:** dominio di studio su cinque città italiane; ogni città è stata caratterizzata a livello di area urbanistica o quartiere.

**Principali misure di outcome:** per ogni area urbanistica o quartiere sono stati costruiti indicatori spaziali che riguardano i principali aspetti ambientali (inquinamento atmosferico, urbanizzazione, temperatura, altitudine e presenza di fiumi e corsi d'acqua, verde, rete stradale e ferroviaria) e socioeconomici (indice di deprivazione). Queste caratteristiche sono state sintetizzate in un indicatore composito costruito con un'analisi in componenti principali pesata geograficamente al fine di caratterizzare la vulnerabilità ambientale e socioeconomica in un'unica misura facilmente interpretabile rispetto a una serie di indicatori individuali.

**Risultati:** le città coinvolte dispongono di un ricco patrimonio di banche dati idonee a produrre una mappatura delle principali caratteristiche ambientali e socioeconomiche. Tra le città in studio, Torino è quella con una maggiore densità abitativa e con il più alto valore medio giornaliero di PM<sub>10</sub> (29,7±1,4 µg/m<sup>3</sup>); insieme a Palermo, è la città con la più alta percentuale di densità di strade locali. La copertura del suolo a uso abitativo presenta un gradiente Sud-Nord, dal 50% a Palermo e Bari al 24,5% nella città di Roma. In tutte le città sono presenti estese aree a bassa densità abitativa. Il valore sintetico dell'indicatore cattura la variabilità spaziale del territorio, mettendo in evidenza le aree di maggiore vulnerabilità urbana in ogni città in studio. Bologna e Roma sono le città con la percentuale più alta di residenti in aree ad alta vulnerabilità ambientale, climatica e socioeconomica, rispettivamente, il 38% e il 29% dei residenti, mentre a Bari e a Palermo più del 50% della popolazione vive in aree a bassa vulnerabilità.

**Conclusioni:** in questo studio, cinque città italiane sono state caratterizzate dal punto di vista ambientale, socio-economico e territoriale. Inoltre, attraverso l'uso di un indicatore sintetico di esposizione ambientale socioeconomica, sono state individuate le aree più vulnerabili. Questo indica-

## Cosa si sapeva già

- Esistono solide evidenze che nelle aree urbane la popolazione è esposta a molteplici fattori di rischio ambientali, come il traffico, l'inquinamento atmosferico e il caldo, con conseguenti impatti sulla salute in termini di mortalità prematura e peggioramento delle condizioni di salute.
- Altri fattori, come gli spazi verdi, possono avere un'azione di mitigazione sulle condizioni ambientali e allo stesso tempo promuovere l'attività fisica, il relax e la socializzazione.
- Le disuguaglianze di salute non solo sono dei determinanti di salute di per sé, ma possono anche amplificare gli effetti dei fattori ambientali.
- È disponibile un ricco patrimonio di banche dati sulle principali caratteristiche territoriali e ambientali nelle città italiane.

## Cosa si aggiunge di nuovo

- Sono state identificate le principali esposizioni ambientali, urbanistiche, demografiche e socioeconomiche per 5 città italiane.
- Utilizzando dati a una stessa risoluzione spaziale, sono state individuate le aree ad alta vulnerabilità ambientale e socioeconomica.
- Un indicatore sintetico di vulnerabilità ambientale e socioeconomica specifico per città permette di sintetizzare la complessità e multifattorialità delle esposizioni presenti all'interno delle aree urbane e valutarne l'impatto sulla salute della popolazione.

tore fornisce informazioni immediate ed efficaci per sostenere politiche di tutela della salute e di contrasto dei fattori di rischio ambientali e sociali sul territorio.

**Parole chiave:** vulnerabilità ambientale e socioeconomica, deprivazione, inquinamento atmosferico, temperatura, verde urbano

## Abstract

**Objectives:** to identify environmental, socioeconomic, and territorial characteristics in five urban areas (Turin, Bologna, Rome, Bari, Palermo) and to identify areas characterized by high environmental and socioeconomic vulnerability.

**Design:** geographical study.

**Setting and participants:** study domain on five Italian cities, each city was characterized at the urban-area level.

**Main outcome measures:** for each urban area or neighbourhood, multiple spatial indicators were constructed concerning the main environmental (air pollution, urbanisation, temperature, altitude and presence of rivers and watercourses, greenery, road and rail networks), and socioeconomic (deprivation index) aspects. These characteristics have been synthesised into a composite indicator with a geographically weighted principal component analysis in order to characterise environmental and socioeconomic vulnerability in a single measure that can be more easily interpreted compared to a set of individual indicators.

**Results:** the involved cities have numerous databases suitable for mapping the main environmental and socioeconomic characteristics. Turin is the most populous of these cities and the one which has the highest average daily PM<sub>10</sub> value (29.7±1.4 µg/m<sup>3</sup>). Together with Palermo, it is the city with the highest density of local roads. Data on residential

land cover show a South-North gradient, from 50% in Palermo and Bari to 24,5% in Rome. Low-density residential areas prevail in all cities. The synthetic value of the indicator captures the spatial variability of the territory, highlighting the areas of greatest urban vulnerability in each city under study. Bologna and Roma are the cities with the highest percentage of residents in the high environmental, climate, and socioeconomic vulnerability level, respectively 38% and 29%, while Bari and Palermo show the highest fraction of population living in low vulnerability areas.

**Conclusions:** in this study, five Italian cities were characterised from an environmental, socioeconomic, and spatial perspective. Furthermore, through the use of a synthetic indicator of socioeconomic environmental exposure, the most vulnerable areas were identified. This indicator provides immediate and effective information to support policies to protect health and combat environmental and social risk factors in the area.

**Keywords:** environmental and socioeconomic vulnerability, deprivation, air pollution, temperature, urban green area

## Introduzione

Nell'ultimo ciclo di stime e proiezioni sulla popolazione mondiale delle Nazioni Unite viene confermato il continuo incremento della popolazione mondiale, seppur con un rallentamento del ritmo di crescita.<sup>1</sup> I futuri aumenti delle dimensioni della popolazione coinvolgeranno soprattutto le aree urbane, dove si prevede che nel 2050 si concentrerà il 68% della popolazione mondiale.<sup>2</sup> La crescita diffusa delle zone urbane fa emergere l'importanza di costruire città sempre più resilienti e sostenibili. Comprenderne le principali tendenze, quindi, è fondamentale per l'attuazione dell'Agenda 2030 e per lo sviluppo di ambienti urbani più salubri. Recentemente, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e il Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani (UN-Habitat) mettono in evidenza che la crescita costante della popolazione urbana pone sfide importanti per migliorare la salute dei cittadini già minacciata da molteplici fattori di rischio connessi all'inquinamento atmosferico, alla raccolta dei rifiuti, agli eventi meteorologici estremi e alla scarsa presenza di spazi verdi.<sup>3</sup> Negli ultimi anni, il tema del cambiamento climatico ha acquisito un'importanza crescente, poiché diverse parti del mondo sono state colpite da eventi meteorologici estremi causati dal cambiamento climatico. Secondo la sesta relazione di valutazione del 2022 dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), i cambiamenti climatici, come la crescita delle temperature e della frequenza e gravità degli eventi estremi, stanno già provocando una serie di impatti avversi sugli ecosistemi e sulla salute umana. In particolare, nelle aree urbane si osserva un'intensificazione delle ondate di calore e degli eventi estremi, con conseguenti danni a infrastrut-

ture e servizi (per esempio, trasporti, rete idrica), con gli impatti maggiori nei sottogruppi di popolazione marginalizzati e deprivati socialmente ed economicamente.<sup>4</sup> A fronte di questo, l'Europa si è impegnata nella riduzione delle emissioni di gas a effetto serra con l'obiettivo di contrastare e limitare gli effetti dannosi che un possibile aumento delle temperature possano avere per la natura e per le persone,<sup>5</sup> supportando misure di mitigazione quali la produzione di energia da fonti rinnovabili, il risparmio energetico negli edifici (pubblici e privati) e la realizzazione di una mobilità sostenibile e di un'economia circolare<sup>6</sup> a fianco di misure di adattamento per ridurre i rischi immediati a breve termine, quali le *nature-based solution* come la riforestazione e la riqualificazione del verde urbano.

