

temperatura e dall'umidità relativa, mettono in rilievo l'importanza del ruolo assunto dalla componente regressa di O_3 nel migliorare l'efficienza previsionale delle reti "Bg-Net2" e "Bg-Net3" rispetto la rete "Bg-Net1" ed infine ci dicono quali tra tutti i siti di monitoraggio del territorio provinciale di Vicenza utilizzati nel presente lavoro, contribuiscono al meglio nel determinare le concentrazioni di O_3 a Bassano del Grappa: Schio e Montecchio Maggiore. Quest'ultimo risultato conferma il coinvolgimento del fenomeno dello smog fotochimico in una scala aerologica che va oltre l'ambiente urbano.

5.2. Modelli per l'ozono a Montecchio Maggiore

Per Montecchio Maggiore sono stati sviluppati gli stessi tre modelli illustrati per Bassano del Grappa, con la differenza che ora le variabili di origine puntuale si riferiscono a Montecchio Maggiore e quelle distribuite nel territorio della provincia di Vicenza includono Bassano del Grappa al posto di Montecchio Maggiore (v. tab. 5.1).

Il numero dei *patterns* disponibili per l'addestramento e la validazione dei modelli di ozono per Montecchio Maggiore è inferiore a quello dei *patterns* disponibili a Bassano del Grappa. In particolare, Bassano del Grappa dispone di 873 esempi di addestramento e di 500 esempi per la validazione del modello, mentre Montecchio Maggiore dispone di 600 esempi per l'addestramento e 373 per la validazione. Tale mancanza a Montecchio Maggiore è dovuta al fatto che, pur usando lo stesso spezzone temporale della matrice dei dati, il numero effettivo degli esempi forniti nel *training* e nel *testing* set dipende dal numero dei dati mancanti, la cui presenza nel vettore di addestramento implica l'eliminazione dello stesso. Il ridotto numero dei *patterns* ha ridotto la possibilità di raggiungere una configurazione dei pesi delle connessioni sufficiente per una buona prestazione di ciascun modello.

Le figure 5.10÷5.12 mostrano la regressione lineare tra i valori sperimentali di O_3 e quelli simulati rispettivamente dalle reti "Mm-Net1", "Mm-Net2" e "Mm-Net3" per il set di *testing*. È stato scelto il *Testing set* per mostrare la capacità di generalizzazione dei modelli elaborati.

Fig. 5.10. “Mm-Net1”: regressione tra i valori sperimentali di O_3 a Montecchio M. ed i valori simulati.

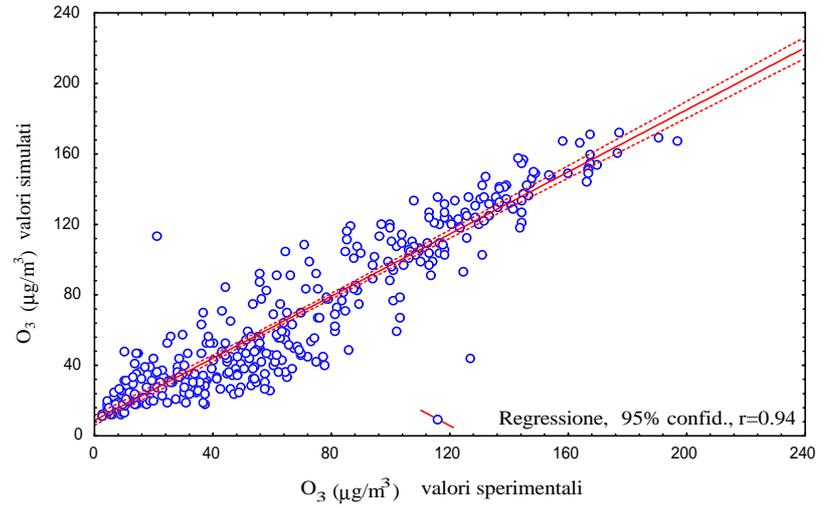


Fig. 5.11. “Mm-Net2”: regressione lineare tra O_3 sperimentale ed O_3 simulato di Montecchio M.

