

Stima dei decessi attribuibili all'inquinamento da NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} nella Città di Milano nel 2019

Estimated number of deaths attributable to NO₂, PM₁₀, and PM_{2,5} pollution in the Municipality of Milan in 2019

Sara Tunesi,¹ Walter Bergamaschi,² Antonio Giampiero Russo¹

¹ UOC epidemiologia, Agenzia per la tutela della salute della Città Metropolitana di Milano

² Direzione strategica, Agenzia per la tutela della salute della Città Metropolitana di Milano

Corrispondenza: Antonio Giampiero Russo; agrusso@ats-milano.it

Riassunto

Introduzione: sono sempre maggiori le evidenze degli effetti dell'esposizione a inquinanti ambientali sulla salute riferite alla mortalità, alle patologie croniche e a quelle acute e, di recente, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha rivisto al ribasso le soglie di sicurezza dell'esposizione a inquinanti ambientali. Il Comune di Milano (CdM), sia per la presenza di fonti emissive di diversa natura sia per le condizioni climatiche e orografiche, presenta livelli di inquinamento particolarmente elevati.

Obiettivi: descrivere l'impatto sulla salute dell'esposizione agli inquinanti misurato in termini di decessi attribuibili all'esposizione ambientale a NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} nel 2019.

Disegno: studio osservazionale. Attraverso l'implementazione di un modello di stima della concentrazione degli inquinanti sono stati stimati i valori medi annuali di NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} in celle di 25mx25m nel 2019 per il CdM. Le funzioni di rischio disponibili in letteratura sono state utilizzate per la stima dei decessi attribuibili alle singole esposizioni; come limiti controfattuali di esposizione sono stati utilizzati i valori raccomandati dalle nuove linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Setting e partecipanti: la popolazione in studio è costituita dai cittadini assistiti dall'Agenzia per la Tutela della Salute di Milano e residenti nel CdM al 01.01.2019 di età uguale o superiore ai 30 anni, la popolazione è stata seguita fino al 31.12.2019. Le residenze della popolazione in studio sono state georeferenziate e i decessi e le relative cause sono stati ottenuti dall'anagrafe degli assistiti e dal Registro Nominativo della Cause di Morte.

Principali misure di outcome: stima dei decessi attribuibili alle esposizioni in studio per cause non accidentali, malattie cardiovascolari, respiratorie e tumore al polmone.

Risultati: nel 2019 sono stati stimati valori medi annui di NO₂ pari a 36,6 µg/m³; 24,9 µg/m³ per il di PM₁₀; 22,4 µg/m³ per il PM_{2,5}, con una distribuzione non uniforme nel territorio. Sono attribuibili a NO₂ il 10% dei decessi per cause naturali e al PM_{2,5} è il 13% dei decessi per cause naturali e il 18% dei decessi per tumore del polmone. Gli andamenti dei decessi attribuibili variano nelle diverse aree del CdM.

Conclusioni: l'impatto sulla salute dell'esposizione a particolato atmosferico nella popolazione del CdM è elevato. È importante che i cittadini, la politica e i portatori di interesse in genere si confrontino con questa problematica, alla luce sia dell'impatto sulla salute sia del forte impatto economico dei relativi costi sanitari e di cura.

Parole chiave: inquinamento atmosferico, particolato atmosferico, decessi attribuibili, Comune di Milano

Cosa si sapeva già

- L'esposizione a particolato atmosferico è associata a eccessi di mortalità per diverse cause.
- L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha recentemente rilasciato nuove linee guida in cui si rivedono i limiti raccomandabili di particolato atmosferico.
- I rischi associati alle esposizioni a particolato atmosferico sono conosciuti in letteratura.
- Nella Città di Milano studi precedenti hanno quantificato gli eccessi di mortalità.

Cosa si aggiunge di nuovo

- Mediante uno stesso modello si sono stimate le medie annuali di NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} per la città di Milano a un alto livello di risoluzione.
- Si forniscono le stime per quartiere dei decessi attribuibili a NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} considerando i nuovi limiti suggeriti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.
- Gli impatti dell'esposizione all'inquinamento atmosferico nel territorio del Comune di Milano non sono omogenei.

Abstract

Background: there is growing evidence that exposure to environmental pollutants affects health, including mortality, chronic diseases, and acute diseases. The World Health Organisation has recently revised downwards the safety thresholds for exposure to environmental pollutants. The City of Milan (CoM) has particularly high levels of pollution; this is due both to the presence of various emission sources and to climatic and orographic conditions.

Objectives: to describe the health effects of exposure to pollutants, measured by deaths due to environmental exposure to NO₂, PM₁₀, and PM_{2,5} in 2019.

Design: observational study. Using a pollutant concentration estimation model, annual mean values of NO₂, PM₁₀, and PM_{2,5} were estimated for the CoM in 2019. The number of deaths attributable to each exposure was estimated using risk functions available in the literature; the values recommended by the new World Health Organisation guidelines were used as counterfactual exposure limits.

Setting and participants: the population assisted by the Agency for Health Protection of Milan and resident in the CoM on 01.01.2019, aged 30 years or older. The place of residence was georeferenced and the population was followed up until 31.12.2019. Deaths and their causes were obtained from the Causes of Death Registry.

RASSEGNE E ARTICOLI

Main outcome measures: deaths attributable to exposure from non-accidental causes, cardiovascular diseases, respiratory diseases, and lung cancer were estimated.

Results: in 2019, the estimated annual average level of NO₂ was 36.6 µg/m³, that of PM₁₀ was 24.9 µg/m³, and that of PM_{2.5} was 22.4 µg/m³, with levels varying across the city area. Concerning exposure to NO₂, in 2019 10% of deaths for natural causes were estimated to be attributable to annual mean levels of NO₂ above 10 µg/m³. As regard PM_{2.5}, 13% of deaths for natural causes and 18% of deaths from lung can-

cer were attributable to an annual mean level above 5 µg/m³. The impact of exposure to particulate matter on mortality does not seem to be the same in all the areas of the CoM.

Conclusions: the health impact of exposure to airborne particulate matter in the CoM population is high. It is important that citizens, policy-makers, and stakeholders address this issue, because of its impact on both health and of health-care costs.

Keywords: Air pollution, particulate matter, attributable deaths, Municipality of Milan

Introduzione

Sono sempre maggiori le evidenze degli effetti dell'esposizione a inquinanti ambientali sulla salute riferite alla mortalità,¹⁻⁵ alle patologie croniche⁵⁻⁷ e acute.^{5,8-10} L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha stimato che nel 2019 sono 307.000 i decessi prematuri attribuibili all'esposizione cronica a particolato in Europa.¹¹ Una recente revisione sistematica, inoltre, ha sintetizzato le evidenze¹² degli effetti delle esposizioni da inquinanti ambientali sulla salute, rivedendo i livelli minimi dei valori soglia obiettivo per limitare gli effetti sulla salute. Di contro sono ormai numerosi gli studi i cui risultati mettono in luce che l'associazione tra morbilità e mortalità e l'esposizione a lungo termine all'inquinamento atmosferico potrebbe non avere una soglia di limite inferiore.^{8,13-16}

Il Comune di Milano (CdM) è la seconda città Metropolitana d'Italia con una popolazione di circa 1.400.000 residenti.¹⁷ Amministrativamente, il territorio del CdM è suddiviso in 88 quartieri denominati "nuclei di identità locale" (NIL,¹⁸ figura S1). La Città di Milano, sia per la presenza di fonti emissive di diversa natura (industriali, da traffico e residenziali) sia per le condizioni climatiche e orografiche, che non favoriscono la dispersione delle sostanze disperse in aria, presenta livelli di inquinamento particolarmente elevati.¹⁹ Nell'ultimo decennio a Milano, grazie alle innovazioni tecnologiche nella gestione delle fonti emissive, a modificazioni del tessuto produttivo e ai cambiamenti climatici in atto, si sono verificati importanti cambiamenti della tipologia e della concentrazione degli inquinanti;¹⁹ tuttavia, nel 2022 per 84 giorni le concentrazioni di inquinanti hanno superato le soglie stabilite a livello europeo.

Diversi lavori hanno indagato l'impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute sia in Regione Lombardia²⁰⁻²² sia nella Città di Milano²³⁻²⁶. Tuttavia, non sono presenti studi riferiti alla stima delle esposizioni a lungo termine in anni più recenti e i modelli di risoluzione spaziale adottati fino al 2007 – ultimo anno per cui sono presenti dati – non consentivano una valutazione dettagliata della distribuzione spaziale dell'inquinante all'interno del territorio comunale.

L'Agenzia per la Tutela della Salute di Milano (ATS-MI)

copre una popolazione di oltre 3,5 milioni di persone residenti nelle province di Milano e di Lodi e, nell'ambito della valutazione dello stato di salute della popolazione assistita, ha recentemente sviluppato alcune indagini volte a valutare l'impatto di esposizioni ambientali²⁷⁻²⁹ o climatiche^{30,31}. Al fine di valutare gli effetti su lungo periodo che le esposizioni a particolato atmosferico hanno a lungo termine, sono stati stimati i livelli di concentrazione media degli inquinanti (NO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}) per l'anno 2019 nel CdM ottenendo una distribuzione degli inquinanti a elevata risoluzione (con celle di 25m×25m). I dati riferiti alle esposizioni ambientali sono stati collegati con le informazioni sanitarie e anagrafiche georeferenziate già utilizzati per studi di popolazione in ATS-MI.^{27,28,30,32} Scopo del presente lavoro è di descrivere l'impatto a lungo periodo sulla salute dell'esposizione a lungo termine agli inquinanti ambientali misurato in termini di decessi attribuibili all'esposizione ambientale considerando la media dell'esposizione all'inquinante stimata nell'anno e il numero di decessi osservati per ogni cella del dominio.