In particolare, la popolazione vulnerabile esposta alle ondate di calore è in aumento a livello globale e anche la mortalità associata al caldo nella popolazione anziana ha registrato un incremento del 68% negli ultimi 20 anni.<sup>7</sup> Studi epidemiologici mostrano un effetto sulla mortalità maggiore nelle aree urbane dove si verifica un particolare fenomeno microclimatico: le isole di calore urbano, cioè luoghi della città dove le temperature sono più calde rispetto alle aree rurali circostanti.<sup>8,9</sup> Questo fenomeno è caratterizzato da un'intensa concentrazione di superfici antropizzate in grado di assorbire la radiazione solare senza riuscire a rifletterla.<sup>10</sup> Gli effetti del caldo sulla salute sono maggiori in sottogruppi vulnerabili come anziani, persone affette da condizioni di salute croniche, bambini piccoli, donne in gravidanza, lavoratori all'aperto, persone socialmente isolate o con minori risorse economiche per proteggersi dal caldo.<sup>11</sup> Le condizioni socioeconomiche sono uno dei compo-

nenti della capacità di risposta agli eventi estremi come le ondate di calore, ma sono anche un noto determinante della salute della popolazione, in quanto associati a disuguaglianze dei fattori di rischio di malattia, nell'accesso e nell'esito delle cure sanitarie,<sup>12,13</sup> talvolta esacerbando altre componenti della vulnerabilità come la condizioni di multicomorbidità o fragilità,<sup>14</sup> talvolta associandosi a elementi di vulnerabilità ambientale<sup>15</sup>.

Per le città diventa sempre più importante pianificare e adottare interventi di mitigazione dei rischi ambientali e sociali e, allo stesso tempo, far fronte agli impatti derivanti dai cambiamenti climatici. Questo lavoro propone la realizzazione di uno strumento innovativo capace di integrare la vulnerabilità ambientale quella socioeconomica e territoriale in cinque città italiane (Torino, Bologna, Roma, Bari, Palermo). Lo studio è stato condotto nell'ambito del progetto Climactions (Finanziamento CCM Ministero della Salute 2019).

## Materiali e metodi

Al fine di identificare le zone a maggior rischio all'interno delle aree urbane, sono state identificate le principali esposizioni ambientali, urbanistiche, demografiche e socioeconomiche per 5 città incluse nel progetto: Torino, Bologna, Roma, Bari e Palermo. Per ogni città, è stato scelto un dominio di studio afferente a una suddivisione statistica suburbana di medie dimensioni, potenzialmente capace di cogliere la variabilità nei territori cittadini e mantenere un'omogeneità all'interno delle aree.

Nella tabella 1 vengono indicate le informazioni spaziali prese in considerazione, la fonte e la risoluzione spaziale a essi associata. Sono state considerate varie dimensioni di vulnerabilità socioeconomica e ambientale. Le dimensioni riflettono fattori di rischio per la salute associati all'esposizione a fonti antropiche, come la densità della rete stradale e ferroviaria, la densità abitativa o l'inquinamento atmosferico, ma anche possibili fattori protettivi, come la presenza di verde urbano.<sup>16</sup>

Tutti gli indicatori sono stati aggregati secondo le suddivisioni statistiche suburbane di riferimento specifiche per ciascun comune.

## Popolazione

L'informazione sulla popolazione residente si riferisce al censimento della popolazione del 2011, ultimo censimento per cui sono disponibili dati a un dettaglio molto capillare. Sono stati considerati due indicatori: il totale della popolazione residente totale e quella con 65 anni o più.

## Orografia

Per definire l'orografia del terreno, nelle città in studio sono state utilizzate le informazioni provenienti dal-

le immagini catturate durante lo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).<sup>17</sup> Grazie a questa missione internazionale, è stato possibile ottenere un modello digitale di elevazione (DEM) e generare un database topografico digitale ad alta risoluzione. Il file di output è un file *raster* i cui pixel corrispondono a un'area di circa 90x90 m, a ogni pixel è stato poi assegnato un centroide di riferimento. Per ogni città e per ogni suddivisione statistica suburbana, è stato assegnato un unico valore di altitudine relativo alla media dei punti afferenti a ciascuna suddivisione.

## Dati di uso del suolo

I dati relativi alle informazioni topologiche sulle caratteristiche di copertura e uso del territorio derivano dalla carta digitalizzata della copertura del suolo (CORINE Land cover del 2018)<sup>18</sup> costruita su scala di 1:100,000. La definizione delle informazioni deriva dalle immagini satellitari SPOT 4 HRVIR, SPOT 5 HRG e/o IRS P6 LISS III. La superficie minima analizzata è di 25 ettari. Dal dataset CORINE Land cover sono state selezionate le aree tematiche che definiscono l'alta e la bassa densità abitativa (codici 111 e 112). Per ogni città e per ogni suddivisione statistica suburbana, è stata individuata la percentuale di territorio occupato ad alta densità abitativa e a bassa densità abitativa. Per il calcolo della percentuale d'uso è stato utilizzato un approccio geografico. Lo strato informativo che rappresenta la copertura e l'uso del suolo è stato sovrapposto a quello della suddivisione statistica suburbana creando un nuovo *shapefile* composto da poligoni che rappresentano l'intersezione dei due strati informativi. È stata calcolata l'area di intersezione, quindi, la percentuale di territorio occupato da ciascuna area tematica.

## Viabilità (rete stradale e ferroviaria)

I dati sulla viabilità sono stati definiti utilizzando il dataset TeleAtlas TomTom network del 2015, selezionando sia la rete ferroviaria sia quella stradale. Questi indicatori sono stati considerati come parte integrante di una pianificazione del trasporto urbano e dell'uso del territorio comunale.

Sono state considerate due tipologie di strade: le strade principali ad alto scorrimento e le strade locali secondarie. Ciascuno strato informativo (tipologia di strade e ferrovie) è stato sovrapposto alla suddivisione statistica suburbana. Per ciascuna di esse è stata calcolata la densità di strade ad alto scorrimento, di strade locali e ferrovie, come rapporto tra i metri di strada o di ferrovia e l'area della suddivisione statistica suburbana corrispondente.

## Aree verdi

Per caratterizzare le aree verdi, sono stati utilizzati sha-

| Nome                   | Descrizione                                                                              | Fonte                                                                                                             | Risoluzione spaziale  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Popolazione            | Popolazione residente al 2011                                                            | Istat                                                                                                             | Sezione di censimento |
|                        | popolazione totale                                                                       |                                                                                                                   |                       |
|                        | popolazione over 65 anni                                                                 |                                                                                                                   |                       |
| Orografia              | Modello digitale di elevazione (European Digital Elevation Model EU-DEM)                 | <a href="http://geodati.fmach.it/gfoss_geodata/SRTM-Italy/">http://geodati.fmach.it/gfoss_geodata/SRTM-Italy/</a> | 90 m <sup>2</sup>     |
| Dati di uso del suolo  | Caratteristiche di copertura e uso del territorio                                        | <a href="http://www.sinanet.isprambiente.it">http://www.sinanet.isprambiente.it</a>                               | scala 1:100000        |
|                        | alta densità abitativa                                                                   |                                                                                                                   |                       |
|                        | bassa densità abitativa                                                                  |                                                                                                                   |                       |
|                        | Strade ad alto scorrimento                                                               |                                                                                                                   |                       |
| Viabilità              | Strade locali                                                                            | TeleAtlas TomTom network                                                                                          | metro                 |
|                        | Ferrovie                                                                                 |                                                                                                                   |                       |
| Aree Verdi             | Normalized difference vegetation index (NDVI)                                            | MODIS (MOD13A3) <a href="https://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html">https://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html</a>   | 1 km <sup>2</sup>     |
|                        | Verde Urbano                                                                             | OpenStreetMap (2019)                                                                                              | m <sup>2</sup>        |
| Corsi d'acqua          | Fiumi                                                                                    | TeleAtlas TomTom network                                                                                          | metro                 |
| Temperatura            | Media 2006-2015 estiva (maggio settembre) delle temperature giornaliere °C               | de'Donato et al. 2021 <sup>8</sup>                                                                                | Sezione di censimento |
| Inquinamento           | PM <sub>10</sub>                                                                         | Stafoggia et al. 2016 <sup>19</sup>                                                                               | 1 km <sup>2</sup>     |
| Indice di deprivazione | Indice di deprivazione (ID) a livello di sezione di censimento basato sui dati del 2011. | Rosano et al. 2020 <sup>20</sup>                                                                                  | Sezione di censimento |

**Tabella 1.** Descrizione delle fonti degli indicatori di esposizione ambientale, urbanistica, demografica e socioeconomica.

