

MITIGAZIONE ED ADATTAMENTO DELLE CITTÀ ALLE
CRISI AMBIENTALI TRA APPROCCI MODELLISTICI ED
ESPERIENZE PARTECIPATIVE
CRISTINA MANGIA, RITA CESARI***

Abstract

This contribution critically explores the concept of *Urbanocene* as a lens to understand the relationship between urbanization and environmental crises, focusing on issues of environmental justice. Adopting an interdisciplinary approach—merging atmospheric modeling with participatory practices—it examines cities as both climate-vulnerable and major emitters. The essay investigates phenomena like air pollution, urban heat islands, and heat waves, emphasizing the need for systemic, context-aware responses. It critiques technocratic solutions and advocates for integrating social inclusion with environmental quality. The goal is to reshape urban policy through justice-driven, co-created strategies for climate sustainability.

Keywords: Urbanocene, Environmental justice, Climate change, Air pollution, Participatory planning

Introduzione

Il concetto di urbanocene offre un quadro critico per leggere l'intreccio tra urbanizzazione e crisi ambientali. Le città, che oggi ospitano la gran parte della popolazione mondiale, non sono solo centri di produzione e consumo, ma anche i luoghi in cui si concentrano i maggiori impatti ambientali e le più evidenti disuguaglianze sociali. Questo le rende al tempo stesso vulnerabili agli effetti del cambiamento climatico e potenzialmente strategiche nella costruzione di scenari di adattamento e mitigazione sostenibili¹. Dalla

*Ricercatrice al CNR, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima di Lecce.

**Ricercatrice al CNR, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima di Lecce.

¹ IPCC, Climate Change 2023a: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H. Lee, J. Romero (eds.), IPCC, Geneva 2023a; IPCC, Climate Change 2023b: Summary for Policy Makers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H. Lee, J. Romero (eds.), IPCC, Geneva 2023b; C40 Cities, C40 cities: an introduction, <http://www.c40cities.org/> (accessed 30 June 2025).

prospettiva della ricerca atmosferica in cui ci muoviamo, l'urbanocene impone di affrontare simultaneamente due grandi temi: il primo è la valutazione degli impatti di alcuni fenomeni ambientali che investono il contesto urbano, inquinamento atmosferico, isola di calore, ondate di calore, alluvioni etc, l'altro focalizzato sull'individuazione di strategie e soluzioni capaci non solo di ridurre i rischi, ma di migliorare la qualità della vita urbana in un'ottica di giustizia ambientale. In questo contesto, la crisi climatica non rappresenta semplicemente un'emergenza in più da affrontare, ma un fattore che aggrava e accelera le criticità ambientali già presenti nelle città. Così l'aumento delle temperature medie globali sta rendendo sempre più frequenti e intensi gli eventi meteorologici estremi, come ad esempio le ondate di calore, che a loro volta accentuano l'effetto isola di calore urbana². Parallelamente, il cambiamento climatico sta alterando circolazioni atmosferiche con una tendenza all'aumento di condizioni di stagnazione atmosferica e conseguente accumulo di inquinanti con conseguenze dirette sulla salute pubblica³. Inoltre, variazioni climatiche come aumento di temperatura, persistente alta pressione, aria stagnante favoriscono la reattività fotochimica e la concentrazione di inquinanti secondari come ozono e particolato fine. A questo si aggiunge che le modifiche ai regimi di precipitazione a livello locale possono influire sulla rimozione degli inquinanti. Le città, però, non sono soltanto esposte agli effetti di questi cambiamenti: sono anche tra i principali responsabili delle emissioni climalteranti. Trasporti, riscaldamento, attività produttive e consumi energetici contribuiscono significativamente alle emissioni responsabili del

²IPCC, Climate Change 2023a: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H. Lee, J. Romero (eds.), IPCC, Geneva 2023a; IPCC, Climate Change 2023b: Summary for Policy Makers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H. Lee, J. Romero (eds.), IPCC, Geneva 2023b; Predrag Ignjačević, Wouter Botzen, Francisco Estrada, Hein Daanen, Veronica Lupi, Climate-induced mortality projections in Europe: Estimation and valuation of heat-related deaths, "International Journal of Disaster Risk Reduction", 2024, 111, pp. 104692; V. Alfano, F. Serini, A. Scaletti, *Addressing heatwave impacts on hospital admissions in an Italian region*, "Scientific Reports", 2024, 14(1), pp. 27994.

³D. E. Horton, N. S. Diffenbaugh, *Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing*, in Environmental Research Letters, 2012, 7, pp. 044034.

cambiamento climatico — emissioni che, a loro volta, tendono a intensificarsi proprio a causa degli effetti della crisi climatica⁴.

Pur sviluppandosi su scale spazio-temporali differenti, l'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici condividono cause comuni e producono effetti negativi rilevanti sugli ecosistemi e sulla salute. Entrambi sollevano importanti questioni di giustizia ambientale: le comunità con livelli socio-economici più bassi tendono a concentrarsi nelle aree maggiormente inquinate, mentre le persone più vulnerabili agli impatti ambientali sono spesso quelle con minori risorse e condizioni di salute già compromesse⁵. Inoltre, i fenomeni attraverso cui si manifestano sono profondamente interconnessi da relazioni non lineari, rendendo difficile affrontare singolarmente ciascun aspetto o proporre soluzioni isolate. Ad esempio, l'incremento di superfici verdi per ridurre l'effetto isola di calore e l'aumento delle ondate di calore può richiedere risorse idriche in contesti già stressati, o comportare effetti sociali inattesi come la cosiddetta gentrificazione verde o ancora l'incremento di fenomeni di inquinamento fotochimico. Le soluzioni tecnologiche, presentate talvolta come “neutre” e “razionali”, oltre a produrre effetti indesiderati rischiano di generare conflitti tra diverse prospettive, valori, priorità e interessi a scala locale, soprattutto quando non tengono conto del contesto socio-territoriale o quando escludono i soggetti più vulnerabili dai processi decisionali. In queste situazioni, l'esito più comune che può verificarsi è la non-gestione del problema, con una procrastinazione decisionale che perpetua il rischio. Obiettivo di questo contributo è, a partire dalla nostra esperienza, esplorare la possibilità di adottare approcci capaci di abbracciare la complessità ambientale e sociale, integrando strumenti di modellistica atmosferica e processi partecipativi. Elementi che possono

⁴ C. Mangia, P. Ielpo, R. Cesari, M. C. Facchini, *Crisi climatica e inquinamento atmosferico*, in Ithaca: Viaggio nella Scienza, 2020, 15, pp. 57–68.

