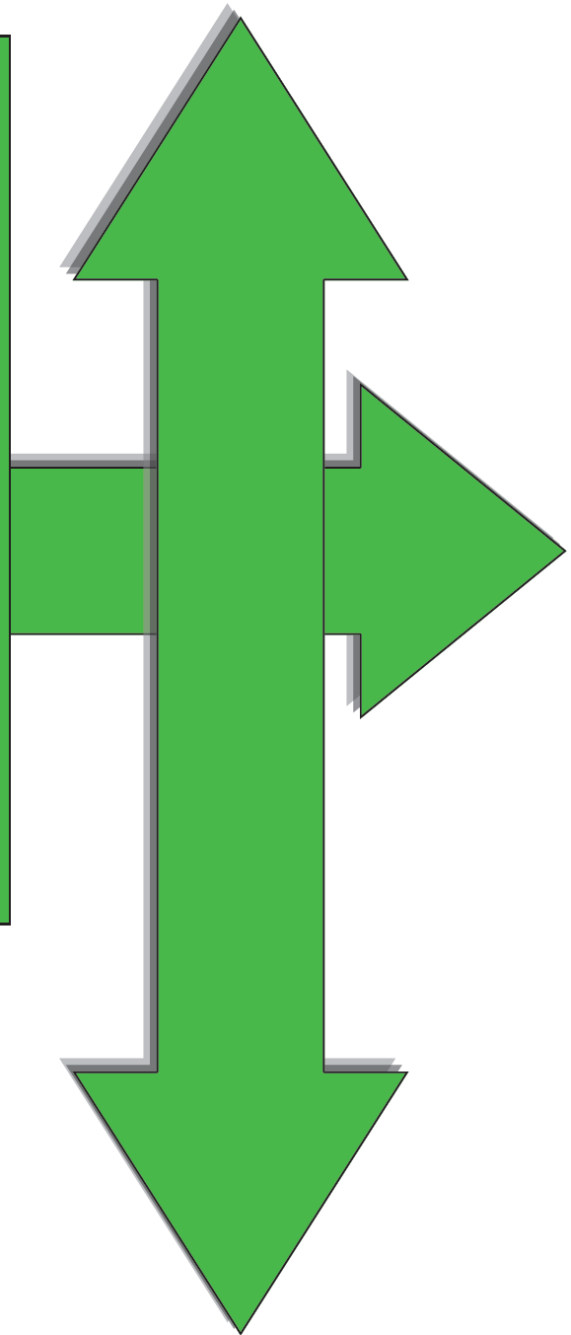


R.E.Po.T.
Rivista di
Economia e
Politica dei
Trasporti



Anno 2015, Numero 1

Rivista Scientifica della Società Italiana di
Economia dei Trasporti e della Logistica



ISSN 2282-6599



Previsione dell'inquinamento generato dalla mobilità veicolare e traffic management

Margaret Bell¹, Angela S. Bergantino², Mario Catalano^{3*}, Fabio Galatioto¹, Marco Migliore³

¹Transport Operations Research Group, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University.

²Dipartimento di Scienze Economiche e Metodi Matematici, Università di Bari, Via C. Rosalba 53, 70124, Bari.

³Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali Area di ricerca Trasporti, Università di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo.

Riassunto

Questo studio s'inserisce in una più ampia attività di ricerca sulle correlazioni tra le concentrazioni dei principali agenti inquinanti e variabili relative sia alle condizioni meteorologiche, che ne possono favorire o meno la dispersione, sia al deflusso veicolare quale fonte primaria d'inquinamento. L'idea è quella di sviluppare una metodologia per la previsione a breve termine delle densità di quegli elementi per i quali la normativa prevede delle soglie in termini di concentrazioni medie orarie. Tutto ciò al fine di potersi avvalere, in futuro, di modelli e tecnologie per sapere, con qualche ora di anticipo, se in una determinata zona di un centro urbano, un giorno, possa verificarsi qualche superamento dei suddetti vincoli di legge e poter, così, implementare tempestivamente strategie di *traffic management* a salvaguardia della salute dei cittadini. In particolare, questa memoria illustra i primi risultati della ricerca, che riguardano il confronto tra i modelli statistici per l'analisi delle serie storiche (modelli ARIMAX, Auto-Regressive Integrated Moving Average with eXogenous variables) e le reti neurali, in relazione all'accuratezza della previsione dei livelli d'inquinamento atmosferico. In questa prima fase, la valutazione comparativa riguarda la previsione delle concentrazioni di biossido di azoto (NO₂) rilevate nell'anno 2007 da una centralina di monitoraggio della qualità dell'aria e delle condizioni meteorologiche in un'arteria stradale della città di Londra, Marylebone Road. È in programma l'estensione dell'analisi alla città di Palermo.

Parole chiave: previsione dell'inquinamento da traffico veicolare, *traffic management*, modelli ARIMAX, reti neurali.

1. Introduzione

L'inquinamento dell'aria nei grandi centri urbani, oggi, è causato principalmente dall'elevato grado di trasporto motorizzato e dalla mancanza di visione di sistema nell'ambito delle politiche per il governo della mobilità e lo sviluppo urbanistico. Il problema assume un grande rilievo, dal punto di vista sanitario, per i

* Autore a cui spedire la corrispondenza: Mario Catalano (mario.catalano@unipa.it)

gravi danni alla salute e all'ambiente provocati dalle concentrazioni degli agenti inquinanti. La normativa europea sulla tutela della qualità dell'aria (Direttiva 2008/50/CE) stabilisce dei limiti, in termini di concentrazioni medie in un'ora, per quelle sostanze che possono determinare effetti somatici acuti nell'uomo; negli altri casi, invece, i valori soglia individuati dalla legge si riferiscono a "periodi di mediazione" delle concentrazioni giornalieri o annuali.

