

Effetti a breve termine del PM₁₀ sulla mortalità causa-specifica e ruolo delle pressioni ambientali di lungo periodo nelle aree industriali di Brindisi e Civitavecchia

Short-term effects of PM₁₀ on cause-specific mortality and the role of long-term environmental pressures in the industrial areas of Brindisi and Civitavecchia

Matteo Renzi,¹ Gianni Tinarelli,² Lisa Bauleo,¹ Sara Maio,³ Claudio Gariazzo,⁴ Massimo Stafoggia,¹ Ida Galise,⁵ Meri Serinelli,⁵ Angela Morabito,⁵ Alessandra Nocioni,⁵ Giovanni Viegi,³ Paola Michelozzi,¹ Carla Ancona¹

¹ Dipartimento di Epidemiologia SSR Lazio, ASL Roma1, Roma

² ARIANET SRL, Milano

³ Istituto di fisiologia clinica, CNR, Pisa

⁴ Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale, Inail, Roma

⁵ Agenzia regionale per la prevenzione e protezione dell'ambiente della Regione Puglia, Bari

Corrispondenza: Matteo Renzi; m.renzi@deplazio.it

Riassunto

Obiettivi: la popolazione residente in prossimità di impianti industriali risulta spesso esposta a diverse pressioni ambientali. L'obiettivo di questo studio è valutare la relazione tra PM₁₀ giornaliero e mortalità causa-specifica in una selezione di comuni in prossimità di due impianti industriali nel periodo 2006-2015.

Disegno: è stato utilizzato un disegno di serie temporale con regressione di Poisson aggiustata per un set di confondenti definiti a priori per quantificare l'associazione tra esposizione a breve termine, calcolata come PM₁₀ giornaliero extrapolato da modelli *machine-learning* su dati satellitari e mortalità causa-specifica.

Setting e partecipanti: sono stati selezionati 20 comuni in prossimità degli impianti termoelettrici di Civitavecchia e Brindisi. I comuni sono stati poi suddivisi in diverse aree di studio derivati da 3 scenari di esposizione cronica crescente sulla base di modelli SPRAY di simulazione di ricaduta al suolo degli inquinanti.

Principali misure di outcome: decessi giornalieri comuni-specifici per cause non-accidentali, cardiovascolari e respiratorie definiti sulla base del codice internazionale di classificazione delle patologie.

Risultati: sono stati osservati un totale di 41.942 decessi nell'intera area (10.503 nell'area di Civitavecchia e 31.439 nell'area di Brindisi), di cui circa il 41% è avvenuto per cause cardiovascolari, mentre l'8% per cause respiratorie. Le misure di associazione hanno mostrato un incremento degli effetti a breve termine nei comuni maggiormente esposti a livelli cronici di inquinamento, per esempio con stime di rischio riportate come incrementi percentuali per aumenti di 10 unità di PM₁₀ pari a 6,7% (IC95%: 0,9, 12,7%) nello scenario 3 (maggiormente esposto) contro un valore pari a 4,2% (-1,2, 9,9%) e 2,7% (-4,2, 10,2%) negli scenari 2 e 1 rispettivamente, nell'area in prossimità dell'impianto di Civitavecchia. Effetti simili sono stati osservati per l'area di Brindisi.

Conclusioni: nonostante la relazione tra inquinamento a breve termine e mortalità sia stata ben documentata, emerge che una maggiore esposizione cronica a inquinanti industriali determina un aumento degli effetti a breve termine del PM₁₀. La ridotta numerosità degli eventi suggerisce che questo studio può rappresentare un punto di inizio per un'indagine a larga scala.

Parole chiave: inquinamento, industria, Civitavecchia, Brindisi, PM₁₀

Cosa si sapeva già

- In Italia sono presenti numerosi impianti industriali che determinano una forte pressione ambientale sulle popolazioni residenti in prossimità degli stessi.
- Gli effetti acuti di esposizioni giornaliere a inquinamento atmosferico sono stati ben documentati su diversi esiti sanitari, sia in ambito nazionale sia internazionale.
- L'esposizione cronica a inquinamento atmosferico industriale causa un incremento di rischio per mortalità e morbosità per diverse cause.

Cosa si aggiunge di nuovo

- Valutare gli effetti acuti dell'inquinamento atmosferico in modo specifico in realtà già esposte a pressioni ambientali industriali.
- Utilizzare metodologie innovative per determinare l'esposizione acuta, grazie allo sviluppo di modelli *machine learning* basati su dati satellitari, e cronica, grazie a modelli di simulazione di ricaduta al suolo degli inquinanti.
- Quantificare effetti acuti differenziali per gradienti di esposizione cronica a inquinamento industriale per cause di morte in popolazioni residenti in prossimità di due importanti impianti italiani (Civitavecchia e Brindisi).

Abstract

Objectives: the health status of people living near industrial plants is often exposed to several environmental risk factors, including air pollution. The aim of this study is to assess the relationship between daily PM₁₀ levels and cause-specific mortality in a selection of municipalities near two industrial plants from 2006 to 2015.

Design: a time-series design with Poisson regression adjusted for a predefined set of confounders was used to quantify the association between exposure, calculated as daily PM₁₀ levels extrapolated from machine-learning models using satellite data, and cause-specific mortality.