⁵ Cfr. A. Hajat, C. Hsia, M.S. O'Neill, *Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review*, in Current Environmental Health Reports, 2014, 2, pp. 440; M. Armiero, *Introduzione*, in Joan Martinez Alier, *Ecologia dei poveri*, Jaca Book, Milano 2009; Cfr. R. Pasetto et al., *Environmental justice in the epidemiological surveillance system of residents in Italian National Priority Contaminated Sites* (SENTIERI Project), in Epidemiologia & Prevenzione, 2017, 41(2), pp. 134; Cfr. C. Mangia, M. Cervino, M. Portaluri, E.A.L. Gianicolo, *Ridurre l'inquinamento e le disuguaglianze sociali migliora la salute globale*, in Riflessioni Sistemiche, 2017, 17, http://www.aiems.eu/files/mangia_-_n_17.pdf (accessed 30 June 2025), pp. 207–220.

rappresentare leve fondamentali per immaginare e costruire città orientate alla giustizia ambientale.

La complessità dei fenomeni ambientali tra dati e modelli

Un corretto approccio ai fenomeni ambientali è quello fornito dal paradigma della complessità: i fenomeni ambientali sono sistemi caratterizzati da un elevato numero di componenti interagenti tra loro, spesso in maniera non lineare. Questo vuol dire che il comportamento di un sistema complesso non può essere determinato analizzando separatamente i comportamenti dei singoli sottosistemi e sommandoli, ma tenendo conto delle reciproche interazioni non lineari tra le parti. La variazione di una singola componente può avere sull'intero sistema delle conseguenze molto diverse tra loro, a seconda dello stato di tutte le altre componenti e delle loro reciproche interazioni. Inoltre, i sistemi complessi possono anche essere caotici, cioè caratterizzati dal fatto che piccole variazioni nelle loro condizioni iniziali producono grandi differenze in istanti successivi.

L'atmosfera terrestre, il clima e i diversi ecosistemi sono tutti sistemi dinamici caratterizzati da un elevato numero di componenti interagenti in maniera non lineare. La crisi climatica globale, l'aumento della frequenza di eventi estremi, la perdita della biodiversità e l'instabilità di interi ecosistemi sono espressione di questa complessità ambientale. All'interno di questo quadro, le città non possono che essere studiate come un sistema complesso, in quanto comprendono al loro interno componenti materiali (infrastrutture, edifici, reti tecnologiche) e immateriali (relazioni sociali, processi economici, flussi informativi) che interagiscono tra loro e con l'ambiente circostante in modo non lineare e dinamico.

L'interdipendenza tra i sistemi naturali rende necessario lo studio di fenomeni urbani attraverso modelli in grado di integrare molteplici variabili e livelli di analisi. I modelli numerici, infatti, costituiscono uno strumento estremamente utile per analizzare sia il comportamento di ciascun componente del sistema, sia le interazioni reciproche tra essi⁶. Nel campo dell'inquinamento atmosferico, il sistema di reazioni chimiche che regola la formazione dell'ozono troposferico rappresenta un classico esempio di

⁶R. Cesari, T. C. Landi, M. D'Isidoro, M. Mircea, F. Russo, P. Malguzzi, F. Tampieri, A. Maurizi, *The on-line integrated mesoscale chemistry model BOLCHEM*, 2021, Atmosphere 12(2),192.

sistema complesso e non lineare. In questi sistemi, anche piccole variazioni nelle emissioni possono generare effetti contrari, a seconda del contesto chimico e geografico dell'area considerata.

L'ozono troposferico (O_3) è un inquinante secondario: non viene emesso direttamente in atmosfera, ma si forma attraverso una serie di reazioni fotochimiche che coinvolgono vari precursori. Tra i principali vi sono gli ossidi di azoto (NO_x), prodotti prevalentemente da processi di combustione come traffico veicolare e attività industriali, e i composti organici volatili (VOC), che possono avere sia un'origine antropica che un'origine naturale, come nel caso dei VOC biogenici (BVOC) emessi dalla vegetazione. Essendo il sistema ozono-precursori un sistema non lineare, la riduzione di uno dei precursori a livello locale può portare ad aumento locale di ozono e viceversa. È quello che succede, ad esempio, negli ambienti urbani nel fine settimana, dove la riduzione del traffico porta ad una diminuzione delle emissioni di NO_x , ma un aumento delle concentrazioni di ozono⁷. Un fenomeno simile si può osservare nelle aree portuale, dove un aumento di ossidi di azoto dovuto ad emissioni navali può causare una diminuzione locale della concentrazione di ozono⁸. Così come spesso si osserva che elevate concentrazioni di ozono non si riscontrano nelle zone con alti livelli di ossidi di azoto, ma in aree rurali ad elevata presenza di composti organici volatili biogenici: in queste aree ridurre gli ossidi di azoto può essere efficace per abbassare l'ozono⁹. Per questo motivo, l'interazione tra vegetazione e qualità dell'aria non può essere considerata in modo lineare o uniforme. La produzione di BVOC dipende da diversi fattori, tra cui la specie vegetale, il tipo di ecosistema e le condizioni ambientali (come temperatura, radiazione solare e umidità del suolo). Questi aspetti sono molto importanti nel momento in cui, ad esempio, si pianifica l'inserimento di nuova vegetazione in città: specie a forte emissione di BVOC possono determinare un aumento dei valori di concentrazione di ozono. La

⁷I. Schipa, A. Tanzarella, C. Mangia, *Differences between weekend and weekday ozone levels over rural and urban sites in Southern Italy*, Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 156, pp. 509.