Le strategie di *traffic management*, volte al monitoraggio e alla gestione dinamica dei flussi di traffico, possono utilmente integrare le politiche infrastrutturali, gestionali e di regolazione finalizzate al raggiungimento di un assetto sostenibile della mobilità urbana. Gli interventi infrastrutturali, infatti, richiedono spesso lunghi tempi di realizzazione e complessi processi di negoziazione con i gruppi sociali che più di altri ne subiscono i costi esterni. Inoltre, la regolazione della domanda, orientata alla distribuzione ottimale dei flussi sulla rete di trasporto, si scontra con il fatto che le concentrazioni di sostanze inquinanti non dipendono soltanto dalla distribuzione delle fonti emissive al suolo, ma anche dalle condizioni atmosferiche. Infine, giova ricordare che i fenomeni di traffico e quelli meteorologici sono caratterizzati da fluttuazioni non di rado dovute ad eventi imprevisti.

Sulla base delle considerazioni esposte, abbiamo avviato un'attività di ricerca tesa a studiare le correlazioni tra le concentrazioni dei principali agenti inquinanti e variabili relative sia alle condizioni meteorologiche (velocità del vento, radiazione solare, etc.), che ne possono favorire o meno la dispersione, sia al deflusso veicolare quale fonte primaria d'inquinamento (volume di traffico, lunghezza delle code, etc.). L'idea è quella di sviluppare una metodologia per la previsione a breve termine (*nowcasting*) delle densità di quegli elementi per i quali la normativa prevede dei vincoli sulle concentrazioni medie orarie. Tutto ciò al fine di poter sapere, con qualche ora di anticipo, se in una determinata zona di un centro urbano, un giorno, possa verificarsi qualche superamento dei suddetti vincoli e poter, così, implementare tempestivamente strategie di *traffic management*¹ per tutelare la salute dei cittadini.

Questa memoria illustra i primi risultati della ricerca, che riguardano il tema della modellazione dell'inquinamento atmosferico da traffico. In particolare, si è confrontato l'approccio statistico parametrico (modelli per l'analisi delle serie storiche ARIMAX, Auto-Regressive Integrated Moving Average with eXogenous variables), e quello dell'intelligenza artificiale (rete neuronale), in relazione all'accuratezza della previsione dei livelli di concentrazione. Tale confronto ha suscitato interesse, in quanto le due metodologie sono potenzialmente complementari: la prima offre la possibilità di verificare con rigore la significatività delle variabili in gioco attraverso i test tipici della verifica statistica di ipotesi parametriche; la seconda consente di incorporare le relazioni non lineari eventualmente presenti, non dovendole esplicitare a priori ed utilizzando vari efficaci algoritmi per evitare la condizione di *overfitting*, che "indebolisce" la capacità di generalizzazione del modello. Pertanto, il parallelo è finalizzato ad esplorare vantaggi e limiti delle due tecniche, per capire se e in che modo possa essere utile un impiego sinergico di entrambe nella previsione della qualità dell'aria.

In questa prima fase, la valutazione comparativa è basata sulla previsione delle concentrazioni di biossido di azoto (NO₂) rilevate nell'anno 2007 da una centralina di monitoraggio della qualità dell'aria e delle condizioni meteorologiche in un'arteria stradale della città di Londra, Marylebone Road. Il biossido di azoto viene prodotto sia

¹ Ad esempio, il controllo dei cicli semaforici e la gestione dinamica dell'accesso dei veicoli privati alle corsie riservate al trasporto pubblico locale.

durante la combustione dei motori sia per reazioni fotochimiche secondarie che avvengono in atmosfera in presenza di radiazioni ultraviolette; è un gas molto tossico per l'uomo, che può provocare irritazioni agli occhi e all'apparato respiratorio. La normativa europea (Direttiva 2008/50/CE) stabilisce che la concentrazione media oraria di NO₂ non possa superare il limite di 200 µg/m³ più di 18 volte in un anno.

Si è voluto, altresì, verificare la possibilità di poter impiegare, tra le variabili esplicative delle densità di NO₂, l'andamento della concentrazione del monossido di carbonio (CO), che, in qualità di inquinante primario², potrebbe fungere da proxy degli attributi che caratterizzano il traffico e consentire, così, utili previsioni dei livelli dell'inquinamento urbano anche laddove non siano disponibili sistemi di monitoraggio della mobilità veicolare. Infatti, oggi, i livelli di concentrazione del monossido di carbonio emesso dai veicoli nelle nostre città sono molto contenuti, grazie all'evoluzione tecnologica del parco circolante³. Pertanto, venendo meno l'interesse per il CO come inquinante da tenere sotto controllo per evitare danni alla salute umana, si apre la strada per un suo impiego come proxy del deflusso veicolare nella previsione delle concentrazioni atmosferiche di quelle sostanze chimiche che ancora oggi rappresentano un pericolo per i cittadini.

Per di più, la densità del monossido di carbonio e di inquinanti come gli ossidi di azoto, oggi, può essere controllata attraverso tecnologie di rilevazione mobili poco costose come quelle al momento in fase di sperimentazione ad opera del gruppo di ricerca *Transport Operations Research Group* dell'Università britannica di Newcastle. Si tratta di sensori *low-cost*, chiamati *e-Mote*⁴, che, montati su pali della luce o altre infrastrutture stradali, registrano ogni minuto la concentrazione di inquinanti quali gli ossidi di azoto, il monossido di carbonio, l'ozono, oltre ai livelli del rumore, della temperatura e dell'umidità relativa. Questi dati, poi, sono trasferiti in tempo reale attraverso comunicazione *wifi*, ad un *gateway*, che a sua volta interagisce con un server centrale. È possibile avere fino a 100 *e-Mote* per *gateway* con i quali coprire superfici urbane fino a 1 km². Tutto ciò lascia immaginare uno scenario futuro in cui il monitoraggio e la previsione dell'inquinamento atmosferico da traffico in città possa essere capillare.

