

Valutazione di costi e benefici derivanti dalle misure individuate
nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA
CLIMAERA: un approccio metodologico per la valutazione di
impatto su costi sanitari diretti, benefici indiretti per i recuperi di
produttività e servizi ecosistemici

RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA RELATIVA ALLA COLLABORAZIONE
NELL'AMBITO DEL PROGETTO ALCOTRA 'CLIMAERA' (CUP E89D17001050007)
TRA DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E STATISTICA (EST) DELL'UNIVERSITÀ
DI TORINO E ARPA PIEMONTE

Roberto Leombruni, Silvana Dalmazzone, Maria Giovanna Lahoz
Dipartimento di Economia e Statistica 'Cognetti de Martiis' (EST), Università di Torino



Campus Luigi Einaudi Lungo Dora, Siena 100/A 10155 Torino

tel.
fax
e-mail
web

011 670 4406 – 670 4917
011 670 3895
de-segretario@unito.it
www.est.unito.it



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Sommario

Premessa	4
Parte I. Valutazione di impatto dell'inquinamento atmosferico su costi sanitari diretti e benefici indiretti per i recuperi di produttività.....	5
Introduzione.....	6
L'approccio <i>Cost of Illness</i> applicato alla valutazione dell'impatto economico dei ricoveri attribuibili.....	9
Materiali e Metodi.....	11
Dati	11
Stima dei costi diretti di ricovero.....	12
La stime dei costi indiretti di mancata produttività di breve periodo.....	13
La stime dei costi indiretti di mancata produttività di medio-lungo periodo	14
Modelli di valutazione dei costi economici	16
Risultati	18
Analisi causale dell'impatto dei ricoveri sulla carriera lavorativa successiva.....	18
Stime dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria	21
Conclusioni.....	24
Bibliografia.....	26
Parte II Valutazione di impatto dell'inquinamento atmosferico su servizi ecosistemici: effetti sulla sicurezza stradale.....	27
Introduzione.....	28
Dati e analisi descrittiva	29
Analisi econometrica	33
Valutazione economica.....	36
Discussione e conclusioni.....	38
Bibliografia.....	40

Premessa

Questo rapporto presenta i risultati dello studio svolto dal Dipartimento di Economia e Statistica di UniTO, in collaborazione con ARPA Piemonte, nell'ambito del WP4 del progetto ALCOTRA CLIMAERA, mirato a fornire un'analisi e una quantificazione monetaria degli impatti positivi che possono derivare dall'adozione di misure di miglioramento della qualità dell'aria sul territorio regionale.

Il rapporto è strutturato in due parti. La prima parte sviluppa una metodologia per la quantificazione dell'impatto economico degli eccessi di morbilità attribuibili all'inquinamento atmosferico (polveri sottili e biossido di azoto), stimati in corrispondenza di diverse ipotesi di scenari di intervento riguardo alla futura evoluzione della qualità dell'aria.

La seconda parte discute la possibilità di valutare in termini economici anche effetti degli inquinanti atmosferici oggetto di studio su altri servizi ecosistemici. Di concerto con Arpa Piemonte, e sulla base dei dati resi disponibili nel corso del progetto, si è deciso di applicare la metodologia di analisi alle relazioni che intercorrono tra inquinamento atmosferico e riduzione della sicurezza stradale.

Rispetto alla proposta tecnica progettuale, sempre in accordo con i responsabili del progetto, le analisi sono state condotte con riferimento alla regione Piemonte, principalmente per problemi di reperimento dei dati relativi al resto del territorio ALCOTRA e difficoltà di coordinamento legati all'emergenza Covid.

Parte I.

Valutazione di impatto dell'inquinamento
atmosferico su costi sanitari diretti e benefici
indiretti per i recuperi di produttività

Introduzione

L'impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute ha dei costi sociali che sono stati quantificati per i paesi OCSE più Cina e India nell'ordine di 3.500 miliardi di dollari (OECD, 2014), o, per l'Europa, in più di 1.400 miliardi di dollari l'anno (OMS, 2010), pari a poco meno del 10% del Prodotto Interno Lordo. Stime così alte sono legate a quella che è la loro componente principale, ovvero i costi della mortalità prematura, su cui negli ultimi anni si è assistito a una drastica revisione verso l'alto delle stime dei morti attribuibili all'inquinamento dell'aria, per via dei miglioramenti nei sistemi di monitoraggio e nei progressi in letteratura sulla comprensione dei nessi concentrazioni-esposizioni-impatti sulla salute (WHO-OECD, 2015). Le stime più recenti relative ai soli eccessi di mortalità legati all'inquinamento dell'aria (*ambient air pollution*, AAP), oscillano dai 3.7 ai 4.2 milioni di morti attribuibili l'anno, ovvero circa il 7% del totale delle morti nel mondo (Lancet, 2017). Il punto di vista economico consiste semplicemente nel monetizzare questi eccessi di mortalità, e l'approccio seguito comunemente si rifà al concetto di *willingness to pay*, la cui idea è quella di cercare di cogliere qual è la valutazione soggettiva di un valore altrimenti difficilmente quantificabile. Si parla in questo caso di impatti di welfare, in cui come moltiplicatore delle morti attribuibili si utilizzano stime standard sul cosiddetto *Value of a Statistical Life* (VLS).

Il presente report si concentra su un'altra componente dei costi economici degli impatti sulla salute pubblica dell'AAP, ovvero i costi degli eccessi di morbilità, sui quali le metodologie di calcolo in letteratura sono meno consolidate e anche i dati necessari sono di più difficile reperimento. È quindi di particolare interesse innanzitutto una loro quantificazione contestualizzata all'area in studio (Piemonte, Valle d'Aosta e Liguria), utilizzando il più possibile parametri e stime territorio-specifiche. Vanno sottolineati però due ulteriori aspetti:

- Estendere la quantificazione dei costi economici alla morbilità porta a una importante revisione verso l'alto dei costi totali dell'inquinamento, che è stata valutata per Stati Uniti ed Europa nell'ordine del 10-15% (Hunt *et al.*, 2016), ma vi sono studi che suggeriscono che gli incrementi siano molto maggiori, in un range che arriva a rivedere verso l'alto di oltre il 70% i costi della sola mortalità (Lancet, 2017).
- Mentre gli impatti di welfare della mortalità sono fondamentali per informare a livello più alto le politiche, i costi economici legati alla morbilità, in particolare i cosiddetti costi diretti e indiretti nell'approccio del *Cost of Illness* utilizzato in questo studio, quantificano quelli che sono gli impatti sul PIL e sulle spese del Sistema Sanitario, e sono quindi fondamentali per impostare correttamente le analisi costi/benefici per la valutazione comparativa di misure alternative.

Lo scopo del presente report è quindi quello di quantificare l'impatto economico degli eccessi di morbilità attribuibili all'inquinamento atmosferico, stimati in corrispondenza di diverse ipotesi di scenari di intervento riguardo alla futura evoluzione della qualità dell'aria. I fattori di rischio considerati sono l'esposizione a polveri sottili e biossido di azoto, mentre

gli *endpoint* di salute valutati sono le malattie dell'apparato circolatorio, le malattie croniche dell'apparato respiratorio e i tumori di trachea, bronchi e polmoni. Come anticipato, l'approccio seguito è il cosiddetto *Cost of Illness*, per il quale la valutazione economica degli impatti considerati si può ricondurre ai costi del consumo di risorse direttamente associati alla gestione della condizione di salute, ai costi opportunità legati alla perdita di produttività e a ulteriori costi intangibili associati ad esempio alla sofferenza del malato. Di questi, il presente report si concentra sui primi due tipi di costi, la cui quantificazione si può interpretare direttamente in termini di mancata produttività e di maggior consumo di risorse da parte del Sistema Sanitario.

In particolare, rispetto ai costi diretti si propone una valutazione dei costi sanitari legati ai ricoveri ospedalieri associabili agli eccessi di morbilità; mentre dei costi indiretti valutiamo quelli legati alla mancata produttività delle persone che hanno avuto un ricovero. I costi di produttività vengono valutati sia nel breve periodo, per via delle assenze dal lavoro dovute allo stato di malattia, sia nel medio-lungo periodo, proponendo una valutazione dell'impatto su occupabilità e produttività delle persone anche negli anni successivi all'evento.

È importante sottolineare quindi che le stime proposte sono solo un *di cui* del totale dei costi economici della morbilità. Oltre ai costi intangibili, le principali voci di costo che rimangono escluse dal presente lavoro riguardano innanzitutto i costi diretti di tutte le ulteriori prestazioni sanitarie generate dallo stato di malattia, ad esempio prestazioni ambulatoriali e spese farmaceutiche. Rispetto ai costi indiretti, la mancata produttività è stata stimata utilizzando il cosiddetto *Human Capital Approach*, che ipotizza che le retribuzioni individuali siano una misura della produttività individuale. Se da un lato questa è una assunzione ragionevole e ampiamente utilizzata, dall'altro trascura possibili riduzioni di breve periodo della produttività, sempre legate a inquinamento e condizioni di salute che però non portano a una assenza dal lavoro. Una letteratura recente ha in realtà dimostrato come un aumento nelle esposizioni a particolato fine e altri inquinanti ha un impatto misurabile anche sulla produttività sui luoghi di lavoro, con risultati coerenti per vari paesi e diversi livelli di skill dei lavoratori (vedi ad esempio Archsmith *et al*, 2018; Chang *et al*, 2019; Fu *et al*, 2017; He *et al*, 2019).

Come da proposta tecnica progettuale, la valutazione dei costi al *baseline* è stata svolta a valori medi – valorizzando cioè gli eccessi di morbilità con valori medi unitari per le varie voci di impatto – coerentemente con la metodologia di calcolo utilizzata in RIAT+. Per quel che riguarda le analisi di scenario invece si è adottato un approccio che tiene conto delle variazioni nella struttura per genere ed età della popolazione, per via delle importanti differenze esistenti lungo queste dimensioni sia nei costi di ricovero che nella produttività delle persone.

Rispetto alla proposta tecnica progettuale, invece, si sottolinea che – in accordo con i responsabili di progetto e degli altri workpackage coinvolti – le analisi sono state limitate alla sola regione Piemonte, principalmente per problemi di reperimento dati e di coordinamento

metodologico legati all'emergenza Covid, e inoltre che la valutazione della spesa farmaceutica e dei costi indiretti legati alla diminuita produttività dei team di lavoro è stata rinviata a eventuali approfondimenti futuri, poiché su entrambe queste voci non è stato possibile reperire stime territorio-specifiche.

