

6. LA PREVISIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA DI MESTRE CON RETI NEURONALI

La base di dati a disposizione, caratterizzata da un'ampia varietà e da una considerevole lunghezza delle serie storiche, è particolarmente adatta ad applicazioni modellistiche di tipo neuronale. Le reti neurali permettono infatti di utilizzare la multidimensionalità dell'informazione (qualità dell'aria, meteorologia, traffico) senza richiedere modelli che interpretino preventivamente le relazioni di causa-effetto tra le variabili. Nella fase di analisi dei risultati, invece, la rete neuronale stessa diventa a posteriori un modello interpretativo dell'importanza che ogni singola variabile assume nella simulazione e quindi, indirettamente, del ruolo che la medesima variabile 'gioca' nella dinamica del sistema.

Lo strumento neuronale permette, inoltre, di adoperare contemporaneamente l'informazione di tipo puntuale registrata nei diversi siti di rilevamento senza dover ricorrere a modelli di interpolazione spaziale (Kriging e simili) che non sempre sono affidabili. In particolare, nel caso dell'inquinamento atmosferico urbano mancano le condizioni di omogeneità necessarie per costruire linee di ugual concentrazione (*isoplete*), stante la frammentarietà dello spazio atmosferico sottostante.

L'applicazione di questo strumento ancora piuttosto sconosciuto dell'intelligenza artificiale vuole essere, infine, anche un'occasione per indagarne e verificarne potenzialità e limiti.

Sulla base di questi presupposti sono stati costruiti modelli neurali¹ per la simulazione dell'andamento dei tre inquinanti per i quali la vigente normativa prevede limiti in termini di concentrazione media oraria: l'ozono, il monossido di carbonio e il biossido d'azoto.

¹ Per la 'costruzione' dei modelli è stato utilizzato il *software* 'Stuttgart Neural Network Simulator' (SNNS) versione 3.3, prodotto dall'Università di Stoccarda e messo a disposizione in Internet. Il programma è stato 'fatto girare' su una macchina RISK.

Oltre alla verifica dell'efficienza delle reti neurali nel riprodurre l'andamento temporale di tali variabili, è indagata la possibilità di costruire un 'dispositivo' che segnali con qualche anticipo eventi acuti di inquinamento.

L'anticipo con cui può essere effettuata una previsione è a due livelli: a breve termine (*nowcasting*) ed a più lungo termine (*forecasting*). Il *nowcasting*, che riguarda anticipi di qualche ora, potrebbe essere applicato all'inquinamento atmosferico di tipo primario per pilotare la segnaletica 'a messaggio variabile' con la quale gestire, ad esempio, il traffico automobilistico in tempo reale. Nel caso di previsioni di superamento dei limiti per l'ozono, invece, poiché non esistono provvedimenti efficaci sul breve periodo e su scala locale (Cattani *et al.*, 1995), l'intervento potrebbe essere mirato ad una tempestiva informazione della popolazione, limitandone così l'esposizione. Il *forecasting*, la cui scala temporale è di qualche giorno (uno o due almeno), potrebbe permettere all'autorità cui spetta tale compito, di intervenire, impartendo le disposizioni previste dalla legge (chiusura del traffico, ecc.), in tempo utile perché non si raggiungano pericolosi livelli di accumulo degli inquinanti.

Le prove condotte con i dati a disposizione hanno fornito ottimi risultati nelle applicazioni di *nowcasting*, mentre dà problemi la previsione a lungo termine dei valori di picco.

Nel seguito saranno descritte i modelli neurali addestrati per il *nowcasting*, le cui prove sono state più numerose e sistematiche ed hanno prodotto risultati di un certo rilievo.

6.1 Modelli per l'ozono

Tra le quattro serie temporali di ozono a disposizione (relative alle quattro stazioni del Comune) si è scelto di addestrare la rete neurale utilizzando quella registrata in Parco Bissuola, dove è collocata l'unica stazione di proprietà del Comune idonea a segnalare gli *stati di attenzione* e *di allarme* in caso di superamento dei limiti di legge ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il *livello di attenzione* e $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per quello *di allarme*).

Poiché per l'ozono gli episodi di alte concentrazioni sono un fenomeno tipicamente estivo, l'addestramento è stato limitato ai mesi più caldi dell'anno '95 (più precisamente l'intervallo temporale selezionato va dal 15 maggio al 15 settembre), evitando così che i valori invernali condizionassero la rete ad una sottostima.

Sono state effettuate diverse prove di addestramento per stabilire quale tipo di architettura neuronale e quali variabili di input potessero fornire risultati migliori. Le prove si sono comunque attenute alla tipologia *feed-forward*, ed anche per la funzione di attivazione ci si è limitati all'utilizzo della sola funzione logistica.

L'architettura che si è dimostrata più efficace ha: (i) un *vettore di input* la cui dimensione dipende dal numero di variabili che si è deciso di considerare per descrivere il sistema, (ii) un unico *layer* di *neuroni nascosti* (in numero inferiore a quelli di *input*); (iii) un solo *neurone* di *output* che rappresenta il valore assunto dall'ozono nell'*i-esimo* istante di tempo.

La rete neuronale è stata dunque addestrata a fornire in uscita la concentrazione attuale dell'ozono ricevendo in ingresso alcuni dati che descrivono lo 'stato del sistema' in istanti precedenti.