Nel prosieguo, al paragrafo 2 si descrivono le caratteristiche principali del sito (Londra, Marylebone Road) e delle tecnologie di monitoraggio dell'ambiente e del traffico dai quali deriva la base dati utilizzata in questa prima fase della ricerca; il paragrafo 3 illustra i modelli impiegati per la simulazione dell'inquinamento nell'area di studio, mostrando, alla fine, i risultati di un confronto tra le rispettive capacità previsionali; il paragrafo 4 conclude la memoria presentando gli sviluppi futuri della ricerca.

² Viene prodotto nei processi di combustione incompleta dei motori degli autoveicoli a benzina durante il funzionamento a basso regime.

³ Ad esempio, la media delle concentrazioni medie orarie di CO, nel periodo 01/09/2013-30/04/2014 a Palermo, è risultata pari a 0,442 mg/m³ con una deviazione standard di 0,621; il corrispondente limite normativo per la protezione della salute umana in Italia, espresso in termini di media massima giornaliera su 8 ore, è pari a 10 mg/m³ (D.M. 02/04/2002, n. 60).

⁴ Prodotti da Envirowatch Ltd.

2. Descrizione del sito e della tecnologia per la rilevazione dei dati ambientali e di traffico utilizzati

Il sito scelto per la raccolta dei dati utilizzati nelle analisi di questo articolo si trova a Londra e precisamente lungo Marylebone Road (Fig. 1). La centralina di monitoraggio fa parte di una rete nazionale conosciuta sotto il nome di AURN (*Automatic Urban and Rural Network*) [<http://uk-air.defra.gov.uk/networks/>]. Essa è inoltre l'unica, tra quelle distribuite nel Regno Unito, a fornire un ricco set di dati che include inquinanti, meteo e traffico per un periodo di 10 anni (dal 1998 al 2007).

Le sostanze rilevate sono le seguenti: ossidi di azoto (NO_x), biossido di zolfo (SO_2), ozono (O_3), monossido di carbonio (CO) e particolato (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$).

I sensori di precisione utilizzati dalla centralina si avvalgono di tecnologia a chemiluminescenza che garantisce il massimo dell'accuratezza oggi possibile.

La centralina su Marylebone Road si trova a circa 1,5 metri di distanza dalla prima corsia e all'interno di un canyon con larghezza di circa 25 metri, altezza media degli edifici di 15 metri ed allineamento dell'asse stradale Ovest-Est (Fig. 1).



Figura 1: Vista satellitare (a sinistra) e posizione rispetto alla sede stradale (a destra) della centralina di monitoraggio di Londra su Marylebone Road.

3. I modelli per la previsione dell'inquinamento generato dal traffico veicolare

In questa sezione, si descrivono i modelli, per la previsione a breve termine delle concentrazioni di sostanze inquinanti emesse dai veicoli stradali, che sono stati oggetto di valutazione comparativa nella prima fase della nostra ricerca. In particolare, sono state studiate le correlazioni tra l'inquinamento atmosferico e la mobilità veicolare urbana nel sito inglese di Marylebone Road (par. 2), a Londra. Sono stati confrontati i modelli ARIMAX, derivanti dalla teoria dei processi stocastici per l'analisi delle serie storiche, e le reti neurali, sviluppate nell'ambito delle ricerche sull'intelligenza artificiale. Le simulazioni dell'inquinamento da traffico hanno riguardato il biossido di azoto (NO_2) e sono state effettuate con modelli sviluppati sulla base di osservazioni sperimentali orarie registrate nell'anno 2007 (8759 osservazioni). Più in dettaglio, la variabile dipendente è rappresentata dalla concentrazione media di NO_2 in una certa ora ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e le variabili indipendenti sono espresse con i seguenti attributi: la concentrazione media dello stesso NO_2 nell'ora precedente a quella di previsione; il flusso di traffico in auto equivalenti/ora (o, in alternativa, la concentrazione di CO in mg/ora , in qualità di proxy del traffico) nell'ora di riferimento; l'andamento medio della direzione (gradi rispetto al Nord) e della velocità (km/ora) del vento nell'ora considerata.

3.1 Fondamenti teorici

I modelli ARIMAX esprimono la variabile dipendente come combinazione lineare di una o più variabili indipendenti e un processo di errore che consta di una componente autoregressiva, per cogliere la memoria che il fenomeno studiato ha di se stesso⁵, ed una parte a media mobile, che incorpora l'effetto di una successione temporale di impulsi casuali (Hamilton, 1994).

La specificazione e stima del modello si fonda su una fase preliminare di analisi (Box *et al.*, 2008) in cui verificare se la serie storica della variabile dipendente sia stazionaria (media e varianza costanti, autocovarianza dipendente soltanto dal *lag* temporale) e studiare l'andamento dell'autocorrelazione in funzione del *lag* temporale, così da poter decidere il numero di componenti della parte autoregressiva e di quella a media mobile. La stazionarietà della serie storica della variabile endogena, proprietà essenziale per l'applicazione di questa classe di modelli, può essere verificata attraverso un test statistico ad hoc (test di radice unitaria).