Setting and participants: twenty municipalities near the thermal power plants in Civitavecchia and Brindisi were selected. The municipalities were then divided into three scenarios of chronic exposure derived from SPRAY simulation models of pollutant deposition.

Main outcome measures: daily cause-specific non-acci-

dental, cardiovascular, and respiratory deaths defined according to the International Classification of Diseases code at the municipality level.

Results: a total of 41,942 deaths were observed in the entire area (10,503 in the Civitavecchia area and 31,439 in the Brindisi area), of which approximately 41% were due to cardiovascular causes and 8% due to respiratory causes. The association showed an increase in short-term effects in municipalities with higher chronic levels of pollution exposure. For example, risk estimates reported as percentage increases per 10-unit increase in PM₁₀ were 6.7% (95% CI 0.9, 12.7%) in scenario 3 (highest ex-

posure) compared to 4.2% (-1.2, 9.9%) and 2.7% (-4.2, 10.2%) in scenarios 2 and 1, respectively, in the area near the Civitavecchia plant. Similar effects were observed for the Brindisi area.

Conclusions: despite the well-documented relationship between short-term pollution and mortality, it appears that greater chronic exposure to industrial pollutants leads to increased short-term effects of PM₁₀. The limited number of events suggests that this study could serve as a starting point for a larger investigation.

Keywords: air pollution; industria; Civitavecchia; Brindisi; PM₁₀

Introduzione

L'inquinamento atmosferico è uno dei principali fattori di rischio ambientali per la salute umana.^{1,2} L'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha calcolato che circa il 99% della popolazione mondiale risulta esposta a concentrazioni di inquinanti aerodispersi più elevate dei valori da essa raccomandati nel 2021.³ Il principale inquinante atmosferico è rappresentato dal materiale particolato (PM₁₀ e PM_{2,5} - in base al diametro delle particelle) prodotto in gran percentuale da attività antropiche, come traffico veicolare e attività industriali. In Italia, l'esposizione cronica a livelli medi di PM_{2,5} superiori a 5 µg/m³, come raccomandato dalle Linee Guida OMS del 2021 (WHO-2021), è responsabile ogni anno di più di 72.000 decessi, di cui 39.628 stimati nelle regioni della Pianura Padana e 10.232 nelle 6 città italiane con popolazione >500.000 abitanti.⁴ Soprattutto in aree fortemente esposte a pressioni industriali, la popolazione residente mostra un aumento della suscettibilità a diversi esiti sanitari (mortalità e morbosità causa-specifica). La letteratura epidemiologica ha prodotto negli ultimi decenni numerose evidenze a supporto di questa ipotesi, sottolineando che spesso in queste aree sono molteplici le fonti di pressione ambientale e sociale⁵⁻⁸ che determinano un peggioramento generale dello stato di salute della popolazione residente. Allo stesso modo, anche la relazione tra gli esiti sanitari ed esposizioni "acute" o giornaliere a PM è ben documentata.⁹⁻¹² Tuttavia, sono poche le evidenze che si sono focalizzate sul ruolo dell'esposizione acuta in contesti di aree a rischio da pressioni industriali croniche.

La modellistica ambientale permette di mappare e stimare le concentrazioni al suolo dei principali inquinanti, integrando tramite innovative tecniche geostatistiche gli esiti delle simulazioni condotte con modelli di chimica e trasporto e le misure fornite dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria. Negli ultimi anni, sono state raffinate metodologie basate sul *machine learning* per predire le concentrazioni giornaliere di inquinamento su tutto il territorio nazio-

nale,^{13,14} utilizzando dati satellitari e variabili orografiche. Allo stesso tempo, modelli di simulazione dei processi di dispersione in atmosfera in grado di tener conto di sorgenti molteplici, come il codice lagrangiano a particelle 3D SPRAY,¹⁵ consentono di valutare in modo fine su specifiche aree la ricaduta al suolo e la distribuzione degli inquinanti da sorgenti industriali. L'uso combinato di questi approcci permette di valutare l'esposizione giornaliera agli inquinanti, tenendo conto di esposizioni croniche da sorgenti puntuali, come gli impianti industriali.

I risultati del progetto BIGEPI mostrano l'effetto dell'esposizione acuta del PM₁₀ su diversi esiti di salute nei residenti nei comuni interessati dagli impianti industriali presenti sul territorio nazionale.^{10,16} L'obiettivo specifico di questo lavoro è avvantaggiarsi di una metodologia modellistica di dispersione in atmosfera in grado di descrivere con dettaglio le aree di impatto di impianti industriali, allo scopo di meglio valutare se diversi livelli di esposizione cronica possano rappresentare un elemento di suscettibilità per gli effetti acuti dell'inquinamento. Sono, quindi, stati condotti due casi studio che considerano le centrali termoelettriche di Torvaldaliga Nord a Civitavecchia (Lazio) e Brindisi (Puglia).

La relazione tra PM₁₀ e mortalità causa-specifica è stata, quindi, osservata in una selezione di comuni in prossimità dei due impianti nel periodo 2006-2015. Inoltre, sono stati costruiti diversi scenari di esposizione cronica per valutare possibili effetti differenziali del PM₁₀ giornaliero sugli esiti di salute.

