

## CONCLUSIONI

La normativa vigente che definisce gli obiettivi ed i criteri dei sistemi di monitoraggio della qualità dell'aria afferma: *“La rete di rilevamento dovrà anche essere dotata di un sistema [...] di elaborazione di dati [...] al fine di individuare potenziali situazioni di emergenza prima che si raggiungano le soglie di attenzione”* (art. 9, DM 20.5.91). A questo obiettivo si è indirizzato il presente lavoro di tesi volto alla ricerca di modelli adeguati a prevedere situazioni di inquinamento acuto.

Il territorio oggetto dell'analisi sperimentale è stato l'area urbana di Mestre, dove già da anni era in funzione un sistema di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico.

L'ampia base di dati, relativa ad inquinanti atmosferici rilevati in più punti del territorio, a variabili meteorologiche ed ad alcuni flussi di traffico, ha consentito un'analisi multiparametrica della qualità dell'aria. Questa indagine ad ampio spettro è stata presupposto indispensabile alla costruzione dei modelli di previsione.

Il quadro generale sulla variabilità spazio-temporale dei fenomeni di inquinamento atmosferico, già noto in letteratura, ha trovato puntuale conferma su scala locale. In particolare, è stato osservato il diverso comportamento degli inquinanti primari rispetto a quelli secondari. L'ozono, che è stato studiato come principale indicatore dello smog fotochimico, raggiunge i massimi valori di concentrazione in area suburbana e in condizioni meteorologiche caratterizzate da forte radiazione solare e da instabilità atmosferica. A questa fenomenologia tipicamente estiva si contrappone un inquinamento atmosferico di origine primaria (CO, NO) più caratteristico della stagione invernale. Esso raggiunge i suoi picchi in situazioni di stabilità atmosferica e assenza di vento ed è in diretta relazione con l'andamento del traffico veicolare.

La ricerca dei modelli previsionali si è focalizzata sui tre inquinanti per i quali la normativa prevede limiti in termini di medie orarie (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>). I modelli di *nowcasting* sono stati costruiti con reti neurali che hanno dimostrato eccellenti capacità di previsione a breve termine dell'andamento delle concentrazioni orarie. La scelta di circoscrivere la previsione entro passi temporali relativamente ridotti (da una a tre ore) è stata condizionata dall'obiettivo di individuare quanto più precisamente possibile i picchi

di inquinamento. Una previsione a lunga scadenza (24 ore o più) avrebbe infatti consentito una riproduzione generica del fenomeno, ma sarebbe stata imprecisa nella segnalazione degli eventi acuti.

La variabilità temporale degli inquinanti è stata riprodotta dalle reti neurali raggiungendo correlazioni tra dati previsti e simulati intorno, e spesso oltre, allo 0.9. I risultati migliori sono stati ottenuti nella previsione dell'ozono. La relativa regolarità del fenomeno e la sua stretta dipendenza da una variabile che domina con la sua influenza sulle altre (la radiazione solare) sono i fattori principali che hanno consentito allo strumento neurale di simulare l'andamento di questo inquinante con una precisione tale da raggiungere correlazioni tra dati previsti e simulati dello 0.96, per la previsione ad un'ora, e di 0.91 per quella a tre ore. I risultati ottenuti hanno trovato conferma, con leggera attenuazione delle capacità previsionali, nei test di verifica condotti su insiemi di dati non utilizzati in addestramento (correlazione di 0.94 a passo temporale di un'ora e di 0.84 per quella a tre ore).

Maggiori difficoltà sono invece state incontrate per il monossido di carbonio: la previsione a passo temporale di tre ore non è riuscita a oltrepassare un coefficiente di correlazione dello 0.78. Proprio queste difficoltà hanno indotto a sperimentare un metodo di addestramento alternativo che ha portato a risultati più che soddisfacenti. Tale metodo è consistito nell'indirizzare l'addestramento delle reti neurali a fornire - invece che la previsione della concentrazione dell'inquinante - la *probabilità* che si verificasse una situazione *di allarme*. La correlazione tra *probabilità d'allarme* simulata e *probabilità d'allarme* sperimentale ha raggiunto valori intorno allo 0.94 anche in fase di test del modello.

Lo sviluppo dei modelli previsionali ha trovato un condizionamento nella composizione del set di dati, che solo sporadicamente superavano i *livelli di attenzione e di allarme*. La carenza di episodi di alte concentrazioni ha limitato la sensibilità della risposta neurale verso situazioni acute.

Le reti neurali si sono comunque dimostrate uno strumento particolarmente appropriato in questa ricerca, per la quale si disponeva di serie storiche di notevole lunghezza e di informazioni multiparametriche registrate in più punti dello spazio atmosferico urbano, la cui frammentarietà però non consentiva di interpolare

spazialmente i dati costruendo, ad esempio, superfici di ugual concentrazione. Grazie alle reti neurali è stato possibile elaborare modelli di previsione efficienti senza dover sviluppare gravosi algoritmi né formulare alcuna ipotesi sul sistema complesso rappresentato da tutte le numerose variabili che concorrono a definire la situazione atmosferica di un ambiente urbano.

Le reti neurali hanno dimostrato una capacità di apprendere ‘realmente’, cioè non ‘a memoria’, come è stato verificato in fase di test per i singoli modelli. Ciò ha consentito, una volta effettuato l’addestramento, l’associazione immediata della previsione della concentrazione dell’inquinante fra  $n$  ore a dati in input noti, costituiti dai valori dell’inquinante nelle ore precedenti e dai valori delle altre variabili scelte per descrivere lo ‘stato del sistema’ (variabili meteorologiche, flussi di traffico, ecc.).

La possibile applicazione di uno strumento con simili prestazioni è notevole. Le reti neurali potrebbero essere affiancate alle stesse apparecchiature che misurano in continuo gli inquinanti e le variabili meteorologiche, divenendo un vero e proprio strumento per il controllo della qualità dell’aria in tempo reale o un valido ‘sistema di supporto alle decisioni’. Inoltre, un riaddestramento periodico della rete utilizzando anche i nuovi dati archiviati o, addirittura, una fase di *training* ininterrotto nella quale vengano inserite di ora in ora nei *pattern* di addestramento le nuove informazioni acquisite (‘addestramento dinamico’) permetterebbero alla rete di mantenere la flessibilità necessaria per adeguarsi a situazioni che cambiano nel tempo.