Il resto del rapporto è strutturato come segue. Il capitolo 2 fornisce ulteriori dettagli sull'approccio *Cost of Illness* utilizzato. Nel capitolo 3 vengono descritti materiali e metodi utilizzati per stimare i parametri necessari alla valutazione. Nel capitolo 4 vengono presentati i risultati della valutazione svolta al baseline e nelle diverse ipotesi di scenari di intervento. Chiude un capitolo di sintesi e commento dei risultati.

L'approccio Cost of Illness applicato alla valutazione dell'impatto economico dei ricoveri attribuibili

L'approccio del *Cost of Illness* propone una sorta di mappa concettuale di quali sono i possibili impatti economici della morbilità, considerando qual è il consumo di risorse tangibili e intangibili nella storia del paziente successiva all'insorgere del problema di salute. Secondo l'approccio più comune questi impatti economici si possono ricondurre a tre tipologie di costi¹:

- Costi legati alle risorse (o costi **diretti**), che comprendono i costi sanitari e non sanitari direttamente associati alla gestione della condizione di salute, quali ad esempio i costi del trasporto in ospedale, i costi del ricovero, o ancora le spese sostenute dalla famiglia connesse alla condizione di salute del familiare.
- Costi opportunità (o costi **indiretti**), che comprendono i costi legati alla perdita di giornate di lavoro del malato, alla eventuale ridotta produttività causata dalla condizione di salute, o alla mancata produttività dei familiari coinvolti in attività di *caregiving* al malato.
- Costi intangibili, o di **disutilità**, legati ad esempio al dolore e alla sofferenza del malato.

Di questi, il presente rapporto si è concentrato solo sulle due categorie di costi tangibili, che sono quelli più chiaramente interpretabili in termini di impatti su PIL e Spesa Sanitaria, e anche tra questi ultimi sono state considerate solo le più importanti tra le tante voci di costo direttamente e indirettamente riconducibili allo stato di morbilità.

In particolare per quel che riguarda i costi diretti è stato considerato il consumo di risorse legato alle ospedalizzazioni, che da solo rappresenta quasi il 30% della spesa sanitaria complessiva in Europa e in Italia (OECD/EC, 2018). Nella ricostruzione della storia del consumo di risorse è importante sottolineare che vi possono essere ricoveri ricorrenti. A un dato evento di salute, ad esempio un infarto o un tumore, possono cioè corrispondere più ricoveri: nel secondo esempio anzi è frequente che vi siano una successione di diversi ricoveri per erogare prestazioni chemioterapiche. Il dato di partenza della valutazione sono le stime sugli eccessi di ricoveri attribuibili all'AAP, che però sono formulate in termini di ricoveri incidenti – ovvero, per ogni malato si considera solo il primo ricovero legato all'insorgenza della patologia. Queste stime quindi sono da inflazionare per considerare il numero medio di ricoveri associati ai casi incidenti di ognuno degli *endpoints* considerati.

¹ L'approccio COI ha una lunga tradizione in economia sanitaria, risalente almeno agli anni Sessanta del secondo scorso (Tarricone, 2006). Per una discussione recente si vedano ad esempio Jo (2014) e Chisholm *et al* (2010); e Hunt *et al* (2016) per la sua applicazione alla valutazione degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria.

Per quel che riguarda i costi indiretti è stata fatta una distinzione tra breve e medio-lungo periodo. I costi di breve periodo sono quelli più direttamente collegati al caso incidente, e corrispondono alla eventuale perdita di giornate di lavoro legate al periodo di degenza ospedaliera e successivamente all'eventuale periodo di convalescenza. Anche se la gran parte degli studi considera solo questi costi è però importante considerare anche gli impatti che le condizioni di salute valutate possono avere sulla partecipazione al lavoro e sulla produttività negli anni successivi all'insorgere del caso (Alavinia *et al*, 2009; Fu *et al*, 2019). Entrambe le possibilità sono state valutate esaminando la storia lavorativa nei quattro anni successivi ai primi ricoveri, considerando sia un possibile impatto sulle settimane di lavoro svolte sia sulla retribuzione media percepita, quest'ultima utilizzata come proxy della produttività individuale.

Nella Tabella 1 sono riassunte le varie voci di costo considerate nella valutazione, indicando qual è l'evento che dà origine all'eventuale costo, qual è il possibile impatto del quale si vuole stimare l'entità, e qual è il valore unitario necessario per quantificare il costo dell'impatto considerato.

Tabella 1. Costi diretti e indiretti considerati nella valutazione di impatto

Tipologia costi	Evento	Impatto	Valore
Costi diretti	Caso incidente di CVD, BPCO o Tumore di trachea, bronchi e polmoni	Numero ricoveri	Costo unitario ricovero
Costi indiretti	Degenza e convalescenza	Settimane di assenza per malattia	Produttività settimanale
	Partecipazione al lavoro	Settimane di inoccupazione	Produttività settimanale
	Produttività del lavoro	Ridotta produttività	Riduzione nella produttività

Materiali e Metodi

Dati

Il punto di partenza della valutazione sono le stime sugli eccessi di ricoveri ospedalieri attribuibili a polveri sottili (PM2.5) e biossido di azoto (NO₂) per gli anni 2005, 2010 e 2015, e per il 2030 in relazione ai diversi scenari espositivi, ovvero a legislazione corrente (CLE) o considerando tutte le misure implementate (SCE). Gli *endpoints* considerati sono le malattie del sistema cardiocircolatorio (*Cardiovascular diseases*, CVD), le malattie croniche dell'apparato respiratorio (*Chronic obstructive pulmonary disease*, COPD) e i tumori di trachea, bronchi e polmoni. La stima degli eccessi di morbilità è stato oggetto di altro *workpackage* del progetto, cui si rimanda per ulteriori dettagli su definizioni e sulle metodologie di stima adottate per quel che riguarda le funzioni concentrazione-risposta.

In questo paragrafo forniamo invece i dettagli sulle fonti dati utilizzate per stimare gli altri parametri necessari a quantificare le varie voci di impatto e i relativi valori riassunti in Tabella 1.

Rispetto ai costi sanitari diretti legati al ricovero, la fonte primaria cui rivolgersi sono le Schede di Dimissione Ospedaliera (SDO), che sono lo strumento utilizzato a livello del Sistema Sanitario Nazionale proprio per monitorare e regolare la spesa sanitaria legata ai ricoveri. Per ottenere stime dei costi di ricovero territorio-specifiche abbiamo sfruttato un accesso diretto ai microdati delle SDO della Regione Piemonte tramite il DataWareHouse **Clone**, un ambiente di condivisione delle fonti informative sanitarie anonimizzate piemontesi, in cui in particolare sono disponibili i microdati delle SDO su base popolazione (Pagano *et al*, 2016).

Rispetto ai costi indiretti invece ci si è rivolti alla banca dati **WHIP-Salute**, che comprende un campione anonimo di storie di lavoro e di salute del 7% della popolazione lavorativa italiana nel settore privato dell'economia (Bena *et al*, 2012). Più in particolare sono presenti, per ogni lavoratore dipendente, parasubordinato e autonomo, le informazioni su base mensile su tutti i loro episodi di lavoro per il periodo 2000-2015, e, nel caso dei lavoratori dipendenti, informazioni dettagliate sui redditi unitari e sugli eventuali periodi trascorsi in malattia.

È presente inoltre un collegamento sempre su base individuale alle SDO degli eventuali ricoveri occorsi al lavoratore. Grazie a questo collegamento è stato possibile innanzitutto passare dalle stime di costo del singolo ricovero alla stima complessiva delle risorse assorbite da tutti i ricoveri associabili ai casi incidenti degli endpoints considerati (vedi la prossima sezione per i dettagli). Sulla stessa fonte si sono poi stimati i costi indiretti di breve periodo, legati alla degenza e convalescenza, associando ai ricoveri considerati il numero complessivo di settimane di assenze per malattia. Inoltre, data la natura longitudinale della banca dati, si è

potuta ricostruire la carriera lavorativa successiva al ricovero per poter valutare l'eventuale presenza ed entità degli impatti di medio-lungo periodo su occupazione e produttività.

Un limite di Whip-Salute è che la sua popolazione di riferimento non include i lavoratori pubblici, e inoltre i dettagli necessari alla valutazione (settimane di lavoro e produttività media) sono disponibili solo per il lavoro dipendente. Ci si è dunque rivolti agli osservatori e rapporti statistici di INPS e ISTAT per ottenere stime sulle consistenze delle platee e sulla produttività delle popolazioni escluse, in modo da poter estrapolare anche a queste categorie di lavoratori i rischi relativi stimati su perdita di occupabilità e di produttività.

Infine, per ottenere stime di scenario che tengano conto della struttura per genere ed età della popolazione al 2030, sono state utilizzate le proiezioni demografiche dell'Istat su base regionale disponibili sul portale GeoDemo dell'Istituto².

Stima dei costi diretti di ricovero

La metodologia standard di valutazione del consumo di risorse ospedaliere si basa sul sistema dei *Diagnosis-Related Groups* (DRG), nato negli anni Settanta negli Stati Uniti per migliorare il monitoraggio, la programmazione e l'efficienza nella gestione delle spese ospedaliere (Fetter e Freeman, 1986), e utilizzato anche in Italia a partire dall'inizio degli anni Novanta con l'introduzione della Scheda Dimissionaria Ospedaliera (SDO). Il sistema DRG riclassifica le diagnosi mediche in gruppi omogenei (le cosiddette *Major Diagnostic Categories*) rispetto al tipo e la quantità di prestazioni erogate, arrivando quindi a una tariffa predeterminata che misura la quantità di risorse consumate nell'assunzione di efficienza economica della prestazione stessa. Nella determinazione della tariffa sono considerati i costi del personale sanitario direttamente impiegato, i costi delle materie prime usate, i costi delle apparecchiature sanitarie e i costi generali dell'unità produttiva.

L'algoritmo di calcolo si basa su una semplice formula che prevede il pagamento di un *forfait* fisso quando il ricovero è all'interno di un certo numero soglia di giorni, più una eventuale tariffa giornaliera per ogni giorno di ricovero oltre soglia. I *forfait*, le tariffe giornaliere e le soglie sono ovviamente specifiche per ogni codice DRG, e sono stabiliti con decreti del Ministero della Salute per quel che riguarda le tariffe massime applicabili e quelle uniche nazionali, e dagli Assessorati regionali alla sanità per le competenze lasciate alle Regioni.