Metodi

Area in studio

Sono stati inclusi 20 comuni in prossimità dei due impianti industriali in studio. La selezione degli impianti è stata effettuata in base alle peculiarità delle due aree e alla disponibilità dei dati. La Tabella 1 mostra la lista dei comuni, sulla base della simulazione emissiva prodotta su un dominio di 26 km² per il sito di Torvaldaliga e di 30 km² per quello di Brindisi (Figura 1).

La scelta delle aree e delle loro dimensioni tiene conto sia delle caratteristiche tipiche di anemologia del sito sia della localizzazione dei principali centri abitati presenti nelle vicinanze degli stabilimenti.

All'interno delle aree specificate, è stato utilizzato il modello lagrangiano a particelle SPRAY^{15,17} per la ricostruzione, su base annuale, delle aree di impatto delle emissioni principali degli impianti industriali. Questa classe di modelli supera i limiti teorico/pratici dei modelli più semplificati (gaussiani rettilinei e stazionari e modelli a puff), in quanto consente di seguire l'evoluzione dei pennacchi emessi seguendo in modo esplicito le caratteristiche tridimensionali della meteorologia e della turbolenza in ogni punto, non solo in corrispondenza del baricentro dei pennacchi emessi. Questo permette, per esempio, di simulare fenomeni quali la separazione verticale di porzioni del pennacchio in presenza di forti variazioni della

direzione del vento ("shear") o di circolazioni a regime di brezza, come quelle che vengono a determinarsi nei due siti in esame. L'informazione meteorologica su base annuale utilizzata, riferita all'anno 2015, è stata ricostruita mediante i dati prodotti dal modello meteorologico prognostico WRF sull'intero territorio nazionale a 5 km di risoluzione orizzontale, resi disponibili dal progetto BEEP (Big data in Environmental Epidemiology).¹⁸ Tale informazione è stata adattata, sui domini target, alla risoluzione orizzontale di 200 m tenendo conto delle caratteristiche orografiche superficiali e di uso del suolo mediante i modelli diagnostici SWIFT19 e SURFPRO.¹⁹

Scopo delle simulazioni mediante il codice SPRAY è quello di definire in maniera il più possibile precisa l'area, o il footprint, di impatto delle emissioni degli impianti industriali, da utilizzare per ricostruire scenari di esposizione più realistici rispetto alle effettive



Figura 1. Rappresentazione grafica sul territorio dei domini di calcolo per le simulazioni di dispersione (quadrati in rosso) per l'area di Torrevaldaliga di 26 km² (sinistra) e per l'area di Brindisi di 30 km² (destra).

Figure 1. Geographical representation of the computational domains for dispersion simulations (red squares) for the Torrevaldaliga area of 26 km² (left) and the Brindisi area of 30 km² (right).

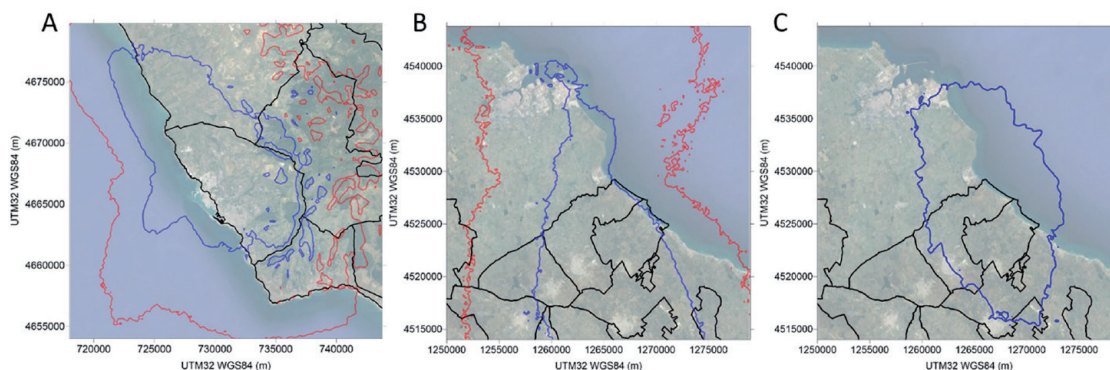


Figura 2. Rappresentazione grafica sul territorio delle aree superiori al 25° percentile della distribuzione di inquinante (in rosso) e superiore al 75° percentile (in blu); in nero i confini comunali. Emissioni puntuali della centrale di Torrevaldaliga Nord (pannello A) e Brindisi (pannello B) ed emissioni del carbonile della centrale di Brindisi (pannello C).

Figure 2. Geographical representation of areas above the 25th percentile of the pollutant distribution (in red) and above the 75th percentile (in blue); municipal boundaries are shown in black. Point source emissions from the Torrevaldaliga Nord power plant (Panel A) and Brindisi (Panel B), and carbonyl emissions from the Brindisi power plant (Panel C).

ve caratteristiche meteo-diffusive locali. Sulla base della simulazione emissiva prodotta sui due domini, sono stati costruiti 3 scenari di esposizione cronica data da PM₁₀ industriale:

■ Scenario 1: tutti i comuni del dominio con una concentrazione di inquinante superiore a 0;

■ Scenario 2: comuni con una concentrazione superiore al 25° percentile della distribuzione dell'inquinante al suolo (0,003470 µg/m³ nell'area di Civitavecchia; 0,02018 µg/m³ nell'area di Brindisi);

■ Scenario 3: comuni con una concentrazione superiore al 75° percentile (0,006207 µg/m³ nell'area di Civitavecchia; 0,06162 µg/m³ nell'area di Brindisi).