**Table 1.** Description of data sources of indicators of environmental, urban, demographic, and socioeconomic exposure.

pefile comunali nei quali viene definito il perimetro di ogni parco urbano o area verde attrezzata di competenza comunale. In modo complementare, è stato utilizzato un indicatore satellitare in grado di rilevare la presenza di vegetazione e il suo stato di salute: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). L'indicatore è calcolato a partire dai dati MODIS (MOD13A3) ed è una grandezza adimensionale che varia tra -1 e +1, con valori compresi tra -1 e 0 tipici di aree non coltivate come corsi d'acqua e zone antropiche, valori tra 0,1 e 0,2 tipici di suolo nudo o copertura vegetale quasi assente o con scarsa capacità fotosintetica, perché nella fase di riposo vegetativo, valori tra 0,3 e 0,8 caratteristici di una copertura di vegetazione crescente da livelli bassi fino a livelli di copertura totale con vigoria molto alta (valori tra 0,9 e 1,0).

### Corsi d'acqua (fiumi)

I dati sulla presenza di fiumi sono stati ottenuti dal dataset TeleAtlas TomTom network del 2015.

### Temperatura media giornaliera

A partire da un modello spaziotemporale multivariato, è stata stimata la temperatura dell'aria giornaliera a scala 1x1 km del territorio italiano, a partire da dati satellitari MODIS *Land Surface Temperature* (LST), da osservazioni di temperatura fornite dalle reti di monitoraggio e da variabili di uso del territorio spaziali e spazio-temporali.<sup>8</sup> Inoltre, a partire dai dati di 1x1 km, è stata definita la temperatura media per ogni cella nel periodo 2006-2015 e successivamente calcolata la media per sezione di censimento e zona urbanistica di ogni città.

### Inquinamento atmosferico

A partire da un modello spaziotemporale, è stata stimata la concentrazione giornaliera di PM<sub>10</sub> a scala 1x1 km, a partire da dati satellitari di *Average Optical Density* (AOD), da osservazioni di PM fornite dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria e da variabili di uso del territorio spaziali e spazio-temporali.<sup>19</sup> Per ogni sezione di censimento e zona urbanistica, è stato calcolato il valore medio di PM<sub>10</sub> nel 2019 delle celle contenute in ogni sezione di censimento o zona urbanistica.

### Indice di deprivazione

L'indice di deprivazione<sup>20</sup> utilizza i dati del Censimento generale della popolazione e delle abitazioni del 2011. Al fine di descrivere il concetto multidimensionale della deprivazione sociale e materiale, sintetizza cinque caratteristiche a livello di sezione di censimento: basso livello di istruzione, condizione di disoccupazione, famiglia monogenitoriale, abitazione in affitto e ad alta densità abitativa. L'indice viene classificato in 5 categorie, definite sulla base dei quintili della distribuzione dell'indicatore pesata per la popolazione residente. Le categorie rappresentano 5 livelli di deprivazione, dal meno deprivato al più deprivato. Per ogni città, è stato calcolato un indice calibrato; la distribuzione originale di ciascun indicatore è stata normalizzata in *z-score* usando media e deviazione standard specifiche per città; infine, l'indice è stato classificato in quintili di popolazione per ogni città.

Per costruire un indice composito, rendendo ininfluente l'ordine di grandezza delle componenti, tutti gli indicatori descritti in tabella 1 sono stati standardizzati. Le



diverse caratteristiche del territorio sono variabili geografiche non stazionarie; pertanto, è stata scelta una tecnica multivariata spaziale. Per ogni città, è stata svolta un'analisi in componenti principali pesata geograficamente (GWPCA). Questa tecnica è in grado di tenere conto dei processi spaziali non stazionari e dell'eterogeneità spaziale.<sup>21</sup>

Brevemente, questa tecnica implementa un modello di analisi in componenti principali per ciascuna suddivisione statistica suburbana. Poiché la relazione tra i dati può essere localmente diversa, ogni modello viene ponderato geograficamente con un sottoinsieme di suddivisioni statistiche suburbane vicine. Per calibrare il modello viene utilizzata la funzione *kernel bi-square*. Questa funzione attribuisce pesi nulli alle osservazioni con una distanza superiore a una determinata *bandwidth* ottimizzata tramite la *cross-validation*. L'approccio dell'analisi in componenti principali permette di sintetizzare le variabili originali in più componenti indipendenti che riassumono le dimensioni iniziali. L'obiettivo è di ridurre il numero di variabili iniziali in un numero minore di componenti, limitando il più possibile la perdita di contenuto informativo (variabilità). Ogni componente spiega una quota di varianza totale e sintetizza l'importanza spaziale (locale) delle variabili originali. Sono stati definiti undici livelli di vulnerabilità utilizzando il metodo di classificazione *Jenks natural breaks*. Questo metodo di raggruppamento determina la migliore disposizione dei valori in diverse classi, riducendo la varianza all'interno delle classi e massimizzando la varianza tra le classi. Le prime sei classi identificano un livello di vulnerabilità molto basso, mentre le ultime cinque classi descrivono il livello di vulnerabilità crescente dal più basso (livello 7) al più alto (livello 11). A ogni suddivisione statistica urbana, è stato dunque assegnato un valore di vulnerabilità. Le analisi sono state eseguite in piattaforma R, versione 4.0.3.

## Risultati

Le città sono tra loro eterogenee per tutti le caratteristiche territoriali prese in esame. Torino è quella più densamente popolata, con più di 6.710 residenti per km<sup>2</sup>, seguita da Palermo, Bari, Bologna e Roma.

Ogni città è sezionata in suddivisioni statistiche suburbane, con numero e dimensioni che variano tra le città a seconda delle caratteristiche amministrative e territoriali. Per il Comune di Roma, sono state analizzate 155 zone urbanistiche, di grandi dimensioni (8,3 km<sup>2</sup>), mentre per Torino e Bologna sono state considerate, rispettivamente, 94 zone statistiche e 90 aree statistiche, mediamente di piccole dimensioni (1,5 km<sup>2</sup>). Palermo è stata suddivisa in 56 unità di primo livello, con una superficie leggermente maggiore: ~ 3 km<sup>2</sup>. Infine, per Bari sono stati considerati i quartieri, ossia 17 suddivi-

sioni statistiche suburbane con una superficie media di circa 7 km<sup>2</sup>.

Tutti gli indicatori relativi alle caratteristiche territoriali si riferiscono alle suddivisioni statistiche suburbane proprie per ciascun comune.

Nella tabella 2 si osserva una sintesi dei valori medi dei principali indicatori considerati nell'analisi a livello di suddivisione statistica suburbana. Il comune con l'altitudine maggiore è Torino, con una media di 264,3 metri s.l.m., mentre Bari, essendo sul mare, presenta un'altitudine pressoché nulla, con soli 28,5 metri s.l.m. In tre comuni in studio (Torino, Bari e Palermo), il *Normalized difference vegetation Index* (NDVI) ha un valore medio di 0,35, valore che indica un terreno composto prevalentemente da una copertura di vegetazione bassa. Bologna e Roma presentano, invece, valori di NDVI mediamente più alti, tra 0,4 e 0,5, che descrivono comunque una copertura vegetale medio-bassa. Nella città di Bari si osservano le temperature medie estive più calde con 24,7°C (95° percentile della distribuzione estiva, maggio-settembre, delle temperature medie giornaliere). Viceversa, Torino è la città più fresca nella quale le temperature medie arrivano a 22°C nel periodo estivo. Rispetto ai valori stimati di PM<sub>10</sub> si osserva un gradiente Nord-Sud, con valori medi giornalieri maggiori a Torino (29,7±1,4 µg/m<sup>3</sup>) e via via decrescenti passando a Bologna (25,5±0,8 µg/m<sup>3</sup>) e Roma (24,5±2,4 µg/m<sup>3</sup>) e con più bassi a Bari (22,4±1,2 µg/m<sup>3</sup>) e Palermo (22,2±1,6 µg/m<sup>3</sup>). Infine, emerge una maggiore densità di strade ad alto scorrimento a Torino (6,05±2,7 km/km<sup>2</sup>) e una maggiore densità di rete ferroviaria a Bologna (1,8±1,7 km/km<sup>2</sup>). Nella tabella 2 viene anche descritta la distribuzione percentuale delle caratteristiche legate alla copertura e l'uso del suolo nelle 5 città in studio, in particolare la densità abitativa secondo la definizione CORINE *Land Cover*, un *dataset* europeo nato per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio.