Teoricamente, quindi, essendo disponibili su entrambe le fonti SDO consultate la codifica DRG e il numero di giorni di degenza, e consultando i tariffari appropriati, si potrebbero calcolare direttamente i costi per ogni singolo ricovero. Questa opzione però produrrebbe stime distorte: l'algoritmo descritto in precedenza infatti non si applica in modo deterministico, poiché le Regioni possono introdurre differenziazioni tariffarie in una pluralità di casistiche. Nel caso del Piemonte, ad esempio, sono previste ipotesi sia di

² <http://demo.istat.it/index.html>

maggiorazione (ad esempio per presidi Universitari o ad alta specializzazione) che di riduzione delle tariffe stesse (ad esempio per istituti ospedalieri privati), con gran parte delle casistiche che non sono direttamente identificabili sulla scheda SDO.

Una potenziale semplificazione al calcolo è data dalla fonte Regionale (il DWH Clone), dove è direttamente presente un campo in cui è riportata esplicitamente la tariffa applicata. In prima approssimazione quindi, per le stime a valor medio si potrebbero calcolare i costi medi di ricovero per i tre *enpoints* considerati, oppure i costi medi di ricovero specifici per *endpoint*, genere ed età per le stime di scenario. In entrambi i casi però va notato che si otterrebbero valori medi riferiti all'unità statistica ricovero, e non al malato, che, come sottolineato nel capitolo precedente, può andare incontro a più ricoveri in seguito a un dato evento di salute. Per ottenere stime corrette dei costi andrebbero prima riaggregati i dati per malato, ma questo non è stato possibile sulla fonte Clone in quanto non era presente un identificativo individuale.

Poiché sulla fonte WHIP-Salute è presente un identificativo individuale anonimo ma non la tariffa, e sulla fonte Clone è presente la tariffa ma non un identificativo individuale, è stato necessario studiare un algoritmo per imputare i costi del ricovero utilizzando la fonte Clone come *donor* e la fonte WHIP come *receiver*, per poi riaggregare su quest'ultima i costi su base individuale.

Come metodo di imputazione si è optato per un modello parametrico, in quanto la forma funzionale dell'algoritmo che lega diagnosi, giorni di degenza e costi è noto, essendo ignoti semplicemente i costi medi delle tariffe *forfait* e giornaliera. Poiché si sono riscontrate delle incoerenze anche tra i giorni-soglia desumibili dai dati e quelli sui tariffari consultati, si è deciso di considerare non noti a priori anche i giorni soglia. Per ogni codice DRG quindi è stato stimato empiricamente qual è il modello soglia/tariffa giornaliera che meglio si adattava al costo effettivo riportato nella fonte Clone. Tecnicamente, si è utilizzato un algoritmo di identificazione automatica della soglia giornaliera in modelli di tipo Tobit (iterando fino a 140 modelli Tobit per ognuno dei 377 codici DRG diversi), per identificare per ogni DRG quali sono i valori soglia, e successivamente quali sono il *forfait* e la tariffa giornaliera applicati in media. I parametri stimati sono stati poi utilizzati per imputare sulla fonte WHIP-Salute i costi di ogni singolo ricovero, per poi riaggregarli per malato.

La stime dei costi indiretti di mancata produttività di breve periodo

Una stima dei costi indiretti di breve periodo legati alla degenza e convalescenza può essere ottenuta facilmente sulla fonte WHIP-Salute, associando alle persone che hanno avuto ognuno dei ricoveri considerati il numero complessivo di settimane di assenze per malattia. Queste sono state poi valorizzate calcolando sulla stessa fonte le retribuzioni medie settimanali, che secondo l'approccio del capitale umano si possono considerare una misura di produttività individuale. Le uniche note tecniche che è opportuno citare sono le seguenti:

- Per semplicità si sono considerate solo le settimane di lavoro perse osservate nello stesso anno del ricovero. In questo modo, in particolare per i ricoveri avvenuti verso la parte finale dell'anno, si produce una sottostima dei costi di breve. Le stime complessive però non ne risentono, in quanto queste assenze vengono poi conteggiate nelle stime dei costi di medio-lungo periodo³.
- Le retribuzioni presenti sui dati INPS (da cui è tratta la banca dati WHIP-Salute) sono le cosiddette retribuzioni base, ovvero al netto dei contributi previdenziali a carico del datore di lavoro. Per ottenere una misura di produttività, non essendo presente direttamente il costo del lavoro lordo aziendale, si è proceduto a inflazarle considerando l'aliquota media dei contributi a carico del datore. Inoltre, i valori medi per genere ed età sono stati calcolati sul sotto-campione di persone che *non* hanno avuto nell'anno episodi di malattia (o altri periodi di assenza quali maternità o cassa integrazione), altrimenti si sarebbe ottenuta una stima di produttività su un campione la cui produttività era già ridotta.
- Come anticipato nella sezione dati, le stime sono riferibili direttamente solo al lavoro dipendente nel settore privato dell'economia, in quanto è l'unica categoria per la quale sono disponibili le settimane di assenza. Per gli altri segmenti della forza lavoro si è assunta una uguale durata media della convalescenza, mentre per le produttività e le numerosità sono stati utilizzati parametri desumibili dalle *Statistiche in breve, 2018* dell'INPS e dall'*Osservatorio sui lavoratori dipendenti* disponibile sul portale di Open Data sempre dell'INPS (consultato a luglio 2020).

La stime dei costi indiretti di mancata produttività di medio-lungo periodo

Come ricordato in apertura, soprattutto nel caso di eventi di salute della gravità di quelli considerati, è opportuno considerare anche gli impatti che le condizioni di salute possono avere sulla partecipazione al lavoro e sulla produttività negli anni successivi all'insorgere del caso (Alavinia *et al*, 2009; Fu *et al*, 2019).

Si è impostato quindi uno studio causale per valutare questi impatti a partire dalla fonte WHIP-Salute, che data la sua natura longitudinale consente di seguire la carriera lavorativa precedente e successiva a un eventuale ricovero (che consideremo come “trattamento”), e di confrontarla con quanto accade a chi invece non ha avuto ricoveri (che avrà la funzione di gruppo di controllo).

Come anno base per il trattamento è stato selezionato il 2010, in modo da avere a disposizione un numero sufficiente di anni di follow-up sui quali misurare gli outcome di

³ L'alternativa sarebbe quella di definire i follow-up di breve e medio-lungo periodo con finestre che decorrono a partire dalla data del ricovero. I dati WHIP-Salute però sono organizzati per anno: anche se molte delle informazioni presenti possono essere collocate anche su una scala infra-annuale (mensile), nel caso delle settimane di malattia questo non è possibile, e non è possibile quindi implementare in modo semplice dei follow-up dinamici. Visto che le stime complessive non ne risentono in termini di correttezza si è preferito seguire la strategia descritta.

interesse. Nell'anno base si sono quindi identificate come gruppo di trattamento le persone che hanno avuto un ricovero incidente per uno degli *endpoints* in studio, ovvero le persone per le quali in tutto il periodo precedente (dal 2001 al 2009) non si è registrato alcun caso di ricovero, e nel 2010 sono state ricoverate con diagnosi CVD, BPCO o Tumore della TBP. Come gruppo di controllo si è selezionato un campione 1/10 di lavoratori che non hanno avuto ricoveri su tutto il periodo considerato (dal 2001 al 2014).

Per entrambi i gruppi è stata quindi ricostruita la carriera lavorativa nei quattro anni precedenti l'anno base, in modo da poter impostare una analisi multivariata in cui controllare – oltre che per genere ed età – anche per le principali caratteristiche osservabili su WHIP-Salute che possono avere il valore di predittori degli outcome nel periodo di follow-up, e/o che hanno una rilevanza riconosciuta nelle relazioni tra salute e lavoro, per controllare almeno in parte per eventuali problemi di selezione nel trattamento. Si sono considerate in particolare:

- Le retribuzioni medie settimanali nel periodo, come proxy di capitale umano;
- La somma delle settimane lavorate nel periodo, come misura dell'intensità di lavoro;
- Le principali caratteristiche del/dei lavori svolti nel periodo (settore produttivo modale, codifica Ateco 2007 a 2 cifre; qualifica professionale modale; dimensione media delle imprese presso cui si è svolto il lavoro; regione di lavoro modale);
- Numero di rapporti di lavoro diversi svolti nel periodo e di anni in cui si è lavorato, come proxy della flessibilità/precarietà dell'attività lavorativa svolta.

Per poter controllare per una proxy delle condizioni di salute nel periodo pre-trattamento (ricordiamo che il campione in studio è composto comunque di persone che non hanno avuto alcun ricovero pre-2010), è stata inoltre calcolata la somma delle settimane in congedo di malattia sul periodo 2006-2009.

Le variabili di outcome sono state misurate nei quattro anni successivi all'anno di ricovero (2011-2014), considerando di nuovo le retribuzioni medie settimanali nel periodo, secondo la definizione data sopra, e il totale delle settimane lavorate nel quadriennio.

Sulla popolazione in studio così costruita si è quindi svolta una analisi a due stadi:

1. Analisi della partecipazione al lavoro. Con un modello logistico si è modellata la probabilità che i partecipanti allo studio abbiano lavorato almeno una settimana nel quadriennio 2011-2014, espressa in funzione delle esplicative descritte sopra (più un termine quadratico per l'età). Vista l'età media avanzata dei casi di ricovero e la lunghezza del follow-up, si tratta sostanzialmente di un modello per analizzare la probabilità che a seguito dell'evento vi sia una uscita anticipata dal mercato del lavoro.
2. Condizionatamente alla partecipazione al lavoro, analisi della intensità di lavoro e della produttività, tramite un modello OLS con la medesima specificazione del modello 1.

Modelli di valutazione dei costi economici

Per la valutazione di impatto sono state adottate due strategie diverse: a valor medio per quel che riguarda le stime al baseline; di microsimulazione per quel che riguarda le stime di scenario.

Nel primo caso, il punto di partenza della stima sono le stime dell'eccesso dei ricoveri attribuibili alle esposizioni, per ogni endpoint e ogni esposizione, che sono state poi valorizzate utilizzando le stime degli impatti e dei valori medi delle varie voci di costo. In particolare, la stima del costo totale di breve periodo (TC^B), riconducibile al pollutant p attraverso il suo impatto sull'endpoint di salute e , è stato calcolato secondo la seguente formula:

$$(1) \quad \widehat{TC}_{p,e}^B = \widehat{H}_{p,e} \bar{C}_e + \bar{W}_e \bar{Y}$$

Dove:

- $\widehat{H}_{p,e}$ sono le stime sui ricoveri con diagnosi e attribuibili al pollutant p ;
- \bar{C}_e è il costo medio del ricovero o della serie di ricoveri riconducibili all'endpoint e ;
- \bar{W}_e è il numero medio di settimane perse di lavoro per via del ricovero e poi della convalescenza legati all'endpoint e ;
- \bar{Y} è la produttività media del lavoro.