Infine, per il solo impianto di Brindisi, è stato prodotto uno scenario supplementare, considerando solo le emissioni del carbonile dell'impianto (Scenario carbonile) in virtù delle diverse caratteristiche rispetto ai camini di emissione degli scenari principali. Infatti, il carbonile determina delle emissioni di lungo periodo con livelli di concentrazione molto più elevati e presenta delle caratteristiche peculiari che sono considerate a sé stanti rispetto alle altre fonti emissive dell'impianto.

Tutti i comuni selezionati nello scenario 3 sono stati considerati anche nello scenario 2 e 1.

La Figura 2 mostra le isolinee che racchiudono le superfici di territorio contenenti i valori di concentrazione superiori al 25° e al 75° percentile (rispettivamente in rosso e in blu) della distribuzione di inquinante al suolo nei domini di Torrevaldaliga Nord (pannello A) e Brindisi (pannelli B e C). Le aree contenute entro le linee rosse rappresentano quelle relative allo scenario 2, mentre le aree contenute entro le linee blu rappresentano gli scenari 3 e carbonile. I comuni vengono assegnati agli scenari di esposizione sulla base della media ponderata di esposizione per l'area di intersezione. Complessivamente, la lista dei comuni che risultano interessati dagli scenari considerati è rappresentata in Tabella 1.

Esposizione

L'esposizione giornaliera è stata calcolata utilizzando i dati giornalieri di PM₁₀ prodotti nell'ambito del progetto BEEP,²⁰ sulla base di modelli *machine learning* applicati a dati satellitari e meteorologici. La metodologia è descritta in dettaglio nei precedenti articoli scientifici prodotti e nei paragrafi precedenti di questo stesso contributo.²¹

Esiti

Sono state raccolte informazioni aggregate dal Ministero della salute italiano sulla mortalità causa-specifica per ogni comune e giorno nel periodo 2006-2015. In particolare, gli esiti sanitari oggetto di studio (codi-

| Comuni | Impianto | Scenario |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| Brindisi | Centrale Brindisi | 1 + carbonile |
| Cellino San Marco | Centrale Brindisi | 1+2 |
| Mesagne | Centrale Brindisi | 1 |
| San Donaci | Centrale Brindisi | 1 |
| San Pancrazio Salentino | Centrale Brindisi | 1 |
| San Pietro Vernotico | Centrale Brindisi | 1 + 2 + 3 + carbonile |
| Torchiarolo | Centrale Brindisi | 1 + 2 + 3 + carbonile |
| Campi Salentina | Centrale Brindisi | 1 + 2 |
| Guagnano | Centrale Brindisi | 1 + 2 |
| Lecce | Centrale Brindisi | 1 + 2 |
| Squinzano | Centrale Brindisi | 1 + 2 + 3 |
| Surbo | Centrale Brindisi | 1 + 2 |
| Trepuzzi | Centrale Brindisi | 1 + 2 |
| Blera | Torrevaldaliga Nord | 1 |
| Monte Romano | Torrevaldaliga Nord | 1 |
| Tarquinia | Torrevaldaliga Nord | 1 + 2 |
| Allumiere | Torrevaldaliga Nord | 1 + 2 |
| Civitavecchia | Torrevaldaliga Nord | 1 + 2 + 3 |
| Santa Marinella | Torrevaldaliga Nord | 1 + 2 |
| Tolfa | Torrevaldaliga Nord | 1 + 2 |

Tabella 1. Lista dei comuni presenti nell'area in studio, afferenti ai due impianti e agli scenari considerati

Table 1. List of municipalities included in the study area, related to the two plants, and considered scenarios.

ci della 9° versione della Classificazione internazionale delle malattie) sono stati: mortalità non accidentale (ICD-9:0-799), cardiovascolare (390-459) e respiratoria (460-519).

Analisi statistica

Le distribuzioni delle variabili continue sono riportate come media e deviazione standard. L'analisi è stata condotta con un approccio di serie temporale a due stadi. Nel primo stadio sono state prodotte stime di effetto comune specifico, mentre nella seconda fase è stata applicata una meta-analisi a effetti fissi, considerata la bassa eterogeneità, delle stime precedentemente ottenute al fine di estrapolare una stima *pooled*. Questo approccio è stato realizzato separatamente per i due impianti in analisi. Le stime comunali sono state ottenute tramite una regressione di Poisson aggiustata per confondenti definiti *a priori* come temperatura media, giorno della settimana, vacanze nazionali, giorni di decremento estivo della popolazione, epidemie influenzali e trend temporali. Le modalità di aggiustamento sono state esplicitate in dettaglio negli articoli precedenti di questo contributo monografico. La valutazione delle stime di rischio è stata effettuata su 4 finestre temporali di esposizione a PM₁₀ (lag 0, 0-1, 2-5 e 0-5), in accordo alla metodologia già applicata in studi precedenti.^{9,11,22} In questo modo è stato possibile indagare gli effetti immediati (lag 0, lag 0-1), ritardati (lag 2-5) e prolungati (lag 0-5) del PM₁₀ giornaliero.