La copertura del suolo a uso abitativo nelle varie città è eterogenea: a Palermo e Bari riguarda quasi il 50% del territorio comunale (rispettivamente del 49,8% e del 45,4%), a Bari il 37%, a Bologna e Roma è poco meno del 30% (rispettivamente il 27,5% e il 24,5%). Per tutte le città in studio sono predominanti le aree a bassa densità abitativa, ma la distribuzione tra le aree ad alta e bassa densità è eterogenea. A Torino, Roma e Palermo, più del 70% del suolo abitativo totale è caratterizzato da aree a bassa densità abitativa. A Bari, invece, la distribuzione tra alta e bassa densità abitativa è più bilanciata. Le diverse caratteristiche territoriali, misurate con la granularità espressa dalla tabella 2, tendono ad assumere associazioni con l'indice di deprivazione di direzione e intensità variabile per città (tabella 3). Il coefficiente di correlazione, ricavato come coefficiente di

| Caratteristiche territoriali                                | Torino               | Bologna              | Roma                   | Bari                   | Palermo               |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>Ripartizioni territoriali</b>                            |                      |                      |                        |                        |                       |
| Numero                                                      | 94                   | 90                   | 155                    | 17                     | 56                    |
| Popolazione                                                 |                      |                      |                        |                        |                       |
| Densità di popolazione (abitanti/km <sup>2</sup> )          | 6.710                | 2.636,3              | 2.032,9                | 2.690,9                | 4.094,7               |
| Popolazione totale media (DS)                               | 9.280,5<br>(7.349,0) | 4.126,0<br>(3.633,9) | 16.885,0<br>(14.215,0) | 18.584,3<br>(12.564,9) | 11.742,2<br>(6.308,4) |
| Popolazione over 65 anni media (DS)                         | 2.319,6<br>(1.945,2) | 1.099,1<br>(1.009,2) | 3.690,1<br>(3.445,3)   | 3.961,7<br>(3.367,7)   | 2.088,7<br>(1.231,5)  |
| <b>Superficie</b>                                           |                      |                      |                        |                        |                       |
| km <sup>2</sup> totali area comunale                        | 130                  | 140,9                | 1287,4                 | 117,4                  | 160,6                 |
| media (DS)                                                  | 1,4 (1,0)            | 1,6 (2,8)            | 8,3 (12,5)             | 6,9 (6,0)              | 2,9 (3,7)             |
| <b>Orografia (metri s.l.m.)</b>                             |                      |                      |                        |                        |                       |
| media (DS)                                                  | 264,3 (57,5)         | 58,7 (31,5)          | 54,5 (32,2)            | 28,5 (23,4)            | 86,9 (100,4)          |
| <b>Viabilità (densità in km/km<sup>2</sup>)</b>             |                      |                      |                        |                        |                       |
| Strade ad alto scorrimento media (DS)                       | 6,05 (2,7)           | 4,36 (2,25)          | 3,16 (2,2)             | 4,65 (3,09)            | 4,03 (2,17)           |
| Strade locali e minori media (DS)                           | 13,26 (5,6)          | 11,03 (6,07)         | 10,97 (5,05)           | 11,87 (3,75)           | 13,67 (7,05)          |
| Ferrovie media (DS)                                         | 1,03 (1,08)          | 1,85 (1,67)          | 0,65 (0,65)            | 0,96 (0,78)            | 1,13 (1,11)           |
| <b>NDVI</b>                                                 |                      |                      |                        |                        |                       |
| media (DS)                                                  | 0,36 (0,13)          | 0,41 (0,09)          | 0,45 (0,10)            | 0,35 (0,09)            | 0,34 (0,11)           |
| <b>Temperatura media giornaliera (°C)</b>                   |                      |                      |                        |                        |                       |
| 95°percentile della distribuzione estiva (maggio-settembre) | 22,00                | 22,82                | 23,52                  | 24,67                  | 24,38                 |
| <b>PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>                   |                      |                      |                        |                        |                       |
| media annuale (DS)                                          | 29,7 (1,4)           | 25,5 (0,8)           | 24,5 (2,4)             | 22,4 (1,2)             | 22,2 (1,6)            |
| <b>Uso del suolo abitativo (%)</b>                          |                      |                      |                        |                        |                       |
| Uso abitativo totale (%)                                    | 45,4                 | 27,5                 | 24,5                   | 37,0                   | 49,8                  |
| Aree ad alta densità abitativa (%)                          | 10,8                 | 2,3                  | 6,5                    | 16,8                   | 14,2                  |
| Aree a bassa densità abitativa (%)                          | 34,6                 | 25,2                 | 18,1                   | 20,2                   | 35,7                  |
| <b>Verde urbano</b>                                         |                      |                      |                        |                        |                       |
| Suolo a uso verde urbano (%)                                | 8,4                  | 6,9                  | 31,9                   | 3,0                    | 0,4                   |
| Corsi d'acqua                                               |                      |                      |                        |                        |                       |
| Suolo coperto da fiumi (%)                                  | 2,1                  | 0,5                  | 0,7                    | 0,4                    | 0,1                   |

DS: deviazione standard / standard deviation

**Tabella 2.** Caratteristiche territoriali incluse nell'indicatore di vulnerabilità ambientale e socioeconomica in 5 città italiane.  
**Table 2.** Geographical characteristics included in the environmental and socioeconomic vulnerability indicator in 5 Italian cities.

Pearson (r) ponderato con la popolazione residente in ciascuna area ed espresso in percentuale (dunque su una scala da -100 a +100%), fa emergere alcune peculiarità: l'altimetria tende ad avere un'associazione negativa con la deprivazione, con valori che arrivano al -42% di Torino e al -38% di Bologna. L'alta densità abitativa tende ad avere un'associazione negativa nelle città del Centro-Sud, al contrario di quanto osservato per quelle del Nord. In generale, la densità abitativa, anche quella bassa, esprime associazioni altalenanti. Anche la presenza di strade ad alto scorrimento si correla negativamente con la deprivazione, in particolare nelle città del Centro-Sud (Roma: -47%, Bari: -37%); un'osservazione analoga vale per le strade locali e minori, dove l'associazione negativa tende a essere meno forte (Roma: -37%). La presenza di ferrovie ha associazioni minori e più spesso positive (Bologna: +29%). La presenza di corsi d'acqua superficiali, vale a dire fiumi, esprime associazioni sia positive (Roma: 30%) sia negative (Palermo: -25%). Le temperature medie e la concentrazione

di PM<sub>10</sub> esprimono correlazioni negative per le città del Sud (-36/-38% per Bari), mentre la correlazione va in direzione opposta a Bologna (+17/+39%).

Nel materiale supplementare viene riportata la mappa con la distribuzione territoriale delle città in studio (figura S1), le mappe di distribuzione per singolo indicatore per ciascuna delle 5 città (figure da S2 a S11). Inoltre, sono riportate le tabelle relative all'analisi in componenti principali standard per mostrare la distribuzione dei pesi delle variabili su ogni componente.

Per ognuna delle 5 città del progetto sono state sintetizzate tutte le caratteristiche territoriali in un indicatore sintetico di vulnerabilità ambientale e socioeconomica. Nella figura 1 vengono riportate le mappe specifiche per città dell'indicatore per mostrare la variabilità spaziale presente all'interno di ciascuna area urbana.