La stima del costo totale di medio-lungo periodo (TC^{ML}), riconducibile al pollutant p attraverso il suo impatto sull'endpoint di salute e , è stato invece calcolato secondo la seguente formula:

$$(2) \quad \widehat{TC}_{p,e}^{ML} = \widehat{H}_{p,e} \hat{p} \bar{L} \bar{Y} + \Delta \widehat{W} \bar{Y}$$

Dove:

- \hat{p} è la stima della probabilità di ritiro precoce dal mercato del lavoro per le persone che hanno avuto un ricovero;
- \bar{L} è la quantità di lavoro media prestata dai lavoratori nel quadriennio di *follow-up*;
- $\Delta \widehat{W}$ è la stima della riduzione nelle settimane lavorate per le persone che hanno avuto un ricovero⁴.

Il primo termine della formula quantifica il costo legato agli eccessi stimati di uscita dall'occupazione, ovvero di non lavoro per l'intero quadriennio di *follow-up*, per le persone che hanno avuto un ricovero. Il secondo termine quantifica il costo legato alla riduzione nel

⁴ Le stime sugli impatti di produttività non sono distinte per endpoint: cfr. *infra* il capitolo sui risultati dei modelli causali e in particolare la nota 6.

numero di settimane di lavoro attribuibili ai ricoveri per le persone che invece proseguono nell'occupazione.

Per quel che riguarda le stime di scenario, si è adottato un approccio di microsimulazione di cella (o a valori medi condizionati) per tener conto delle variazioni nella struttura demografica della popolazione. Per tutti i parametri della simulazione, infatti, in particolare per quanto riguarda i costi dei ricoveri, esistono importanti differenze di genere ed età, e quindi utilizzare una stima a valor medio equivarrebbe ad attribuire dei costi validi nel 2015 a una popolazione diversa. Nelle proiezioni dell'Istat, ad esempio, in soli 15 anni è stimato un invecchiamento della popolazione che si traduce in una età media che passa da 46,2 anni a 48,6; al contempo, in particolare nelle fasce di età anziane dove la prevalenza dei ricoveri considerati è maggiore, i costi medi dei ricovero aumentano in un range dai 50€ ai 150€ a ricovero per ogni anno di età.

Date le consistenze di popolazione delle proiezioni Istat, quindi, per ogni classe di età e genere si sono stimati in sequenza:

- Il numero di ricoveri attribuibili a ogni classe d'età e genere, ripartendo le stime $\hat{H}_{p,e}$ utilizzando la distribuzione per età e genere *endpoint*-specificata osservata nel 2015;
- Il totale dei costi diretti e indiretti di breve periodo dei ricoveri calcolati secondo la formula (1), utilizzando però per i costi dei ricoveri, le settimane perse e la produttività dei valori specifici di genere ed età;
- Il totale dei costi indiretti di medio-lungo periodo calcolati secondo la formula (2), utilizzando però valori di produttività specifici di genere ed età.

L'intero processo è stato quindi iterato per ognuno dei *pollutant*, *endpoint* e scenario di intervento considerati.

Risultati

Analisi causale dell'impatto dei ricoveri sulla carriera lavorativa successiva

Nella Tabella 2 sono riportate le principali descrittive del campione in studio. Il dato generale che si può rilevare è che, dei tre gruppi di trattamento, coloro che hanno avuto un ricovero per una malattia cardiovascolare o per tumore a trachea bronchi o polmone hanno caratteristiche che si differenziano in modo abbastanza netto sia dal gruppo di controllo che dalle persone che hanno avuto un ricovero per BPCO. Le differenze sono quelle attese, considerando il gradiente di età nei rischi di ricovero per le due patologie più gravi: l'età media è sensibilmente maggiore, e corrispondentemente anche la quota di donne è inferiore, data la minore percentuale di donne lavoratrici nelle classi di età più avanzate. Rispetto alla loro carriera dell'occupazione, il gruppo dei trattati ha in media una continuità nell'occupazione maggiore e anche retribuzioni maggiori, tranne di nuovo per i ricoverati per BPCO in cui sia occupazione che retribuzioni sono paragonabili al gruppo di controllo.

Tabella 2. Statistiche descrittive sul campione in studio

	Controlli	BPCO	CVD	Tumori TBP
Età media	40.2	39.0	46.5	57.2
Percentuale donne	39.7	25.3	20.9	22.4
Numerosità campione	127590	3046	3240	58
Pre-trattamento				
<i>Retribuzione media settimanale</i>	432.6	432.6	488.6	443.2
<i>Somma settimane lavorate</i>	127.0	131.7	140.4	136.0
<i>Somma settimane malattia</i>	2.4	1.7	1.8	2.2
<i>Numero di rapporti di lavoro</i>	1.7	1.8	1.6	1.3
<i>Numero di anni lavorati</i>	3.2	3.2	3.3	3.2
Post-trattamento				
<i>Retribuzione settimanale</i>	384.9	398.5	406.9	307.0
<i>Somma settimane lavorate</i>	107.1	113.6	104.0	30.3

Sempre dalla Tabella 2 si può rilevare per tutti i gruppi un peggioramento negli outcome di interesse negli anni post-trattamento. A questo proposito bisogna ricordare che dal punto di vista macroeconomico nell'anno base considerato, il 2010, e fino ai primi mesi del 2011, le condizioni dell'economia erano relativamente positive, dopodiché ci fu un aggravamento della crisi del debito sovrano, che quindi spiega il peggioramento medio negli outcome di occupazione che si rileva per tutta la popolazione in studio. In termini relativi, però, se il

gruppo BPCO ha un peggioramento in linea con il gruppo di controllo, per i ricoverati per CVD e soprattutto per Tumori di TBP si intuisce già da queste descrittive un peggioramento molto maggiore, e quindi un probabile impatto significativo del ricovero sulla carriera.

Questa evidenza è confermata innanzitutto dalle stime del modello di primo stadio, sulla probabilità di occupazione nei quattro anni di *follow-up*. In Tabella 3 sono presentati i risultati della specificazione utilizzata per la valutazione economica, in cui i tre gruppi di trattamento sono considerati congiuntamente⁵. Anche controllando per le varie caratteristiche personali e di carriera considerate in Tabella, gli *odds* di occupazione, per chi ha avuto uno dei ricoveri considerati, sono del 18% per cento inferiori rispetto a chi non ha avuto un ricovero. Risultato robusto rispetto alle varie esplorazioni svolte utilizzando altre specificazioni o stratificazioni della popolazione. Utilizzando i valori di probabilità del modello per tradurre gli *odds* stimati in termini di impatto medio nella popolazione in studio, ne risulta in media un eccesso di probabilità di uscita precoce dal mercato del lavoro del 3,71%.

Tabella 3. Stime logit della probabilità di occupazione negli anni di *follow-up*

	Odds Ratio	Wald CI 95%
ricovero	0,822	(0,737-0,918)
eta	1,233	(1,212-1,253)
eta2	0,997	(0,997-0,997)
donna	1,128	(1,067-1,193)
qualifica	0,892	(0,853-0,934)
retribuzione settimanale	1,067	(1,001-1,138)
dimensione impresa	0,969	(0,951-0,987)
settimane di lavoro	1,015	(1,015-1,016)
settimane di malattia	0,982	(0,979-0,984)
numero rapporti di lavoro	1,103	(1,079-1,128)
anni in occupazione	2,772	(2,598-2,957)

Note: Numero di osservazioni 81391; Casi 72012; Percentuale concordi 80.4%; D di Somers 0.608.

Nelle Tabelle 4 e 5 invece sono riportate le stime dei modelli di secondo stadio, in cui, condizionatamente al fatto che l'individuo abbia proseguito a lavorare, si stima l'eventuale

⁵ Qua e nel seguito commentiamo solo alcuni risultati di esempio delle varie specificazioni dei modelli considerate. Dalle esplorazioni svolte è utile citare che si rilevano ovviamente delle differenze tra i tre *endpoint* considerati: nel caso del modello di Tabella 3, ad esempio, mentre l'OR per i ricoveri per CVD è in linea con quello medio, l'OR per i casi di tumore è decisamente più basso (0,271, CI95: 0.131-0.559), mentre l'OR per i casi di BPCO è pari a 0.913, non significativo per la popolazione complessiva, ma significativo al 10% se ci si limita alla popolazione di 50-60 anni, sulla quale è più probabile che un problema grave di salute porti a un ritiro precoce dal lavoro. Lo scopo dello studio presente però non è quello di una analisi causale di questo dettaglio, per confrontarsi con quanto già presente nella letteratura scientifica, quanto di ottenere realistici valori medi di impatto territorio-specifici.

impatto dei ricoveri sull'intensità di lavoro (misurata dalla somma delle settimane di lavoro nel quadriennio) e sulla produttività (misurata dalla retribuzione lorda settimanale).

Controllando per le stesse caratteristiche personali e di carriera della specificazione del modello di primo stadio, si rileva un ulteriore effetto di riduzione dell'occupazione, quantificabile in poco meno di una settimana l'anno. Per quel che riguarda la produttività, come misurata dalla retribuzione settimanale media, non è rilevabile un effetto statisticamente diverso da zero. Anche questo *null effect* è risultato robusto a diverse specificazioni e stratificazioni del modello, ed è coerente con gli studi sulle dinamiche salariali in Italia nei quali si sottolinea la rigidità nominale verso il basso delle retribuzioni contrattuali (vedi ad esempio Rosolia 2015).

In definitiva, per le valutazioni di impatto dei costi indiretti di medio-lungo periodo, è stato considerato solo il canale che passa attraverso la riduzione della quantità di lavoro, sia lungo il margine estensivo – dovuta alle persone che a seguito del ricovero si ritirano anticipatamente dal mercato del lavoro – che lungo il margine intensivo – con un numero di settimane lavorate minore per chi ha continuato a lavorare.