⁸R. Cesari, T. Christian Landi, M. D'Isidoro, M. Mircea, F. Russo, P. Malguzzi, F. Tampieri, A. Maurizi, *The on-line integrated mesoscale chemistry model BOLCHEM*, 2021, Atmosphere 12(2), 192.

⁹Cfr. C. Mangia, D. Conte, G.P. Marra, M. Miglietta, I. Schipa, A. Tanzarella, U. Rizza, *A numerical study of the effect of the Sea Breeze circulations on photochemical pollution over a highly industrialized area*, Meteorological Applications, 2010, 17, pp. 19–31.

vegetazione va, quindi, scelta anche in funzione della quantità di BVOC che emette e delle condizioni idriche del territorio.

In questo contesto, uno strumento fondamentale per comprendere tali interazioni è rappresentato dai modelli numerici di qualità dell'aria (Fig. 1) che integrando dati di emissioni, caratteristiche geografiche e simulando il trasporto, la dispersione e la trasformazione degli inquinanti, consentono di ricostruire e prevedere la distribuzione degli inquinanti sia nello spazio sia nel tempo in una determinata area. Sono, pertanto, uno strumento strategico per riprodurre le condizioni atmosferiche attuali, prevedere l'evoluzione futura e analizzare scenari alternativi, offrendo così una base scientifica per le decisioni ambientali e sanitarie. In questa prospettiva si colloca ad es. il progetto UISH (Urban Intelligence Science Hub For City Network)¹⁰ finanziato dal Programma Operativo Complementare Città Metropolitane 2014-2020, e caso pilota del Centro Interdipartimentale Scienza della Città (CISC) del CNR (CISC, 2024).

La scelta del modello più adatto dipende da numerosi fattori, strettamente legati alla natura del problema da affrontare. Un criterio fondamentale riguarda la scala spaziale, ovvero l'estensione del dominio su cui si vuole simulare la qualità dell'aria. Nelle applicazioni all'ambiente urbano, i modelli possono lavorare fondamentalmente su due scale spaziali. La *Microscala* (100 m – 1 km) è utilizzata per simulazioni molto dettagliate, tipiche di contesti urbani complessi. È adatta, ad esempio, per studiare l'impatto del traffico su un singolo incrocio o l'effetto della vegetazione in una strada o in una piazza. La *Scala locale* (10 – 100 km) è più adatta alla simulazione di aree metropolitane o distretti industriali, dove è necessario cogliere interazioni tra più sorgenti e condizioni atmosferiche variabili.

A seconda della risoluzione spaziale, della scala temporale e degli obiettivi specifici dell'analisi, i modelli numerici per la qualità dell'aria risolvono esplicitamente alcune equazioni, mentre per processi che avvengono a scale inferiori rispetto alla griglia di calcolo, utilizzano delle parametrizzazioni, ovvero rappresentazioni semplificate basate su relazioni empiriche o teoriche. Tra i vari processi che vengono parametrizzati in un modello, ricordiamo i moti turbolenti, per il ruolo chiave che svolgono nella dispersione degli inquinanti nello strato limite atmosferico. Tali moti avvengono su scale che molto spesso non possono essere risolte

10

esplicitamente nella maggior parte dei modelli e quindi si ricorre molto a parametrizzazioni della turbolenza. Oltre alla tipologia di modello, ed alle parametrizzazioni utilizzate, fondamentale importanza rivestono gli input, il cui dettaglio dipende fondamentalmente dalla risoluzione spaziale del modello e dalla disponibilità dei dati. Si distinguono 3 tipologie di input: input statico come topografia, edifici, strade, acqua, uso del suolo, vegetazione; input dinamico come variabili meteorologiche come vento, temperatura, umidità, temperatura del suolo; input emissivo come tipologia di sorgente (puntuale, lineare, o areale), composizione chimica delle sorgenti, distribuzione spaziale e temporale dei flussi di emissione.

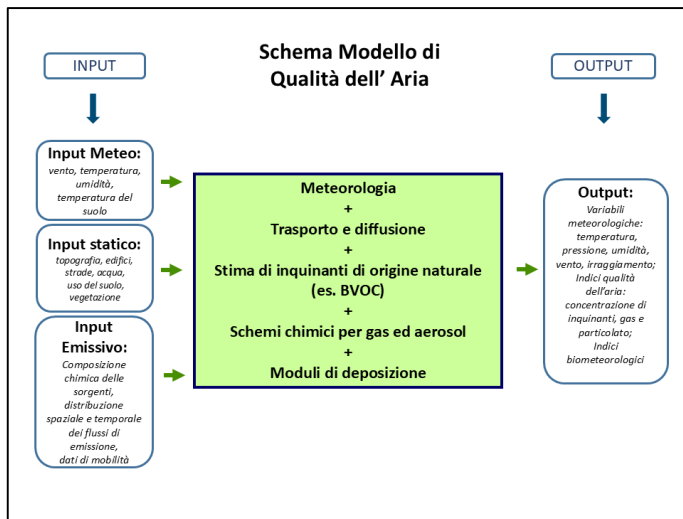


Fig. 1: Rappresentazione schematica di un modello di qualità dell'aria

Nel contesto della ricerca a supporto delle decisioni politiche, l'uso di stime quantitative e modelli matematici di previsione comporta il confrontarsi con diversi tipi di incertezza: incertezza nei dati, nei modelli e nella completezza delle informazioni. La prima riguarda l'incompletezza o scarsa affidabilità dei dati disponibili, che compromette la qualità degli input utilizzati nei modelli previsionali. L'incertezza nei modelli, invece, deriva sia dalle semplificazioni matematiche impiegate per rappresentare i processi reali, sia da una comprensione ancora parziale dei fenomeni su cui tali modelli si basano. Infine, l'incertezza di completezza è legata a ciò che ancora non si

conosce: può riguardare aspetti inesplorati di determinati fenomeni oppure connessioni tra processi che non sono stati considerati¹¹.