Il valore sintetico dell'indicatore cattura la variabilità spaziale del territorio, mettendo in evidenza le aree di maggiore pericolosità urbana in ogni città in studio.

| Caratteristiche territoriali | Torino | Bologna | Roma  | Bari  | Palermo |
|------------------------------|--------|---------|-------|-------|---------|
|                              | r (%)  | r (%)   | r (%) | r (%) | r (%)   |
| <b>Orografia</b>             | -42,2  | -37,8   | -4,0  | -10,3 | -1,5    |
| <b>Densità abitativa</b>     |        |         |       |       |         |
| alta densità abitativa       | 21,4   | 2,1     | -30,8 | -36,2 | -12,5   |
| bassa densità abitativa      | 5,3    | -19,0   | 33,6  | -18,0 | -9,9    |
| <b>Viabilità</b>             |        |         |       |       |         |
| Strade ad alto scorrimento   | -8,9   | -4,4    | -47,0 | -36,6 | -24,3   |
| strade locali e minori       | -16,5  | -14,1   | -36,7 | 14,3  | 0,2     |
| ferrovie                     | 2,6    | 29,2    | -22,9 | 11,8  | 7,0     |
| <b>Verde urbano</b>          |        |         |       |       |         |
| Aree di verde urbano         | 6,1    | 15,7    | 4,5   | 57,1  | 1,9     |
| NDVI                         | -18,4  | -13,3   | 17,4  | 19,8  | 8,2     |
| <b>Corsi d'acqua</b>         | -9,1   | 18,1    | 29,7  | -15,9 | -25,1   |
| <b>Temperatura</b>           | 10,7   | 17,4    | -32,1 | -37,9 | -22,7   |
| <b>PM<sub>10</sub></b>       | -0,6   | 39,5    | -27,0 | -36,1 | -11,7   |

**Tabella 3.** Coefficiente di correlazione di Pearson (r) delle caratteristiche territoriali con l'indice di deprivazione, ponderato per popolazione residente totale in 5 città italiane.

**Table 3.** Pearson correlation coefficient (r) between geographical characteristics and deprivation index, weighted by total resident population in 5 Italian cities.

A Roma emerge una maggiore vulnerabilità ambientale e socioeconomica nel centro della città e nei quartieri della periferia Est. Nel centro della città contribuiscono maggiormente all'indicatore di vulnerabilità le elevate temperature, il traffico e l'inquinamento, sia acustico sia atmosferico; inoltre, si osserva una minore presenza di spazi verdi, mentre il livello di deprivazione segue un andamento inverso ed è maggiore nella periferia della città. L'area Est è una zona con molteplici impianti industriali, in cui si osservano livelli elevati sia di inquinamento da PM<sub>10</sub> sia di deprivazione sociale. A Bologna emergono valori più alti in prima periferia, in particolare nelle zone a Nord-Est e a Ovest, che tendono a essere medio-alti nei pressi della linea mediana che attraversa il centro e che rappresenta la via Emilia; all'allontanarsi da essa, i valori risultano inferiori, in particolare andando verso Sud, dove si colloca la parte collinare della città, dove si trova più verde, minor popolazione, minor uso del suolo, bassi livelli di inquinamento e di deprivazione.

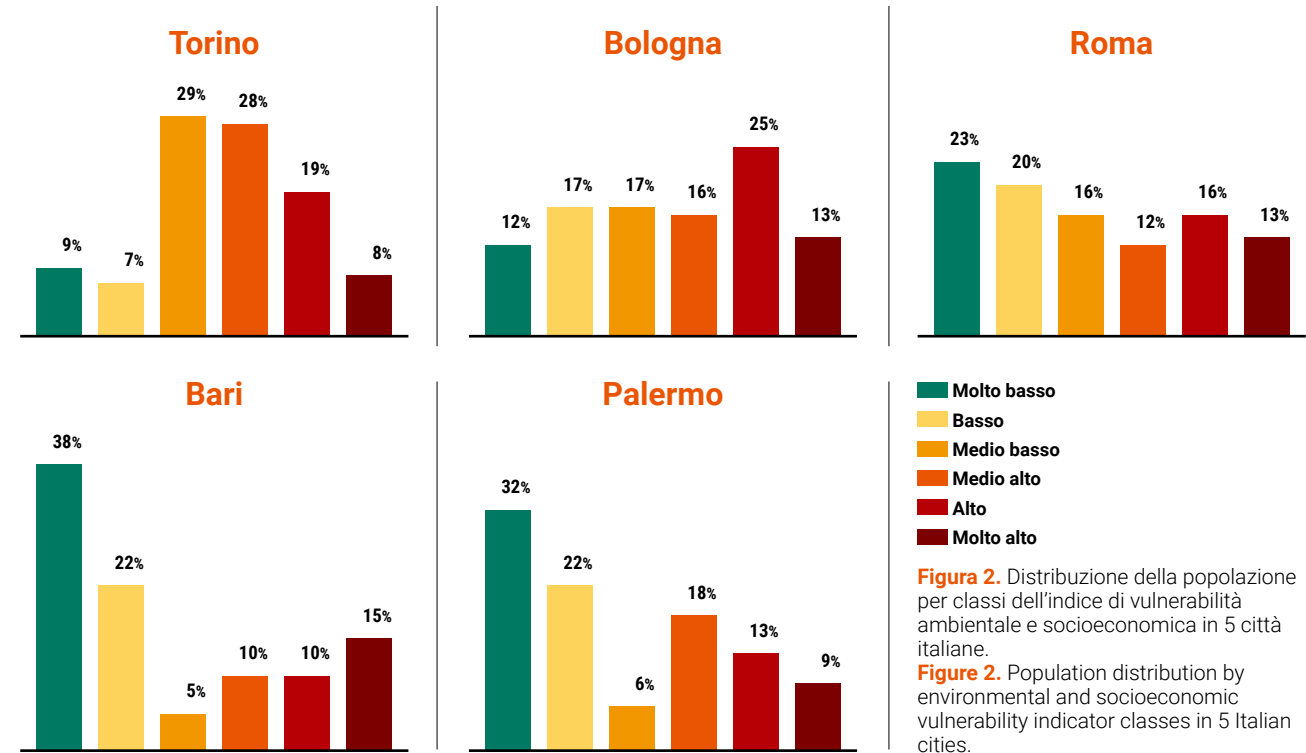
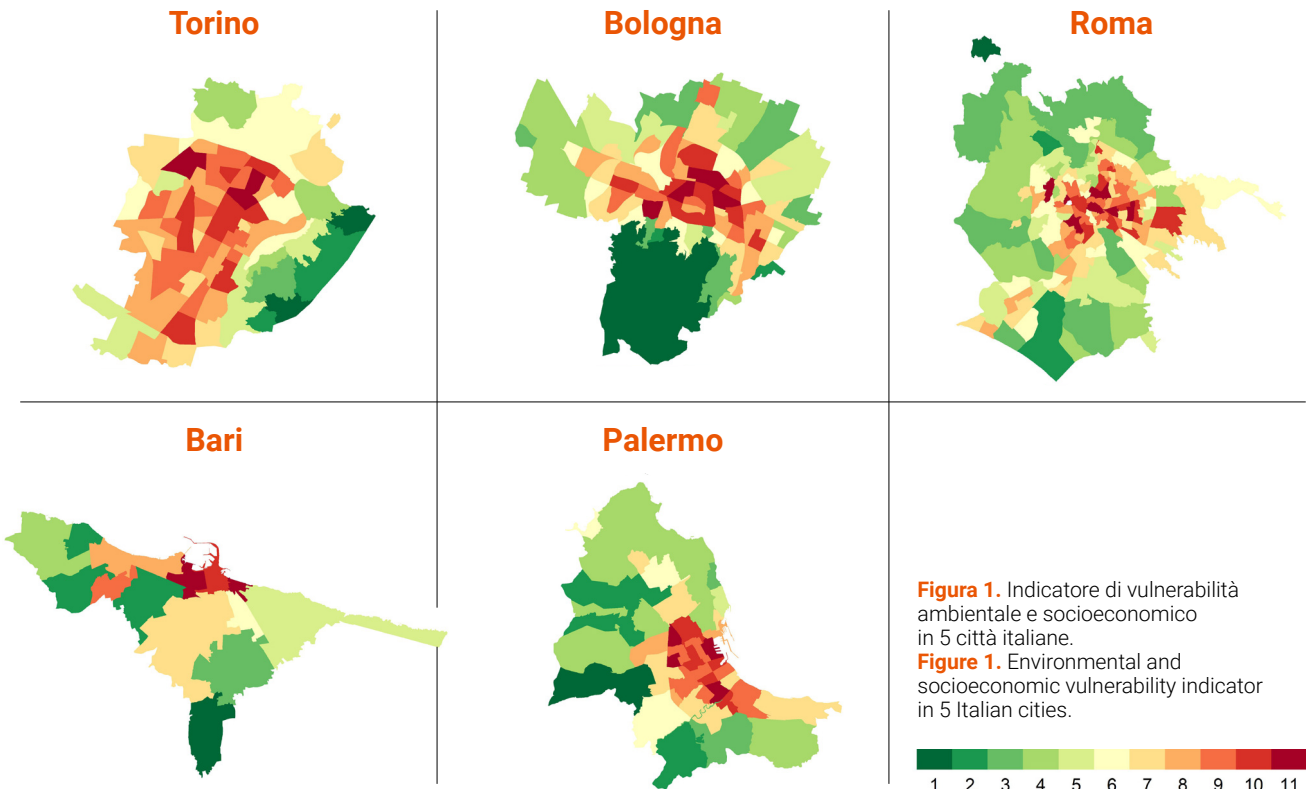
Nella figura 2 viene riportata la distribuzione della popolazione per le 6 classi di indice di vulnerabilità ambientale e socioeconomica (prima classe: livelli da 1 a 6; seconda classe: livello 7; terza classe: livello 8; quarta classe: livello 9, quinta classe: livello 10; sesta classe: livello 11). Le città in studio sono tra loro molto eterogenee e mostrano un differente andamento tra Nord e Sud. A Bologna e Roma si osserva una maggior presenza di popolazione nelle aree con livelli alti e molto alti di vulnerabilità (rispettivamente, il 38% e il 29%).