Metodi

L'area geografica in studio è il territorio del CdM, per un totale di 181 km². Il dominio totale dell'area di dispersione degli inquinanti è stato realizzato in modo da contenere completamente il territorio del CdM ed è costituito da un'area di forma rettangolare con una superficie totale di 440 km².

Popolazione in studio

La coorte in studio è costituita dalla popolazione di età maggiore o uguale a 30 anni assistita da ATS-MI e residente nel CdM al 01.01.2019. Utilizzando la banca dati degli assistiti (NAR)³³, nel quale la residenza di ogni assistito è stata precedentemente georeferenzata, ogni soggetto è stato assegnato a una cella del dominio.

Stima dell'esposizione agli inquinanti ambientali

La modellizzazione della dispersione degli inquinanti ambientali (NO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}) è stata effettuata secondo il modello di dispersione degli inquinanti atmosferici

RASSEGNE E ARTICOLI

Inquinante	Soglia OMS (µg/m³)*	Soglia UE (µg/m³)	Evento (ICD-10)	RR (IC95%) per incrementi di 10 µg/m³
Stime OMS				
NO ₂	10	40	cause naturali (A00-R99)	1,04 (1,01-1,06)
			cause cardiovascolari (I00-I99)	1,04 (1,00-1,09)
			cause respiratorie (J00-J99)	1,05 (1,00-1,09)
			tumore del polmone (C30-C39)	1,04 (1,01-1,07)
PM ₁₀	15	40	cause naturali (A00-R99)	1,04 (1,03-1,06)
			cause cardiovascolari (I00-I99)	1,06 (1,01-1,10)
			cause respiratorie (J00-J99)	1,12 (1,06-1,19)
			tumore del polmone (C30-C39)	1,08 (1,04-1,13)
PM _{2,5}	5	25	cause naturali (A00-R99)	1,08 (1,06-1,09)
			cause cardiovascolari (I00-I99)	1,11 (1,09-1,14)
			cause respiratorie (J00-J99)	1,10 (1,03-1,18)
			tumore del polmone (C30-C39)	1,12 (1,07-1,16)
Analisi di sensibilità				
NO ₂	10	40	cause naturali (A00-R99)	1,04 (1,03-1,06)**
			cause respiratorie (J00-J99)	1,03 (1,01-1,05)***
PM _{2,5}	5	25	cause naturali (A00-R99)	1,12 (1,06-1,18)**

* valore di soglia controfattuale utilizzata nelle analisi / *Threshold used as counterfactual in analysis*

** Hofmman et al.³⁸

*** Huangfu et al.³⁹

Tabella 1. Stime dei RR per incrementi di concentrazione di inquinante di 10 µg/m³.

Table 1. RR estimates for pollutant concentration increases of 10 µg/m³.

ci “The Urban Tool for Air Quality” (UTAQ).³⁴ Il modello UTAQ è stato appositamente sviluppato per modellizzare ad alta risoluzione le concentrazioni di inquinanti in atmosfera in contesti urbani. Si tratta di un modello ibrido composto da due differenti contributi: un contributo gaussiano locale (Kernel, basato su modello di traffico e di emissioni) e un contributo regionale (EMEP, parte euleriana), che vengono successivamente integrati. Sintesi del modello UTAQ è riportata nella sezione “Metodi” dei materiali supplementari online. La modellizzazione è stata effettuata su base annuale (2019) per la città di Milano su un dominio di 20x22 km² diviso in 802x879 celle aventi dimensione di 25mx25m che ha incluso tutto il CdM e 40 comuni limitrofi.

A scopo descrittivo, per ogni NIL è stata stimata la media pesata dell'esposizione all'inquinante come media dei valori delle celle di ogni NIL pesata per frazione di popolazione attribuita alla cella rispetto alla popolazione del NIL di appartenenza (*population weighted exposure, PWE*). Per il comune di Milano, la media pesata dei livelli di esposizione è stata ottenuta pesando il contributo di popolazione di ogni cella appartenente al CdM rispetto al totale della popolazione del Comune.

Stima dell'impatto sulla salute

Mediante *record linkage* con il registro Nominativo della Cause di Morte (ReNCaM), gestito dalla ATS di

Milano per le sue funzioni specifiche di sorveglianza, sono stati individuati i decessi occorsi nel 2019 con la relativa causa principale di decesso, codificata secondo le regole internazionali.

L'impatto sulla salute è stato stimato in termini di decessi attribuibili per cause naturali (A00-R99), cause cardiovascolari (I00-I99), cause respiratorie (J00-J99) e per tumore del polmone (C30-C39). Per ciascuna delle cause di decesso e per ogni inquinante sono state utilizzate le stime di concentrazione-risposta riportate dall'OMS:¹² i rischi relativi (RR) sono riferiti a incrementi di 10 µg/m³ di inquinante (tabella 1). Per ogni inquinante, inoltre, è stata considerata la soglia controfattuale secondo le più aggiornate raccomandazioni fornite dall'OMS¹² (tabella 1).

Per la stima dei decessi attribuibili (DA) è stata applicata, a ogni cella *i,j* del dominio, la seguente formula: $DA_{i,j} = AF_{i,j} * D_{i,j}$ dove $D_{i,j}$ è il numero di decessi osservati per ogni cella *i,j* e $AF_{i,j}$ è la frazione di decessi attribuibili, calcolata secondo la seguente formula:^{35,36}

$$AF_{i,j} = \frac{\exp\left(\frac{\log(RR)}{10} * (media_{i,j} - soglia)\right) - 1}{\exp\left(\frac{\log(RR)}{10} * (media_{i,j} - soglia)\right)}$$

dove RR si riferisce al *Relative Risk* per incrementi di 10 µg/m³ dello specifico inquinante. La stima dei decessi attribuibili per NIL (DA_{NILPop}) è stata ottenuta

RASSEGNE E ARTICOLI

Inquinante	Media* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Decessi per cause naturali n. 12.818			Decessi per cause cardiovascolari n. 4.180			Decessi per cause respiratorie n. 1.214			Decessi per tumore del polmone n. 853		
		DA (IC95%)	AF% (IC95%)	DA per 100.000 (IC95%)	DA (IC95%)	AF% (IC95%)	DA per 100.000 (IC95%)	DA (IC95%)	AF% (IC95%)	DA per 100.000 (IC95%)	DA (IC95%)	AF% (IC95%)	DA per 100.000 (IC95%)
Stime OMS													
NO ₂	38,2	1.335,0 (542,7-2.052,1)	10,4 (4,2-16,0)	130,3 (53,0-200,4)	433,4 (0,0-853,1)	10,4 (0,0-6,7)	42,3 (0,0-83,3)	152,6 (30,8-276,2)	12,6 (2,5-2,2)	14,9 (3,0-27,0)	87,1 (24,9-144,0)	10,2 (2,9-1,1)	8,5 (2,4-14,1)
PM ₁₀	25,4	509,3 (334,5-697,6)	4,0 (2,6-5,4)	49,7 (32,7-68,1)	248,5 (79,6-416)	5,9 (1,9-3,2)	24,3 (7,8-40,6)	132,6 (62,8-197,1)	10,9 (5,2-1,5)	12,9 (6,1-19,2)	64,6 (32-96,8)	7,6 (3,7-0,8)	6,3 (3,1-9,5)
PM _{2,5}	22,8	1.644,1 (1.392,9-1.906,0)	12,8 (10,9-14,9)	160,5 (136-186,1)	704,3 (563,2-839,6)	16,8 (13,5-20,1)	68,8 (55,0-82,0)	189,7 (52,2-308,8)	15,6 (4,3-25,4)	18,5 (5,1-30,2)	156,3 (102,5-208,1)	18,3 (12,0-24,4)	15,3 (10,0-20,3)
Analisi di sensibilità													
NO ₂	38,2	1.348,9 (858,6-1.816,0)	10,5 (6,7-14,2)	131,7 (83,8-177,3)				96,2 (33,0-155,5)	7,9 (2,7-1,2)	9,4 (3,2-15,2)			
PM _{2,5}	22,8	2.345,4 (1.310,6-3.323,9)	18,3 (10,2-25,9)	229,0 (128,0-324,6)									

* Media pesata dell'esposizione per la popolazione residente in ogni cella rispetto alla popolazione del CdM (n. 1.024.145) / RR estimates for pollutant concentration increases of 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

§ Come soglie controfattuali sono stati utilizzati i seguenti valori: 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per NO₂, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per PM₁₀ e 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per PM_{2,5} (cfr tabella 1) / The following values were used as counterfactual thresholds 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO₂, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM₁₀, and 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2,5} (see Table 1).

Tabella 2. Decessi attribuibili (DA), frazione attribuibile (AF%) e decessi attribuibili per 100.000 abitanti per causa di decesso e per inquinante del CdM.

Table 2. Attributable deaths (DA), attributable fraction (AF%) and attributable deaths per 100 000 inhabitants by cause of death and pollutant for the municipality of Milan

come sommatoria del numero dei decessi attribuibili delle celle che compongono il NIL.