A questi elementi si aggiunge la complessità dell'interazione tra l'ambiente fisico e i comportamenti umani, un intreccio dinamico e difficilmente prevedibile in cui ciascuno influisce sull'altro in modo anche questo non lineare.

.Le Nature Based Solutions

Tra le diverse strategie di adattamento alla crisi climatica in ambiente urbano sta assumendo un ruolo rilevante la vegetazione. Mentre a partire dagli ultimi anni del secolo scorso, nelle città si è investito molto sullo sviluppo di tecnologie digitali ed informatizzazione, riduzione delle emissioni, risoluzione di problemi quali il traffico ed il consumo energetico, ora maggior importanza viene data ad aspetti di sostenibilità ambientale e inclusione sociale. In tale contesto, le *Nature Based Solutions*, ovvero la vegetazione come strumento per affrontare le sfide ambientali e urbane, vengono sempre più utilizzate. La vegetazione nelle città, come ad esempio parchi e foreste urbane, o viali alberati, apporta benefici psico-fisici per la salute e il benessere dei cittadini. Un parco in una città, in quanto luogo d'incontro, è un'infrastruttura relazionale che favorisce relazioni sociali, attiva legami, rafforza il tessuto comunitario promuovendo un senso di fiducia e di appartenenza comune. Dal punto di vista del microclima urbano, la vegetazione riduce l'effetto "isola di calore", assorbe la CO₂ atmosferica, facilita la rimozione di inquinanti tramite deposizione sulle superfici fogliari. Incrementa la biodiversità urbana, permette una migliore gestione delle acque piovane e previene l'erosione del suolo. Accanto a questi aspetti positivi, si possono però verificare anche degli effetti negativi, come l'emissione di allergeni da parte di alcune specie vegetali, e l'emissione di composti organici che in determinate condizioni possono favorire la formazione di ozono e particolato di origine secondaria. La vegetazione infatti emette BVOC, prevalentemente isoprene e monoterpeni, con tassi di emissione che variano notevolmente tra le specie, e dipendono sia da caratteristiche genetiche della pianta (famiglia e genere), sia da fattori ambientali, quale radiazione

¹¹ Cfr. S. O. Funtowicz, J. R. Ravetz, *Post-Normal Science*, in *International Society for Ecological Economics* (ed.), *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*, 2003 <http://isecoeco.org/pdf/pstnormsc.pdf> (accessed 30 June 2025).

fotosinteticamente attiva, temperatura, umidità, disponibilità di CO₂. La selezione accurata delle specie vegetali è quindi essenziale per massimizzare l'assorbimento degli inquinanti atmosferici e limitare al minimo la formazione di ozono. Molta letteratura scientifica recente si è concentrata sull'analisi dei diversi composti organici volatili emessi da singole specie vegetali in base anche al loro potenziale di formazione dell'ozono. Uno studio condotto a Roma ha evidenziato come le emissioni di composti organici volatili biogenici, come terpeni e isoprene, varino sensibilmente in base alla specie arborea considerata: *Quercus ilex* e *Pinus pinea* sono risultate tra le principali fonti di monoterpeni, mentre *Platanus hybrida* presenta emissioni intermedie di isoprene. Queste emissioni tendono a raggiungere i valori più alti durante l'estate, quando radiazione solare e temperature elevate favoriscono i processi fotochimici. Questo fenomeno si osserva anche in specie sempreverdi, come *Q. ilex* e *P. pinea*, che continuano a emettere composti anche nei mesi più caldi, contribuendo così alla formazione di ozono troposferico, specialmente in condizioni di ondate di calore e scarsa ventilazione¹². Uno studio modellistico condotto a Berlino ha evidenziato come la sostituzione degli alberi urbani con specie ad alta emissione di isoprene, come *Robinia pseudoacacia*, *Quercus robur* e *Populus* spp., possa aumentare le concentrazioni di ozono e PM₁₀. Al contrario, specie come *Fagus sylvatica* e *Magnolia grandiflora*, che emettono principalmente monoterpeni, erano in grado di ridurre l'ozono, anche se la magnolia favoriva la formazione di aerosol organico secondario, contribuendo così all'aumento di particolato atmosferico¹³. In un lavoro analogo condotto da Cesari et al.¹⁴ (2021), invece, è stato simulato l'impatto delle emissioni di BVOC provenienti da un parco ipotetico di *Quercus ilex* L. nella città di Lecce,

¹² Cfr. C. Calfapietra, S. Fares, F. Manes, A. Morani, G. Sgrigna e F. R. Loreto, *Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review.*, 2013, *Environmental Pollution* 183, pp 71-80.