A Roma la popolazione appare distribuita in modo piuttosto concentrato agli estremi, con una prevalenza di aree con livelli di vulnerabilità sia bassa e molto bassa sia alta e molto alta.

## Conclusioni

Le aree metropolitane sono caratterizzate da un'ampia gamma di zone paesaggistiche diverse, con interazioni complesse con diversi fattori ambientali che caratterizzano l'esposizione ambientale dei residenti con effetti dannosi per la salute umana, come il caldo e l'inquinamento atmosferico, o benefici, come la presenza di verde. Evidenze ormai solide testimoniano gli effetti dell'esposizione a inquinamento atmosferico o a eventi meteorologici estremi (freddo, caldo, nubifragi eccetera) sulla salute dell'uomo, come effetti a breve termine sulla mortalità per cause respiratorie e cardiovascolari o a lungo termine che riguardano effetti tumorali (inquinamento e tumore del polmone) e cardio-respiratori, sia nella popolazione generale sia in specifici gruppi di popolazione più vulnerabili.<sup>22-26</sup> Sono limitate ma crescenti le evidenze sulla salute mentale e cognitiva.<sup>27,28</sup> I bambini sono un sottogruppo particolarmente vulnerabile in termini di incremento dei sintomi respiratori<sup>29,30</sup> e, con evidenze crescenti sulla finestra temporale dei primi 1.000 giorni, a partire dall'esposizione durante la gravidanza, in relazione a problemi cognitivi e comportamentali dei bambini.<sup>31</sup> Sono crescenti, invece, le evidenze che mostrano come la presenza di spazi verdi possa ridurre il rischio di basso peso alla nascita o nascite pretermine,<sup>32-36</sup> l'occorrenza di malattie croniche,<sup>37-40</sup> migliorare la salute mentale<sup>41,42</sup> e il benessere generale<sup>43,44</sup>.

Nel presente lavoro, per ognuna delle città in studio sono state raccolte informazioni su molteplici fattori di rischio ambientali, per esempio la temperatura, gli inquinanti atmosferici, la densità di strade e traffico, la densità della rete ferroviaria e la proporzione di terreno con un'alta densità abitativa; infine, è stato considerato un indicatore sintetico di deprivazione socioeconomica della





popolazione che include diverse caratteristiche come il livello di istruzione, la condizione di disoccupazione, la composizione familiare, la tipologia di abitazione e l'alta densità abitativa. Per ogni fattore di rischio, sono stati selezionati alcuni indicatori che potessero essere più rappresentativi dell'esposizione complessiva. In relazione al dato dell'inquinamento atmosferico, quindi, è stato selezionato il PM<sub>10</sub>, poiché copre una gamma più ampia di particelle, includendo fino a 10 micrometri di diametro. Sebbene il PM<sub>2,5</sub> sia generalmente considerato più rilevante per gli effetti sulla salute a causa della sua capacità di penetrare più profondamente nel sistema respiratorio, il PM<sub>10</sub> fornisce una misura più completa del particolato totale nell'aria, includendo alcune particelle naturali come polvere e pollini.

Nell'analisi spaziale, secondo la prima legge della geografia di Tobler, «ogni cosa è in relazione con ogni altra, ma le cose vicine sono più correlate di quelle lontane». <sup>45</sup> Pertanto, la comprensione della variazione geografica è di chiara importanza per la pianificazione di politiche di mitigazione, senza trascurare considerazioni di “giustizia ambientale”, secondo cui i fattori che esprimono la vulnerabilità ambientale possono associarsi alla vulnerabilità sociale dei contesti urbani e delle famiglie. L'obiettivo di questo lavoro, quindi, è di tentare di riassumere le dimensioni ambientali e socioeconomiche attraverso la costruzione di un indice sintetico in grado di esprimere un livello di vulnerabilità nella città. L'unità di analisi scelta per l'indicatore è stata definita con un valore statistico riconoscibile e un dettaglio adeguato, generalmente un livello intermedio tra l'unità statistica più fine (sezione di censimento) e quella più ampia (come il quartiere). Questo livello di aggregazione è utile anche per riportare le informazioni sulle esposizioni ambientali (caratteristiche del territorio) e quelle derivanti dalla statistica ufficiale (indicatori di deprivazione, dal censimento della popolazione) a una scala geografica analoga. Tutte le caratteristiche territoriali sono state riportate a livello di suddivisione statistica suburbana: questa sintesi ha comportato un'approssimazione, poiché è stato effettuato un *up-scaling* del dato originale.

Le città risultano tra loro molto eterogenee sia per esposizione a fattori ambientali di natura antropica sia per esposizione a caratteristiche ambientali naturali sia per deprivazione socioeconomica. In relazione alla struttura delle correlazioni tra le caratteristiche del territorio e l'indice di deprivazione, si è riscontrata un'eterogeneità sia nella direzione sia nell'intensità, a indicare che le caratteristiche ambientali tendono ad avere associazioni con la vulnerabilità sociale, variabile tra città e per tipologia delle caratteristiche misurate. In termini generali, è possibile osservare la distribuzione dei pesi dell'analisi in componenti principale standard. Si osserva un valore medio dei pesi riferito all'intera area in stu-

dio, dunque non relativo alla struttura specifica dei dati locali di ogni zona urbanistica. Emerge un'eterogeneità sul peso della deprivazione rispetto alle componenti sintetizzate in ciascun indicatore. Mediamente, nel comune di Roma l'indice di deprivazione socioeconomica rappresenta la prima componente, mentre a Bologna e Bari rappresenta la seconda componente, a Palermo la terza e a Torino la quarta componente.

La misura sintetica della vulnerabilità ambientale e socioeconomica è in grado di cogliere non solo l'effetto delle singole esposizioni, ma anche il rischio combinato di tutte le caratteristiche che vi contribuiscono. Inoltre, sintetizza le informazioni sull'eterogeneità spaziale degli indicatori originali; infatti, in quanto dati spaziali, tutti i set di indicatori variano localmente e il loro valore è legato alla posizione geografica nello spazio. Pertanto, la stima di vulnerabilità è ponderata geograficamente e dipende dalle circostanze ambientali locali, poiché ogni area suburbana è correlata con le aree vicine. Inoltre, è uno strumento flessibile che può essere esteso per includere ulteriori esposizioni ambientali.