Non esistono in letteratura criteri precisi che indichino il numero di unità nascoste o il numero di strati in cui distribuirle e d'altronde la scelta non ha alcun significato fisico connesso al fenomeno che viene simulato (Fabbri e Orsini, 1993). All'aumentare del numero delle connessioni però, la rete, mentre acquista una maggiore capacità di riprodurre il *training set*, perde in flessibilità, cioè diviene sempre meno capace di generalizzare quanto 'imparato' nella fase di addestramento. Per questi motivi il numero dei neuroni nascosti è sempre stato mantenuto inferiore alla dimensione del vettore di input, mentre alcune prove preliminari² hanno orientato all'uso di un unico strato nascosto.

I primi modelli sviluppati riguardano la previsione dell'ozono con passo temporale di un'ora. Tali modelli hanno consentito di confrontare il contenuto informativo delle variabili di volta in volta scelte come input nelle varie prove. In tabella 6.1 è descritta la loro configurazione. La prima colonna indica il 'nome' della rete, la seconda la tipologia (*f* sta per *feed-forward*, i numeri definiscono la quantità di neuroni rispettivamente nello

strato di input, in quello nascosto e in quello di output), la terza colonna dà il numero degli eventi di addestramento (i *pattern*), la quarta elenca le componenti del vettore di input e l'ultima indica l'errore medio tra valori previsti e valori sperimentali.

Tab. 6.1. Reti neurali per la previsione dell'ozono a passo temporale di un'ora.

Rete	Tipo	N°patterns	vettore di input	ME (mg/m^3)
1O ₃ 1	f-10-8-1	2140	NO ₂ -1; NMHC-1; VV-1; T-1; Rad-3; γ -1; O ₃ -4; O ₃ -3; O ₃ -2; O ₃ -1	± 11.1
1O ₃ 2	f-8-6-1	2228	VV-1; T-1; Rad-3; γ -1; O ₃ -4; O ₃ -3; O ₃ -2; O ₃ -1	± 11.7
1O ₃ 3	f-9-6-1	2187	NO ₂ -1; VV-1; T-1; Rad-3; γ -1; O ₃ -4; O ₃ -3; O ₃ -2; O ₃ -1	± 11.8
1O ₃ 4	f-9-6-1	2180	NMHC-1; VV-1; T-1; Rad-3; γ -1; O ₃ -4; O ₃ -3; O ₃ -2; O ₃ -1	± 11.8
1O ₃ 5	f-10-8-1	2140	NO ₂ -1; NMHC-1; VV-1; T-1; Rad-1; γ -1; O ₃ -4; O ₃ -3; O ₃ -2; O ₃ -1	± 10.6

In tutti i vettori di input delle reti neurali di tabella 6.1 sono presenti le concentrazioni di ozono delle quattro ore precedenti (O₃-4; O₃-3; O₃-2; O₃-2; O₃-1). A tale insieme di input, che può essere pensato come un modo per tener conto della 'componente autoregressiva' del fenomeno, vengono di volta in volta affiancate altre variabili.

La rete neuronale che ha fornito risultati più soddisfacenti è quella nel cui vettore di input sono state aggiunte sia le variabili meteorologiche più influenti nella determinazione delle concentrazioni di ozono - la velocità del vento (VV), la temperatura (T), la radiazione solare (Rad) ed il gradiente termico verticale (γ), *cfr.* Cap. V - sia le variabili chimiche coinvolte nel meccanismo dello smog fotochimico - il biossido di azoto (NO₂) e gli idrocarburi non metanici (NMHC), *cfr.* Cap. II - (rete '1O₃1' di tab. 6.1).

Le prove effettuate considerando solo le variabili meteorologiche (rete '1O₃2'), o solo una delle due specie chimiche citate (reti '1O₃3' e '1O₃4') hanno fornito risultati meno soddisfacenti.

Nella rete '1O₃1' la coordinata temporale delle due 'componenti esogene' rappresentate dalla meteorologia e dal chimismo è unica e corrisponde all'ora

² Una di queste prove verrà presentata nel paragrafo relativo ai modelli per il biossido di azoto.

immediatamente precedente a quella dell'output. Fa eccezione la variabile che rappresenta la radiazione solare, fornita in input con tre ore d'anticipo. La scelta si deve ad un ritardo temporale osservato nella correlazione incrociata tra le serie storiche dell'ozono e della radiazione solare. La correttezza della scelta è confermata dai risultati meno soddisfacenti ottenuti addestrando una rete con configurazione del tutto simile a quella individuata come la migliore, ma fornendo in input il valore di radiazione solare dell'ora immediatamente precedente (rete '1O₃5' di tab. 6.1³).

Il modello neuronale della rete '1O₃1' è dunque sintetizzabile nell'espressione:

$$O_3(t+1) = f_{[10,8,1]} \left(O_3(t), O_3(t-1), O_3(t-2), O_3(t-3), NO_2(t), \right. \\ \left. NMHC(t), T(t), VV(t), \mathbf{g}(t), Rad(t-3); \mathbf{W} \right)$$

dove $O_3(t+1)$ è l'output, $f_{[...]}$ è la trasformazione effettuata dalla rete neuronale, i valori in parentesi quadra sono il numero di neuroni per ogni *layer*, \mathbf{W} è l'insieme dei pesi, ed i rimanenti valori sono gli input, inseriti nel modello secondo la coordinata temporale indicata tra parentesi tonda.