Gli intervalli di confidenza di DA_{NIL} sono stati stimati tramite simulazione; sono state effettuate 1.000 simulazioni indipendenti del RR distribuito secondo una distribuzione normale e per ogni simulazione è stato calcolato DA_{NIL}. I 1.000 valori così ottenuti sono stati utilizzati per calcolare il valore medio dei decessi attribuibili per ogni NIL, mentre l'intervallo di confidenza al 95% (IC95%) è stato ottenuto mediante la stima del 2,5° e il 97,5° percentile della serie ordinata.³⁷ Partendo dalle stime dei DA_{NIL} così ottenute e utilizzando come riferimento la popolazione di 30 anni o più (30+) residente per NIL sono state calcolate le stime dei decessi per 100.000 abitanti (DA_{NILPop}) come il rapporto del numero dei decessi attribuibili in ciascun NIL (DA_{NIL}) e la popolazione residente nel NIL, per 100.000 abitanti. Le stime dei DA per il CdM sono state ottenute come somma dei DA_{NIL}.

Analisi di sensibilità

Recentemente altri studi^{38,39} hanno proposto, per la realtà europea, l'utilizzo di stime di effetto più restrittive. Queste funzioni di rischio sono state utilizzate come analisi di sensibilità per i decessi attribuibili in tutto il CdM (tabella 1).

Come ulteriore analisi di sensibilità, sono state effettuate analisi relative alla concentrazione di inquinan-

ti riscalate a una griglia 1kmx1km con modello UTAQ e le analisi su griglia di 1kmx1km con dati derivanti da un altro modello di stima degli inquinanti secondo, la modellizzazione di Stafoggia et al.⁴⁰

Risultati

Popolazione in studio

Nel complesso sono stati identificati 1.024.145 residenti nel CdM di età 30+ al 01.01.2019; dal 01.01.2019 al 31.12.2019 sono stati registrati 13.602 decessi, di cui 12.818 per cause naturali. Dettagli rispetto alla distribuzione della popolazione in studio per NIL sono riportati nella sezione "Risultati" dei materiali supplementari online.

Stima dell'esposizione agli inquinanti ambientali

In figura 1A sono riportate le stime della concentrazione media annua di NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} ottenuta dal modello UTAQ nel dominio in studio. Per il CdM, nel 2019 sono stati stimati valori medi annui di NO₂ pari a 36,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM₁₀ e 22,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{2,5} (tabella S1 e figura S2).

La PWE di ogni inquinante è riportata in tabella 2. L'esposizione media annua pesata a NO₂ è di 38,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a PM₁₀ e 22,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a PM_{2,5}. I dettagli per NIL (figura 1B) della media pesata delle esposizioni sono riportati sezione "Risultati" dei materiali supplementari online.

Stima dell'impatto sulla salute

Per la valutazione dell'impatto sulla salute, per ciascun inquinante, sono stati stimati la frazione, il numero e il tasso (per 100.000 abitanti) di decessi attribuibili (DA) all'esposizione complessivi per il CdM e per ogni NIL.

I decessi attribuibili totali nel CdM per inquinante e per causa di decesso sono riportati in tabella 2. Nel 2019 sono stati registrati 12.818 decessi per cause naturali, di cui 4.180 decessi per cause cardiovascolari, 1.214 decessi per cause respiratorie e 853 decessi per tumore del polmone.

Decessi attribuibili a NO₂

Nel 2019 sono stati stimati 1.330 (10,4%) decessi per cause naturali attribuibili a esposizione di NO₂ nel CdM (tabella 2), corrispondenti a 130,3 decessi su 100.000 abitanti. La distribuzione del numero di decessi attribuibili dovuti a cause naturali per NIL (figura 2 e tabella S2) registra numeri di decessi attribuibili sia in valori assoluti (figura 2A) sia per tassi per 100.000 abitanti (figura 2B) più elevati nelle zone periferiche e abitate della città. Si riscontrano alti tassi di decesso (per 100.000) in NIL periferici in zona Nord (Quarto Oggiano 158, Bovisasca 156, Niguarda 156), a Est (Parco Lambro 164, Città Studi 149, Mecenate 193, Lodi 159), a Ovest (Bandenere 166, Lorenteggio 165, Gallaratese 170, QT8 161), a Sud (Tibaldi 178, Barona 167) e del Centro (XXII Marzo 151).

Per le cause di decesso specifiche (tabella 2), si stimano, nel 2019, 433 decessi cardiovascolari attribuibili a NO₂ (10,4%), corrispondenti a un tasso di 42 per 100.000; 153 (12,6%) decessi per cause respiratorie, corrispondenti a 15 per 100.000 abitanti; 87 (10,2%) per tumore del polmone, corrispondenti a 8,5 per 100.000 abitanti. La distribuzione del numero di decessi attribuibili alle singole cause specifiche (tabella S2, figura S3A) mostra un alto numero di eventi in NIL sovrapponibili alle cause naturali per le cause cardiovascolari e respiratorie. Per il tumore al polmone, invece, i NIL in cui si concentra un alto numero di decessi sono XXII Marzo (10,5%), Mecenate (10,5%), Giambellino (10,3%), Vigentina (10,6%), Gallaratese (9,6%), Gratosoglio (8,8%).

Il tasso (per 100.000 abitanti) dei decessi attribuibili (tabella S2, figura S3B) – escludendo le zone con bassa numerosità – rimarca la presenza di tassi più elevati di mortalità per cause naturali nelle zone periferiche della città. A Ovest (Bandenere 168, Lorenteggio 166, Gallaratese 170, QT8 161), a Nord (Quarto Oggiano 158, Bovisasca 156, Niguarda 156), a Sud (Tibaldi 178, Barona 167) e a Est (Mecenate 193, Lodi-Corvetto 159, Parco Lambro-Cimiano 164, Città Studi 149, XXII marzo 152). A Nord Comasina (42) e a Ovest QT8 (59), Bandenere (59), Lorenteggio (57) e Selinunte (49) mostra-

no tassi elevati per cause cardiocircolatorie, mentre per il tumore del polmone tassi elevati sono osservati a Giambellino (15) e a Gallaratese (14). A Est, Città Studi (53) e Parco Lambro-Cimiano (60) mostrano tassi elevati per cause cardiovascolari, mentre Mecenate per tutte le cause di decesso in studio (cardiovascolari 56, respiratorie 33, tumore del polmone 14). A Sud, Tibaldi (55) mostra tassi elevati per cause cardiovascolari, Gratosoglio (15) per tumore del polmone, Corvetto (24) per cause respiratorie. A Centro città, Brera (43) e Vigentina (49) mostrano decessi elevati per cause cardiovascolari, Vigentina (13) e XXII marzo (16) per tumore del polmone, XXII marzo (23) per cause respiratorie.

Decessi attribuibili a PM₁₀

Nel 2019, sono stati stimati 509 (4,0%) DA all'esposizione a PM₁₀, corrispondenti a 50 decessi su 100.000 abitanti (tabella 2). Per le cause di decesso in studio, si riscontra un'elevata percentuale di decessi attribuibili a cause respiratorie (11%), corrispondenti a 133 decessi attribuibili nell'anno e un tasso di 13 decessi su 100.000 abitanti (tabella 2).

La distribuzione per NIL dei decessi attribuibili a PM₁₀ per tutte le cause naturali (tabella S3 e figura 2A) mostra un andamento simile ai DA per NO₂ con numeri più elevati a Nord a Niguarda, a Ovest a Bande Nere e Gallaratese e nella zona centrale a Buenos Aires. La distribuzione dei tassi di decesso (tabella S3 e figura 2B) mette in evidenza tassi più elevati prevalentemente nelle zone periferiche e la tendenza a formare raggruppamenti di NIL adiacenti. Le zone interessate sono analoghe alle zone messe il luce per NO₂, con l'aggiunta di Gratosoglio in zona Sud.

Per le altre cause di decesso (tabella S3 e figura S4A), i DA più elevati si registrano nelle zone a Ovest; più specificatamente, nei NIL di Bande Nere e zona centrale a Buenos Aires per cause cardiocircolatorie; per il tumore al polmone, XXII marzo in zona centrale e Gallaratese a Ovest.

A Nord si registrano tassi di decesso (tabella S3 e figura S4B) più elevati nei NIL di Niguarda (32) e Bovisasca (31) per cause cardiovascolari, Comasina (20) per cause respiratorie. A Ovest si registrano tassi di mortalità elevata per cause cardiovascolari a Bande Nere (34), Lorenteggio (34), QT8 (34), Trenno (32), Gallaratese (31); per cause respiratorie in Bande Nere (18), Baggio (17), Selinunte (18), Lorenteggio (20); per tumore del polmone a Giambellino (11) e Gallaratese (11). A Sud si registrano alti tassi di decesso per cause cardiocircolatorie a Tibaldi (31); per cause respiratorie e tumore del polmone a Gratosoglio (18 e 12, rispettivamente). A Est si registrano tassi elevati nei NIL di Parco Lambro (34), Città Studi (30) e Mecenate (31) per cause cardiovascolari; a Mecenate (28) e Corvetto (20)

RASSEGNE E ARTICOLI

per cause respiratorie e a Mecenate (10) per tumore del polmone. Nei NIL centrali si osservano alti tassi a Vigentina (20) e Brera (19) per cause respiratorie e XXII Marzo (11) per tumore del polmone.