Le reti neurali sono state sviluppate nell'ambito delle ricerche sull'intelligenza artificiale. Esse operano emulando la plasticità sinaptica che il cervello umano mostra nei processi di apprendimento. Infatti, una rete è composta da una serie di unità elementari, i singoli neuroni, collegati tra loro attraverso connessioni pesate. Ciascun neurone artificiale riceve simultaneamente diversi segnali, che, se superano un valore soglia (*bias*), lo attivano producendo, di conseguenza, un segnale di output per altri neuroni. Ai segnali afferenti ad un neurone sono associati dei pesi lungo le connessioni attraverso le quali viaggiano. Tali pesi sono dei coefficienti adattivi, che si modificano iterativamente nella fase di addestramento della rete, in cui essa opera su svariate combinazioni input-output osservate (casi-esempio o *training set*), attraverso specifici algoritmi di apprendimento, per minimizzare lo scostamento tra output reali e output simulati. Inoltre, un gruppo di casi-esempio (*selection test*) è impiegato per controllare, durante l'addestramento, la capacità della rete di generalizzare (mostrare alte performance rispetto a casi nuovi) ed arrestare il processo di apprendimento qualora si riscontri un peggioramento della suddetta capacità (*overlearning* o *overfitting*). Un terzo insieme (*test set*), infine, ha la funzione di confermare i livelli di performance raggiunti in relazione al *selection test*.

Le reti neurali utilizzate nel nostro studio presentano un'architettura del tipo perceptrone multistrato (*Multi-Layer Perceptron* o MLP) con connessioni *feed-forward* (Bishop, 1995). Ciò significa che i neuroni sono organizzati in strati: uno strato di input, uno o più strati nascosti, uno strato di output. Inoltre, i collegamenti sono unidirezionali: dalle unità di un livello a tutte quelle del livello successivo. Gli input ricevuti da ciascun neurone sono combinati attraverso una funzione lineare dipendente da parametri incogniti, ovvero i pesi delle varie connessioni. Il risultato di questo primo stadio (livello di attivazione o potenziale netto), prima di essere trasferito al successivo nodo della rete, funge da input per una funzione sigmoide denominata funzione di trasferimento.

⁵ Impiegando uno o più valori passati della variabile dipendente.

3.2 Specificazione dei modelli e stima dei coefficienti incogniti

L'analisi grafica della serie storica oraria delle concentrazioni di NO₂ (µg/m³), presso il sito inglese nell'anno 2007, suggerisce un processo stazionario (Fig. 2) e, quindi, la possibilità di applicare direttamente un modello ARIMAX che la rappresenti adeguatamente. L'ipotesi di stazionarietà della serie è stata anche confermata dall'esito di un test di radice unitaria del tipo *Augmented Dickey-Fuller* (ADF).

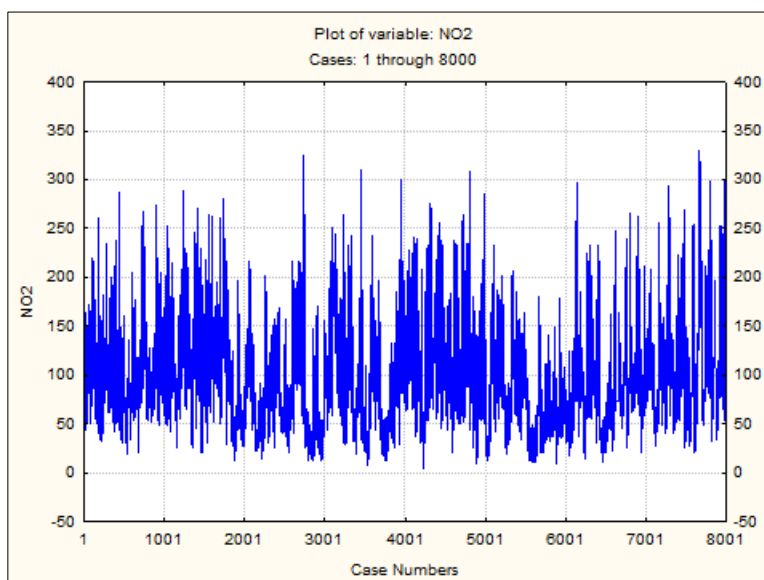


Figura 2: Concentrazioni orarie medie di NO₂ (µg/m³) nel 2007 a Londra (Marylebone Road).

La tavola 1 presenta le statistiche descrittive fondamentali relative alle variabili impiegate per la modellazione dei livelli di concentrazione media oraria di NO₂ nel 2007 a Londra. Si osservi il valore della media della densità oraria del biossido di azoto, particolarmente elevata rispetto al limite normativo di 200 µg/m³. Dai dati risulta che tale soglia è stata superata, a Marylebone Road nel 2007, 457 volte, a fronte di un numero massimo di superamenti concessi dalla legge di 18 volte in un anno (Direttiva 2008/50/CE).

Tavola 1: Statistiche descrittive relative alla concentrazione oraria di NO₂ nel 2007 a Londra (Marylebone Road) e alle sue variabili esplicative.

	Media	Minimo	Massimo	Deviazione Standard
Densità media oraria di NO ₂ (µg/m ³)	102,5	4	329	53,1
Velocità media dei veicoli nell'ora (km/h)	43,0	12,6	78,9	11,1
Flusso orario (auto equivalenti/ora)	3506	304	5162	1173,2
Densità media oraria di CO (mg/m ³)	0,8	0,1	3	0,4
Velocità media del vento nell'ora (km/h)	2,8	0,1	15,1	2,1
Direzione media del vento nell'ora (gradi Nord)	203,9	2,9	358,1	82,4
Temperatura media nell'ora (gradi centigradi)	13,5	-0,8	29,7	5,2

L'analisi dei legami tra la concentrazione oraria di NO₂ ed i suoi valori passati ha messo in luce un elevato grado di correlazione con la densità media nell'ora precedente quella di osservazione. Pertanto, è stato stimato un modello ARIMAX costituito da una sola componente autoregressiva, ossia la concentrazione di NO₂ un'ora prima.