I criteri di valutazione dei risultati sono molteplici. Una prima indicazione, fornita anche in *run-time* dallo strumento informatico, è il valore dell'errore quadratico medio (*Mean Square Error, MSE*) dell'insieme dei dati previsti. Poiché ogni variabile presentata nei *pattern*⁴ di addestramento è stata preventivamente normalizzata in modo che il suo *range* di variabilità fosse compreso nell'intervallo 0-1 in cui la rete neuronale opera e fornisce i valori di output, per risalire all'errore medio (*ME*) di previsione bisogna tenere conto del fattore di normalizzazione (f_N) adoperato⁵:

$$ME = f_N \cdot \sqrt{MSE}$$

L'errore medio così calcolato è espresso nell'unità di misura della variabile di output prima della normalizzazione, in questo caso $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si osserva, dunque, che tutte le reti di

³ La rete '1O₃5', pur avendo un errore medio minore, ha dimostrato meno precisione nella segnalazione degli eventi acuti.

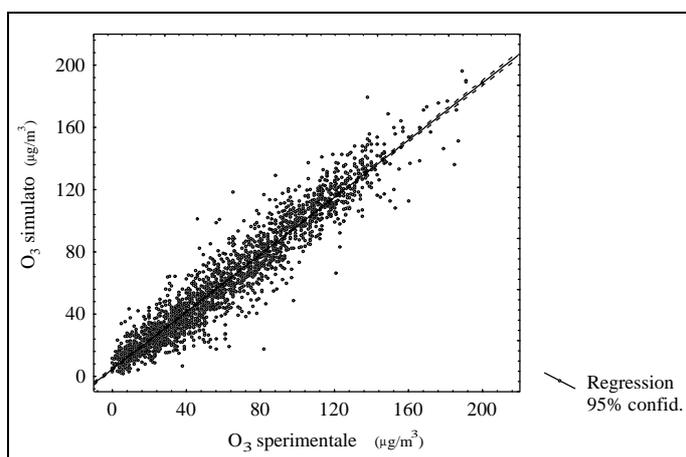
⁴ Come si osserva in tabella 6.1 il numero dei *pattern* varia leggermente per i diversi modelli. Infatti, pur usando lo stesso spezzone temporale della matrice dei dati, il numero effettivo degli *esempi* forniti nel *training set* dipende dal numero di dati mancanti, la cui presenza nel *vettore di addestramento* implica l'eliminazione del *pattern*.

⁵ Il più delle volte la normalizzazione è stata effettuata tra 0 e 0.6 perché per tale intervallo di variabilità si è osservata una maggiore sensibilità della rete nella riproduzione dei picchi.

tabella 6.1 forniscono un errore medio piuttosto basso attorno alla decina di $\mu\text{g}/\text{m}^3$, circa il 6% della concentrazione individuata come *livello di attenzione*.

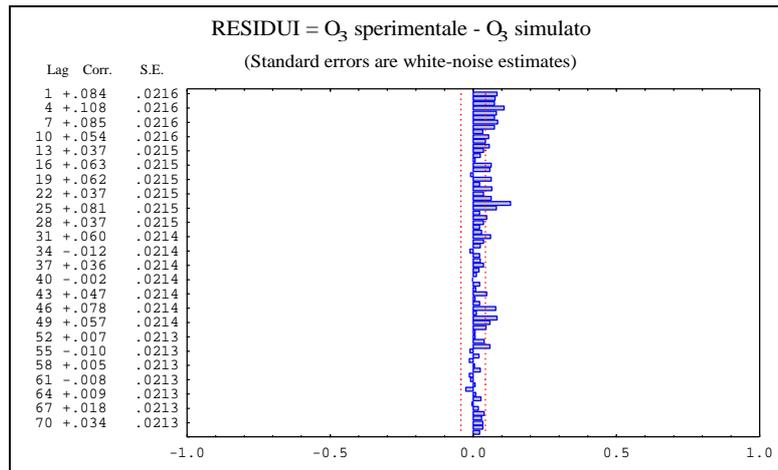
Una seconda indicazione della bontà dei risultati è fornita dal valore del coefficiente di correlazione tra valori sperimentali e valori simulati. In figura 6.1 è possibile osservare la retta di regressione calcolata per la rete '1O₃1': il valore del coefficiente di correlazione molto prossimo all'unità (precisamente 0.96) dimostra l'ottima riproduzione del fenomeno raggiunta dalla rete neuronale. Ad un tale valore di correlazione corrisponde infatti una varianza spiegata molto prossima al 92%. La simulazione effettuata dalla rete neuronale 'perde' perciò solo l'8% della varianza originaria dei dati.

Fig. 6.1. Analisi dei risultati della rete '1O₃1': regressione O₃ sperimentale - O₃ simulato.



Tramite il calcolo della funzione di autocorrelazione sulla serie storica ottenuta dalla differenza tra concentrazione sperimentale e concentrazione simulata viene poi verificato se i residui del modello sono di tipo *white noise*⁶. In figura 6.2 è possibile osservare che i residui della rete '1O₃1' presentano valori di autocorrelazione per la maggior parte dei casi all'interno della banda di confidenza del *rumore bianco*. Anche i valori eccedenti tale banda sono comunque molto bassi.

Fig. 6.2. Funzione di autocorrelazione dei residui del modello della rete '1O₃1'.



Il confronto tra le statistiche descrittive della serie dell'ozono sperimentale e quella dell'ozono simulato dalla rete '1O₃1' conferma il giudizio positivo sulla riproduzione del fenomeno effettuata da questo modello neurale (tab. 6.2).