Decessi attribuibili a PM_{2,5}

Per l'esposizione a PM_{2,5}, i DA per cause naturali sono 1.644 (12,8%), corrispondenti a 160 decessi per 100.000 abitanti. Per le cause di decesso in studio si riscontra un'elevata percentuale di decessi attribuibili a tumore del polmone (18,3%), corrispondenti a 156 decessi attribuibili e un tasso di 15 decessi su 100.000 abitanti (tabella 2). La distribuzione per NIL (tabella S4 e figura S5A) mostra un maggior numero di decessi e tassi più elevati nei NIL periferici come Mecenate, Gallaratese, Tibaldi, Barona, Lorenteggio, Bande Nere. La distribuzione dei tassi di decesso per cause naturali (tabella S4 e figura S5B) mette in luce tassi più elevati prevalentemente nelle zone periferiche a Ovest: Lorenteggio (212), Bande Nere (205); a Sud: Barona (214), Tibaldi (215), Gratosoglio (207); a Est, Mecenate (234). Per le singole cause di decesso (tabella S4 e figura S5A) si osserva un numero di DA più elevati nelle zone di Bande Nere e Buenos Aires per cause cardiovascolari e respiratorie, mentre per il tumore del polmone si contano XXII Marzo e Gallaratese. A Nord si osservano tassi elevati di mortalità a Niguarda (89) e Bovisasca (90) per cause cardiocircolatorie. A Ovest si registrano tassi (tabella S4 e figura S5B) elevati per cause cardiocircolatorie in Bande Nere (96), Lorenteggio (96), Trenno (96), QT8 (95), Gallaratese (90), e a Giambellino (26) per il tumore del polmone. A Est si registrano tassi elevati di mortalità per cause cardiovascolari a Parco Lambro (98), Mecenate (89 e 41) per cause cardiovascolari e respiratorie. A Sud si registrano tassi elevati per cause cardiovascolari a Tibaldi (88) e per tumore al polmone a Gratosoglio (30). Nei NIL centrali si riscontrano tassi per tumore del polmone in XXII Marzo (27).

Analisi di sensibilità

I risultati delle analisi di sensibilità su tutto il CdM ottenuti applicando le stime di rischio europee^{38,39} (tabella 2) riportano un numero di decessi per cause naturali e respiratorie paragonabili (1.332 e 96, rispettivamente) per le esposizioni a NO₂, mentre per esposizioni a PM_{2,5} si osserva un numero di decessi maggiore (2.331) rispetto alle stime ottenute mediante l'utilizzo delle funzioni di rischio dell'OMS.

Per quanto riguarda le analisi di sensibilità effettuate utilizzando griglie spaziali diverse, si osserva che le stime ottenute riscalando il modello UTAQ a 1kmx1km sono paragonabili a quanto ottenuto con griglia 25mx25m. Per quanto riguarda l'utilizzo di un altro modello a scala 1kmx1km, si osserva, anzi tutto,

che i due modelli presentano stime paragonabili per NO₂ e per PM_{2,5}, mentre per il PM₁₀ il modello UTAQ riporta stime di concentrazioni lievemente inferiori. Questo si ripercuote, in termini di decessi attribuibili, a stime paragonabili per i decessi attribuibili a NO₂ e PM_{2,5}, mentre a stime superiori di decessi attribuibili rispetto a UTAQ per PM₁₀ (tabella S6).

Discussione

Stima dell'esposizione agli inquinanti ambientali

Fino al 2007, il territorio lombardo,^{21,35,36} in particolare il CdM,^{26,27,40-46} sono stati oggetto di numerosi studi relativi agli effetti sulla salute dell'inquinamento atmosferico. Questo lavoro consente, per la prima volta, di utilizzare per il CdM una stima della concentrazione degli inquinanti con scala dettagliata (25mx25m) ottenuta applicando un modello fisico-emissivo ai tre inquinanti principali (NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5}).

Nel contesto metropolitano di Milano sono stati utilizzati altri modelli di dispersione. Per esempio, per NO₂ sono stati utilizzati modelli con approccio statistico (*machine learning*) basato su una distribuzione di campionatori posti in città,^{50,51} ottenendo stime su scala locale paragonabili a quelle ricostruite nel presente lavoro. Tuttavia, a causa della complessità delle misurazioni sul particolato, non sono al momento disponibili stime basate sullo stesso modello per gli altri inquinanti di interesse. Altri modelli^{40,52-54} forniscono una stima delle concentrazioni (anche giornaliere) degli inquinanti in tutto il territorio nazionale, ma utilizzano una scala maggiore e riproducono con meno dettaglio l'andamento territoriale nel CdM. La solidità dell'utilizzo di scale a risoluzione fine (100x100 m²) su coorti georeferenziate è risultata valida per la stima degli effetti a lungo termine dell'esposizione a inquinanti ambientali⁵⁵ anche rispetto ai diversi approcci modellistici⁵⁶. La stima della media annua ottenuta per l'NO₂ è in linea con il dato della stima ottenuta mediante un approccio modellistico differente per l'anno 2020 in assenza di *lockdown*⁵⁰ e da altre modellizzazioni più recenti sull'area in studio². Nel complesso, le stime medie annuali per il CdM ottenute sono più basse rispetto alle stime a livello comunale effettuate sia scala più elevata⁴⁰ sia riferite ad anni meno recenti.^{41,58}

Le stime ottenute per il 2019 delle concentrazioni medie degli inquinanti prodotte rilevano che i limiti medi annuali imposti dalla Comunità europea per NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} sono, a livello di stima media annuale, rispettati a livello del CdM. All'interno della città, i limiti per NO₂ sono, invece, localmente superati in corrispondenza delle strade a maggiore percorrenza. Questo risultato è in linea con l'atteso, essendo il traffico veicolare una delle maggiori fonti di inquinamento.

RASSEGNE E ARTICOLI

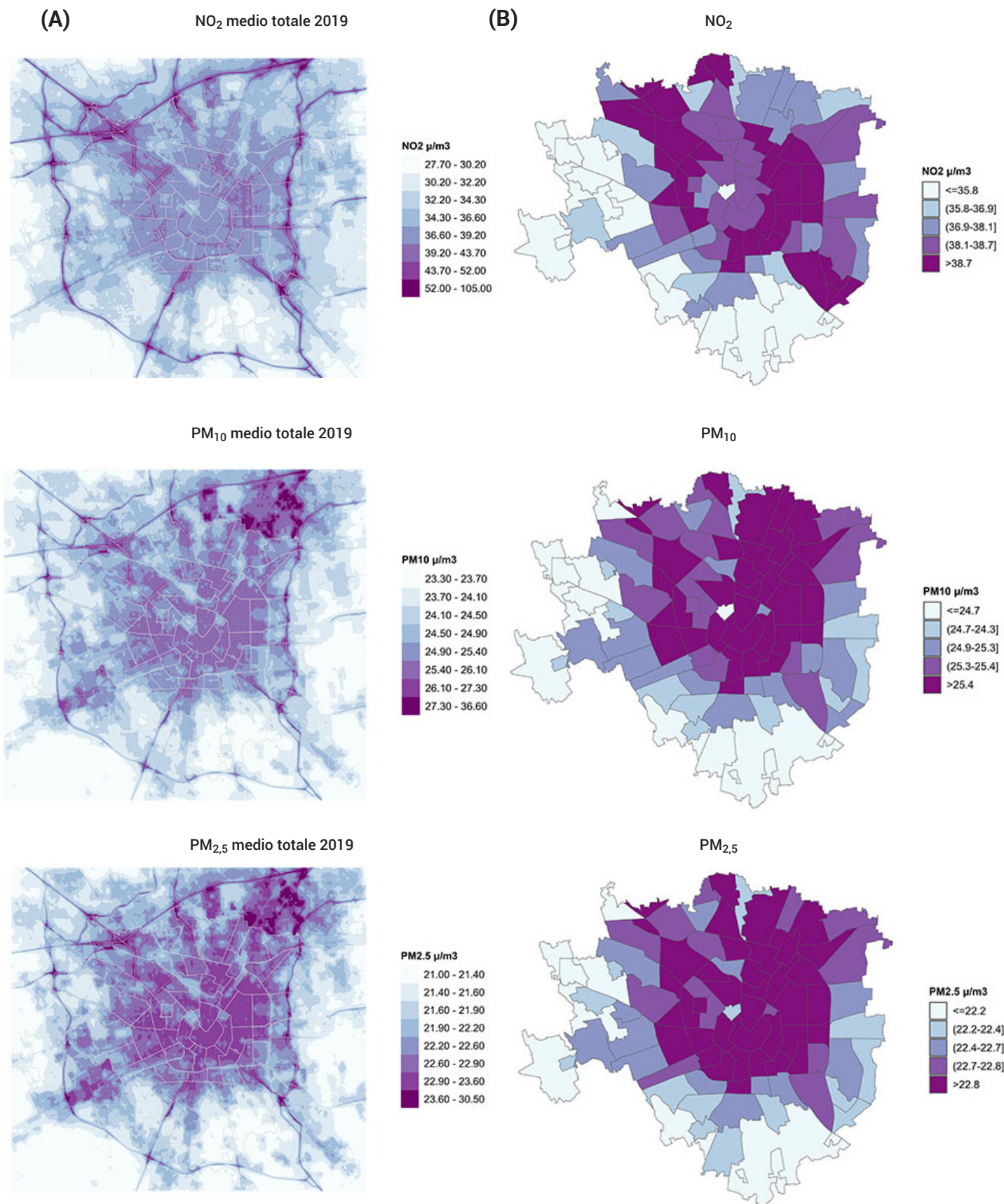
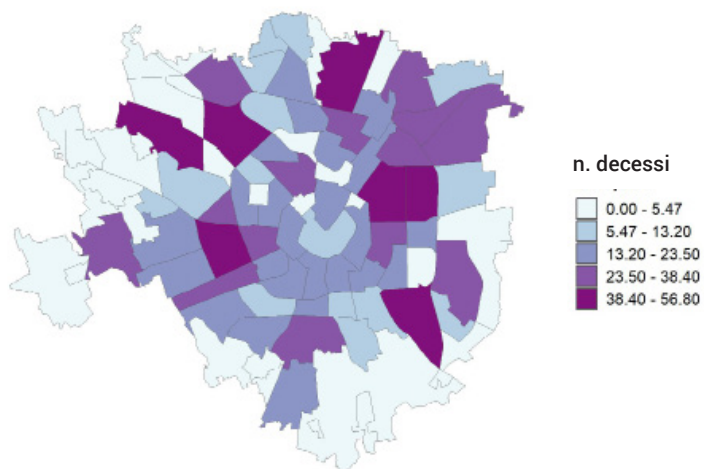