¹³ Cfr. B. Bonn, E. von Schneidmesser, T. Butler, G. Churkina, C. Ehlers, R. Grote, D. Klemp, R. Nothard, K. Schäfer, A. von Stülpnagel, A. Kerschbaumer, R. Yousefpour, C. Fountoukis, M. G. Lawrence, *Impact of vegetative emissions on urban ozone and biogenic secondary organic aerosol: Box model study for Berlin, Germany*, 2018, *Journal of Cleaner Production* 176, pp 827-841

¹⁴ Cfr. R. Cesari, T. C. Landi, M. D'Isidoro, M. Mircea, F. Russo, P. Malguzzi, F. Tampieri, A. Maurizi, *The on-line integrated mesoscale chemistry model BOLCHEM*, 2021, *Atmosphere* 12(2),192

durante un periodo estivo. I risultati hanno mostrato un incremento della concentrazione di ozono al suolo nelle ore centrali della giornata, a causa dell'attività emissiva della vegetazione. Un contributo rilevante verso un approccio integrato tra benefici termici e qualità dell'aria è dato dallo studio di Simon et al.¹⁵ (2019). Lo studio, condotto a Mainz (Germania), esplora come la struttura urbana, la temperatura delle foglie e la vicinanza a fonti di ossidi di azoto influenzino la formazione dell'ozono. In giornate calde e poco ventilate, specie arboree come *Quercus*, *Populus alba* e *Platanus acerifolia* possono contribuire in modo significativo all'aumento dell'ozono. Dai risultati emerge come le emissioni di isoprene siano più strettamente correlate alla temperatura fogliare che alla radiazione fotosinteticamente attiva, sottolineando l'importanza di considerare sia le caratteristiche fisiologiche delle specie sia il contesto urbano in cui vengono inserite.

La progettazione urbana, dunque, non può prescindere da una visione sistemica. Elementi come la geometria degli edifici, il disegno degli spazi verdi, le condizioni microclimatiche e la scelta delle specie vegetali devono essere integrati per garantire un impatto positivo sulla qualità dell'aria. È altrettanto importante accompagnare queste scelte con politiche efficaci in materia di regolamentazione delle emissioni e mobilità sostenibile, per assicurare un reale beneficio per il benessere degli abitanti.

Un esempio concreto di questo approccio di insieme è rappresentato dal progetto VEG-GAP (*Vegetation for Urban Green Air Quality Plans*), finanziato dal programma Life nel 2018. Il progetto ha valutato il doppio ruolo della vegetazione urbana – come risorsa ambientale e come potenziale fonte di inquinamento – in tre città europee: Bologna, Madrid e Milano. Le simulazioni hanno mostrato come la vegetazione urbana contribuisca generalmente a migliorare il microclima, riducendo la temperatura e aumentando l'umidità. Tuttavia, lo studio mostra come l'effetto della vegetazione sia differente nelle diverse città e nei diversi periodi dell'anno. In generale si è osservata una diminuzione della concentrazione di Ozono nelle città in cui è presente una maggiore vegetazione, in particolar modo a Madrid. Nella città di Milano gli effetti sono positivi solo nel periodo estivo, ma in misura inferiore rispetto a Madrid, mentre a Bologna la vegetazione diminuisce le concentrazioni di ozono solo in alcune zone, nel mese di luglio.

¹⁵Cfr. H. Simon, J. Fallmann, T. Kropp, H. Tost, M. Bruse, *Urban Trees and Their Impact on Local Ozone Concentration—A Microclimate Modeling Study*, 2019, *Atmosphere*, 10, 154.

Nei mesi invernali nelle città di due città italiane, la diminuzione della velocità del vento, dovuta alla presenza di vegetazione e le condizioni atmosferiche stagnanti che caratterizzano la Pianura Padana, favorisce una minore dispersione degli inquinanti precursori con conseguente maggiore formazione di ozono¹⁶. Tutti questi studi mostrano chiaramente come la vegetazione urbana non possa essere interpretata in modo semplicistico né considerata esclusivamente come una soluzione ai problemi ambientali. Al contrario, essa rappresenta un elemento complesso del sistema urbano, il cui impatto sulla qualità dell'aria dipende da molteplici variabili, tra cui la specie vegetale scelta, il contesto microclimatico, le condizioni meteorologiche, le caratteristiche morfologiche della città e la presenza di inquinanti atmosferici. A questo si aggiunge che la vegetazione stessa può essere vulnerabile agli inquinanti atmosferici¹⁷: l'esposizione prolungata a concentrazioni elevate di ozono, biossido di azoto o particolato fine può danneggiare i tessuti fogliari, alterare i processi fisiologici delle piante e ridurre la capacità di assorbire CO₂, trattenere polveri o mitigare le temperature. In questo quadro complesso, i modelli numerici rappresentano uno strumento fondamentale per supportare l'analisi e la pianificazione del verde urbano, in quanto permettono di simulare le interazioni tra vegetazione, atmosfera e inquinanti, valutando gli effetti di differenti scenari di gestione sul medio e lungo periodo.

Le soluzioni che generano conflitti: quale scienza al confine con la politica e la società?

Nel campo della mitigazione e dell'adattamento alle crisi ambientali urbane, la linea di confine tra scienza e politica si fa sempre più sfumata. Le città

¹⁶Cfr. M. D'Isidoro, M. Mircea, R. Borge, S. Finardi, D. de la Paz, G. Briganti, F. Russo, G. Cremona, M. G. Villani, M. Adani, G. Righini, L. Vitali, M. Stracquadanio, R. Prandi, G. Carlino, *The Role of Vegetation on Urban Atmosphere of Three European Cities—Part 1: Evaluation of Vegetation Impact on Meteorological Conditions*, 2023, *Forests*, 14, 1235; M. Mircea, R. Borge, S. Finardi, G. Briganti, F. Russo, D. de la Paz, M. D'Isidoro, G. Cremona, M. G. Villani, A. Cappelletti, M. Adani, I. D'Elia, A. Piersanti, B. Sorrentino, E. Petralia, J. M. de Andrés, A. Narros, C. Silibello, N. Pepe, R. Prandi, G. Carlino, *The Role of Vegetation on Urban Atmosphere of Three European Cities. Part 2: Evaluation of Vegetation Impact on Air Pollutant Concentrations and Depositions*, 2023, *Forests*, 14, 1255.