La Tavola 2 illustra i risultati di tale stima. Come si può osservare, i coefficienti stimati sono tutti statisticamente molto significativi. La temperatura media nell'ora non è stata inserita tra le variabili esplicative, in quanto il suo andamento annuale non è stazionario. I segni dei parametri stimati sono quelli attesi. Una considerazione particolare merita la direzione media del vento. In questo caso, il modello ARIMAX, specificato in modo da rappresentare legami lineari con i regressori, mostra i suoi limiti. Infatti, esso assegna effetti positivi e molto diversi sulla concentrazione di NO₂ a direzioni del vento che sono molto simili (ad esempio, 358° Nord e 2° Nord). Chiaramente, per colmare questo deficit di realismo, sarebbe opportuno specificare il modello in modo da stabilire un legame non lineare tra la direzione del vento e l'inquinamento. A tal fine, può essere utile simulare tale relazione attraverso una rete neurale, addestrata sugli stessi dati, in modo da farsi un'idea sulle caratteristiche di questo legame funzionale.

Tavola 2: Risultati della stima del modello ARIMAX (1,0,1) per prevedere la concentrazione media oraria di NO₂ in funzione del volume di traffico e delle variabili meteorologiche.

Variabili Indipendenti	Coefficienti	Err. Std.	z	P> z	[Int. Conf. 95%]	
Flusso di traffico (auto/h)	0,123	0,005	23,170	0,000	0,113	0,133
Velocità media del vento (km/h)	-8,815	0,345	-25,540	0,000	-9,492	-8,139
Direzione media del vento (Gradi Nord)	0,023	0,005	4,300	0,000	0,012	0,033
Costante	88,259	2,561	34,460	0,000	83,239	93,278
Densità media di NO ₂ un'ora prima	0,870	0,008	103,030	0,000	0,853	0,886
Componente a media mobile	-0,055	0,021	-2,670	0,008	-0,095	-0,015
Deviazione standard dell'errore	21,030	0,300	70,060	0,000	20,442	21,618
LN (Verosimiglianza) = -34844,09						
N. osservazioni = 7800						
Wald $X^2(5) = 19041,99$						
Prob. > $X^2 = 0,0000$						

La Tavola 3, invece, mostra i risultati della stima di un modello ARIMAX analogo al precedente, in cui, però, l'influenza del traffico sull'inquinamento è rappresentata dal concentrazione media del monossido di carbonio nell'ora (mg/m³). Tutto ciò allo scopo di verificare l'ipotesi secondo cui l'andamento della densità di CO possa essere una valida proxy del deflusso veicolare. I commenti sulle precedenti stime valgono anche in questo caso. È opportuno, tuttavia, notare una sensibile riduzione degli effetti marginali relativi alla velocità e alla direzione del vento. Questa differenza può essere spiegata considerando che i cambiamenti nel tempo della concentrazione di CO sono dovuti non soltanto alla dinamica dei veicoli, ma anche in una certa misura⁶ alle caratteristiche del vento.

⁶ Non tale, comunque, da generare problemi di collinearità.

Tavola 3: Risultati della stima del modello ARIMAX (1,0,1) per prevedere la concentrazione di NO₂ in funzione della densità di CO e delle variabili meteorologiche.

Variabili Indipendenti	Coefficienti	Err. Std.	z	P> z	[Int. Conf. 95%]	
Densità media oraria di CO (mg/m ³)	76,549	1,427	53,650	0,000	73,753	79,346
Velocità media del vento (km/h)	-3,838	0,224	-17,140	0,000	-4,277	-3,399
Direzione media del vento (Gradi Nord)	0,007	0,004	1,760	0,079	-0,001	0,016
Costante	50,530	1,908	26,480	0,000	46,790	54,269
Densità media di NO ₂ un'ora prima	0,854	0,010	82,220	0,000	0,834	0,874
Componente a media mobile	-0,136	0,020	-6,690	0,000	-0,176	-0,096
Deviazione standard dell'errore	16,515	0,246	67,030	0,000	16,032	16,997

LN (Verosimiglianza) = -31960,4
N. osservazioni = 7564
Wald X²(5) = 14504,81
Prob. > X² = 0,0000

Utilizzando le osservazioni relative a Marylebone Road nell'anno 2007, per la previsione della concentrazione oraria di NO₂, è stata sviluppata anche una rete neurale. La sua architettura, del tipo MLP (Fig. 3), è stata selezionata addestrando e comparando centinaia di reti sulla base di casi-esempio generati, di volta in volta, attraverso processi di ricampionamento casuale.

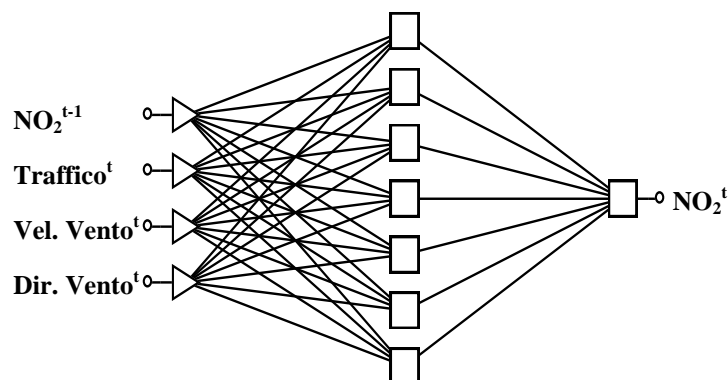


Figura 3: Architettura neurale per la previsione della densità media oraria di NO₂.