Nonostante la capacità di fornire informazioni di facile lettura ai decisori politici e sintetizzare diverse esposizioni in un unico indicatore, è bene tener presente alcune criticità dovute soprattutto alla disponibilità di dati. In un'ottica di confrontabilità tra diverse aree geografiche, bisogna disporre di dati di qualità omogenea, altrimenti l'eterogeneità dei dati originali in termini di periodo, risoluzione spaziale e fonte dei dati potrebbe portare a un errore specifico di misurazione di entità difficile da quantificare, soprattutto nell'applicazione dell'indicatore per valutare esiti di salute specifici. Nel presente studio, una possibile criticità deriva dall'utilizzo dei dati sulle aree verdi. Nell'analisi sono stati utilizzati due indicatori di verde (NDVI e aree verdi da fonte comunale) per tener conto dell'eterogeneità nella definizione delle aree verdi disponibili nei comuni. Un limite è la mancanza di informazioni accurate sulle tipologie di aree verdi incluse nella mappatura e sulla effettiva fruibilità e accessibilità da parte della popolazione residente. Un altro limite importante è la mancanza di un dato che possa identificare l'esposizione al rumore urbano. Nonostante il rumore sia riconosciuto come fattore di rischio per la salute, <sup>46</sup> in questo studio non è stato possibile includere tale aspetto nella costruzione dell'indicatore di sintesi a cause della mancanza di una mappatura dettagliata del rumore a livello comunale per tutte le città incluse nell'analisi, disponibile solo su alcune città e basata su specifiche campagne di monitoraggio del rumore da traffico stradale non aggiornate agli ultimi anni, limitando la possibilità di includere questa informazione nell'indicatore composito di vulnerabilità. Quest'aspetto potrà essere considerato negli sviluppi futuri dell'indicatore.

In questa prima fase di sviluppo dell'indicatore di vulnerabilità, come misura dell'inquinamento atmosferico è stato selezionato il  $PM_{10}$ , poiché permette di coprire una gamma più ampia di componenti associate a effetti avversi sulla salute che differiscono anche in base alle fonti locali di emissione prevalenti<sup>47,48</sup>, includendo particelle di carbonio, metalli, IPA e componenti biologiche di grandi dimensioni, come batteri, virus, spore fungine e pollini. Sebbene il  $PM_{2.5}$  sia generalmente considerato più rilevante per gli effetti sulla salute a causa della sua capacità di penetrare più profondamente nel sistema respiratorio, il  $PM_{10}$  può fornire una misura di una gamma più ampia di fonti, sia naturali sia antropiche. Ulteriori sviluppi dell'indicatore potrebbero considerare altre misure dell'inquinamento, come il  $PM_{2.5}$ , per una valutazione più completa della vulnerabilità ambientale legata alla qualità dell'aria e dei potenziali impatti sulla salute.

In un contesto di cambiamenti climatici, cresce il tema della valutazione della vulnerabilità ambientale visto come strumento utile per contribuire a indirizzare politiche che possano congiuntamente portare benefici per la salute pubblica e mitigare il cambiamento climatico, contrastando gli impatti climatici sulla salute.

Nella costruzione di questo indicatore di sintesi, sono stati utilizzati metodi già validati per Roma<sup>49</sup> relativamente alla vulnerabilità ambientale e climatica, che era stata analizzata separatamente dalla componente socioeconomica per mantenere separate e distinte le due dimensioni al fine di valutarne gli effetti combinati sulla salute della popolazione. Nel presente studio, è stato seguito un approccio differente integrando la matrice

socioeconomica tra gli indicatori elementari considerati nell'analisi spaziale multivariata. Un'ulteriore evoluzione dell'indicatore è in fase di sviluppo nell'ambito del nuovo progetto del Piano Nazionale Complementare (PNC) Clima co-benefici di salute ed equità per caratterizzare meglio la componente climatica, in particolare integrando indicatori di rischio idrogeologico e pericolosità di alluvioni e siccità. Verrà considerato, inoltre, l'effetto combinato della vulnerabilità ambientale e climatica in relazione alla deprivazione socioeconomica per meglio stratificare il rischio della popolazione e indirizzare politiche di giustizia ambientale e sociale.

In conclusione, l'indicatore composito sintetizza le caratteristiche complesse e multidimensionali a livello di suddivisioni statistiche territoriali presenti nelle aree urbane, catturando la massima informazione presente nei fenomeni spaziali, ambientali e sociali. L'indicatore è in grado di riassumere la variabilità intraurbana di ciascun indicatore e le correlazioni che si osservano tra i diversi indicatori. La descrizione che ne deriva permette una rappresentazione del territorio ai livelli geografici individuati; la misura sintetica permette, dunque, di integrare l'interpretazione di un gran numero di fattori elementari, fornendo informazioni immediate ed efficaci per sostenere politiche di tutela della salute e di contrasto dei fattori di rischio ambientali e sociali sul territorio.

**Conflitti di interesse dichiarati:** nessuno.

**Finanziamenti:** Ministero della Salute – CCM 2019 "Adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici: interventi urbani per la promozione della salute – Climactions". CUP F85J19001810001

## Bibliografia

- United Nations – Department of Economic and Social Affairs – Population Division. World Population Prospects 2022. Summary of Results. New York, United Nations, 2022. Disponibile all'indirizzo: [https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa/pd/files/wpp2022\\_summary\\_of\\_results.pdf](https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa/pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf)
- United Nations – Department of Economic and Social Affairs – Population Division. World Urbanization Prospects. The 2018 Revision. New York, United Nations, 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf>
- United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Annual Report 2022. Nairobi (Kenya), UN-Habitat, 2023. Disponibile all'indirizzo: [https://unhabitat.org/sites/default/files/2023/06/unhabitat\\_annualreport\\_2022.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2023/06/unhabitat_annualreport_2022.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers, In: Masson-Delmotte VP, Zhai A, Pirani SL et al (eds.). Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) e New York (USA), Cambridge University Press, 2021; pp. 3-32. doi:10.1017/9781009157896.001
- Council of the European Union. Council conclusions on EU Climate Diplomacy: accelerating the implementation of Glasgow outcomes. Brussels, 21.02.2022. Disponibile all'indirizzo: <https://www.consilium.europa.eu/media/54433/st06120-en22.pdf>
- European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. The Road from Paris: assessing the implications of the Paris Agreement and accompanying the proposal for a Council decision on the signing, on behalf of the
- European Union, of the Paris agreement adopted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2016. Disponibile all'indirizzo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52016DC0110>
- Romanello M, Di Napoli C, Drummond P, Green C, Kennard H, Lampard P, Scamman D, Arnell N, Ayeb-Karlsson S, Ford LB, Belesova K et al. The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. Lancet 2022;400(10363):1619-54. doi: 10.1016/S0140-6736(22)01540-9. Erratum in: Lancet, 2022 400(10364):1680. Erratum in: Lancet 2022;400(10365):1766.
- de' Donato FK, Leone M, Stafoggia M, Marino C, Fabrizi R, Michelozzi P. Urban heat island and socio-economic position as factors that increase the risk of heat-related mortality in Rome, Italy. ISEE Conference Abstracts 2011;1. doi: 10.1289/isee.2011.01134
- Yadav N, Rajendra K, Awasthi A, Singh C, Bhushan B. Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. Urban Climate 2023;51:101622. doi:10.1016/j.uclim.2023.101622
- Christen A, Vogt R. Energy and radiation balance of a central European City. Int J Climatol 2004;24(11):1395-421. doi: 10.1002/joc.1074
- World Health Organization, Regional Office for Europe. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention. Copenhagen, WHO, 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/339462/9789289055406-eng.pdf>
- OECD. Health for Everyone? Social Inequalities in Health and Health Systems. OECD Health Policy Studies. Paris, OECD Publishing, 2019. doi: 10.1787/3c8385d0-en