Tabella 4. Stime OLS dell'impatto del ricovero sul numero di settimane di lavoro negli anni di *follow-up*

	Odds Ratio	Wald CI 95%
ricovero	-3,35	(-5,41 -1,29)
eta	4,92	(4,58 5,25)
eta2	-0,07	(-0,07 -0,07)
donna	-3,85	(-4,79 -2,92)
qualifica	1,99	(1,23 2,76)
retribuzione settimanale	0,01	(0,01 0,01)
dimensione impresa	4,69	(4,36 5,02)
settimane di lavoro	0,75	(0,74 0,77)
settimane di malattia	-0,56	(-0,62 -0,5)
numero rapporti di lavoro	-1,82	(-2,11 -1,53)
anni in occupazione	-19,20	(-20,89 -17,52)

Note: Numero di osservazioni 81391; R² 22,45%.

Tabella 5. Stime OLS dell'impatto del ricovero sulla produttività

	Odds Ratio	Wald CI 95%
ricovero	-0,90	(-8,43 6,64)
eta	-7,92	(-9,15 -6,7)
eta2	0,07	(0,06 0,09)
donna	-7,40	(-10,83 -3,96)
qualifica	25,09	(22,28 27,89)
retribuzione settimanale	1,05	(1,05 1,06)
dimensione impresa	0,91	(-0,28 2,1)
settimane di lavoro	0,19	(0,13 0,24)
settimane di malattia	-0,01	(-0,23 0,21)
numero rapporti di lavoro	-1,08	(-2,14 -0,01)
anni in occupazione	2,09	(4,07 8,24)

Note: Numero di osservazioni 81391; R² 22,45%.

Stime dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria

Nella Tabella 6 sono riportate le stime dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria *by pollutant* nel 2015. Gli impatti maggiori sono quelli attribuibili al particolato fine, in cui l'assorbimento di risorse sanitarie – valutata considerando solo i ricoveri ospedalieri – è pari a circa 22.5 milioni di euro l'anno. La valutazione dei costi indiretti di produttività, sia nell'anno del ricovero ma con un impatto rilevabile anche negli anni successivi, è di 3.65 milioni di euro l'anno. Ne risulta un costo totale di oltre 26 milioni di euro l'anno, del 16% superiore rispetto ai soli costi sanitari. La ripartizione tra costi diretti e indiretti è simile nel caso degli impatti attribuibili al biossido di azoto, in cui il costo totale è di 15,7 milioni di euro l'anno.

Le due stime non si possono direttamente sommare, in quanto sono possibili delle interazioni tra esposizioni diverse, sia a livello epidemiologico sia rispetto agli impatti economici. A livello interpretativo, i quasi 42 milioni di euro che si ottengono sommando i due impatti possono essere piuttosto letti come *upper bound* dei possibili costi totali legati ai due inquinanti.

Con questa precauzione nella interpretazione, in Tabella 6 la valutazione di impatto al baseline è disaggregata per *endpoint*. I costi maggiori derivano dalle conseguenze dell'impatto dell'inquinamento sulle malattie cardiovascolari, in cui ad essere più alte sono le stime in input sui ricoveri attribuibili nel caso di questo *endpoint*. Dal punto di vista del costo medio dei ricoveri infatti non ci sono grosse differenze tra i vari tipi di ricovero. Nel caso delle malattie dell'apparato respiratorio, si nota invece un peso relativamente maggiore dei costi indiretti (che sono il 21% di quelli sanitari, rispetto al 14-15% per CVD e Tumori TBP). In

questo caso è la distribuzione per età dei ricoveri che conta. Nel caso delle malattie dell'apparato respiratorio infatti l'inquinamento atmosferico ha degli impatti ingenti già nelle classi di età più giovani, che sono quelle per le quali la perdita di produttività è maggiore. È utile ricordare a questo proposito che nell'approccio COI i costi indiretti di produttività della persona che ha avuto un ricovero ci sono solo nel caso in cui la persona aveva una occupazione. Ma mentre nel caso delle malattie dell'apparato respiratorio quasi la metà dei ricoverati era ancora in età lavorativa, nel caso di CVD e Tumori TBP questa proporzione si riduce a un terzo.

Tabella 6. Stima dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria, by pollutant, al baseline (anno 2015), milioni di euro.

	Costo totale	costi diretti	costi indiretti di breve periodo	indiretti medio
NO2	15,71 €	13,55 €	1,49 €	0,67 €
PM25	26,13 €	22,49 €	2,50 €	1,15 €

Tabella 7. Stime di upper bound dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria, by endpoint, al baseline (anno 2015), milioni di euro.

	Costo totale	costi diretti	costi indiretti di breve periodo	indiretti medio
Malattie apparato respiratorio	6,71 €	5,55 €	0,73 €	0,43 €
Malattie cardiovascolari	31,41 €	27,23 €	2,86 €	1,31 €
Tumori di trachea bronchi e polmoni	3,73 €	3,25 €	0,39 €	0,08 €

Nella Tabella 8 le stime al *baseline* per i due inquinanti considerati sono messe a confronto con le stime al 2030 nello scenario base e in quello di intervento. Date le proiezioni di miglioramento nelle esposizioni agli inquinanti grazie alle politiche già implementate negli ultimi anni, anche nello scenario di base le stime parlano di una riduzione importante negli costi. Il miglioramento è evidente in particolare nel caso degli impatti attribuibili al biossido di azoto, che scendono dai 15,7 milioni di euro a poco meno di 9, per una riduzione dei costi del 44%. Nel caso del particolato fine, che è la voce maggiore dei costi, senza ulteriori misure il miglioramento sarebbe del 20%. Nello scenario di intervento i miglioramenti sarebbero molto più evidenti, con una riduzione dei costi legati a biossido di azoto e particolato fine rispettivamente a circa un quarto e a meno della metà. In un'ottica costi-benefici, un *upper bound* per i risparmi ottenibili – confrontando quindi i costi al 2030 nello scenario base *versus* quello di intervento – è quantificabili in circa 13,4 milioni di euro.

Tabella 8. Stima dei costi degli impatti di salute pubblica dell'inquinamento dell'aria, *by pollutant*, al baseline e negli scenari al 2030, milioni di euro.

	2015	2013 – scenario base	2013 – scenario di intervento
NO2	15,71 €	8,87 €	4,40 €
PM25	26,13 €	20,90 €	12,01 €

Conclusioni

Questa prima parte del rapporto è stata dedicata alla valutazione dei costi economici degli impatti di salute pubblica delle esposizioni a particolato fine e biossido di azoto, limitatamente alla loro componente associabile agli eccessi di morbilità per malattie dell'apparato circolatorio, malattie croniche dell'apparato respiratorio e i tumori di trachea, bronchi e polmoni, e limitatamente ai cosiddetti costi *tangibili*, ovvero quelli più direttamente interpretabili in termini di concreti impatti sul PIL e/o sulla spesa pubblica sanitaria.

Diversamente dalla quantificazione economica degli eccessi di mortalità, in cui c'è un solo evento, drammatico, da valutare, che viene monetizzato con il cosiddetto *Value of a Statistical Life*, nel caso dei costi della morbilità sono tante le tipologie di risorse che vengono mobilitate e tanti i possibili nessi causali da prendere in considerazione. Essendo il primo studio di questo tipo che viene svolto sulla regione, si è ritenuto di procedere alla valutazione di quelli che nella letteratura scientifica di riferimento sono considerate le voci principali di questi costi, e in particolare, per quel che riguarda i costi diretti sanitari, il consumo di risorse ospedaliere per i ricoveri incidenti e ricorrenti legati agli endpoint considerati, mentre dei costi indiretti sono stati considerati i costi opportunità riconducibili alla mancata produttività delle persone che hanno avuto un ricovero.

La valutazione ha potuto contare sull'accesso diretto a microdati di fonte amministrativa, e in particolare al DWH Regionale Clone e al sistema di monitoraggio WHIP-Salute, grazie ai quali si sono potute ottenere stime originali dirette di tutte le principali voci di impatto e relativi valori economici necessari alla valutazione. Per quel che riguarda i costi diretti di produttività, in particolare, si è potuta svolgere una analisi prosettica con la quale valutare anche quelli che si manifestano nel medio-lungo periodo, sino a quattro anni successivi al ricovero.

La valutazione svolta indica le polveri sottili quali fonte maggiore di costi per la collettività, quantificati in circa 26 milioni di euro l'anno, soprattutto per gli eccessi di malattie del sistema cardiovascolare. La quota più importante di questi costi è legata alle risorse sanitarie assorbite per i ricoveri, ma la considerazione dei costi di produttività porta comunque a incrementare le stime di circa il 16%. Rispetto alle proiezioni al 2030, è prevista una riduzione dei costi di salute pubblica dell'inquinamento, grazie al miglioramento negli scenari emissivi legato alle misure già introdotte in passato. In proporzione però il miglioramento è meno netto nel caso dei costi del particolato, che sono la componente maggiore dei costi, rispetto alla quanto si stima per il biossido di azoto. Nello scenario di intervento il miglioramento è molto più sensibile: si otterrebbe nel caso del particolato una riduzione nei costi di oltre il 50% rispetto ai costi stimati per il 2015, e un risparmio complessivo totale rispetto a uno scenario senza intervento quantificabile fino a un massimo di circa 13,4 milioni di euro l'anno.

Tra i limiti dello studio va citato che le stime presentate per i costi di produttività sono particolarmente accurate per quel che riguarda i lavoratori dipendenti del settore privato

dell'economia, mentre nel caso delle altre forme di lavoro e dei dipendenti pubblici si è dovuto operare su valori medi, e assunto impatti uguali a quelli rilevati per i dipendenti. Inoltre, la valutazione dei costi di produttività si basa sulla prima applicazione al caso italiano di un modello causale volto a studiare le relazioni tra gli endpoint considerati e le conseguenze di lungo periodo sulla carriera successiva, e meriterebbe un approfondimento metodologico.

Nell'interpretare questi risultati si deve tener conto infine che le voci stimate sono solo un di cui di tutti i costi diretti e indiretti degli impatti sugli endpoint considerati. Per quel che riguarda i costi diretti, va ricordato che ve ne sono altri quantitativamente anche molto rilevanti, quali ad esempio la spesa farmaceutica non ospedaliera o le prestazioni ambulatoriali. Rispetto ai costi indiretti, la voce più importante è probabilmente quella legata alle esigenze di *caring* del malato. Data l'età media avanzata dei casi di ricovero attribuibili all'inquinamento, soprattutto per le malattie cardiovascolari e i tumori di bronchi trachea e polmoni, la considerazione della sola mancata produttività del malato porta a una importante sottostima dei costi di produttività totale, o dei costi sempre per il malato ma adottando un approccio di *Willingness to Pay* (Lancet, 2017). Mentre d'altra parte è stato già riconosciuto in letteratura che gli effetti dell'inquinamento sulla offerta di lavoro sono più consistenti nel caso di famiglie che hanno al loro interno componenti "fragili", per via appunto delle attività di *caregiving* che i casi di morbidità richiedono in particolare quando il malato è anziano (Aragon *et al*, 2017).