¹⁷Cfr. A. Roy, M. Mandala, S. Dasa, R. Popekb, R. Rakw, G. Kumar Agrawald, A. Awasthie, A. Sarkar, *The cellular consequences of particulate matter pollutants in plants: Safeguarding the harmonious integration of structure and function*, "Science of the Total Environment", 2024, 914, 169763.

rappresentano contesti complessi non solo per le loro caratteristiche fisiche, ma anche perché il sapere scientifico non si traduce automaticamente in decisioni operative, né le soluzioni tecniche possono essere considerate neutrali. Ogni proposta di intervento – che si tratti di ridurre l'inquinamento atmosferico attraverso nuove normative, installare infrastrutture verdi o adottare modelli per orientare la pianificazione urbana – si confronta con una pluralità di attori, interessi e valori spesso divergenti. La complessità dei fenomeni ambientali urbani è, infatti, amplificata dalle dinamiche sociali e politiche. In questo contesto, i conflitti emergono non solo rispetto alle priorità da adottare, ma anche rispetto alle modalità con cui i problemi vengono definiti, misurati e affrontati. Non esistono soluzioni “tecnicamente oggettive” scollegate dai contesti: ogni scelta tecnica implica conseguenze etiche, sociali ed economiche. Ridurre la mobilità privata, ad esempio, può migliorare la qualità dell'aria ma penalizzare alcune categorie sociali. Realizzare piste ciclabili può ridurre la disponibilità di parcheggi, generando tensioni con i residenti. Allo stesso modo, ampliare il verde urbano è spesso auspicabile dal punto di vista ambientale, ma può avere ripercussioni sull'uso del suolo urbano, attivando dinamiche di competizione e contribuendo, in alcuni casi, a processi di gentrificazione. D'altra parte, la riduzione degli spazi verdi pubblici per favorire interessi commerciali può trasmettere messaggi ambigui, minando la coerenza delle politiche urbane orientate alla sostenibilità. Anche le metodologie scientifiche possono diventare oggetto di contestazione, soprattutto quando entrano in contrasto con percezioni locali, saperi esperienziali o istanze di giustizia sociale. Tutto ciò impone un ripensamento del ruolo del sapere tecnico-scientifico nella società, in particolare quando è chiamata a supportare decisioni in condizioni di elevata incertezza e forte rilevanza sociale.

La scienza post-normale

I contesti che riguardano l'ambiente e la salute sono attraversati frequentemente da conflitti tra esperti della stessa disciplina, tra specialisti di campi diversi, tra comunità scientifica e società civile, o tra scienza e decisione politica. Questi attriti possono tradursi nell'incapacità di fornire risposte tecniche adeguate, in un crescente scetticismo verso la scienza e le istituzioni, e nell'acutizzarsi di tensioni territoriali. È in questo scenario che si inserisce la proposta della scienza post-normale, formulata da Silvio

Funtowicz e Jerome Ravetz nei primi anni '90¹⁸. Tale approccio sollecita una rilettura critica del ruolo della scienza quando questa si confronta con ambiti in cui le decisioni sono urgenti, i valori sono oggetto di controversia, i rischi elevati e i dati disponibili incerti. Il termine post-normale segnala il superamento di due accezioni di “normalità”. La prima è rispetto alla definizione di scienza “normale” descritta da Thomas Kuhn¹⁹, in cui le attività scientifiche “normali” o “soluzioni di rompicapi” sono svolte all'interno di paradigmi accettati dalla comunità scientifica di riferimento, e nella netta distinzione tra “fatti scientifici” e “valori”. La seconda, riferita all'idea di un rapporto lineare e unidirezionale tra scienza e politica, in cui si presume che gli scienziati forniscano conoscenze oggettive e neutre al servizio delle decisioni politiche²⁰. La scienza post-normale si propone come una cornice epistemica più adatta ad affrontare problemi complessi al confine tra conoscenza e governance, focalizzandosi su aspetti solitamente trascurati dalla scienza “normale”: l'incertezza, la pluralità di valori e la legittimità di punti di vista differenti. Secondo gli autori, i metodi classici della scienza producono risultati efficaci finché i livelli di incertezza sono contenuti e gli interessi in gioco sono limitati. In tali casi, modelli semplificati, sperimentazioni controllate e logiche di falsificazione garantiscono avanzamenti reali. Tuttavia, quando si entra nei campi dell'ambiente e della salute, queste condizioni spesso vengono meno. Ci si confronta con processi ecologici e umani complessi, sistemi dinamici imprevedibili, e scelte che influenzano direttamente la biosfera, amplificando l'incertezza. Le crisi ambientali urbane rappresentano un esempio paradigmatico di contesto “post-normale”, in cui fattori climatici, ambientali, sociali ed economici si intrecciano e si influenzano reciprocamente, rendendo inefficaci approcci puramente tecnici o l'applicazione isolata di modelli numerici, anche avanzati. In queste situazioni, la scienza non può più essere concepita come una voce neutra e distaccata: le scelte su cosa misurare, come modellare e

¹⁸Cfr. S. O. Funtowicz, J. R. Ravetz, *Post-Normal Science*, in International Society for Ecological Economics (ed.), *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*, 2003 <http://isecoeco.org/pdf/pstnormsc.pdf> (accessed 30 June 2025).

¹⁹ T. Kuhn, (1962), *The structure of scientific revolutions*, University of Chicago press. Original edition.

²⁰ Cfr. S. O. Funtowicz, J. R. Ravetz, *op.cit.*

quali dati selezionare sono già scelte politiche, cariche di valori e di visioni del mondo²¹.

La proposta epistemologica della scienza post-normale consiste, allora, in un ampliamento dei soggetti legittimati a contribuire alla definizione e alla soluzione di un problema tecnico-scientifico sin dalle fasi iniziali: dalla formulazione delle domande di ricerca, alle metodologie di lavoro, fino alla raccolta delle informazioni rilevanti. Questo vuol dire che ad elaborare risposte o soluzioni ad un problema dovrebbe esserci una “comunità estesa di pari” che includa, accanto agli esperti istituzionali, scienziati e scienziate portatrici di prospettive minoritarie, persone esperte di altri settori rilevanti, cittadini e cittadine che possono contribuire con conoscenze locali non riconosciute dalla scienza “normale”, ovvero una comunità fatta da tutte le persone portatrici degli interessi in gioco.