Tab. 6.2. *Statistiche descrittive per il confronto tra O₃ sperimentale ed O₃ simulato dalla rete '1O₃1'.*

	Media	Int. Confid 95%	Mediana	Min	Max	Dev Std.	Err Std.
O ₃ sperimentale	61.1	59.4 ; 62.8	55.0	0.0	200.0	39.8	.86
O ₃ simulato	60.8	59.2 ; 62.4	53.9	1.6	196.1	38.3	.83
RESIDUI	.28	-.20 ; .77	-.11	-55.2	64.7	11.37	.25

Un'analisi particolarmente attenta è stata riservata al comportamento dei vari modelli neurali nella previsione dei picchi di concentrazione. Sono stati individuati, uno ad uno, gli eventi acuti presenti nell'output dei *pattern* di addestramento, e si è studiata la risposta fornita dalla rete.

Gli episodi eccedenti i *limiti di attenzione* e *di allarme* sono in effetti presenti nel *training set* in numero molto limitato e questo senz'altro influisce negativamente sulla possibilità della rete neurale di sviluppare un'adeguata capacità di prevedere tali

⁶ Un correlogramma pressoché piatto o con piccole oscillazioni all'interno della banda di confidenza indica che il processo generatore della serie è di tipo *white noise*, le cui determinazioni sono cioè di tipo puramente casuale, identicamente distribuite ed tra loro scorrelate.

eventi⁷.

Il neurone di output della rete non viene cioè sufficientemente addestrato a raggiungere valori prossimi al proprio limite superiore di eccitazione.

Nel *training set* presentato alla rete '1O₃1' gli eventi con concentrazione superiore a 180 µg/m³ sono solo 8. Di questi la rete riesce a riprodurne 4, cioè in 4 casi su 8 lo stato di attivazione del neurone di output riesce a superare il valore corrispondente a tale concentrazione. Nei rimanenti 4 viene comunque superato il livello di 120 µg/m³. Estendendo questo tipo di analisi a tutti gli eventi al di sopra di 120 µg/m³, in modo tale da poter lavorare su di un numero di dati meno esiguo⁸, si osserva che gli eventi acuti 'persi', cioè non trovati nell'output della simulazione neuronale, corrispondono al 29% di quelli sperimentali.

Anche un modello con caratteristiche ottime quali quelle presentate dalla rete '1O₃1' ha dunque alcune difficoltà nella previsione di eventi al di fuori della norma. Si tratta comunque di una sfida ben nota a chi si occupa di previsioni in campo ambientale. Le medesime ragioni che rendono importante questo tipo di indagine, ovvero l'eccezionalità e la gravità dell'evento che si vuole prevedere, rendono difficoltosa la sua attuazione.

In figura 6.3 è presentato l'insieme degli output forniti dalla rete '1O₃1' sovrapposto ai corrispondenti dati sperimentali. Il diagramma, oltre a permettere un confronto⁹ complessivo sulla 'riproduzione' del fenomeno, dà un'idea della tipologia dei dati con cui si sta lavorando. Uno *zoom* su di uno spezzone particolarmente interessante perché relativo ad eventi di alte concentrazioni è proposto in figura 6.4.

⁷ Fabbri ed Orsini argomentano che la frequenza con cui vengono presentati in addestramento diversi tipi di *pattern* possa condizionare la rete a preferire un tipo di output piuttosto che un altro.

⁸ Sono 194 i valori orari del *training set* superiori a 120 µg/m³.

⁹ Le coppie di dati O₃ simulato - O₃ sperimentale vanno comunque valutate singolarmente poiché si tratta di una previsione del fenomeno punto per punto.

Fig. 6.3. Analisi dei risultati della rete 'IO₃I': confronto dati sperimentali-simulati.