| Variabile | Torrevaldaliga Nord | | | Brindisi | | | |
|------------------------|---------------------|-------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Carbonile |
| | n. (%) | n. (%) | n. (%) | n. (%) | n. (%) | n. (%) | n. (%) |
| Comuni | 7 (100) | 5 (71) | 1 (14) | 13 (100) | 9 (69) | 3 (23) | 3 (23) |
| Mortalità | | | | | | | |
| Non-accidentale | 10.503 (100) | 10.155 (97) | 6.278 (60) | 31.439 (100) | 17.803 (57) | 2.885 (9) | 12.177 (39) |
| Cardiovascolare | 4.269 (41) | 4.116 (96) | 2.421 (57) | 13.010 (41) | 7.778 (60) | 1.223 (9) | 4.740 (15) |
| Respiratoria | 801 (8) | 780 (97) | 487 (61) | 2.454 (8) | 1.316 (54) | 251 (10) | 1.056 (3) |
| Esposizioni | | | | | | | |
| PM ₁₀ medio | 21,7 (7,4) | 22,5 (7,7) | 26 (8,0) | 26,0 (10,3) | 26,3 (10,3) | 26,1 (10,3) | 24,8 (9,7) |

Tabella 2. Descrizione delle variabili di esposizione e di esito per scenario di esposizione in prossimità dei due impianti nell'area in studio dal 2006 al 2015.

Table 2. Description of exposure and outcome variables in the different chronic exposure scenarios near the two plants in the study area from 2006 to 2015.

Le analisi sono state condotte su software R.²³ I risultati sono espressi come incrementi di rischio % per 10 unità di incremento di PM₁₀ e relativi intervalli di confidenza al 95% (IC95%).

Risultati

In Tabella 2 vengono riportati i dati relativi al numero di decessi giornalieri osservati durante il periodo in studio (2006-2015) per gli scenari di esposizione cronica considerati in analisi e le relative distribuzioni delle variabili ambientali. Nello specifico, sono stati osservati un totale di quasi 42.000 decessi nell'intera area (10.503 nell'area di Civitavecchia e 31.439 nell'area di Brindisi). Circa il 41% dei decessi è avvenuto per cause cardiovascolari, mentre l'8% per cause respiratorie. Per quanto riguarda l'esposizione, si osserva un aumento crescente del valore medio di PM₁₀ giornaliero nei diversi scenari di esposizione cronica a Civitavecchia, mentre non si registrano differenze per gli scenari relativi all'impianto di Brindisi.

Nelle Figure 3 e 4 sono riportate le stime di associazione per la mortalità causa-specifica come incrementi di rischio percentuale (IR%) e relativi intervalli di confidenza al 95% (IC95%) per incrementi di 10 µg/m³ di PM₁₀, nei diversi scenari per entrambe le aree.

Come si può notare dalla Figura 3, si osservano stime di rischio con una variabilità molto accentuata che ne compromette la significatività statistica. Tuttavia, nel confronto tra le stime di rischio per causa per singoli lag dei diversi scenari, si sottolinea che le stime nello scenario 3 (comuni esposti a valori supe-

riori al 75° percentile delle concentrazioni di inquinanti derivati da simulazione) sono superiori rispetto alle stime degli altri scenari, specialmente nella mortalità non-accidentale e cardiovascolare. Per esempio, considerando le stime a lag 0-5 si osserva un IR% pari a 6,7% (IC95%: 0,9, 12,7%) nello scenario 3 contro un valore pari a 4,2% (-1,2, 9,9%) e 2,7% (-4,2, 10,2%) negli scenari 2 e 1 rispettivamente. Un andamento simile si osserva anche per la mortalità cardiovascolare a lag prolungati (lag 0-5), mentre nella mortalità respiratoria soltanto a lag immediati (lag 0 e lag 0-1).

In Figura 4 vengono riportate le stime di rischio relative ai comuni in prossimità dell'impianto di Civitavecchia. A causa della scarsa numerosità di eventi per cause respiratorie, sono state riportate solo le stime di rischio per mortalità non-accidentale e cardiovascolare. Nonostante una scarsa potenza statistica che ne compromette la possibilità di fare inferenza, si osserva un chiaro trend in aumento di rischio tra i diversi scenari. Questo è evidente specialmente nella mortalità cardiovascolare a lag prolungati dove le stime negli scenari 3 assumono valori positivi, contrariamente agli altri due scenari.

Infine, in Figura 5 vengono mostrate le stime di rischio nei 3 comuni in prossimità della Centrale di Brindisi considerando le emissioni del carbonile. Si registrano stime positive con IR% fino a 13,0% (-5,9, 35,7%) per la mortalità non-accidentale a lag 2-5 e 10,5% (-1,2, 23,5%) a lag 0-5. La mortalità per cause cardiovascolari e respiratorie mostra invece un andamento opposto con stime di rischio negative, soprattutto ai lag più immediati.