Figura 1. Stima secondo il modello UTAQ (A) della concentrazione media annua degli inquinanti (NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5}) per il 2019 nel dominio in studio con rete stradale e (B) dei valori medi per NIL nel CdM.

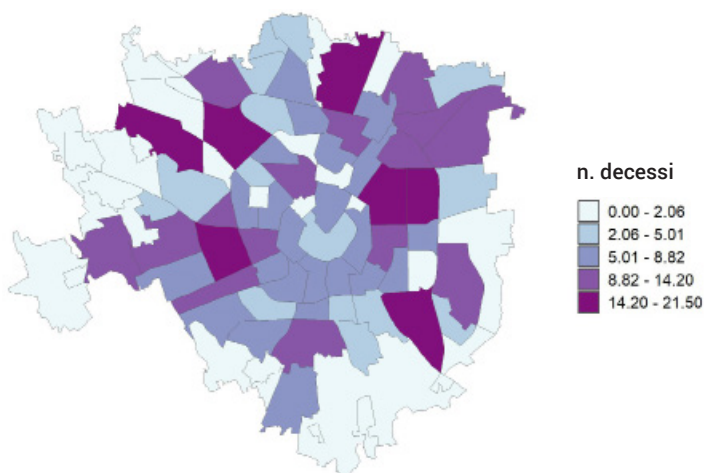
Figure 1. Estimation according to the UTAQ model (A) of the annual average concentration of pollutants (NO₂, PM₁₀, and PM_{2,5}) for 2019 in the study area with road network and (B) of the average values for NIL in the municipality of Milan.

RASSEGNE E ARTICOLI

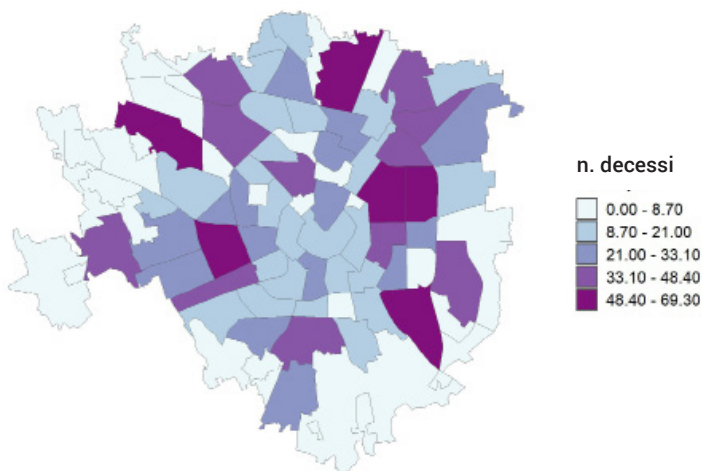
(A) Numero di decessi per cause naturali attribuibili a NO₂



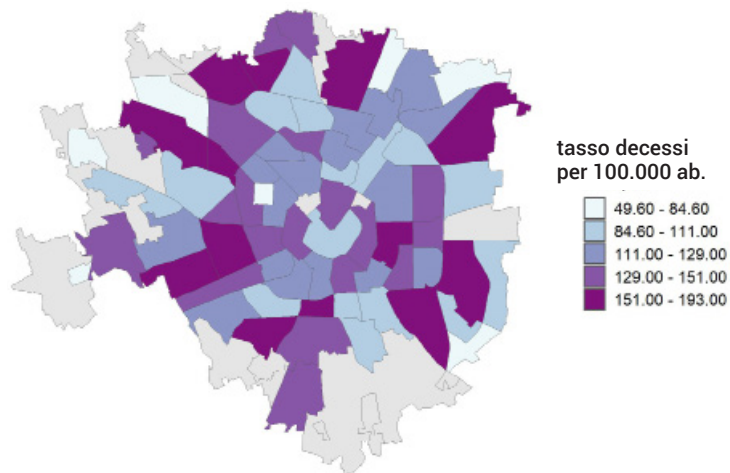
Numero di decessi per cause naturali attribuibili a PM₁₀



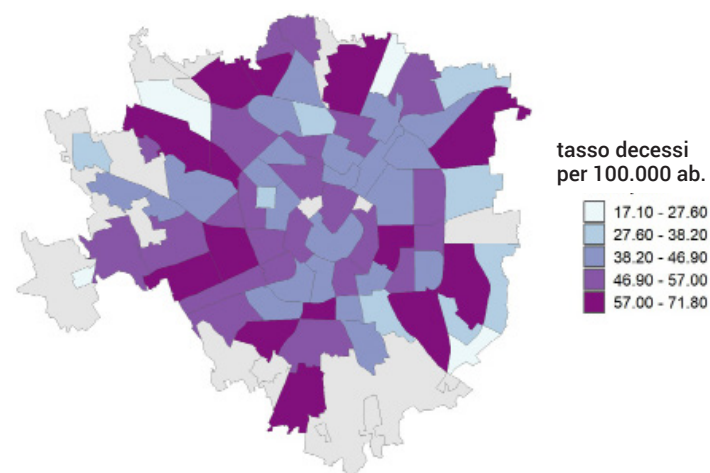
Numero di decessi per cause naturali attribuibili a PM_{2,5}



(B) Tasso di decessi per cause naturali attribuibili a NO₂



Tasso di decessi per cause naturali attribuibili a PM₁₀



Tasso di decessi per cause naturali attribuibili a PM_{2,5}

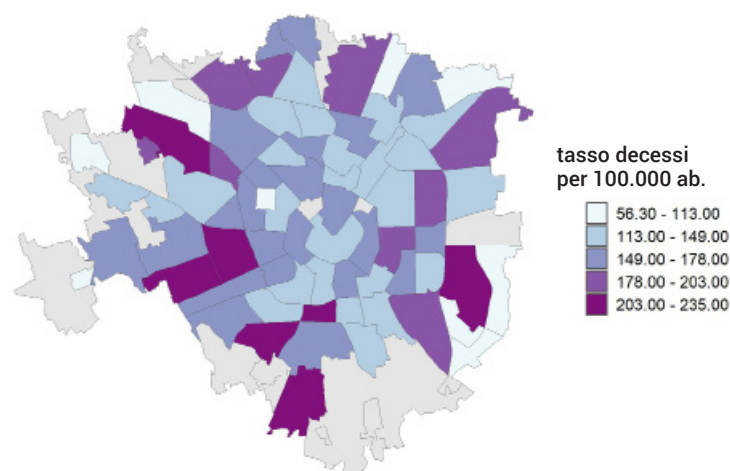


Figura 2. Stima annuale del (A) numero di decessi e (B) tasso di decessi per cause naturali su 100.000 abitanti attribuibili a esposizione a NO₂, PM₁₀ e PM_{2,5}.

Figure 2. Yearly estimated (A) number of deaths and (B) rate of deaths for natural causes per 100,000 inhabitants attributable to NO₂, PM₁₀, and PM_{2,5} exposure.

NOTA: Come soglie controfattuali sono stati utilizzati i seguenti valori: 10 µg/m³ per NO₂, 15 µg/m³ per PM₁₀ e 5 µg/m³ per PM_{2,5} (cfr tabella 1) / **NOTE:** The following values were used as counterfactual thresholds 10 µg/m³ for NO₂, 15 µg/m³ for PM₁₀ and 5 µg/m³ for PM_{2,5} (see Table 1).

RASSEGNE E ARTICOLI

mento da NO₂, come anche mostrato dalle osservazioni di riduzioni della sua concentrazione durante i periodi di *lockdown* imposti dal COVID-19.⁵⁷ La distribuzione dell'inquinante tra i NIL mostra concentrazioni più elevate nei NIL periferici, soprattutto a Est e Ovest della città, dove si trovano le maggiori arterie del traffico. La distribuzione territoriale a livello di NIL della concentrazione di PM₁₀ e PM_{2,5} non presenta livelli medi annui superiori al limite europeo. Il PM₁₀ a livello locale non supera i limiti, mentre per il PM_{2,5} si registrano alcune celle con aree a concentrazione più elevata in corrispondenza di alcune strade ad alta intensità di traffico. La distribuzione di PM₁₀ e PM_{2,5} a livello urbano mostra valori più elevati nei NIL a Nord Città e nelle zone centrali e della prima periferia a Est e Ovest, dove il contributo della rete stradale è meno pronunciato, mentre nel territorio al confine con il CdM a Nord e Sud-Ovest si riconosce il contributo delle zone industriali.