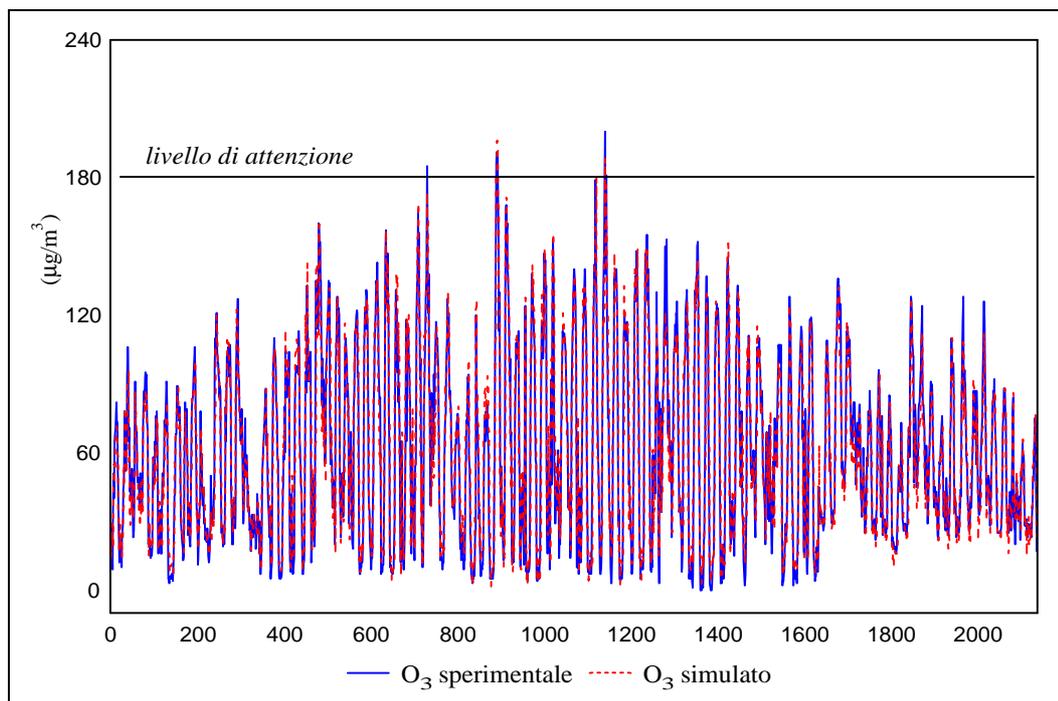
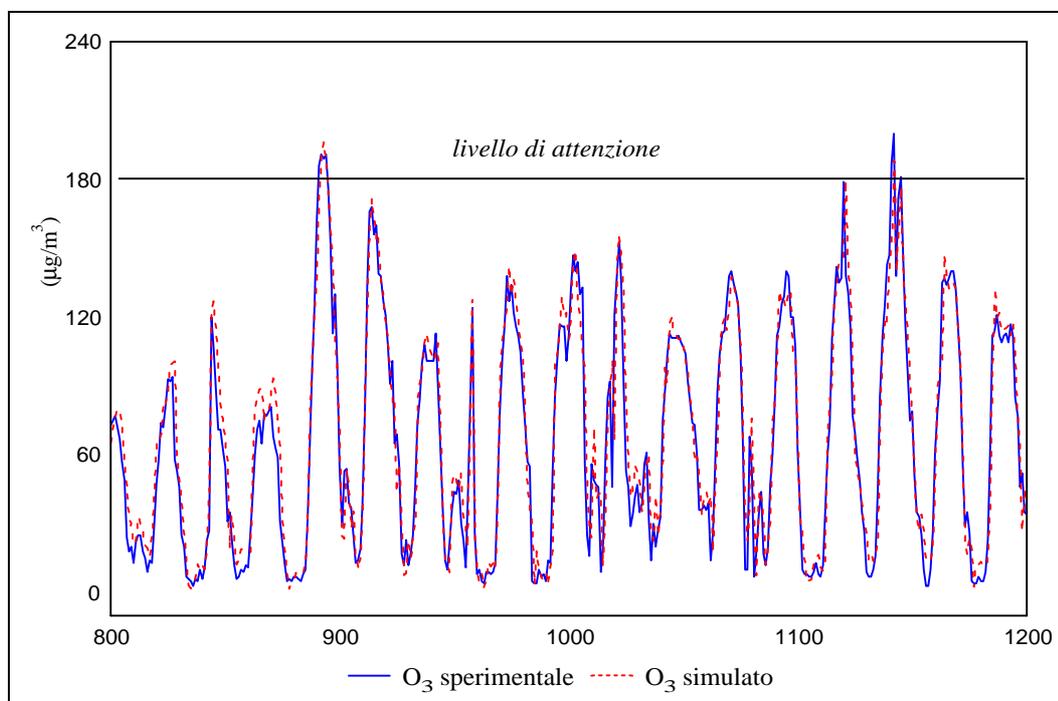


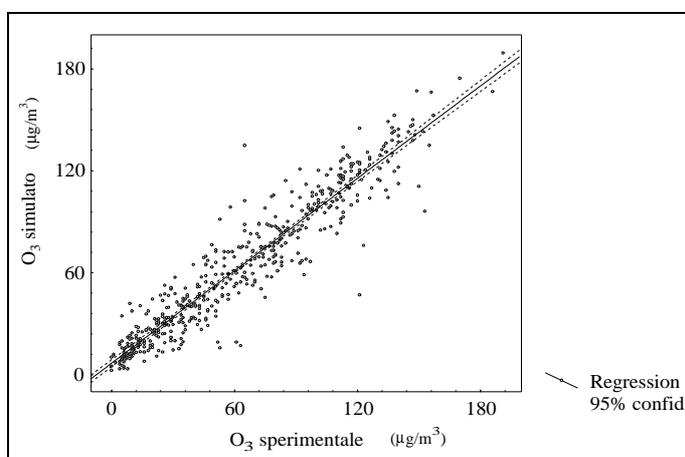
Fig. 6.4. Analisi dei risultati della rete 'IO₃I': confronto dati sperimentali-simulati.



Per verificare la capacità di generalizzazione del modello neuronale è stato eseguito un test su di un piccolo insieme di dati (in tutto 500 *pattern*) non utilizzato durante l'addestramento.

L'errore medio di previsione del *validation set* si è rivelato addirittura inferiore a quello raggiunto al termine dell'addestramento ($\pm 7.5 \text{ mg/m}^3$) ed è molto soddisfacente anche la correlazione tra concentrazione sperimentale e concentrazione simulata (pari a 0.95), sebbene lievemente inferiore a quella del *training set* (fig. 6.5).

Fig. 6.5. Test della rete '1O₃1': regressione dati sperimentali-previsti.



Anche la previsione degli eventi acuti si è dimostrata eccellente: dei 59 episodi al di sopra dei 120 µg/m^3 presenti nel *validation set* la rete non è riuscita a prevedere valori maggiori di tale soglia solo in due casi, mentre la risposta neuronale è stata scorretta per una delle due sole concentrazioni eccedenti i 180 µg/m^3 .

Il test, quindi, conferma che il modello neuronale '1O₃1' è in grado di fornire risposte sostanzialmente corrette anche ad input non incontrati nella fase di addestramento.

I successivi tentativi sono stati volti ad aumentare il passo della previsione, portandola da 1 a 3 ore.

In input sono state perciò fornite le variabili esogene corrispondenti a tre ore prima dell'output e la componente autoregressiva è stata trasformata nel vettore (O_3 -12, O_3 -9, O_3 -6, O_3 -3)¹⁰.

Non avendo ottenuto risultati molto soddisfacenti da questo modello (rete '3O₃' di tab. 6.3) si è pensato di arricchire il vettore di input con altre informazioni.