Bibliografia

- Alavinia SM, Molenaar D, Burdorf A (2009). *Productivity loss in the workforce: associations with health, work demands, and individual characteristics*. Am J Ind Med
- Aragon, FM, JJ Mirandaz and P Olivax (2017), *Particulate Matter and Labor Supply: The Role of Caregiving and Non-Linearities*, “Journal of Environmental Economics and Management”, 86:295-309
- Archsmith J, Heyes A, Saberian S (2018). *Air quality and error quantity: Pollution and performance in a high-skilled, quality-focused occupation*. “Journal of the Association of Environmental and Resource Economists”, 2018 Oct 1;5(4):827-63
- Bena A, R Leombruni, M Giraud, G Costa. (2012) *A new Italian surveillance system for occupational injuries: characteristics and initial results*. Am J Ind Med; 55(7):584-92
- Chang TY, Graff Zivin J, Gross T, Neidell M (2019), *The effect of pollution on worker productivity: evidence from call center workers in China*. “American Economic Journal: Applied Economics”. Jan;11(1):151-72.
- Chisholm D, AE Stanciole, TT Torres Edejer, DB Evans (2010), *Economic impact of disease and injury: counting what matters*, BMJ, 340:c924
- Fetter, RB, JL Freeman (1986), *Diagnosis Related Groups: Product Line Management within Hospitals*, “The Academy of Management Review”, Vol. 11, No. 1, pp. 41-54
- Fu R, Noguchi H, Kaneko S, Kawamura A, Kang C, Takahashi H, et al. (2019) *How do cardiovascular diseases harm labor force participation? Evidence of nationally representative survey data from Japan, a super-aged society*. PLoS ONE 14(7)
- Fu S, Viard B, Zhang P (2017). *Air quality and manufacturing firm productivity: Nationwide evidence from China*, MPRA Paper
- He J, Liu H, Salvo A (2019), *Severe air pollution and labor productivity: Evidence from industrial towns in China*, “American Economic Journal: Applied Economics”, Jan;11(1):173-201.
- OECD (2014), *The Cost of Air Pollution: Health Impacts of Road Transport*, OECD Publishing, Paris
- OECD, European Commission (2018), *Health at a Glance: Europe 2018*, OECD Publishing, Paris
- Fetter, RB, JL Freeman: *Diagnosis Related Groups: Product Line Management within Hospitals*, 1986
- Hunt, A, J Ferguson, F Hurley and A Searl (2016), *Social costs of morbidity impacts of air pollution*, OECD Environment Working Paper No. 99
- Kirch W. (2008, eds), *Encyclopedia of Public Health*. Springer, Dordrecht, voce “Human Capital Approach”.
- Pagano, E., M. Calcagno, L. Crosetto, M. Dalmasso et al (2016), *Un ambiente di condivisione del patrimonio informativo anonimizzato piemontese*, XL Congresso AIEL, Poster
- Rosolia A (2015), *On the response of Italian wages to the unemployment rate*, “Questioni di Economia e Finanza”, Banca d'Italia, 287, Luglio 2015
- Tarricone R (2006), *Cost-of-illness analysis. What room in health economics?*, “Health Policy”, 77: 51–63
- WHO, OECD (2015). *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe

Parte II

Valutazione di impatto dell'inquinamento
atmosferico su servizi ecosistemici: effetti sulla
sicurezza stradale

Introduzione

Mentre la prima parte del report si è concentrata sulla valutazione economica degli impatti sanitari dell'inquinamento atmosferico, in questa seconda parte viene considerata la possibilità di valutare in termini economici anche effetti degli inquinanti atmosferici oggetto di studio su altri servizi ecosistemici. In ambito urbano, oggetto di interesse del progetto CLIMAERA, fra i principali impatti si possono registrare danni alla vegetazione urbana, determinati dalla perdita di capacità di depurazione dell'aria e dalla riduzione della capacità di stoccaggio di carbonio, e danni al patrimonio storico-architettonico, causati dall'erosione delle superfici degli edifici. Elevate concentrazioni di inquinanti atmosferici, in particolar modo NO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}, sono inoltre responsabili di una riduzione della limpidezza dell'aria e della visibilità sia in aree urbane che in parchi e aree di interesse turistico e paesaggistico. Di concerto con Arpa Piemonte, si è deciso di concentrare l'analisi quantitativa di quest'ultima parte dell'analisi economica sulle relazioni che intercorrono tra inquinamento atmosferico, riduzione della visibilità e conseguente riduzione della sicurezza stradale – area con una disponibilità di dati relativamente migliore rispetto alle alternative sopra menzionate.

La letteratura economica evidenzia, in casi studio relativi a diversi paesi, l'esistenza di nessi tra gli impatti dell'inquinamento da polveri sottili e gli incidenti stradali determinati da una riduzione della visibilità e dagli effetti sulle capacità cognitive, sull'attenzione e sulla salute psichica degli individui coinvolti. Ad esempio, per la città di Londra, Sager (2019) ha riscontrato un aumento dello 0.3-0.6% nel numero di vetture coinvolte in incidenti stradali al giorno per ogni µg/m³ addizionale di PM 2.5; mentre nello studio cinese di Wan et al. (2020) è stato osservato un aumento degli incidenti autostradali dell'11.1% al variare del PM_{2.5} da 35 µg/m³ (Chinese Ambient Air Quality Standards-Grade I) a 75 µg/m³ (Chinese Ambient Air Quality Standards-Grade II) e del 35 % al variare del PM₁₀ da 50 µg/m³ a 150 µg/m³, rispettivamente standard di primo grado e di secondo grado.

L'analisi presentata nei prossimi capitoli, relativa al territorio della Regione Piemonte, ha osservato attraverso metodi di stima econometrici le correlazioni fra concentrazioni orarie e giornaliere degli inquinanti atmosferici oggetto di CLIMAERA e riduzioni nella sicurezza stradale. La risoluzione spaziale dell'analisi è comunale, per il periodo 2010-2018 (esclusi gli anni 2014 e 2016). Le informazioni sulla sicurezza stradale sono state elaborate sulla base di dati ISTAT (microdati a uso pubblico⁶), relativi a numero di incidenti, veicoli coinvolti e lesioni alle persone. Sulla base dei coefficienti di impatto elaborati dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT, 2019) sono poi stati calcolati i costi sanitari, amministrativi e patrimoniali dell'aumento di incidentalità attribuibile all'inquinamento atmosferico.

⁶ <https://www.istat.it/it/archivio/87539>

Dati e analisi descrittiva

La prima fase del lavoro è consistita nella creazione del dataset. ARPA Piemonte ha fornito dati di concentrazione oraria per PM10, PM2.5 e NO₂, per tutti i giorni degli anni dal 2010 al 2018 (esclusi 2014 e 2016) su un grigliato regolare che copre la regione Piemonte con risoluzione orizzontale di 4 km. Questi dati, in formato binario *netcdf*, sono stati rielaborati e integrati con i dati ISTAT sull'incidentalità stradale. Il database ISTAT, tuttavia, non offre la medesima risoluzione temporale e spaziale: per ogni anno identifica il comune, il trimestre e il giorno della settimana in cui gli incidenti sono avvenuti (senza consentire perciò di identificare il giorno esatto), oltre ad altre variabili di interesse specificate in seguito, e fornisce dunque pubblicamente un livello di informazione meno dettagliato rispetto ai valori atmosferici a disposizione.

Inoltre, i dati sono sbilanciati nelle variabili circostanziali, perché nei file a disposizione sono tabulate solo le occorrenze di incidenti (a ogni riga corrisponde un incidente e le relative circostanze). Questo ha comportato la necessità di effettuare una serie di aggregazioni al fine di costruire un indice di incidentalità che si riferisse alla numerosità degli incidenti, e non solo alla loro gravità (identificata da variabili quali veicoli coinvolti, numero di feriti e morti) e di ridurre lo sbilanciamento delle variabili circostanziali.

Le elaborazioni svolte sono consistite in:

- Categorizzare il fattore 'ora del giorno' in due livelli: *orario di punta* (7-10, 19-23) e *altro* (0-6, 11-18);
- Categorizzare i giorni della settimana in due livelli: *domenica-lunedì* e *altri giorni*, dal momento che i valori degli inquinanti atmosferici mostravano poca variazione tra martedì e sabato e tra domenica e lunedì, con valori tendenzialmente più bassi in questi ultimi due giorni;
- Distinguere le condizioni meteo in: *sereno* e *perturbato* (che aggrega tutti gli altri livelli: grandine, nebbia, neve, pioggia, vento, altro), poiché (i) la maggior parte dei valori atmosferici è concentrata nella condizione sereno e (ii) solo il 18% degli incidenti risulta avvenire in categorie diverse da *sereno*;
- Aggregare il fondo stradale in due livelli: *asciutto* e *non asciutto* in quanto più dell'80% degli incidenti risulta su strada in buone condizioni;
- Distinguere il tipo di strada in *strade a carreggiata unica e doppio senso di circolazione* e *altre* in quanto metà degli incidenti è avvenuto nella prima tipologia;
- Distinguere il tipo di intersezione in *rettilineo e incroci/altro*: il 41% degli incidenti è avvenuto infatti in rettilineo e il 46% in incrocio o altro;
- Escludere la variabile riguardante la segnaletica in quanto tre quarti degli incidenti sono avvenuti con segnaletica verticale e orizzontale.

Una volta effettuate tali aggregazioni, si è proceduto ad analizzare la relazione tra la numerosità degli incidenti e le concentrazioni inquinanti.

Già da un'analisi descrittiva è possibile constatare che alle province con livelli medi di concentrazioni inquinanti maggiori corrispondano numeri più elevati di incidenti (Figure 1 e 2). La provincia di Torino, ad esempio, registra valori medi delle concentrazioni inquinanti superiori alle altre province, fino a oltre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e un'elevata incidentalità trimestrale che supera i 600 incidenti al giorno.