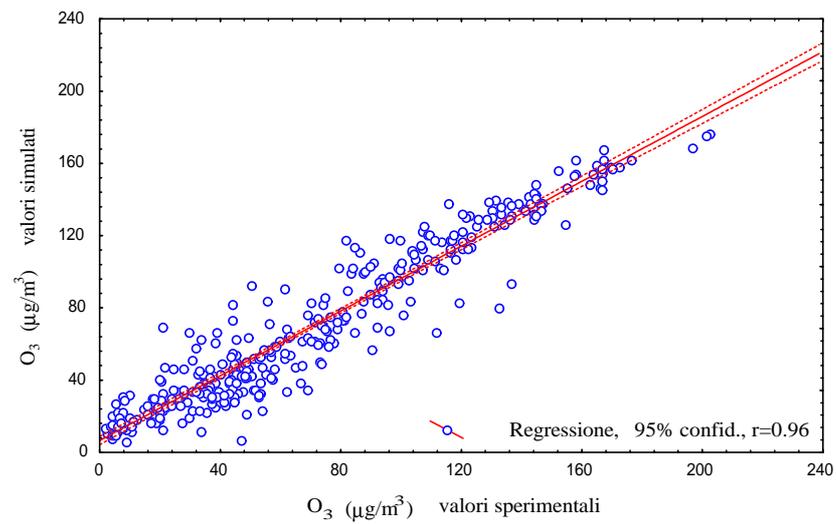
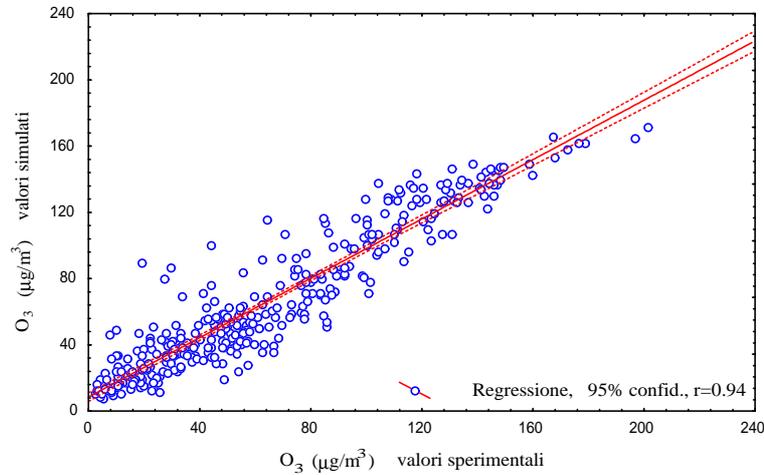


Fig. 5.12. “Mm-Net3”: regressione lineare tra i valori sperimentali di Montecchio M. e quelli simulati.



Confrontando i diagrammi 5.10÷5.12 con i diagrammi 5.1÷5.3, si osserva che la rete “Mm-Net1” realizza una previsione maggiormente correlata con i rispettivi dati sperimentali, rispetto a quella effettuata dalla rete “Bg-Net1”, mentre i risultati della rete “Mm-Net3” sono meno correlati ai propri dati sperimentali, rispetto ai valori forniti dalla rete “Bg-Net3”. Il coefficiente di correlazione tra dati sperimentali e simulati (r) della rete “Mm-Net2” è uguale a quello della rete “Bg-Net2”.

Le figure 5.13÷5.15 ritraggono i correlogrammi dei residui tra valori previsti e le corrispondenti osservazioni sperimentali: tutte e tre le reti effettuano delle previsioni abbastanza soddisfacenti, con valori di autocorrelazione, nella maggior parte dei casi, compresi nella banda del *rumore bianco* e privi di marcate periodicità nella distribuzione.

Fig. 5.13. Autocorrelazione dei residui della rete “Mm-Net1”

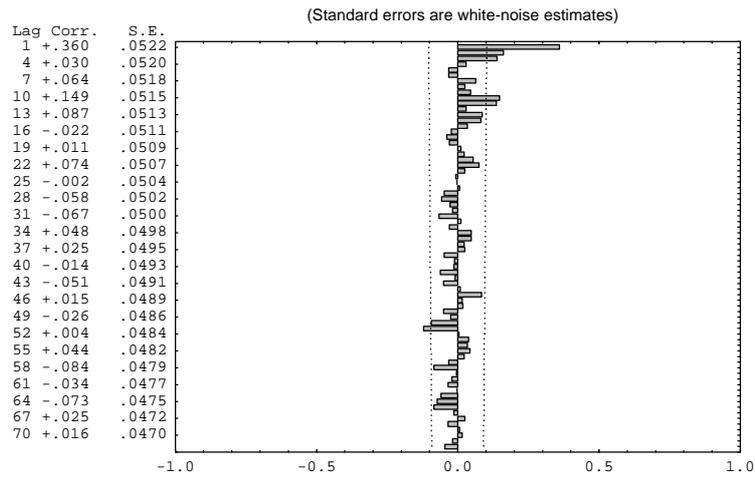


Fig. 5.14. Autocorrelazione dei residui della rete “Mm-Net2”.