Come si evince dalla Figura 3, la rete presenta nello strato di input quattro neuroni relativi alle seguenti variabili: concentrazione media del biossido di azoto nell'ora precedente a quella di previsione (µg/m³); il flusso di traffico in auto equivalenti nell'ora di riferimento; la direzione (gradi rispetto al Nord) e la velocità media (km/ora) del vento nell'ora considerata. Essa, inoltre, ha uno strato nascosto costituito da 7 neuroni e uno strato di output costituito da un solo neurone relativo alla concentrazione media del biossido di azoto nell'ora di previsione.

Per avere un'idea della capacità della rete di cogliere i legami non lineari tra la concentrazione di NO₂ e le caratteristiche del vento, a differenza dei modelli ARIMAX esaminati in precedenza, si osservi la Figura 4. Come si può notare, la relazione tra la

densità oraria del biossido di azoto e la velocità del vento ha un andamento decrescente e convesso; mentre, la funzione che rappresenta il legame con la direzione del vento ha una forma ad U, assegnando, realisticamente, effetti simili in termini di concentrazione di NO₂ a scostamenti simili dell'asse del vento dal punto di riferimento, che è il Nord.

Le relazioni che la rete neurale modella per prevedere gli effetti degli altri regressori (valori passati della concentrazione di NO₂ e volume di traffico) sono, invece, di tipo lineare.

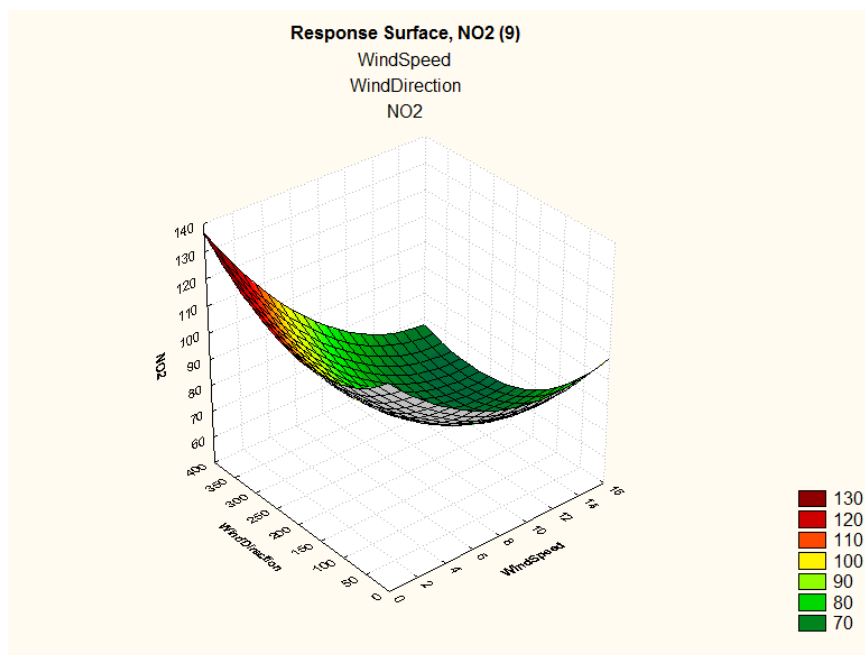


Figura 4: Andamento simulato dalla rete neurale della densità di NO₂ in funzione delle caratteristiche del vento.

3.3 Le performance di previsione a confronto

In questo paragrafo, si confrontano la rete neurale e i due modelli ARIMAX descritti in precedenza, in relazione alla capacità di prevedere le densità medie orarie di NO₂ osservate a Marylebone Road nell'anno 2006, ovvero in un periodo che i processi di sviluppo dei modelli stessi non hanno preso in considerazione.

L'analisi comparativa è stata svolta sulla base di tre indicatori fondamentali: la correlazione tra le densità rilevate e quelle previste, il valore assoluto dell'errore percentuale medio (MAPE, Mean Absolute Percent Error), la percentuale di superamenti della soglia di densità oraria massima (200 µg/m³) non sfuggiti al modello; quest'ultimo è il criterio più rilevante, atteso che lo scopo della ricerca è sviluppare un sistema di supporto al *traffic management* per garantire il rispetto dei target normativi di qualità dell'aria. I risultati sono riportati dalla Tavola 4, nella quale si nota una sostanziale omogeneità tra il modello ARIMAX e la rete neurale a parità di variabili esplicative ed un significativo miglioramento della capacità di prevedere i picchi d'inquinamento qualora l'impatto dei fenomeni di traffico sia espresso tramite la variabile proxy densità media del monossido di carbonio. Ciò dipende dal fatto che questo gas, essendo generato direttamente nei processi di combustione incompleta dei

motori delle auto a benzina, è in grado di "catturare" gli effetti dei moti accelerati dei veicoli, caratteristici dei regimi di marcia di tipo "stop and go" che si verificano in condizioni di traffico congestionato. È stato, infatti, sperimentalmente provato che, per gli ossidi di azoto, le emissioni variano poco con la velocità media e sono, invece, molto sensibili all'accelerazione (Tartaglia, 1999).

Le figure 5-7 mettono a raffronto le concentrazioni misurate e quelle previste dai tre modelli per un ampio campione di ore osservate nell'anno 2006. Tutti i modelli mostrano un'eccellente capacità di seguire le fluttuazioni della concentrazione di NO₂ nell'ambito di questo nuovo insieme di dati.

Tavola 4: Rete neurale e modelli ARIMAX a confronto: densità media oraria di NO₂ nell'anno 2006 a Londra, Marylebone Road.