Il principio della pluralità di prospettive legittime su un determinato problema porterebbe ad elaborare soluzioni che scaturiscano dal dibattito e dal dialogo più che da una dimostrazione rigorosa²². Queste comunità non vanno intese come semplici destinatarie delle informazioni prodotte dai gruppi di ricerca, ma come soggetti attivi nella costruzione della conoscenza, capaci di produrre “fatti estesi” basati su esperienza diretta, osservazioni di contesto o competenze informali. Di fronte a problemi ambientali o sanitari urgenti, l’obiettivo della scienza post-normale non è stabilire una verità oggettiva e definitiva, spesso impossibile da raggiungere, ma gestire in modo efficace e partecipato l’incertezza, includendo il maggior numero possibile di informazioni e punti di vista, e promuovendo processi di deliberazione orientati al consenso. In quest’ottica, il valore di un’indagine scientifica non si misura tanto nella sua aderenza a un’idea astratta di verità, quanto nella qualità del processo di conoscenza che è stata in grado di attivare.

Questa visione si intreccia profondamente con alcune riflessioni maturate nell’ambito dell’epistemologia femminista²³, in particolare con i

²¹Cfr. A. L’Astorina, C. Mangia, *Scienza, politica e società: l’approccio post-normale in teoria e nelle pratiche*, Edizioni CNR, Roma 2022.

²² Cfr. S. O. Funtowicz, J. R. Ravetz, *op. cit.*

²³ C. Mangia, *Sapere post normale e oggettività forte*, *Notizie di POLITEIA*, 2020, XXXVI (139), pp. 83–93; E. Severini, E. Gagliasso, C. Mangia, *Una comunità estesa di pari nella ricerca ambientale: la conoscenza situata come ampliamento dell’epistemologia*, in A. L’Astorina e C. Mangia, *Scienza, politica e società: l’approccio post-normale in teoria e nelle pratiche*, Edizioni CNR, Roma 2022, pp. 95–101.

concetti di *saperi situati* e *oggettività forte* elaborati da Sandra Harding e Donna Haraway²⁴. Partendo dalla consapevolezza che ciò che si osserva, si misura e si interpreta è sempre filtrato da una collocazione materiale e relazionale, Sandra Harding propone di passare da una conoscenza da “nessun luogo” e da un’oggettività da “nessuna prospettiva” ad una “oggettività forte” che includa nel processo di conoscenza gruppi diversi da quelli dominanti con punti di vista e valori diversi fra loro²⁵. In questo modo i risultati di un’indagine potranno essere tanto più obiettivi quanto più saranno supportati da processi oggettivi. In pratica, questo si traduce in aggiungere ai fenomeni da analizzare con razionalità scientifica il contesto, i valori e gli interessi condivisi all’interno di una comunità di ricerca più vasta. L’ampliamento del processo di conoscenza dovrebbe portare non ad un relativismo della conoscenza, ma piuttosto ad un rafforzamento del processo obiettivo di conoscenza. Come sottolinea Sandra Harding, il programma della oggettività forte è un progetto scientifico che ridà legittimità alla razionalità scientifica in un mondo in cui molti pensano che il potere di questa razionalità debba essere limitato²⁶.

L’approccio post-normale ha trovato applicazione in numerosi contesti ambientali, dai conflitti territoriali legati a grandi opere infrastrutturali fino alla gestione partecipata dei rischi naturali e ambientali²⁷. In ambito urbano, l’idea di comunità estesa di pari è particolarmente potente, perché consente di superare la separazione tra chi produce dati e chi subisce le conseguenze delle decisioni, riconoscendo la natura sociale e relazionale della conoscenza ambientale. La scienza post-normale non propone un nuovo paradigma rigido, né una ricetta definitiva, ma piuttosto un quadro di riferimento per governare la complessità, accettando la tensione tra sapere e valori, tra rigore metodologico e apertura al dissenso, tra oggettività e collocazione storica. Nel contesto urbano e ambientale, questa prospettiva invita a riconoscere la validità e la rilevanza di conoscenze non accademiche, prodotte da chi vive quotidianamente i territori, subisce gli impatti delle trasformazioni

²⁴ D. Haraway, *Situated Knowledge. The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective*, *Feminist Studies*, 1988, 14, pp. 575–599; S. Harding, *Strong objectivity: A response to the new objectivity question*, *Synthese*, 1995, 104(3), pp. 331–349.

²⁵ *Ibidem*.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ Cfr. A. L’Astorina, C. Mangia, *op. cit.*

climatiche, ma anche elabora forme di adattamento e resistenza spesso invisibili alle metriche ufficiali.