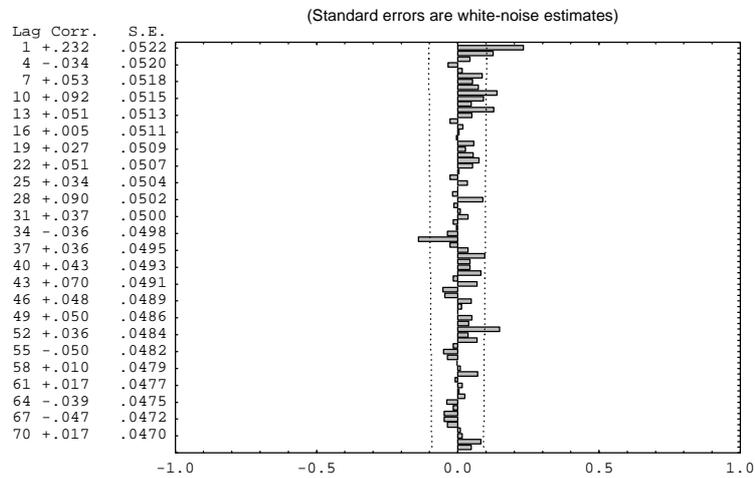
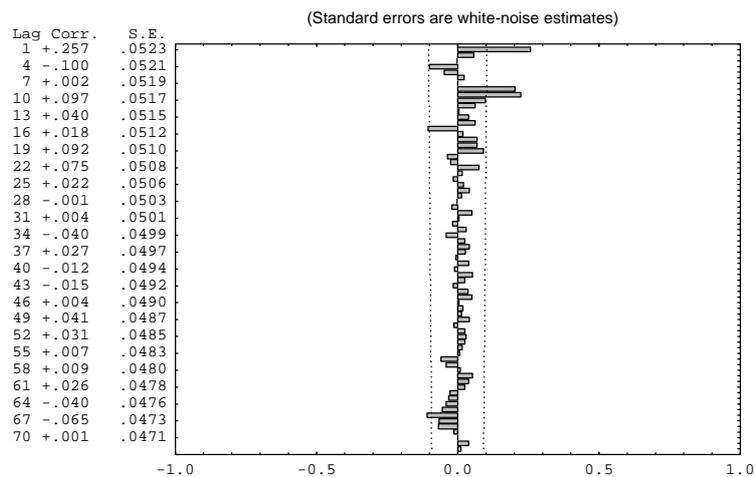


Fig. 5 15. Autocorrelazione dei residui della rete “Mm-Net3”.



Le tabelle 5.11÷5.13 riportano gli indici statistici utili per valutare l’accuratezza e la precisione dei calcoli realizzati dalle reti “Mm-Net1”, “Mm-Net2” e “Mm-Net3”.

Tabella 5.11. *Analisi dell'accuratezza e della precisione dei risultati della rete "Mm-Net1".*

| Modello "Mm-Net 1" | | | | |
|---|---------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| | <i>Training set</i> | | <i>testing set</i> | |
| numero di esempi, N | 600 | | 364 | |
| media dei valori osservati, \bar{O} | 63.80 | | 68.56 | |
| media dei valori previsti, \bar{P} | 63.48 | | 69.21 | |
| deviazione standard dei valori osservati, s_o | 45.45 | | 47.48 | |
| deviazione standard dei valori previsti, s_p | 42.00 | | 44.69 | |
| coefficiente di correlazione | 0.94 | | 0.94 | |
| varianza spiegata | 0.88 | | 0.88 | |
| regressione lineare | a = 8.23 | b = 0.87 | a = 8.78 | b = 0.88 |
| errore medio assoluto, MAE | 12.35 | | 12.65 | |
| radice dell'errore quadratico medio, RMSE | 15.88 | | 16.62 | |
| errore quadratico medio sistematico, $RMSE_s$ | 6.09 | | 5.66 | |
| errore quadratico medio casuale, $RMSE_u$ | 14.66 | | 15.63 | |
| indici di Willmott, d_1 e d_2 | $d_1 =$ 0.83 | $d_2 =$ 0.97 | $d_1 = 0.84$ | $d_2 = 0.97$ |