13. Marmot M, Bell R. Fair society, healthy lives. *Public Health* 2012;126 Suppl 1:S4-10. doi: 10.1016/j.puhe.2012.05.014
14. Di Girolamo C, Bartolini L, Caranci N, Moro ML. Socioeconomic inequalities in overall and COVID-19 mortality during the first outbreak peak in Emilia-Romagna Region (Northern Italy). *Epidemiol Prev* 2020;44(5-6) Suppl 2:288-96. doi: 10.19191/EP20.5-6.S2.129
15. Pasetto R, Marsili D, Rosignoli F et al. Promozione della giustizia ambientale nei siti industriali contaminati. *Epidemiol Prev* 2020;44(5-6):417-25. doi: 10.19191/EP20.5-6.A001
16. World Health Organization, Regional Office for Europe. Environmental health inequalities in Europe. Second assessment report. Copenhagen, WHO, 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289054157>. WHO 2019
17. Jarvis A, Reuter HI, Nelson A, Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V4. Tech. rep., International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Disponibile nel CGIAR-CSI SRTM 90m Database all'indirizzo: <https://srtm.csi.cgiar.org>
18. Italian National Institute for Environmental Protection. Uso, copertura e consumo di suolo. Corine Land Cover 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://groupware.sinanet.isprambiente.it/uso-copertura-e-consumo-di-suolo/library/copertura-del-suolo/corine-land-cover> (ultimo accesso: 20.03.2022).
19. Stafoggia M, Schwartz J, Badaloni C et al. Estimation of daily PM10 concentrations in Italy (2006-2012) using finely resolved satellite data, land use variables and meteorology. *Environ Int* 2017;99:234-44. doi: 10.1016/j.envint.2016.11.024
20. Rosano A, Pacelli B, Zengarini N, Costa G, Cislighi C, Caranci N. Aggiornamento e revisione dell'indice di deprivazione italiano 2011 a livello di sezione di censimento. *Epidemiol Prev* 2020;44(2-3):162-70. doi: 10.19191/EP20.2-3.P162.039
21. Harris P, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted principal components analysis. *Int J Geogr Inf Sci* 2011;25(10):1717-36. doi: 10.1080/13658816.2011.554838
22. Achilleos S, Kioumourtoglou MA, Wu CD, Schwartz JD, Koutrakis P, Papatheodorou SI. Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis. *Environ Int* 2017;109:89-100. doi: 10.1016/j.envint.2017.09.010
23. Stieb DM, Zheng C, Salama D et al. Systematic review and meta-analysis of case-crossover and time-series studies of short term outdoor nitrogen dioxide exposure and ischemic heart disease morbidity. *Environ Health* 2020;19(1):47. doi: 10.1186/s12940-020-00601-1. Erratum in: *Environ Health* 2020;19(1):85.
24. Waidyatillake NT, Campbell PT, Vicendese D, Dharmage SC, Curto A, Stevenson M. Particulate matter and premature mortality: A Bayesian meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(14):7655. doi: 10.3390/ijerph18147655
25. Yang L, Zhang H, Zhang X et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: A review. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(4):2177. doi: 10.3390/ijerph18042177
26. Rugel EJ, Brauer M. Quiet, clean, green, and active: A Navigation Guide systematic review of the impacts of spatially correlated urban exposures on a range of physical health outcomes. *Environ Res* 2020;185:109388. doi: 10.1016/j.envres.2020.109388
27. Li D, Zhang Y, Li X, Zhang K, Lu Y, Brown RD. Climatic and meteorological exposure and mental and behavioral health: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ* 2023;892:164435. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164435
28. Bazayr J, Pourvakhshoori N, Khankeh H, Farrokhi M, Delshad V, Rajabi E. A comprehensive evaluation of the association between ambient air pollution and adverse health outcomes of major organ systems: a systematic review with a worldwide approach. *Environ Sci Pollut Res Int* 2019;26(13):12648-61. doi: 10.1007/s11356-019-04874-z
29. Lakhoo DP, Blake HA, Chersich MF, Nakstad B, Kovats S. The Effect of High and Low Ambient Temperature on Infant Health: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2022;19(15):9109. doi: 10.3390/ijerph19159109
30. Zheng XY, Orellano P, Lin HL, Jiang M, Guan WJ. Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2021;150:106435. doi: 10.1016/j.envint.2021.106435
31. Lopuszanska U, Samardakiewicz M. The Relationship Between Air Pollution and Cognitive Functions in Children and Adolescents: A Systematic Review. *Cogn Behav Neurol* 2020;33(3):157-78. doi: 10.1097/WNN.0000000000000235
32. Akaraci S, Feng X, Suesse T, Jalaludin B, Astell-Burt T. A systematic review and meta-analysis of associations between green and blue spaces and birth outcomes. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(8):2949. doi: 10.3390/ijerph17082949
33. Islam MZ, Johnston J, Sly PD. Green space and early childhood development: a systematic review. *Rev Environ Health* 2020;35(2):189-200. doi: 10.1515/reveh-2019-0046
34. Luque-Garcia L, Corrales A, Lertxundi A, Diaz S, Ibarluzea J. Does exposure to greenness improve children's neuropsychological development and mental health? A Navigation Guide systematic review of observational evidence for associations. *Environ Res* 2022;206:112599. doi: 10.1016/j.envres.2021.112599
35. Vanaken GJ, Danckaerts M. Impact of green space exposure on children's and adolescents' mental health: A systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 2018;15(12):2668. doi: 10.3390/ijerph15122668
36. Zhang Y, Zhang Y, van Dijk T, Yang Y. Green place rather than green space as a health determinant: A 20-year scoping review. *Environ Res* 2022;214(Pt 4):113812. doi: 10.1016/j.envres.2022.113812
37. Chen X, Lee C, Huang H. Neighborhood built environment associated with cognition and dementia risk among older adults: A systematic literature review. *Soc Sci Med* 2022;292:114560. doi: 10.1016/j.socscimed.2021.114560
38. Geneshka M, Coventry P, Cruz J, Gilbody S. Relationship between green and blue spaces with mental and physical health: A systematic review of longitudinal observational studies. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(17):9010. doi: 10.3390/ijerph18179010
39. Mmako NJ, Courtney-Pratt H, Marsh P. Green spaces, dementia and a meaningful life in the community: A mixed studies review. *Health Place* 2020;63:102344. doi: 10.1016/j.healthplace.2020.102344
40. van den Bosch M, Ode Sang A. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environ Res* 2017;158:373-84. doi: 10.1016/j.envres.2017.05.040
41. Bonaccorsi G, Milani C, Giorgetti D et al. Impact of Built Environment and Neighborhood on Promoting Mental Health, Well-being, and Social Participation in Older People: an Umbrella Review. *Ann Ig* 2023;35(2):213-39. doi: 10.7416/ai.2022.2534
42. Kabisch N, van den Bosch M, Laforteza R. The health benefits of nature-based solutions to urbanization challenges for children and the elderly – A systematic review. *Environ Res* 2017;159:362-73. doi: 10.1016/j.envres.2017.08.004
43. Bogar S, Beyer KM. Green Space, Violence, and Crime: A Systematic Review. *Trauma Violence Abuse* 2016;17(2):160-71. doi: 10.1177/1524838015576412
44. Nguyen PY, Astell-Burt T, Rahimi-Ardabili H, Feng X. Green space quality and health: A systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(21):11028. doi: 10.3390/ijerph182111028
45. Tobler WR. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Econ Geogr* 1970;46:234-40. doi: 10.2307/143141
46. Arregi A, Vegas O, Lertxundi A et al. Road traffic noise exposure and its impact on health: evidence from animal and human studies-chronic stress, inflammation, and oxidative stress as key components of the complex downstream pathway underlying noise-induced non-auditory health effects. *Environ Sci Pollut Res Int* 2024;31(34):46820-39. doi: 10.1007/s11356-024-33973-9
47. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MAM. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ Geochem Health* 2019;41(3):1131-62. doi: 10.1007/s10653-018-0203-z
48. Yang Y, Pun VC, Sun S, Lin H, Mason TG, Qiu H. Particulate matter components and health: a literature review on exposure assessment. *J Public Health Emerg* 2018;2(3). doi: 10.21037/jphe.2018.03.03
49. Badaloni C, De Sario M, Caranci N et al. A spatial indicator of environmental and climatic vulnerability in Rome. *Environ Int* 2023;176:107970. doi: 10.1016/j.envint.2023.107970