Rispetto ai nuovi livelli soglia proposti dall'OMS¹² si osserva, invece, che i valori massimi medi annui sono superati sia globalmente sia a livello locale nel territorio del CdM anche nelle aree a minore concentrazione di inquinanti.

Le stime PWE ottenute mostrano distribuzione più diffusa di alte concentrazioni nel territorio del CdM, mostrando che l'esposizione media della popolazione è più elevata. In particolar modo, si osserva che l'esposizione media pesata del comune di Milano per NO₂ è al di sotto della soglia di legge europea, ma esiste una parte della popolazione che è mediamente esposta a livelli superiori ai valori annuali di riferimento imposti per legge nelle zone a Nord-Ovest del Comune (NIL di Villapizzone, Maggiore, Cascina Triulza e Sacco) e a Sud Triulzo superiore. Per il particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}), i limiti sono sempre rispettati, seppur con concentrazioni particolarmente alte soprattutto per PM_{2,5}. In nessun caso, invece, vengono rispettate le nuove soglie proposte dall'OMS.¹² Il superamento della soglia per NO₂, in zone dove si riscontra la presenza di grandi arterie stradali, ripropone l'importanza del contenimento di questo tipo di emissioni.

Stima dei decessi attribuibili

Le stime del numero di decessi su 100.000 abitanti ottenute consentono, per la prima volta, di descrivere il carico di mortalità associato all'inquinamento nel CdM e a ogni NIL cittadino, tenendo conto dei nuovi limiti delle esposizioni proposti dall'OMS e delle funzioni di rischio ottenute in anni più recenti, riportando una forte eterogeneità, oltre che delle esposizioni, anche dei potenziali effetti.

Per il CdM, la diminuzione delle emissioni di NO₂, legate soprattutto al traffico veicolare, consentirebbe di ridurre la mortalità per cause naturali di una parte

dei decessi attribuibili stimati (1.335 decessi anno, 433 per cause cardiovascolari, 153 per cause respiratorie e 87 per tumore del polmone). Globalmente, l'impatto del particolato è superiore a quello di NO₂, considerando che sono attribuibili 1.644 decessi per cause naturali, 704 per cardiovascolari, 189 respiratorie e 156 per il tumore del polmone, rappresentando dal 12% al 18% dei decessi per causa osservati e attribuiti a PM_{2,5}. Interessante notare che l'impatto del PM_{2,5} stimato è superiore all'impatto del PM₁₀: considerando che il PM₁₀ è in parte composto da PM_{2,5}, questo risultato necessita della considerazione di numerosi elementi: **1.** l'alta percentuale di concentrazione del PM_{2,5} (87%), indicatore della natura antropica del particolato⁵⁹ nel PM₁₀ registrata; **2.** la soglia utilizzata per il PM_{2,5} (5 µg/m³); **3.** le funzioni di rischio utilizzate che derivano da metanalisi svolte in diversi contesti e riferite a diverse composizioni del particolato, composto in diversa proporzione da agglomerati di diverse dimensioni e da differenti miscele di composti anche in relazione alle diverse fonti emmissive.

La distribuzione dei tassi di decesso per cause naturali nel CdM mostra che l'impatto dell'esposizione a inquinamento atmosferico è diverso nelle aree della città. Per tutti gli inquinanti in studio, il Centro città (NIL 1) risulta mediamente meno colpito dagli effetti dell'esposizione a inquinanti, sia rispetto ad altri NIL sia alla media cittadina, pur registrando concentrazioni di inquinanti in media o superiori al resto della città. Rispetto al centro cittadino, le aree immediatamente limitrofe mostrano tassi di decesso in linea con la media del CdM. Le aree più periferiche della città generalmente, invece, registrano impatti mediamente maggiori. I NIL che registrano un maggior impatto in termini di tassi di mortalità per più cause e più esposizioni (Mecenate, Lorenteggio, Gallarate, Gratosoglio) sono NIL di zone periferiche della città, che presentano livelli di inquinamento paragonabili alla media del CdM con più di 10.000 residenti e una percentuale elevata di residenti 65+ (figura S6). I NIL nei quali si registra un minor impatto sono altri NIL periferici (Bicocca, Muggiano, Maggiore, Triulzo Superiore) con meno di 10.000 residenti (massimo 6.000 circa in zona Bicocca) e con una bassa percentuale di residenti con 65+ anni e zone periferiche con tessuto residenziale discontinuo (per esempio, Muggiano ha parte della superficie occupata da orti, Gallarate spazi sportivi e artigiani, Bicocca tessuto commerciale e Triulzo scalo ferroviario). Per i NIL con più di 10.000 abitanti si osservano bassi livelli di decessi nei NIL Adriano (cause naturali, cardiovascolari e respiratorie, bassa percentuale di 65+ e bassa età media 30+), Ripamonti (cause cardiovascolari e respiratorie, alta percentuale 65+, ma bassa età media 30+), Dergano (cause cardiovascolari e respi-

RASSEGNE E ARTICOLI

ratorie, bassa percentuale di 65+ e bassa età media 30+) e San Cristoforo (cause naturali, respiratorie e tumore del polmone, media percentuale di 65+ e bassa età media 30+) e Guastalla (tumore del polmone). A esclusione di Guastalla, che è un NIL centrale e con popolazione mediamente anziana, gli altri sono NIL periferici e con popolazione mediamente più giovane. Per le cause cardiovascolari, gli andamenti nei diversi NIL sono sovrapponibili a quanto osservato per la mortalità generale. Andamenti diversi si riscontrano per le cause respiratorie: soprattutto NO₂ e PM_{2,5} mostrano tassi di decesso attribuibile più elevati in Centro e nella zona Sud del CdM, pur continuando a mostrare in periferia zone con tassi di mortalità elevati. Particolare attenzione va posta agli impatti dell'inquinamento atmosferico nella mortalità per tumore del polmone; pur essendo la causa con un minor numero di decessi in termini assoluti in CdM, presenta tassi di decessi attribuibili paragonabili alle cause respiratorie e una frazione attribuibile di decessi superiore, in particolar modo per l'esposizione a PM_{2,5}. La distribuzione della mortalità attribuibile per tumore del polmone nel CdM pare nel complesso più omogenea nel territorio, mostrando NIL ad alto tasso di mortalità sia in zone periferiche sia in zone più centrali.

Le stime proposte derivano esclusivamente dalla diversa PWE nei singoli NIL e dal numero di decessi registrati e non considerano altri fattori, di natura anagrafica socioeconomica o di composizione del particolato, che potrebbero influenzare le stime ottenute. Alla determinazione dei tassi di mortalità del CdM, infatti, contribuiscono anche altri determinati sociali (per esempio, distribuzione dell'età media, indice di deprivazione, obesità, abitudine al fumo e alcol) e di salute (maggior prevalenza di comorbidità), che non possono essere indagate in questo studio. La riduzione del PM_{2,5}, in particolar modo, potrebbe concorrere, insieme alla limitazione del fumo di sigaretta, alla drastica riduzione della mortalità per tumore del polmone. Da quanto esposto, deriva che è difficoltoso, in presenza di una distribuzione della popolazione così varia, quantificare con sicurezza l'impatto dell'esposizione a inquinanti ambientali. Le stime proposte sono un primo passo per quantificare il reale impatto sulla popolazione del CdM dell'esposizione a inquinamento atmosferico, che andranno ulteriormente aggiustate introducendo i maggiori confondenti derivandoli sviluppando *survey* di popolazione. Inoltre, va ricordato che le stime riportate vanno sempre riferite al singolo inquinante e non tengono in alcun modo conto dell'effetto di più inquinanti sulla stessa causa di decesso; pertanto, i decessi attribuibili ai diversi inquinanti non possono essere sommati.

Per quanto riguarda la coerenza delle stime ottenu-

te, un recente lavoro sui siti contaminati condotto in Italia⁶⁰ stima i decessi per cause naturali, cardiovascolari, respiratorie e tumore del polmone attribuibili a PM₁₀ e PM_{2,5} per l'anno 2015. Le stime ottenute per il Nord Italia sono coerenti con le stime prodotte nel presente lavoro. Anche in questo caso si assiste, per il Nord Italia, a un maggior numero di decessi attribuibili a PM_{2,5} rispetto al PM₁₀. Inoltre, le stime relative ai decessi per cause naturali per esposizione a NO₂ ottenute dall'utilizzo di queste mappe sono in linea con le stime dei decessi attribuibili per il 2020 ottenute da Boniardi et al.⁵⁰ per il CdM. Per il 2019 in Italia, il Global Burden of Disease (<https://www.healthdata.org/data-tools-practices>) attribuisce al particolato un tasso di mortalità per tutte le cause pari a 40,9 per 100.000 e l'11% dei tumori del polmone, stime paragonabili a quanto attribuito all'impatto del PM₁₀ in questo lavoro, ma più basse rispetto all'impatto stimato per il PM_{2,5}. Le analisi di sensibilità proposte per altri modelli riportano stime paragonabili per NO₂ e PM_{2,5} e un maggiore impatto per PM₁₀.