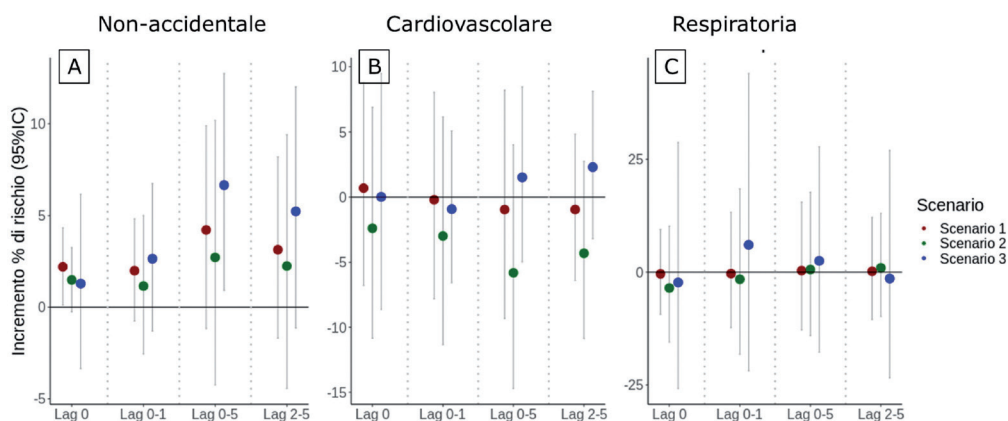


Figura 3. Stime di associazione tra mortalità causa-specifica (pannello A: mortalità non accidentale; B: cardiovascolare; C: respiratoria) ed esposizione a diversi lag (0, 0-1, 2-5 e 0-5) di PM₁₀ nei comuni in prossimità alla Centrale di Brindisi. Le stime sono espresse come IR% e IC95% per incrementi di 10 µg/m³.

Figure 3. Association between cause-specific mortality (Panel A: non-accidental mortality; B: cardiovascular mortality; C: respiratory mortality) and exposure at different lag periods (0, 0-1, 2-5, and 0-5) of PM₁₀ in the municipalities near the Brindisi Power Plant. The estimates are expressed as percentage increase (IR%) with 95% confidence intervals (CI) for a 10 µg/m³ increase.

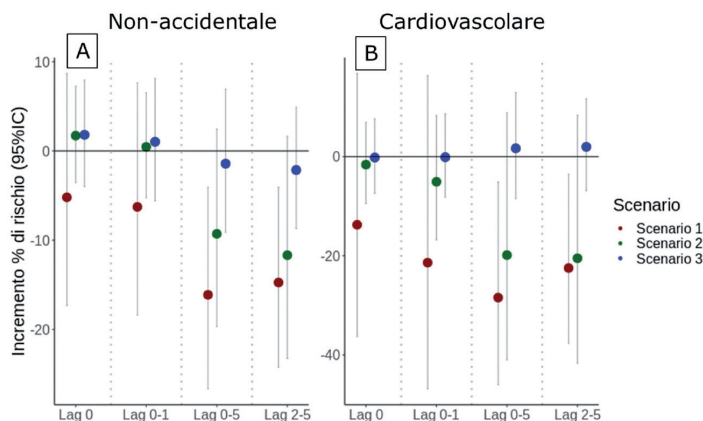


Figura 4. Stime di associazione tra mortalità causa-specifica (pannello A: mortalità non accidentale; B: cardiovascolare) ed esposizione a diversi lag (0, 0-1, 2-5 e 0-5) di PM₁₀ nei comuni in prossimità all'impianto Torrevaldaliga Nord di Civitavecchia. Le stime sono espresse come IR% e IC95% per incrementi di 10 µg/m³.

Figure 4. Association between cause-specific mortality (Panel A: non-accidental mortality; B: cardiovascular mortality) and exposure at different lag periods (0, 0-1, 2-5, and 0-5) of PM₁₀ in the municipalities near the Torrevaldaliga Nord power plant in Civitavecchia. The estimates are expressed as percentage increase (IR%) with 95% confidence intervals (CI) for a 10 µg/m³ increase.

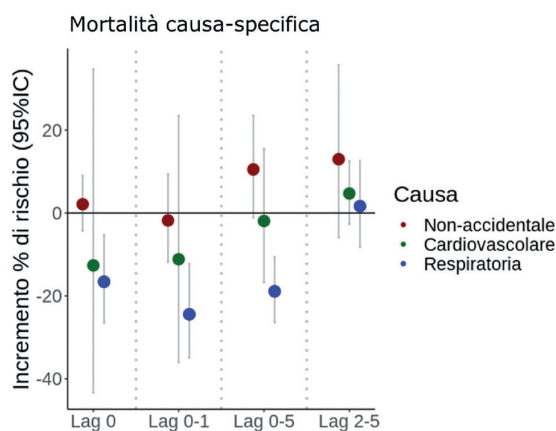


Figura 5. Stime di associazione tra mortalità causa-specifica ed esposizione a diversi lag (0, 0-1, 2-5 e 0-5) di PM₁₀ nei comuni in prossimità al carbonile della Centrale di Brindisi. Le stime sono espresse come IR% e IC95% per incrementi di 10 µg/m³.

Figure 5. Association between cause-specific mortality and exposure at different lag periods (0, 0-1, 2-5, and 0-5) of PM₁₀ in the municipalities near the Brindisi power plant's carbonyl emissions. The estimates are expressed as percentage increase (IR%) with 95% confidence intervals (CI) for a 1010 µg/m³ increase.