Tabella 5.12. *Analisi dell'accuratezza e della precisione delle previsioni realizzate dalla rete "Mm-Net2".*

| Modello "Mm-Net 2" | | | | |
|---|---------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| | <i>Training set</i> | | <i>testing set</i> | |
| numero di esempi, N | 600 | | 364 | |
| media dei valori osservati, \bar{O} | 63.86 | | 68.70 | |
| media dei valori previsti, \bar{P} | 63.76 | | 68.19 | |
| deviazione standard dei valori osservati, s_o | 45.45 | | 47.53 | |
| deviazione standard dei valori previsti, s_p | 43.29 | | 44.51 | |
| coefficiente di correlazione | 0.96 | | 0.96 | |
| varianza spiegata | 0.92 | | 0.92 | |
| regressione lineare | a = 5.25 | b = 0.92 | a = 6.55 | b = 0.90 |
| errore medio assoluto, MAE | 9.44 | | 10.17 | |
| radice dell'errore quadratico medio, RMSE | 12.42 | | 13.65 | |
| errore quadratico medio sistematico, $RMSE_s$ | 3.81 | | 4.04 | |
| errore quadratico medio casuale, $RMSE_u$ | 11.82 | | 12.73 | |
| indici di Willmott, d_1 e d_2 | $d_1 = 0.87$ | $d_2 =$ 0.98 | $d_1 = 0.87$ | $d_2 = 0.98$ |

Tabella 5.13. *Analisi dell'accuratezza e della precisione dei risultati della rete "Mm-Net3".*

| Modello "Mm-Net 3" | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Training set | | testing set | |
| numero di esempi, N | 600 | | 362 | |
| media dei valori osservati, \bar{O} | 67.20 | | 63.05 | |
| media dei valori previsti, \bar{P} | 67.05 | | 64.93 | |
| deviazione standard dei valori osservati, s_o | 47.33 | | 44.11 | |
| deviazione standard dei valori previsti, s_p | 44.54 | | 42.01 | |
| coefficiente di correlazione | 0.96 | | 0.94 | |
| varianza spiegata | 0.91 | | 0.88 | |
| regressione lineare | a = 6.56 | b = 0.90 | a = 8.42 | b = 0.90 |
| errore medio assoluto, MAE | 10.63 | | 11.27 | |
| radice dell'errore quadratico medio, RMSE | 13.83 | | 15.04 | |
| errore quadratico medio sistematico, RMSE _s | 4.72 | | 4.94 | |
| errore quadratico medio casuale, RMSE _u | 13.00 | | 14.21 | |
| indici di Willmott, d_1 e d_2 | $d_1 = 0.86$ | $d_2 = 0.98$ | $d_1 = 0.84$ | $d_2 = 0.97$ |

Per quanto riguarda la previsione dei picchi di concentrazione, le tabelle 5.14÷5.19 ne forniscono una valutazione, mediante indici statistici su tabelle di contingenza per l'evento di superamento di una soglia inferiore a quella cui si fa riferimento per il *livello d'attenzione* ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pari a $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tale scelta è motivata dal fatto che i valori sperimentali del *training set* delle reti "Mm-Net1", "Mm-Net2" e "Mm-Net3" presentano pochissimi eventi eccedenti la soglia d'attenzione per l'O₃ (2 le prime due reti e 3 la terza), rendendo non significativa una valutazione statistica sulla capacità dei modelli di prevedere eventi eccezionali. È stata scelta la soglia di $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ perché la più vicina a quella di riferimento per il livello d'attenzione dell'O₃⁵ che potesse fornire un numero di eventi di superamento sufficienti per tutte e tre le reti. Una soglia inferiore, che avesse qualche riferimento legislativo, come il *livello per la protezione della salute umana* (D.M. 16/05/96) e corrispondente a $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sarebbe stata troppo bassa per poter analizzare le capacità delle reti di prevedere concentrazioni di picco⁶.

⁵ $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corrispondono all'88% della concentrazione stabilita in qualità di soglia per il *livello d'attenzione*.

⁶ $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corrispondono a circa il 60% della concentrazione di riferimento per il *livello d'attenzione* dell'O₃.

Tabella 5.14. *Tabella di contingenza per il superamento della concentrazione di 160 mg/m^3 nei valori sperimentali ed in quelli previsti dalla rete “Mm-Net1”.*

| Tabella di contingenza per $\text{O}_3 > 160 \text{ mg}/\text{m}^3$, “Mm-Net1” | | |
|---|--|---|
| | Eventi favorevoli per i valori previsti | Eventi sfavorevoli per i valori previsti |
| Eventi favorevoli per i valori osservati | 6 (A) | 8 (B) |
| Eventi sfavorevoli per i valori osservati | 1 (C) | 349 (D) |