Vantaggi e limiti

Vantaggio di questo lavoro è l'aver esteso le stime alle cause cardiovascolari, respiratorie e al tumore del polmone basandosi su una fonte di dati (ReNCaM) validata e coerente per tutta l'area in studio.

Recenti pubblicazioni^{14,15} attribuiscono un impatto maggiore dell'inquinamento sulla mortalità e alcuni autori^{8,13-16} riportano che non esiste un livello di soglia minimo al di sotto del quale l'esposizione non sia associata a un rischio aumentato di mortalità, quindi è possibile che le stime fornite siano in difetto rispetto al reale impatto. Anche la validazione con un modello esterno⁴⁰ o l'utilizzo di stime di rischio più elevate ma più coerenti con la realtà europea³⁹ vanno in questa direzione, soprattutto per il particolato atmosferico. Le analisi di sensibilità svolte consentono di affermare che le eventuali misclassificazioni degli indirizzi (georeferenziati al civico) dovute alla scala molto dettagliata non hanno prodotto distorsioni significative. Limite di questo studio è il non aver considerato l'impatto, nelle diverse aree della città, della diversa composizione della popolazione per età, indice di deprivazione, carico di malattie pregresse ed esposizione ad altri fattori di rischio (per esempio, fumo di sigaretta, alcol, obesità, attività fisica e dieta) e attribuendo la residenza al reclutamento come principale fattore di esposizione. Altro limite dello studio è l'aver utilizzato la modellizzazione degli inquinanti relativa al 2019 come *proxy* di esposizione a lungo termine per la valutazione di *outcome* a lungo termine e di utilizzare i decessi dello stesso anno, senza considerare il *background* di salute; questo è soprattutto vero per il tumore del polmone che ha tempi di latenza elevati.

RASSEGNE E ARTICOLI

Nelle stime è stata modellizzata solamente la variabilità legata alle funzioni di rischio senza considerare la variabilità introdotta dalle stime della modellizzazione degli inquinanti. Nel presente lavoro, inoltre, ci si è soffermati solo sullo studio dei principali *outcome* di mortalità legati alle esposizioni a lungo termine agli inquinanti ambientali, ma non va dimenticato che questi rappresentano solo una parte degli effetti delle esposizioni lungo termine di inquinanti ambientali: ulteriori studi saranno necessari per indagare l'impatto dell'inquinamento atmosferico anche rispetto ad altri *outcome* a lungo termine⁶, nonché ad approfondire gli impatti a breve termine. Sarà, inoltre, necessario indagare la relazione combinata di più esposizioni⁶¹ e l'eventuale esistenza di effetti legati alle specifiche componenti e origini del particolato.⁶²

Conclusioni

Nel CdM, all'esposizione a lungo termine a NO₂ si attribuiscono 1.300 decessi annui e un numero superiore, più di 1.600, all'esposizione a particolato atmosferico (PM_{2,5}). Considerando il grande impatto stimato

solo in termini di mortalità, è importante che i cittadini, la politica e i portatori di interesse in genere si confrontino con questa problematica, sia alla luce dell'impatto sulla salute sia del forte impatto economico dei relativi costi sanitari e di cura. È necessario attuare strategie per la mitigazione degli effetti sulla salute delle esposizioni a particolato atmosferico e insieme implementare politiche integrate per la riduzione delle emissioni e delle concentrazioni di inquinamento.

Conflitti di interesse dichiarati: nessuno.

Ringraziamenti: si ringrazia Terraria s.r.l. (G. Maffei e F. Ferrari) che, a seguito della vincita di una gara a evidenza pubblica, ha realizzato le mappe di concentrazione nel territorio di ATS.

Bibliografia

1. Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet Lond Engl* 2014;383(9919):785-95. doi: 10.1016/S0140-6736(13)62158-3
2. Khomenko S, Cirach M, Pereira-Barboza E et al. Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *Lancet Planet Health* 2021;5(3):e121-34. doi: 10.1016/S2542-5196(20)30272-2
3. Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2020;143:105974. doi: 10.1016/j.envint.2020.105974
4. Andersen ZJ, Pedersen M, Weinmayr G et al. Long-term exposure to ambient air pollution and incidence of brain tumor: the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Neuro Oncol* 2018;20(3):420-32. doi: 10.1093/neuonc/nox163
5. Andersen ZJ, Zhang J, Jørgensen JT et al. Long-term exposure to air pollution and mortality from dementia, psychiatric disorders, and suicide in a large pooled European cohort: ELAPSE study. *Environ Int* 2022;170:107581. doi: 10.1016/j.envint.2022.107581
6. So R, Chen J, Mehta AJ et al. Long-term exposure to air pollution and liver cancer incidence in six European cohorts. *Int J Cancer* 2021;149(11):1887-97. doi: 10.1002/ijc.33743
7. Shi L, Steenland K, Li H et al. A national cohort study (2000-2018) of long-term air pollution exposure and incident dementia in older adults in the United States. *Nat Commun* 2021;12(1):6754. doi: 10.1038/s41467-021-27049-2
8. Wolf K, Hoffmann B, Andersen ZJ et al. Long-term exposure to low-level ambient air pollution and incidence of stroke and coronary heart disease: a pooled analysis of six European cohorts within the ELAPSE project. *Lancet Planet Health* 2021;5(9):e620-32. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00195-9
9. Danesh Yazdi M, Wang Y, Di Q, Zanobetti A, Schwartz J. Long-term exposure to PM_{2.5} and ozone and hospital admissions of Medicare participants in the Southeast USA. *Environ Int* 2019;130:104879. doi: 10.1016/j.envint.2019.05.073
10. Lei J, Chen R, Liu C et al. Fine and coarse particulate air pollution and hospital admissions for a wide range of respiratory diseases: a nationwide case-crossover study. *Int J Epidemiol* 2023;52(3):715-26. doi: 10.1093/ije/dyad056
11. European Environment Agency. Health impacts of air pollution in Europe, 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/health-impacts-of-air-pollution> (Ultimo accesso: 22.05.2023).
12. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva, World Health Organization, 2021. (Ultimo accesso: 18.01.2023). Disponibile all'indirizzo: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
13. Beelen R, Hoek G, Raaschou-Nielsen O et al. Natural-cause mortality and long-term exposure to particle components: an analysis of 19 European cohorts within the multi-center ESCAPE project. *Environ Health Perspect* 2015;123(6):525-33. doi: 10.1289/ehp.1408095
14. Stafoggia M, Oftedal B, Chen J et al. Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project. *Lancet Planet Health* 2022;6(1):e9-18. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00277-1
15. Strak M, Weinmayr G, Rodopoulou S et al. Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis. *BMJ* 2021;374:n1904. doi: 10.1136/bmj.n1904
16. Weichenthal S, Pinault L, Christidis T et al. How low can you go? Air pollution affects mortality at very low levels. *Sci Adv* 2022;8(39):eabo3381. doi: 10.1126/sciadv.abo3381
17. Demo-Geodemo. Mappe, Popolazione, Statistiche Demografiche dell'ISTAT. Disponibile all'indirizzo: <https://demo.istat.it/index.php> (Ultimo accesso: 12.04.2022).
18. Comune di Milano. Nuclei d'Identità Locale (NIL) VIGENTI - PGT 2030. Disponibile all'indirizzo: <https://dati.comune.milano.it/it/dataset/ds964-nil-vigenti-pgt-2030> (Ultimo accesso: 19.01.2023).
19. ARPA Lombardia. Rapporto Sulla Qualità Dell'aria Della Città Metropolitana Di Milano ANNO 2019. 2021.
20. Baccini M, Grisotto L, Catelan D, Consonni D, Bertazzi PA, Biggeri A. Commuting-adjusted short-term health impact assessment of airborne fine particles with uncertainty quantification via Monte Carlo simulation. *Environ Health Perspect* 2015;123(1):27-33. doi: 10.1289/ehp.1408218
21. Carugno M, Consonni D, Randi G et al. Air pollution exposure, cause-specific deaths and hospitalizations in a highly polluted Italian region. *Environ Res* 2016;147:415-24. doi: 10.1016/j.envres.2016.03.003
22. Carugno M, Consonni D, Bertazzi PA, Biggeri A, Baccini M. Temporal trends of PM₁₀ and its impact on mortality in Lombardy, Italy. *Environ Pollut* 2017;227:280-86. doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.077
23. Santus P, Russo A, Madonini E et al. How air pollution influences clinical management of respiratory diseases. A case-crossover study in Milan. *Respir Res* 2012;13(1):95. doi: 10.1186/1465-9921-13-95
24. Baccini M, Mattei A, Mealli F, Bertazzi PA, Carugno M. Assessing the short term impact of air pollution on mortality: a matching approach. *Environ Health* 2017;16(1):7. doi: 10.1186/s12940-017-0215-7
25. Forastiere L, Carugno M, Baccini M. Assessing short-term impact of PM₁₀ on mortality using a semiparametric generalized propensity score approach. *Environ Health* 2020;19(1):46. doi: 10.1186/s12940-020-00599-6