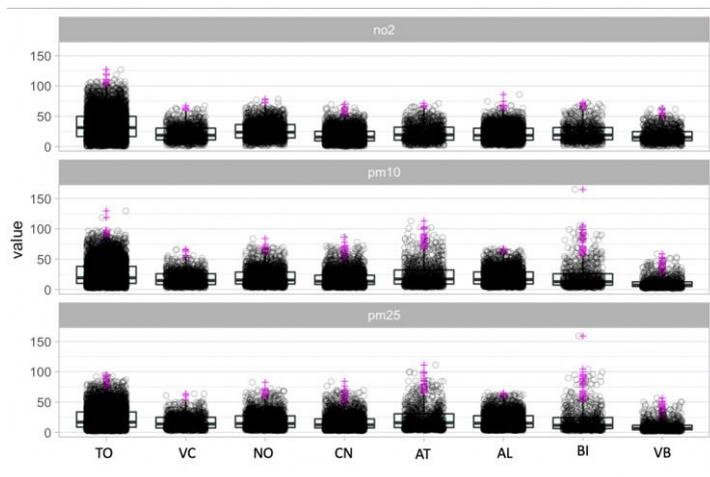


Figura 1. Distribuzione inquinanti in relazione alla provincia

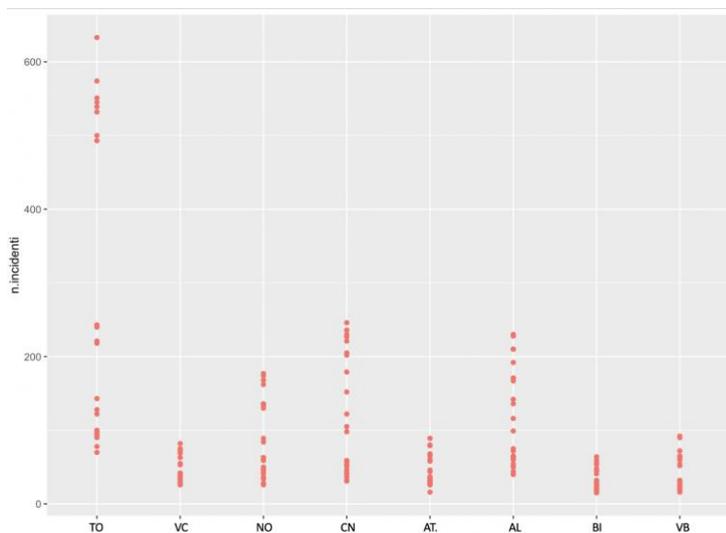


Figura 2. Numerosità incidenti per provincia

Questo tuttavia potrebbe essere dovuto semplicemente alla maggiore intensità di traffico nelle province più popolate e che accolgono pendolari dei comuni vicini (il dato riguardante i flussi di traffico non è risultato disponibile a scale spazio-temporali associabili ai dati di concentrazione e di incidentalità). L'analisi descrittiva rivela però che l'incidentalità risulta maggiore nei giorni di tempo sereno (Figura 3), nonostante in giornate perturbate fattori come l'incremento del traffico veicolare e il manto stradale bagnato dovrebbero determinare un numero di incidenti maggiore. E nelle giornate con meteo sereno si riscontrano anche i livelli più elevati di concentrazione di inquinanti (Figura 4).

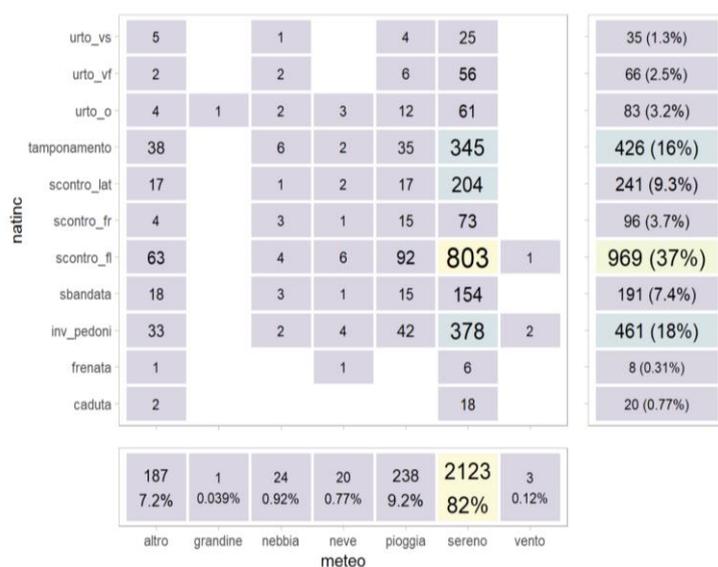


Figura 3. Numerosità degli incidenti in rapporto alle condizioni meteo e al tipo di incidente

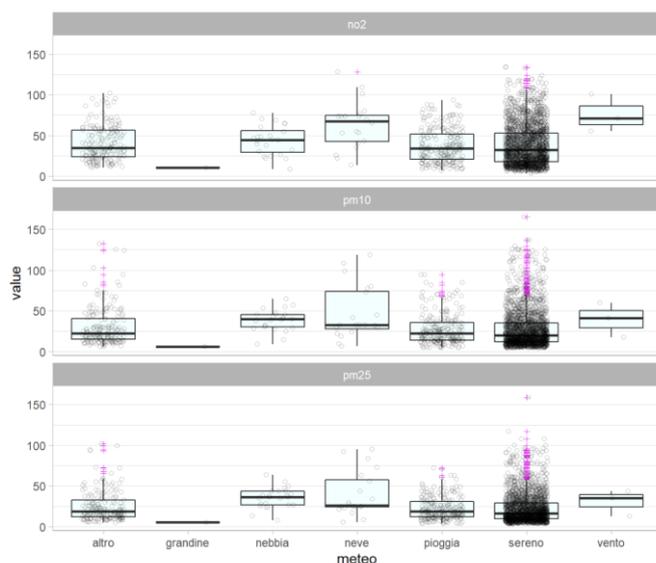


Figura 4. Distribuzione dei valori atmosferici in relazione alle condizioni meteo

Analisi econometrica

Le relazioni tra i fenomeni oggetto di indagine sono state indagate tramite un modello di regressione lineare, e poi tramite un modello Poisson per la validazione dei risultati.

Il modello di regressione lineare utilizzato ha la forma:

$$INC_i = \alpha + \beta_1 INQ_i + \beta_2 METEO_i + \beta_3 ANNO_i + \beta_4 ORA_i + \beta_5 STAGIONE_i + \beta_6 FONDO_i + \beta_7 STRADA_i + \varepsilon_i$$

in cui la variabile dipendente è il numero di incidenti registrati e i regressori sono la concentrazione dell'inquinante considerato, il meteo, l'anno, l'ora del giorno, la stagione, il fondo stradale e la tipologia di strada. L'analisi di regressione è stata ripetuta rispetto alle concentrazioni registrate di NO₂, PM10 e PM2.5.

Il modello lineare ha prodotto i risultati mostrati in Tabella 1.a, che evidenziano, con un buon livello di significatività, un aumento dell'1,66% nel numero di incidenti all'aumentare di 1µg/m³ di NO₂, e di poco meno dell'1% (0,81% e 0,62% rispettivamente) per PM10 e PM2.5 (risultati riassunti in Tabella 1.b).

Tabella 1.a. Risultati regressione lineare

Regressor	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
NO ₂	0.0165229	0.0003012	54.864	<2e-16 ***
Meteo sereno	0.1807970	0.0094773	19.077	<2e-16 ***
PM10	0.0081023	0.003481	23.273	<2e-16 ***
Meteo sereno	0.1371008	0.0100426	13.652	<2e-16 ***
PM2.5	0.0062171	0.0003909	15.903	<2e-16 ***
Meteo sereno	0.1293627	0.0101109	12.794	<2e-16 ***

*p < 0.1, **p < 0.05, ***p < 0.001

Tabella 1.b. Sintesi risultati: Variazioni percentuali degli incidenti al variare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di inquinante considerato – modello lineare

Δ incidenti all'aumentare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO₂	1.66%
PM10	0.81%
PM2.5	0.62%

L'analisi è stata replicata applicando il modello Poisson, come da letteratura (Wan et al., 2020, Akin, 2011) Il modello in questo caso può essere scritto:

$$\text{INC}_i = e^{(\alpha + \beta_1 \text{INQ}_i + \beta_2 \text{METEO}_i + \beta_3 \text{ORA}_i + \beta_4 \text{STAGIONE}_i + \beta_5 \text{FONDO}_i + \beta_6 \text{STRADA}_i)}$$

Anche in questo caso il modello ha evidenziato una buona significatività e risultati coerenti con quelli ottenuti tramite regressione lineare (Tabelle 2.a e 2.b).

Tabella 2.a. Risultati regressione con modello Poisson

Regressor	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
NO ₂	0.017514	0.000248	70.61	<2e-16 ***
PM10	0.0085457	0.0002902	29.45	<2e-16 ***
PM2.5	0.0058233	0.0003275	17.78	<2e-16 ***

*p < 0.1, **p < 0.05, ***p < 0.001.

Tabella 2.b. Sintesi risultati: Variazioni percentuali degli incidenti al variare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di inquinante considerato – modello Poisson

Δ incidenti all'aumentare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO₂	1.8%
PM10	0.9%
PM2.5	0.6%

La Tabella 3 riporta il numero di incidenti, feriti e morti totali negli anni considerati. La Tabella 4 mostra le variazioni medie annuali nel numero di incidenti all'aumentare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dell'inquinante considerato.

Tabella 3. Incidenti, morti e feriti totali nell'arco temporale considerato

2010-2018	Incidenti	Feriti	Morti
Totale	33.966	49.053	742

Tabella 4. Variazioni medie annuali determinate dall'aumentare di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di inquinante, a seconda del modello utilizzato

Variazioni medie annuali				
Modello	Inquinante	Incidenti	Feriti	Morti
Lineare	NO ₂	565	816	12
	PM10	276	399	6
	PM2.5	211	305	5
Modello	Inquinante	Incidenti	Feriti	Morti
Poisson	NO ₂	600	866	13
	PM10	290	419	6
	PM2.5	198	285	4

I risultati ottenuti per quanto riguarda il PM2.5 appaiono in linea con la letteratura precedente: per la regione Piemonte stimiamo un aumento nel numero di incidenti stradali dello 0.6% per ogni $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in più di concentrazione dell'inquinante, mentre per la medesima variazione di concentrazione Sager (2019), nel caso londinese, stima un aumento dello 0.3-0.6% del numero dei veicoli coinvolti in incidenti stradali al giorno; e Wan et al. (2020) per il caso cinese stimano un aumento di circa 0.3% nel numero di incidenti stradali. L'impatto del PM10 nella nostra analisi, con un aumento dell'incidentalità di 0.8-0.9% per ogni $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in più di concentrazione, risulta invece superiore rispetto a quello stimato nell'unico studio precedente, quello di Wan et al. (2020), in cui veniva stimato un aumento di 0.4% nel numero di incidenti.