Discussione

In questo articolo è stato valutato l'effetto del PM₁₀ giornaliero sulla mortalità causa-specifica in una selezione di comuni, situati in prossimità di due centrali termoelettriche (Civitavecchia e Brindisi), per i quali è stato possibile stimare la ricaduta al suolo delle emissioni medie annue dei due impianti industriali. In questo modo è stato possibile valutare se esposizioni croniche più elevate (scenari) potessero rappresentare un elemento di suscettibilità per gli effetti acuti sulla mortalità per causa. Come già esplicitato in precedenza, gli effetti acuti dell'inquinamento atmosferico da PM₁₀ sono stati ampiamente documentati a livello mondiale nella letteratura scientifica.^{2,24,25} In ambito nazionale, sono stati molti i documenti che hanno messo in luce un'associazione positiva tra i livelli giornalieri di PM₁₀ e mortalità causa specifica sia nelle principali città italiane^{22,26} sia in ambiti rurali.²⁷ Per esempio, in uno studio precedente condotto dagli stessi autori di questo contributo,²⁷ relativo agli effetti acuti del PM₁₀ sulla mortalità totale nei comuni urbani, suburbani e rurali in Italia nello stesso periodo in studio, è stato riportato un incremento percentuale di rischio tra 1,5 e 2,0 per tutte le tipologie dei comuni analizzati. Tuttavia, il focus di questo lavoro mira a due realtà industriali ben definite, per cui sono state già riportate in letteratura evidenze di effetti cronici avversi sulla popolazione residente.²⁸⁻³⁰ La popolazione residente in questi comuni potrebbe essere caratterizzata da uno stato di salute più fragile rispetto alla popolazione generale, a causa di una lunga esposizione a contaminanti ambientali di origine industriale. Alcuni studi hanno infatti mostrato associazioni tra la residenza in prossimità di siti industrialmente inquinati ed esiti avversi per la salute, come risultati riproduttivi, tumori e anomalie congenite.³¹⁻³³ Occorre precisare che la definizione degli scenari avviene su differenze minimali di esposizione cronica agli inquinanti, come descrit-

to in precedenza, che *per se* non costituiscono un elemento sufficiente per definire la fragilità della popolazione. Questo perché i dati sono caratterizzati da una distribuzione fortemente decentrata, con molti valori a bassa concentrazione (ricadute al suolo esterne all'impatto principale) e pochi valori a media-elevata concentrazione al suolo (pennacchio principale). Questo determina la piccola differenza tra le soglie utilizzate per definire gli scenari. In questo studio tali dati non vengono usati per definire valori di esposizione, ma per identificare aree a livelli crescenti di esposizione cronica. Nonostante la bassa potenza statistica, derivante dall'inclusione di comuni con una bassa popolazione e un numero esiguo di casi, non consenta di mostrare associazioni statisticamente significative, da questo lavoro emerge che l'aumento progressivo delle concentrazioni di natura industriale determini nei residenti un aumento degli effetti acuti del PM₁₀. In prospettiva, si potrebbero sviluppare disegni di studio alternativi per valutare gli effetti acuti, come il *case-crossover* in grado di focalizzarsi sull'individualità del dato.

Conclusioni

Gli effetti acuti del PM₁₀ sulla mortalità non-accidentale, cardiovascolare e respiratoria sembrano aumentare in aree maggiormente esposte a livelli cronici di inquinanti industriali in due casi studio presenti sul territorio italiano. La disponibilità per ogni impianto industriale di un modello di simulazione emissiva consentirebbe di poter rilevare possibili effetti differenziali a livello acuto dell'inquinamento atmosferico sulla salute della popolazione residente.

Conflitti di interesse dichiarati: nessuno.

Finanziamenti: questo progetto è stato cofinanziato dall'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL) nell'ambito del Bando BRIC 2019 (progetto n. 46/2019).