RASSEGNE E ARTICOLI

26. Biggeri A, Baccini M, Bellini P, Terracini B. Meta-analysis of the Italian studies of short-term effects of air pollution (MISA), 1990-1999. *Int J Occup Environ Health* 2005;11(1):107-22. doi: 10.1179/oeh.2005.11.1.107
27. Magnoni P, Murtas R, Russo AG. Residential exposure to traffic-borne pollution as a risk factor for acute cardiocerebrovascular events: a population-based retrospective cohort study in a highly urbanized area. *Int J Epidemiol* 2021;50(4):1160-71. doi: 10.1093/ije/dyab068
28. Gervasi F, Murtas R, Decarli A, Russo AG. Residential distance from high-voltage overhead power lines and risk of Alzheimer's dementia and Parkinson's disease: a population-based case-control study in a metropolitan area of Northern Italy. *Int J Epidemiol* 2019;48(6):1949-57. doi: 10.1093/ije/dyz139
29. Murtas R, Andreano A, Greco MT, Tunesi S, Russo AG. Cancer incidence and congenital anomalies evaluation in the contaminated sites of Sesto San Giovanni – the SENTIERI Project. *Ann Ist Super Sanita* 2019;55(4):345-50. doi: 10.4415/ANN_19_04_07
30. Murtas R, Russo AG. Effects of pollution, low temperature and influenza syndrome on the excess mortality risk in winter 2016-2017. *BMC Public Health* 2019;19(1):1445. doi: 10.1186/s12889-019-7788-8
31. Faccini M, Russo AG, Bonini M et al. Large community-acquired Legionnaires' disease outbreak caused by *Legionella pneumophila* serogroup 1, Italy, July to August 2018. *Euro Surveill* 2020;25(20):1900523. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.20.1900523
32. Fonte L, Murtas R, Russo AG. Comparison between cohort and case-control approaches for health impact assessment on a population exposed to the emissions of an incinerator. *Epidemiol Prev* 2017;41(3-4):176-83. doi: 10.19191/EP17.3-4.P176.050
33. Anagrafe Regionale degli assistiti e delle strutture. Disponibile all'indirizzo: <https://www.siss.regione.lombardia.it/wps/portal/site/siss/il-sistema-informativo-socio-sanitario/principali-servizi-offerti/anagrafe-regionale-degli-assistiti-e-delle-strutture> (Ultimo accesso: 28.04.2022).
34. Flemming J, Ferrari F, Gianfreda R, Maffei G. UTAQ, a tool to manage the severe air pollution episodes. *Environ Eng Manag J* 2020;19(10):1915-26. doi: 10.30638/eemj.2020.182
35. Martenes SE, Wilkins D, Batterman SA. Health impact metrics for air pollution management strategies. *Environ Int* 2015;85:84-95. doi: 10.1016/j.envint.2015.08.013
36. Greenland S. Interval estimation by simulation as an alternative to and extension of confidence intervals. *Int J Epidemiol* 2004;33(6):1389-97. doi: 10.1093/ije/dyh276
37. Steenland K, Armstrong B. An overview of methods for calculating the burden of disease due to specific risk factors. *Epidemiol Camb Mass* 2006;17(5):512-19. doi: 10.1097/01.ede.0000229155.05644.43
38. Hoffmann B, Brunekreef B, Andersen ZJ, Forastiere F, Boogaard H. Benefits of future clean air policies in Europe. *Environ Epidemiol* 2022;6(5):e221. doi: 10.1097/EE9.0000000000000221
39. Huangfu P, Atkinson R. Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2020;144:105998. doi: 10.1016/j.envint.2020.105998
40. Stafoggia M, Cattani G, Ancona C, Ranzi A. Exposure assessment of air pollution in Italy 2016-2019 for future studies on air pollution and COVID-19. *Epidemiol Prev* 2020;44(5-6) Suppl 2:161-68. doi: 10.19191/EP20.5-6.S2.115
41. Baccini M, Biggeri A, Grillo P, Consonni D, Bertazzi PA. Health impact assessment of fine particle pollution at the regional level. *Am J Epidemiol* 2011;174(12):1396-405. doi: 10.1093/aje/kwr256
42. Angelici L, Piola M, Cavalleri T et al. Effects of particulate matter exposure on multiple sclerosis hospital admission in Lombardy region, Italy. *Environ Res* 2016;145:68-73. doi: 10.1016/j.envres.2015.11.017
43. Consonni D, Carugno M, Matteis SD et al. Outdoor particulate matter (PM10) exposure and lung cancer risk in the EAGLE study. *PLoS One* 2018;13(9):e0203539. doi: 10.1371/journal.pone.0203539
44. Contiero P, Boffi R, Tagliabue G et al. A Case-Crossover Study to Investigate the Effects of Atmospheric Particulate Matter Concentrations, Season, and Air Temperature on Accident and Emergency Presentations for Cardiovascular Events in Northern Italy. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16(23):E4627. doi: 10.3390/ijerph16234627
45. Giovannini M, Sala M, Riva E, Radaelli G. Hospital admissions for respiratory conditions in children and outdoor air pollution in Southwest Milan, Italy. *Acta Paediatr* 2010;99(8):1180-85. doi: 10.1111/j.1651-2227.2010.01786.x
46. Forastiere F, Stafoggia M, Berti G et al. Particulate Matter and Daily Mortality: A Case-Crossover Analysis of Individual Effect Modifiers. *Epidemiology* 2008;19(4):571-80. doi: 10.1097/EDE.0b013e3181761f8a
47. Chiusolo M, Cadum E, Stafoggia M et al. Short-Term Effects of Nitrogen Dioxide on Mortality and Susceptibility Factors in 10 Italian Cities: The EpiAir Study. *Environ Health Perspect* 2011;119(9):1233-38. doi: 10.1289/ehp.1002904
48. Biggeri A, Bellini P, Terracini B. Meta-analysis of the Italian studies on short-term effects of air pollution – MISA 1996-2002. *Epidemiol Prev* 2004;28(4-5) Suppl:4-100.
49. Alessandrini ER, Faustini A, Chiusolo MC et al. Air pollution and mortality in twenty-five Italian cities: results of the EpiAir2 Project. *Epidemiol Prev* 2013;37(4-5):220-29.
50. Boniardi L, Nobile F, Stafoggia M, Michelozzi P, Ancona C. A multi-step machine learning approach to assess the impact of COVID-19 lockdown on NO2 attributable deaths in Milan and Rome, Italy. *Environ Health* 2022;21(1):17. doi: 10.1186/s12940-021-00825-9
51. Cittadini per l'aria. NO2. Milano le mappe di analisi 2020. Disponibile all'indirizzo: <https://www.cittadiniperlaria.org/no2-milano-le-mappe-di-analisi-2020/> (Ultimo accesso: 08.05.2023).
52. Badaloni C, Cattani G, De Donato F et al. Big data in environmental epidemiology. Satellite and land use data for the estimation of environmental exposures at national level. *Epidemiol Prev* 2018;42(1):46-59. doi: 10.19191/EP18.1.P046.015
53. Stafoggia M, Bellander T, Bucci S et al. Estimation of daily PM10 and PM2.5 concentrations in Italy, 2013-2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environ Int* 2019;124:170-79. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.016
54. Gariazzo C, Carlino G, Silibello C et al. A multi-city air pollution population exposure study: Combined use of chemical-transport and random-Forest models with dynamic population data. *Sci Total Environ* 2020;724:138102. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138102
55. de Hoogh K, Chen J, Gulliver J et al. Spatial PM2.5, NO2, O3 and BC models for Western Europe - Evaluation of spatiotemporal stability. *Environ Int* 2018;120:81-92. doi: 10.1016/j.envint.2018.07.036
56. Klompaker JO, Janssen N, Andersen ZJ et al. Comparison of associations between mortality and air pollution exposure estimated with a hybrid, a land-use regression and a dispersion model. *Environ Int* 2021;146:106306. doi: 10.1016/j.envint.2020.106306
57. Collivignarelli MC, Abbà A, Bertanza G, Pedrazzani R, Ricciardi P, Carnevale Miino M. Lockdown for CoVID-2019 in Milan: What are the effects on air quality? *Sci Total Environ* 2020;732:139280. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280
58. Baccini M, Biggeri A, Gruppo collaborativo EpiAir2. Short-term impact of air pollution among Italian cities covered by the EpiAir2 project. *Epidemiol Prev* 2013;37(4-5):252-62.
59. Colangeli C, Palermi S, Bianco S, Aruffo E, Chiacchieretta P, Di Carlo P. The Relationship between PM2.5 and PM10 in Central Italy: Application of Machine Learning Model to Segregate Anthropogenic from Natural Sources. *Atmosphere* 2022;13(3):484. doi: 10.3390/atmos13030484
60. Bauleo L, Fabri A, De Santis M, Soggiu ME, Ancona C. SENTIERI Project: air pollution and health impact of population living in industrial areas in Italy. *Epidemiol Prev* 2023;47(1-2) Suppl 1:338-53. doi: 10.19191/EP23.1-2-S1.007
61. Chen J, Rodopoulou S, de Hoogh K et al. Long-Term Exposure to Fine Particle Elemental Components and Natural and Cause-Specific Mortality-a Pooled Analysis of Eight European Cohorts within the ELAPSE Project. *Environ Health Perspect* 2021;129(4):47009. doi: 10.1289/EHP8368
62. Hvidtfeldt UA, Chen J, Andersen ZJ et al. Long-term exposure to fine particle elemental components and lung cancer incidence in the ELAPSE pooled cohort. *Environ Res* 2021;193:110568. doi: 10.1016/j.envres.2020.110568