Tab. 6.3. Reti neurali per la previsione dell'ozono a passo temporale di tre ore.

Rete	Tipo	N°patterns	vettore di input	ME (mg/m ³)
3O ₃	f-10-8-1	2083	NO ₂ -3; NMHC-3; VV-3; T-3; Rad-3; γ-3; O ₃ -12; O ₃ -9; O ₃ -6; O ₃ -3	± 16.4
3O _{3s}	f-13-8-1	1849	NO _{PI} -3; O _{3PI} -3; O _{3MA} -3; NO ₂ -3; NMHC-3; VV-3; T-3; Rad-3; γ-3; O ₃ -12; O ₃ -9; O ₃ -6 O ₃ -3	± 16.1

La rete '3O_{3s}' (tab. 6.3) affianca alla meteorologia e al chimismo (NO₂ e NMHC), monitorato nella stazione di Parco Bissuola, altre variabili di qualità dell'aria registrate in siti diversi: ozono e monossido di azoto in via Piave (O_{3PI} e NO_{PI}), e ancora ozono in Piazzetta Matter (O_{3MA}). Le variabili aggiunte sono state scelte in base al valore del coefficiente di correlazione tra i più elevati che lega queste variabili all'ozono che si vuole prevedere¹¹. L'espressione di tale modello è dunque la seguente:

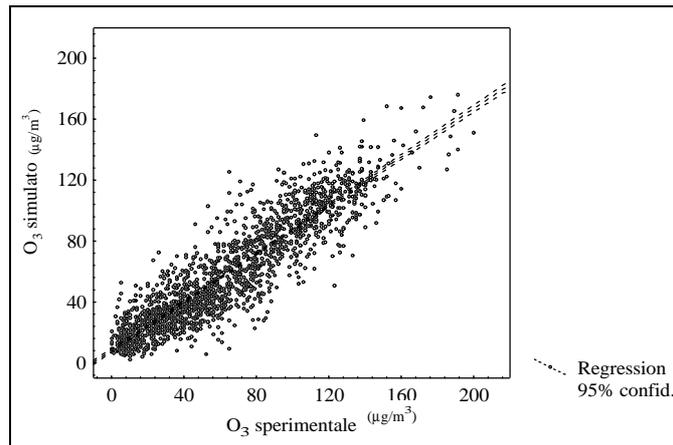
$$O_3(t+3) = f_{[13,8,1]} \left(\begin{array}{l} O_3(t), O_3(t-3), O_3(t-6), O_3(t-9), NO_2(t), NMHC(t), \\ NO_{PI}(t), O_{3PI}(t), O_{3MA}(t), T(t), VV(t), \mathbf{g}(t), Rad(t); \mathbf{W} \end{array} \right)$$

I risultati conseguiti per la previsione a tre ore sono, come immaginabile, inferiori a quelli raggiunti per la previsione dell'ora successiva. L'errore medio (ME di tab. 6.3) si assesta a ±16.1 µg/m³, l'8.9% del *livello di attenzione*; il coefficiente di correlazione O₃ sperimentale - O₃ simulato raggiunge il valore di 0.91 (fig. 6.6). La varianza spiegata dal modello neuronale corrisponde perciò all'83%, un valore comunque piuttosto buono.

Fig. 6.6. Analisi dei risultati della rete '3O_{3s}': correlazione O₃ sperimentale - O₃ simulato.

¹⁰ Altre configurazioni per la componente autoregressiva hanno fornito risultati meno soddisfacenti.

¹¹ Non è stato introdotto come input l'O₃ di Via Da Verrazzano, che pur presenta un coefficiente di correlazione maggiore di quello dell'NO di via Piave (0.40), per la perplessità evidenziatasi nel corso dell'analisi statistica su questo parametro. Difatti il suo coefficiente di correlazione con l'O₃ di P. Bissuola, pari a 0.58, è significativamente diverso dai valori 0.81 e 0.90 rispettivamente calcolati per l'O₃ di via Piave e di Piazzetta Matter.



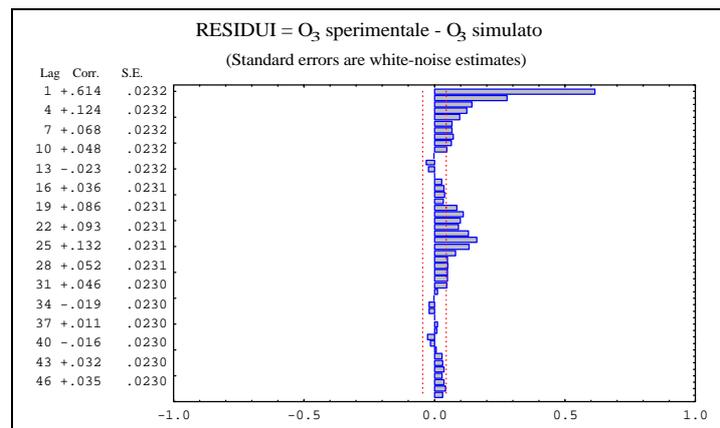
L'analisi delle statistiche descrittive, presentate in tabella 6.4, evidenzia parametri ancora piuttosto simili tra l'ozono simulato e quello sperimentale ma i residui ottenuti cominciano ad essere di una certa entità.