Modello	Correlazione con i dati osservati	MAPE	Percentuale di superamenti individuati
ARIMAX (Volume di Traffico)	90,7%	17,0%	69,4%
Rete neurale (Volume di Traffico)	91,1%	16,5%	71,6%
ARIMAX (Densità media di CO)	90,8%	16,7%	81,3%

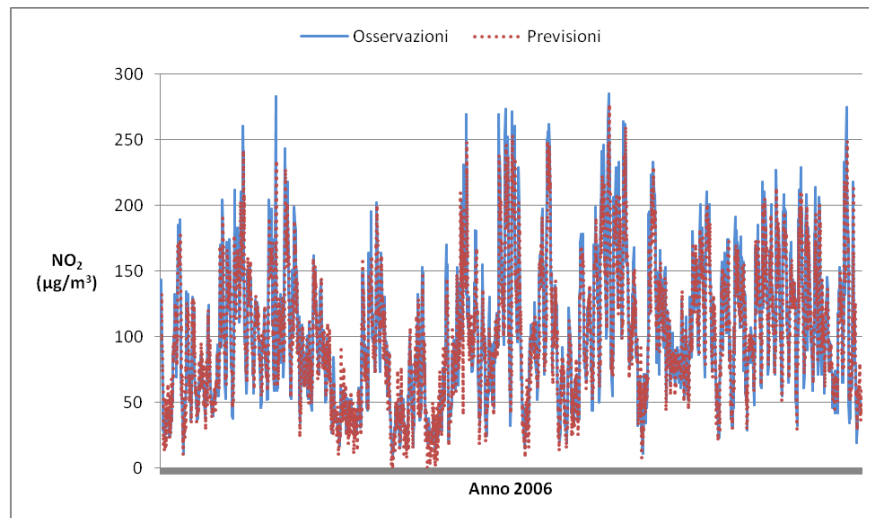


Figura 5: Concentrazioni medie orarie di NO₂ osservate nell'anno 2006 *versus* le concentrazioni previste dal modello ARIMAX in funzione del volume di traffico a Londra (Marylebone Road).

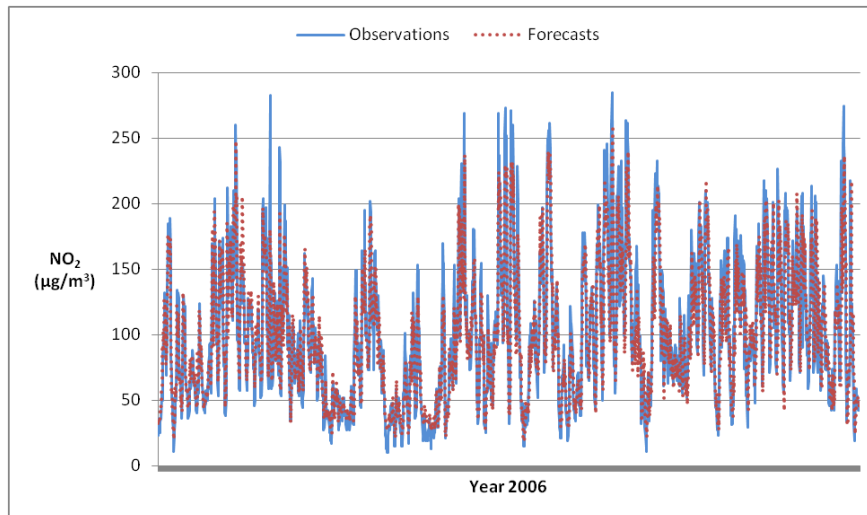


Figura 6: Concentrazioni medie orarie di NO₂ osservate nell'anno 2006 *versus* le concentrazioni previste dalla rete neurale in funzione del volume di traffico a Londra (Marylebone Road).

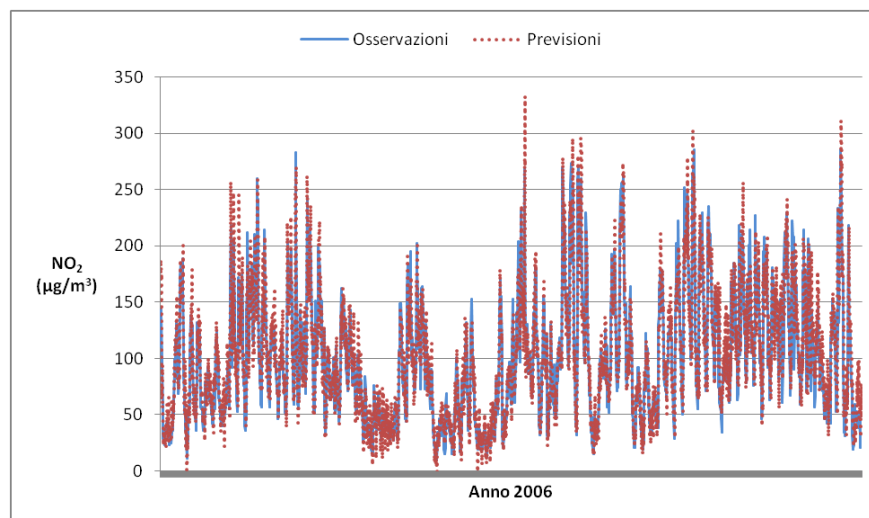


Figura 7: Concentrazioni medie orarie di NO₂ osservate nell'anno 2006 *versus* le concentrazioni previste dal modello ARIMAX in funzione della densità media di CO a Londra (Marylebone Road).

4. Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati di questa prima fase dello studio rivelano che la rete neurale e il modello ARIMAX presentano performance di previsione simili e dei vantaggi peculiari: la prima, infatti, è in grado di catturare le relazioni non lineari in gioco a differenza del secondo, che, però, consente una più rigorosa verifica della significatività delle variabili esplicative (attraverso test statistici parametrici) e si avvale dell'intera base dati per la stima dei coefficienti dei regressori. Per la previsione delle concentrazioni medie orarie

di NO₂, pare, pertanto, opportuno un impiego sinergico delle due metodologie: in un primo stadio, si potrebbe utilizzare la rete neuronale per indagare sulla forma funzionale dei legami tra la densità oraria del gas inquinante considerato e i fattori esplicativi individuati. Il feedback di questa fase esplorativa, poi, potrebbe orientare la specificazione di un modello ARIMAX con eventuali componenti non lineari (ad esempio, l'inverso della velocità del vento) per rappresentare relazioni tra la variabile dipendente e alcune delle variabili indipendenti caratterizzate da derivata prima non costante. La stima di un modello ARIMAX di questo tipo potrebbe essere effettuata solo se, preliminarmente, fosse verificata la stazionarietà delle serie storiche delle suddette componenti non lineari.

Inoltre, si dimostra che l'introduzione nella specificazione del modello di previsione di un indicatore dell'andamento della congestione nell'ora (densità media di CO) migliora notevolmente la capacità di anticipare i superamenti delle concentrazioni-soglia che storicamente si sono verificati. Ciò nonostante, prevedere poco più dell'80% dei superamenti registrati, in alcuni casi, come quello in esame, potrebbe non essere sufficiente ad evitare di oltrepassare il livello critico dei 200 µg/m³ più di 18 volte all'anno. Preme, però, sottolineare che nei casi di altissima frequenza annuale dei superamenti, non si può pretendere di determinare la qualità dell'aria secondo le prescrizioni legislative con il solo impiego del *traffic management*. Infatti, nel caso di Marylebone road a Londra nel 2007, per rispettare i vincoli di legge sul biossido di azoto, si sarebbe dovuto anticipare almeno il 96% dei superamenti (439), da scongiurare tutti, poi, attraverso interventi di indirizzo della mobilità veicolare. Considerato l'elevatissimo profilo di un obiettivo del genere, forse, per i contesti come Marylebone road, il *traffic management* andrebbe visto come uno strumento integrativo, utile al perfezionamento degli effetti di riduzione dell'inquinamento conseguibili con politiche di trasporto di lungo periodo, quali, ad esempio, quelle volte a favorire il trasporto collettivo.

Ad ogni modo, uno sviluppo futuro della ricerca consisterà nel tentare di migliorare ulteriormente la capacità di prevedere i superamenti tramite le tecniche di *ensembling*. Ci si riferisce alla possibilità di avvalersi di molteplici modelli, le cui diverse previsioni possano contribuire all'elaborazione di un unico output di sintesi (tramite il calcolo di una loro particolare media oppure del massimo, etc.). Ad esempio, potrebbero essere addestrate diverse architetture neurali, così da formare un sistema di modelli (*ensemble*) per la previsione delle concentrazioni. Inoltre, per innalzare la percentuale di superamenti individuati, un'altra possibilità da sperimentare è l'abbassamento del valore previsto di concentrazione che discrimini tra i casi di non intervento e quelli d'intervento. Infatti, se si stabilisse di dover agire con il *traffic management* non solo quando la densità prevista sia superiore a 200 µg/m³, bensì anche quando sia maggiore di un valore-limite più basso, si potrebbe riuscire a prevedere in misura maggiore quei superamenti che derivano da concentrazioni poco al di là della soglia normativa. Il costo di un tale progresso si manifesterebbe in termini di accresciuta incidenza dei falsi allarmi. A tal proposito, un tema di ricerca potrebbe riguardare l'individuazione di criteri per la determinazione di una concentrazione critica d'intervento, che assicuri un equilibrio tra la capacità di prevedere i superamenti dello standard di legge e il costo d'intervenire quando non è necessario.

È in programma l'estensione dello studio alla città di Palermo, per la quale si può disporre di una più ricca gamma di dati sulla qualità dell'aria e sulle condizioni meteorologiche, in virtù di una rete di rilevazione costituita da 10 stazioni di

monitoraggio, collegate tramite modem a un centro di elaborazione dati, ed integrata da un laboratorio chimico per analisi ambientali. Si avrà, così, la possibilità di indagare sull'importanza relativa di molte altre variabili esplicative di natura ambientale per la previsione dell'inquinamento atmosferico prodotto dalla mobilità veicolare.

Inoltre, Palermo non ha un sistema di monitoraggio del traffico e, quindi, rappresenta un contesto in cui poter sperimentare l'uso della concentrazione di CO come proxy del deflusso veicolare. Ancora, la scelta di Palermo come ulteriore area di studio consentirà di arricchire il patrimonio delle osservazioni sperimentali sulle densità degli inquinanti e sulle condizioni di contesto, grazie all'impiego di un laboratorio mobile per la rilevazione della qualità dell'aria, di recente acquisito dal gruppo di ricerca sui trasporti dell'Università di Palermo in virtù di un finanziamento europeo (Progetto RE.S.E.T., Rete di laboratori per la Sicurezza, sostenibilità ed Efficienza dei Trasporti della Regione Siciliana - CUP J75E12000020006). Questo consentirà, ad esempio, di analizzare l'impatto della configurazione urbanistica di un'area (presenza di strade *canyon*) sui fenomeni d'inquinamento da traffico, il che richiede un significativo aumento del numero degli *spot* di rilevazione sul territorio urbano rispetto allo scenario attuale.

Riferimenti bibliografici

- Bishop, C. 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: University Press.
Box, G. E. P., G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. 2008. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley.
Hamilton, J. D. 1994. *Time Series Analysis*. Princeton: Princeton University Press.
Tartaglia, M. 1999. *L'Inquinamento dell'Aria da Traffico Stradale*. Ed. Bios.