Bibliografia

- Shah ASV, Lee KK, McAllister DA, et al. Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis. *BMJ* 2015;350:h1295. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Boogaard H, Patton AP, Atkinson RW, et al. Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 2022;164:107262. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- WHO. Air pollution. WHO report. Link available from: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Stafoggia M, de' Donato F, Ancona C, Ranzi A, Michelozzi P. Health impact of air pollution and air temperature in Italy: evidence for policy actions. *Epidemiol Prev* 2023;47(3):22-31.
- Jbaily A, Zhou X, Liu J, Lee TH, Kamareddine L, Verguet S, et al. Air pollution exposure disparities across US population and income groups. *Nature* 2022;601(7892):228-33. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Collins TW, Grineski SE. Racial/Ethnic Disparities in Short-Term PM_{2.5} Air Pollution Exposures in the United States. *Environ Health Perspect* 2022;130(8):87701. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Clougherty JE, Humphrey JL, Kinnee E, et al. Social Susceptibility to Multiple Air Pollutants in Cardiovascular Disease. *Res Rep Health Eff Inst* 2021;2021(206):1-71.
- Sharma R, Humphrey JL, Frueh L, Kinnee EJ, Sheffield PE, Clougherty JE. Neighborhood violence and socioeconomic deprivation influence associations between acute air pollution and temperature on childhood asthma in New York city. *Environ Res* 2023;231(Pt 3):116235. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Renzi M, Stafoggia M, Faustini A, Cesaroni G, Cattani G, Forastiere F. Analysis of temporal variability in the short-term effects of ambient air pollutants on nonaccidental mortality in Rome, Italy (1998-2014). *Environ Health Perspect* 2017;125(6):067019.
- Stafoggia M, Renzi M, Forastiere F, et al. Short-term effects of particulate matter on cardiovascular morbidity in Italy: a national analysis. *Eur J Prev Cardiol* 2022;29(8):1202-11.
- Di Blasi C, Renzi M, Michelozzi P, et al. Association between air temperature, air pollution and hospital admissions for pulmonary embolism and venous thrombosis in Italy. *Eur J Intern Med* 2022;96:74-80. (Ultimo accesso: 13.01.2023).
- Gariazzo C, Renzi M, Marinaccio A, et al. Association between short-term exposure to air pollutants and cause-specific daily mortality in Italy. A nationwide analysis. *Environ Res* 2023;216(Pt 3):114676. (Ultimo accesso: 13.01.2023).
- Stafoggia M, Schwartz J, Badaloni C, et al. Estimation of daily PM₁₀ concentrations in Italy (2006-2012) using finely resolved satellite data, land use variables and meteorology. *Environ Int* 2017;99:234-44.
- Stafoggia M, Bellander T, Bucci S, et al. Estimation of daily PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Italy, 2013-2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environ Int* 2019;124:170-9.
- Tinarelli G, Anfossi D, Trini Castelli S, Bider M, Ferrero E. A New High Performance Version of the Lagrangian Particle Dispersion Model Spray, Some Case Studies. *Air Pollut Model Its Appl XIII* 2000;499-507. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Renzi M, Scortichini M, de' Donato F, et al. A nationwide study of air pollution from particulate matter and daily hospitalizations for respiratory diseases in Italy. *Sci Total Environ* 2022;807(Pt 3):151034.
- Nanni A, Tinarelli G, Solisio C, Pozzi C. Comparison between Puff and Lagrangian Particle Dispersion Models at a Complex and Coastal Site. *Atmosphere (Basel)* 2022;13(4):508. (Ultimo accesso: 22.06.2023).
- Silibello C, Bolognani A, Sozzi R, Gariazzo C. Application of a chemical transport model and optimized data assimilation methods to improve air quality assessment. *Air Qual Atmos Health* 2014;7(3):283-96.
- Finardi S, Tinarelli G, Faggian P, Brusasca G. Evaluation of different wind field modeling techniques for wind energy applications over complex topography. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1998;74-76:283-94.
- Stafoggia M, Bellander T, Bucci S, et al. Estimation of daily PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Italy, 2013-2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environ Int* 2019;124:170-9.
- Stafoggia M, Schwartz J, Badaloni C, et al. Estimation of daily PM₁₀ concentrations in Italy (2006-2012) using finely resolved satellite data, land use variables and meteorology. *Environ Int* 2017;99:234-44.
- Alessandrini ER, Faustini A, Chiusolo M, et al. Inquinamento atmosferico e mortalità in venticinque città Italiane: Risultati del progetto EpiAir2. *Epidemiol Prev* 2013;37(4-5):220-9.
- R Development Core Team R. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019.
- Mills IC, Atkinson RW, Kang S, Walton H, Anderson HR. Quantitative systematic review of the associations between short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality and hospital admissions. *BMJ Open* 2015;5(5):e006946.
- Atkinson RW, Mills IC, Walton HA, Anderson HR. Fine particle components and health-a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2015;25(2):208-14.
- Scarinci C, Alessandrini ER, Chiusolo M, et al. Inquinamento atmosferico e ricoveri ospedalieri urgenti in 25 città italiane: risultati del progetto EpiAir2. *Epidemiol Prev* 2013;37(4-5):230-41.
- Renzi M, Marchetti S, De' Donato F, et al. Acute Effects of Particulate Matter on All-Cause Mortality in Urban, Rural, and Suburban Areas, Italy. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(24):12895.
- Vrijheid M. Health effects of residence near hazardous waste landfill sites: A review of epidemiologic literature. *Environ Health Perspect* 2000;108Suppl 1(Suppl 1):101-12.
- Galise I, Serinelli M, Morabito A, et al. L'impatto ambientale e sanitario delle emissioni dell'impatto siderurgico di Taranto e della centrale termoelettrica di Brindisi. *Epidemiol Prev* 2019;43(5-6):329-37.
- Martin-Olmedo P, Sánchez-Cantalejo C, Ancona C, et al. Siti industriali contaminati e salute: risultati di un'indagine europea. *Epidemiol Prev* 2019;43(4):238-48.
- Rzymyski P, Tomczyk K, Rzymyski P, Poniedziałek B, Opala T, Wilczak M. Impact of heavy metals on the female reproductive system. *Ann Agric Environ Med* 2015;22(2):259-64.
- Cirera L, Cirarda F, Palència L, et al. Mortality due to haematological cancer in cities close to petroleum refineries in Spain. *Environ Sci Pollut Res* 2013;20(1):591-6. (Ultimo accesso: 22.10.2023).
- Brender JD, Maantay JA, Chakraborty J. Residential proximity to environmental hazards and adverse health outcomes. *Am J Public Health* 2011;101 Suppl 1(Suppl 1):37-52.