Tab. 6.4. *Statistiche descrittive: confronto O₃ sperimentale - O₃ simulato dalla rete '3O₃'.*

	Media	Int. Confid. 95%	Mediana	Min	Max	Dev. Std.	Std. Err.
O ₃ sperimentale	61.3	59.4 ; 63.1	55.0	0.0	200.0	40.4	.94
O ₃ simulato	56.8	55.2 ; 58.5	48.1	2.1	176.0	35.2	.82
RESIDUI	4.4	3.6 ; 5.2	3.1	-60.7	71.9	16.7	.39

La presenza di residui non molto soddisfacenti è confermata dal diagramma che ne ritrae l'autocorrelazione (fig. 6.7). In corrispondenza del lag temporale di un'ora si osserva infatti un valore molto al di fuori della banda di confidenza del rumore bianco.

Fig. 6.7. *Funzione di autocorrelazione dei residui del modello della rete '3O₃'.*



Ma è proprio nella previsione dei picchi di concentrazione che diventano evidenti i maggiori scostamenti tra la serie dell'ozono sperimentale e quella dell'ozono previsto, come si osserva in fig. 6.8 e più in dettaglio in figura 6.9.

Fig. 6.8. Confronto dati sperimentali-simulati dalla rete '3O₃s'.

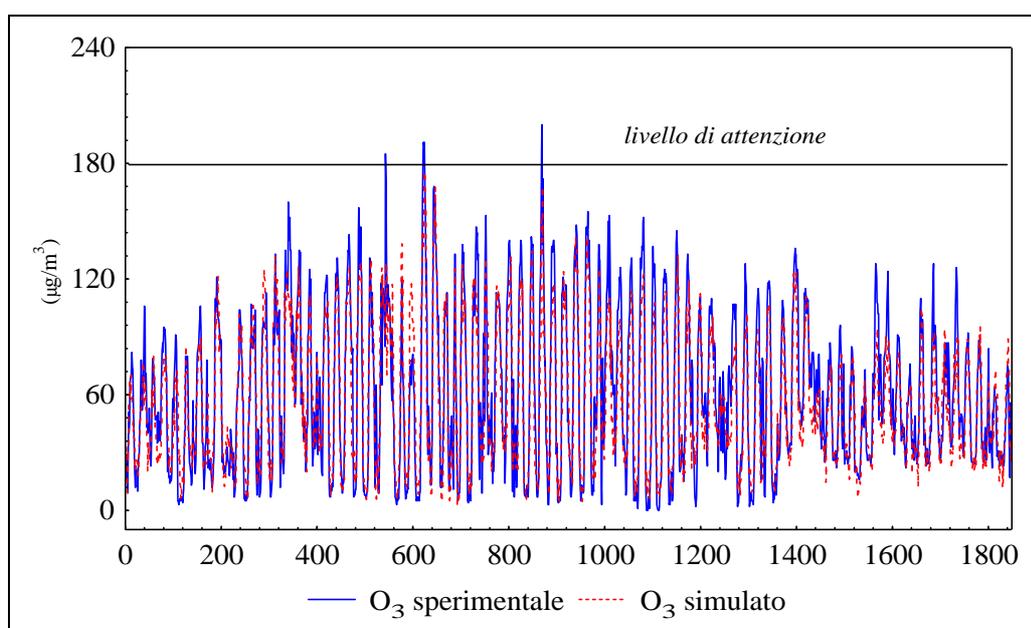
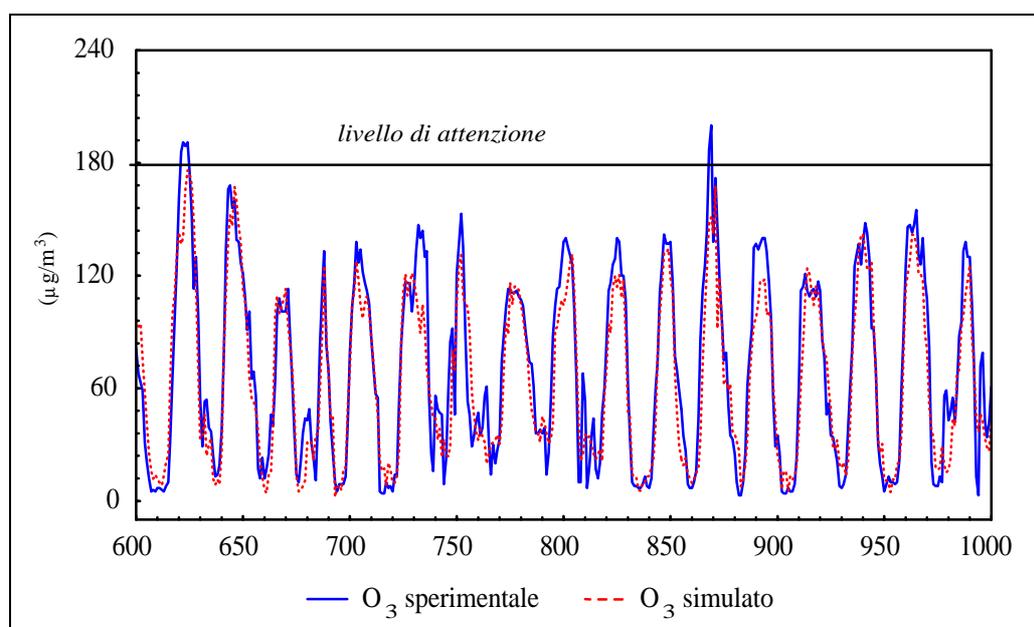


Fig. 6.9. Confronto dati sperimentali-simulati dalla rete '3O₃s': dettaglio.