Dalla teoria alla pratica

Trasformare principi di coinvolgimento pubblico e creazione di comunità estesa di pari in pratica non è semplice e investe diversi piani simbolici, culturali e pratici. A livello operativo, comporta mettere in atto una co-produzione della conoscenza attraverso processi di partecipazione pubblica, di *citizen science*, di mappe di comunità, di *urban living labs*. Processi che devono tenere conto della specificità dei contesti e dei problemi con cui la comunicazione deve misurarsi, della posta in gioco – che si tratti di comprendere e ridurre fenomeni di inquinamento o piuttosto di pianificazione di una NBS. Numerose sono le esperienze in questa direzione, a livello nazionale una serie di pratiche sono raccolte nel volume curato da L’Astorina e Mangia²⁸ (2022). Un caso di studio interessante, ad esempio, è stato quello di San Donaci (BR), dove si è affrontata un’indagine di epidemiologia ambientale finanziata dagli enti locali. La particolarità del progetto è stata l’integrazione di processi partecipativi strutturati coordinati da un’associazione di facilitazione, che ha svolto un ruolo chiave nella mediazione del dialogo e un ponte emotivo tra cittadini, amministrazione pubblica e gruppo di ricerca. La metodologia, costruita in modo adattivo al contesto locale, ha incluso *focus group*, *circle time* e incontri pubblici, ha creato spazi di ascolto e confronto in cui i cittadini hanno potuto esprimere dubbi, fornire materiali, sollevare critiche e proporre soluzioni. Il lavoro di facilitazione ha avuto un duplice valore: da un lato, ha permesso di integrare prospettive ed emozioni diverse nel processo di approfondimento tecnico scientifico, arricchendo l’analisi e la relazione finale; dall’altro, ha contribuito a ricostruire legami di fiducia tra comunità, istituzioni e sapere esperto. Un elemento di particolare rilievo è che, al termine del percorso, si è riusciti a individuare azioni condivise tra cittadinanza, esperti e amministrazione pubblica. Queste proposte concrete sono state riprese e portate avanti dall’amministrazione comunale, segnando un passaggio dal confronto partecipativo all’attuazione di politiche basate sul dialogo e sulla corresponsabilità. L’esperienza ha mostrato che il dialogo reale richiede il superamento delle asimmetrie di potere tra esperti e cittadini, riconoscendo il valore del sapere situato e delle esperienze vissute. Ha, inoltre, dimostrato

²⁸ Ibidem.

come, in un quadro post-normale, il successo di una ricerca non risieda solo nella qualità tecnica dei dati, ma nella capacità di includere, ascoltare e negoziare, creando condizioni di corresponsabilità verso obiettivi comuni.

Sul fronte della progettazione di un intervento urbanistico come una NBS si presentano altre problematiche e prospettive. In un articolo del 2019 vengono analizzate esperienze in undici città europee che offrono spunti concreti su come le *Nature-Based Solutions* (NBS) possano essere efficacemente pianificate e realizzate nel contesto urbano attraverso approcci partecipativi e collaborativi²⁹. Tra le lezioni imparate sicuramente c'è l'importanza dell'estetica: le NBS non devono solo funzionare, ma devono anche essere visivamente attraenti e ben progettate. Questo favorisce l'appropriazione da parte dei cittadini, soprattutto se coinvolti sin dalle prime fasi insieme ad artisti, architetti e paesaggisti. Una seconda lezione evidenzia che le NBS creano nuovi spazi pubblici condivisi, veri e propri beni comuni verdi, che migliorano la qualità della vita e rafforzano i legami sociali, specie nei quartieri più fragili. Il filo che tiene tutto insieme è quello della fiducia tra amministrazioni, gruppi di ricerca e cittadinanza. Le sperimentazioni più riuscite sono quelle fondate su trasparenza, dialogo continuo e reale apertura al contributo della cittadinanza. Da qui nasce anche la quarta lezione: la necessità di aprire nuovi spazi e modalità di partecipazione, che vadano oltre i meccanismi tradizionali e riescano a coinvolgere attivamente anche i soggetti meno visibili, attraverso pratiche informali come laboratori creativi o cene di quartiere. Nel complesso, queste esperienze mostrano che non esistono formule predefinite, ma una serie di strumenti e approcci adattabili che permettono di affrontare la complessità urbana con visione sistemica e spirito di corresponsabilità. Come nel caso di San Donaci, anche su scala europea la partecipazione attiva e il dialogo rappresentano il cuore dei processi trasformativi.

Conclusioni

Nelle aree urbane, le emissioni provenienti da trasporti, riscaldamento, consumi energetici, attività produttive, e gestione dei rifiuti compromettono la qualità dell'aria, con ripercussioni su salute pubblica, ecosistemi,

²⁹Cfr.N. Frantzeskaki, *Seven lessons for planning nature-based solutions in cities*, "Environmental Science & Policy," 2019, 93, pp. 101–111.

patrimonio culturale e disuguaglianze sociali. La crisi climatica aggrava ulteriormente la situazione aumentando la vulnerabilità delle città. Tra le tante strategie di adattamento un ruolo sempre più importante è assunto dalle Nature-Based Solutions, che attraverso infrastrutture verdi offrono benefici multipli: assorbimento di CO₂, miglioramento della biodiversità e mitigazione del microclima. Tuttavia, queste soluzioni possono generare effetti indesiderati, come l'aumento di inquinanti secondari o danni alla vegetazione stessa. La natura non lineare dei fenomeni ambientali richiede l'uso di modelli atmosferici in grado di simulare scenari complessi e prevedere gli impatti delle diverse scelte. Ma i modelli, seppure molto avanzati, da soli non bastano: ogni intervento si inserisce in un contesto fatto di interessi diversi, valori e visioni spesso in conflitto tra loro.

Per affrontare questa complessità, a nostro avviso è necessario un cambio di prospettiva che vada in due direzioni. Da una parte verso il superamento di approcci tecnici lineari e settoriali attraverso l'utilizzo di strumenti modellistici avanzati, che consentano di analizzare scenari complessi, valutino le interazioni tra le variabili in gioco, quantificando i benefici o i rischi associati a specifiche scelte tecnologiche. Dall'altra è necessario andare oltre gli approcci top-down che hanno caratterizzato molte politiche ambientali del passato, a favore di pratiche capaci di integrare diverse forme di conoscenza, con approcci partecipativi, capaci di dare voce ai cittadini, alle comunità locali e agli attori spesso esclusi dai processi decisionali.

Questa integrazione non è soltanto una questione metodologica, ma, a nostro avviso, ha una forte valenza politica. Affrontare le crisi ambientali urbane significa abbandonare l'idea della città come semplice spazio da "aggiustare" con soluzioni tecniche calate dall'alto, e iniziare a leggerla come un sistema complesso di relazioni ecologiche, sociali e culturali.