Il PM10 non era stato considerato nel caso studio londinese, e l'NO₂ non era oggetto di indagine in nessuno dei due studi precedenti sul tema.

Valutazione economica

Il costo sociale medio per incidente rappresenta il danno economico subito dalla società e derivante dall'evento 'incidente stradale' (in cui ci siano o meno morti o feriti). Si tratta della quantificazione economica degli oneri principali che, a diverso titolo, gravano sulla società per un incidente stradale (MIT, 2010). Esistono diverse metodologie per stimare i costi legati all'incidentalità; tra questi i principali sono l'approccio del capitale umano (*human capital approach*) e il metodo della disponibilità a pagare (*willingness to pay approach*). Il primo si basa sulla valutazione delle conseguenze economiche degli incidenti stradali, mentre il secondo si fonda sulla stima di quanto gli individui sarebbero disposti a pagare per evitare un incidente stradale.

Per una valutazione economica degli impatti associati all'incremento nel numero di incidenti annuali attribuibile all'aumento di $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ nella concentrazione degli inquinanti oggetto di studio, sono state prese come riferimento le stime dei costi dell'incidentalità del Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture, calcolate adottando l'approccio del capitale umano (Tabella 5).

Tabella 5 Costi medi dell'incidentalità stradale (Fonte: MIT, 2019; rielaborazione propria)

Costo umano medio per decesso	Costo umano medio per ferito	Costi generali medi per incidente	Unità di misura
1.503.990	42.219	10.986	Euro

Nell'analisi sono stati considerati sia i costi umani, riferiti alle persone vittime dell'incidente, sia i costi generali riferiti all'incidente. I primi includono (i) il costo della vita umana, sia in caso di morti che di feriti gravi e/o lievi, inteso come mancata produttività e danni non patrimoniali (moralì e biologici), e (ii) i costi associati alle spese sanitarie. I secondi sono invece determinati dai danni patrimoniali, come quelli ai veicoli o a infrastrutture, e dai costi amministrativi.

I risultati stimano un costo incrementale annuo medio dell'incidentalità con danni alle persone (prendendo in considerazione sia morti che feriti), per il territorio piemontese, di circa 110 milioni di euro (Tabella 6). La componente dei soli costi generali stimata come attribuibile all'inquinamento atmosferico è di circa 11 milioni e mezzo di euro all'anno.

Tabella 6. Costi incrementali annui in Euro dell'incidentalità associati all'incremento di 1 µg/m³ di inquinante considerato (modello lineare).

Inquinante	Δ costo annuo incidentalità	Costo annuo mortalità	Δ Costo annuo feriti	Δ costo annuo incidentalità con danni alle persone	Δ costo annuo incidentalità con feriti
NO ₂	6.208.058,49	18.566.098,67	34.454.449,54	59.228.606,70	40.662.508,03
PM10	3.034.793,18	9.075.988,83	16.842.967,65	28.953.749,65	19.877.760,82
PM2.5	2.320.719,75	6.940.448,75	12.879.891,77	22.141.060,27	15.200.611,52
Totale	11.563.571,42	34.582.536,25	64.177.308,96	110.323.416,63	75.740.880,37

I risultati ottenuti con il modello Poisson (Tabella 7) risultano coerenti e di ammontare simile a quelli del modello lineare. Calcolano un costo incrementale medio dell'incidentalità con danni alle persone pari a circa 114 milioni di euro l'anno, e un incremento dei costi generali pari a circa 12 milioni di euro all'anno.

Tabella 7. Costi incrementali annui in Euro dell'incidentalità associati all'incremento di 1 µg/m³ di inquinante considerato (modello Poisson).

Inquinante	Δ costo annuo incidentalità	Costo annuo mortalità	Δ Costo annuo feriti	Δ costo annuo incidentalità con danni alle persone	Δ costo annuo incidentalità con feriti
NO ₂	6.587.606,77	19.701.192,80	36.560.925,66	62.849.725,23	43.148.532,43
PM10	3.185.297,38	9.526.093,47	17.678.259,32	30.389.650,18	20.863.556,71
PM2.5	2.170.561,30	6.491.378,16	12.046.519,06	20.708.458,52	14.217.080,36
Totale	11.943.465,45	35.718.664,43	66.285.704,04	113.947.833,93	78.229.169,50

Discussione e conclusioni

La stima economica del costo incrementale in termini di sicurezza stradale connesso all'inquinamento atmosferico nel territorio Piemontese, oggetto di quest'ultima parte dello studio, aggiunge elementi interessanti alla valutazione dei benefici di interventi di mitigazione delle emissioni nelle aree del progetto. Rappresenta anche un esempio di valutazione economica di impatti dell'inquinamento ulteriori, spesso trascurati nella valutazione delle politiche, rispetto a quelli diretti sulla salute umana. Le valutazioni qui sviluppate con riferimento al territorio piemontese costituiscono esempi applicati di metodologie utilizzabili e replicabili negli altri contesti territoriali, primo fra tutti quello dell'area ALCOTRA francese su cui non è stato possibile estendere le analisi a causa della mancata ricezione di dati.

L'analisi presentata in questa parte è tuttavia da considerarsi più come uno studio pilota, in grado di indicare una direzione promettente per progetti futuri, che come un'analisi conclusiva. Il limite principale è determinato dalla temporalità dei dati sugli incidenti stradali, al momento resi disponibili da ISTAT in formato trimestrale e non puntuale rispetto al giorno dell'anno, come evidenziato nelle sezioni precedenti. Inoltre, la distribuzione dei dati mostra una tendenza bimodale: si riscontra un'alta numerosità di incidenti nel comune di Torino, capoluogo piemontese con la maggiore densità di popolazione. In tutti gli altri comuni i valori dell'incidentalità sono più bassi e tendenzialmente omogenei, elemento che indebolisce l'analisi econometrica.

Possibili sviluppi, oltre alla auspicabile disponibilità futura di dati più completi sull'incidentalità, prevedono l'implementazione nel modello di altre variabili, *in primis* indicatori di intensità del traffico e di inversione termica. Allo studio anche la possibilità di un'estensione territoriale dell'analisi all'intera pianura padana, area fra le più critiche a livello europeo per concentrazioni di inquinanti atmosferici.

Valutazioni economiche riguardanti gli impatti dell'inquinamento atmosferico sono ovviamente possibili e auspicabili anche con riferimento ad altri servizi ecosistemici. Una questione aperta e importante riguarda ad esempio il *feedback loop* negativo innescato dagli impatti dell'inquinamento atmosferico sulla capacità depurativa dell'aria da parte della vegetazione urbana. Studi recenti hanno, da un lato, confermato e quantificato la capacità di assorbimento degli inquinanti da parte di diverse specie arboree urbane (Selmi et al., 2016; Buffoni et al., 2013; Sæbø et al., 2012; Wang et al., 2011). Dall'altro, numerose analisi hanno calcolato gli impatti morfologici, biochimici e fisiologici dell'inquinamento atmosferico sulla vegetazione urbana (Chaudhary et al., 2018; Kameswaran et al., 2019; Rai, 2016; Pourkhabbaz et al., 2010). Non appena diverranno disponibili relazioni dose-risposta che consentano di connettere questi due aspetti (un passo ulteriore rispetto agli attuali indici di tolleranza delle piante all'inquinamento) e dunque quantificare quanto le concentrazioni di specifici inquinanti possano ridurre la capacità di diverse specie arboree di svolgere una funzione depurativa dell'aria, sarà possibile anche sviluppare valutazioni economiche di

questo tipo di impatto. Si tratta di ricerche a un buon stadio di avanzamento che meriterebbero di essere supportate nell'ambito di futuri progetti.

Bibliografia

Akin Darcin, 2011, Analysis of highway crash data by Negative Binomial and Poisson regression models, doi: 10.13140/2.1.4113.0567

Buffoni A., Silli V., Manes F., 2013, *Air pollution removal by urban green in Milan town centre results from model estimations and air quality measurements*, Conference paper per 16th EFUF, Milano, Italy 7 – 11 May, 2013

Chaudhary I.J., Rathore D., Suspended particulate matter deposition and its impact on urban trees, 2018, ATMOSPHERIC POLLUTION RESEARCH, 9, pp. 1071-1082

Dastoorpoor M., Idani E., Khanjani N., Goudarzi G., and Bahrapour A., 2016, *Relationship Between Air Pollution, Weather, Traffic, and Traffic-Related Mortality*, TRAUMA MON., 2016 September; 21(4):e37585

ISTAT, MICRODATI - Rilevazione degli incidenti stradali con lesioni a persone: Microdati ad uso pubblico; <https://www.istat.it/it/archivio/87539>

Kameswaran S., Y. Gunavathi, P. Gopi Krishna, 2019, *Dust pollution and its influence on vegetation A critical analysis*, RJLBPCS 5(1), January – February, p. 341

MIT, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2010, *Studio di valutazione dei Costi Sociali dell'incidentalità stradale*, URL: https://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=12919

MIT, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019, *Studio di valutazione dei Costi Sociali dell'incidentalità stradale*, rev. 2010-2018.

Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R., Polle A., 2010, *Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, Platanus orientalis L.*, BULLETIN OF ENVIRONMENTAL CONTAMINATION AND TOXICOLOGY, 85, pp. 251–255

Rai P.K., 2016, Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring, ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY ,129, pp. 120–136

Ren H., Song Y, Liu JX , Hu Y., Lei J., 2017, A Deep Learning Approach to the Prediction of Short-term Traffic Accident Risk. ARXIV: 1710.09543v2.

Sager L., 2019, Estimating the effect of air pollution on road safety using atmospheric temperature inversions, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT, 98, 102250

Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawronska H., Gawronski S.W., 2012, *Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces*, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 427–428, pp. 347–354

Selmi W., Weber C., Rivière E., Blond N., Mehdi L., Nowak D., 2016, *Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France*, URBAN FORESTRY & URBAN GREENING, 17, pp. 192–201

Wan Y., Yuhang Li, Chunhong Liu, Zhongqiu Li, 2020, *Is traffic accident related to air pollution? A case report from an island of Taihu Lake, China*, ATMOSPHERIC POLLUTION RESEARCH, Volume 11, Issue 5, pp. 1028-1033

Wang H., Shi H., Li Y., 2011, *Leaf Dust Capturing Capacity of Urban Greening Plant Species in Relation to Leaf Micromorphology*, ISWREP (Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection), 3, pp. 20199-20201