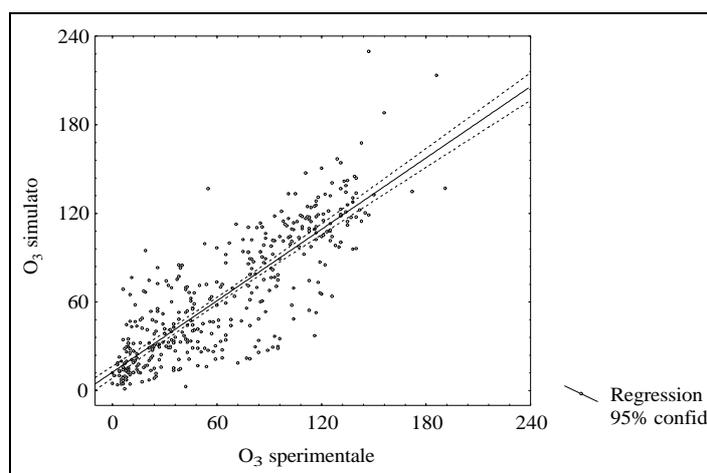


L'analisi in dettaglio sulla previsione dei picchi di concentrazione rivela che dei 7 casi al di sopra del *limite di attenzione* il modello neuronale non riesce a riprodurlo alcuno, ovvero il valore previsto dalla rete neuronale non oltrepassa mai il valore soglia di $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, giungendo però in tutti questi a superare i $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estendendo l'analisi a tutti i valori di concentrazione che nel *training set* superano questo secondo limite (177 in tutto), la rete neuronale ne prevede correttamente il 45%.

All'aumentare del passo di previsione si è dunque accentuata la difficoltà dello strumento neuronale nel segnalare gli eventi acuti, il cui numero comunque è esiguo rispetto alle dimensioni del *training set* (solo 177 casi su 1849).

Nel *validation set* (costituito da 400 *pattern*) la correlazione tra concentrazione sperimentale e concentrazione prevista dal modello è risultata pari a 0.84 (fig. 6.10). La varianza spiegata è perciò del 71%.

Fig. 6.10. Test della rete '3O₃s': regressione dati sperimentali-previsti.

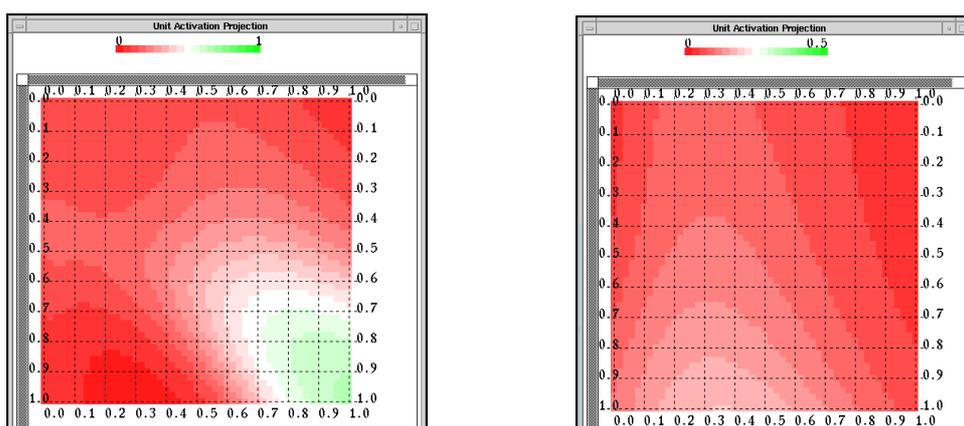


Nella previsione degli eventi acuti del *validation set* (in tutto 55) la rete neuronale fornisce una risposta corretta nel 53% dei casi con concentrazioni eccedenti i $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ed in uno dei due casi al di sopra dei $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il modello dimostra, quindi, in fase di test, una capacità di segnalare gli eventi acuti addirittura migliore di quella ottenuta al termine dell'addestramento. Il numero degli eventi acuti, però, è troppo esiguo sia nel *training set* che nel *validation set* per rendere significative queste differenze di prestazione.

Al di là delle valutazioni in merito alle capacità di previsione, lo studio dei diversi modelli neurali ha consentito di fare alcune considerazioni sul fenomeno ‘ozono’.

È stato innanzitutto confermato il ruolo della meteorologia nella dinamica di tale inquinante. In particolare, l’analisi della proiezione dei pesi dei neuroni di input su quello di output (fig. 6.11) ha confermato l’importanza della radiazione solare, verso la quale l’ozono dimostra massima sensibilità. Sensibilità leggermente ridotta è stata registrata nei confronti della velocità del vento ed ancora più debole rispetto a temperatura e gradiente termico. Per quanto riguarda le variabili chimiche, NO_2 e NMHC mostrano un peso simile sull’output.

Fig. 6.11. Un esempio della proiezione del peso di 2 neuroni di input sull’output della rete ‘ $1O_31$ ’ e della ‘ $1O_35$ ’.



I due grafici ritraggono, rispettivamente per la rete ‘ $1O_31$ ’ e ‘ $1O_35$ ’, lo stato di attivazione del neurone di output (definito dal colore, secondo la scala indicata), in funzione dello stato di attivazione di una coppia di neuroni di input (valori dell’ascissa e dell’ordinata). L’output della rete ‘ $1O_31$ ’ è più sensibile ai due input (per entrambi i grafici l’ascissa è la radiazione solare e l’ordinata l’ NO_2), essendo maggiore la scala di variabilità del proprio stato di attivazione.

Infine, il miglioramento della previsione ottenuto considerando in input variabili misurate in stazioni diverse testimonia la scala spaziale piuttosto ampia che interessa la dinamica di sviluppo di questo inquinante.