Tabella 5.15. *Coefficienti per la valutazione della bontà della previsione di eventi acuti effettuata dalla rete “Mm-Net1”.*

| | |
|--------------------------------------|------|
| <i>Probability of detection, POD</i> | 0.43 |
| <i>Miss Rate, MISS</i> | 0.57 |
| <i>False Alarm Rate, FAR</i> | 0.14 |
| <i>Correct Null Forecast, CNULL</i> | 1.00 |
| <i>Critical Success Index, CSI</i> | 0.40 |
| <i>True Skill Scores, TSS</i> | 0.43 |
| <i>Heidke Skill Score, S</i> | 0.41 |

Tabella 5.16. *Tabella di contingenza per i valori eccedenti 160 mg/m^3 nei valori sperimentali ed in quelli previsti dalla rete “Mm-Net2”.*

| Tabella di contingenza per $\text{O}_3 > 160 \text{ mg}/\text{m}^3$, “Mm-Net2” | | |
|---|--|---|
| | Eventi favorevoli per i valori previsti | Eventi sfavorevoli per i valori previsti |
| Eventi favorevoli per i valori osservati | 6 (A) | 12 (B) |
| Eventi sfavorevoli per i valori osservati | 1 (C) | 345 (D) |

Tabella 5.17. *Parametri relativi alla tabella di contingenza 5.16 per la rete “Mm-Net2”.*

| | |
|--------------------------------------|------|
| <i>Probability of detection, POD</i> | 0.33 |
| <i>Miss Rate, MISS</i> | 0.67 |
| <i>False Alarm Rate, FAR</i> | 0.14 |
| <i>Correct Null Forecast, CNULL</i> | 1.00 |
| <i>Critical Success Index, CSI</i> | 0.32 |
| <i>True Skill Scores, TSS</i> | 0.33 |
| <i>Heidke Skill Score, S</i> | 0.46 |

Tabella 5.18. Tabella di contingenza per gli eventi eccedenti la soglia di 160 mg/m^3 nelle misure sperimentali e nelle corrispondenti previsioni effettuate dalla rete “Mm-Net3”.

| Tabella di contingenza per $\text{O}_3 > 160 \text{ mg/m}^3$, “Mm-Net3” | | |
|--|--|---|
| | Eventi favorevoli per i valori previsti | Eventi sfavorevoli per i valori previsti |
| Eventi favorevoli per i valori osservati | 5 (A) | 2 (B) |
| Eventi sfavorevoli per i valori osservati | 0 (C) | 355 (D) |

Tabella 5.19. Parametri statistici riferiti ai valori della tabella 5.19.

| | |
|--------------------------------------|------|
| <i>Probability of detection, POD</i> | 0.71 |
| <i>Miss Rate, MISS</i> | 0.29 |
| <i>False Alarm Rate, FAR</i> | 0.00 |
| <i>Correct Null Forecast, CNULL</i> | 1.00 |
| <i>Critical Success Index, CSI</i> | 0.71 |
| <i>True Skill Scores, TSS</i> | 0.71 |
| <i>Heidke Skill Score, S</i> | 0.83 |

I valori riportati nelle tabelle 5.11÷5.13 ci conducono alle seguenti considerazioni:

- la rete “Mm-Net1” riproduce il fenomeno con uno scarto tra il valore medio delle osservazioni ed il valore medio delle previsioni di $0.3 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, per il *training set*, e di $0.6 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, per il *testing set*, con un coefficiente di correlazione (r) pari a 0.94 sia per il *training set* che per il *testing set* ed un errore medio (RMSE) di $15.9 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ per il *training set* e $16.6 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ per il *testing set*. I due errori medi sono corrispondenti a circa il 9% della concentrazione di riferimento per il *livello d’attenzione* dell’ O_3 ;
- la rete “Mm-Net2” è caratterizzata da uno scarto tra i valori medi delle osservazioni e delle previsioni di $0.1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, per il *training set*, e di $0.5 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, per il *testing set*; ha un coefficiente di correlazione di 0.96 per entrambi i set di dati e presenta un errore medio (RMSE) di $12.4 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ nel *training set* e di $13.6 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ nel *testing set*, corrispondenti a circa il 7% della concentrazione di riferimento per il *livello d’attenzione* dell’ O_3 ;
- la rete “Mm-Net3” produce delle simulazioni dotate delle seguenti caratteristiche: uno scarto tra la media dei valori sperimentali e la media dei corrispondenti previsti di $0.1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, nel *training set*, e di $1.9 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, nel *testing set*; una correlazione tra valori

sperimentali e valori simulati di 0.96 nel *training set* e di 0.94 nel *testing set*; un errore medio (RMSE) di $13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nel *training set* e di 15.0 nel *testing set*: corrispondenti a circa l'8% del *livello d'attenzione*.

La rete "Mm-Net2" sembra riprodurre il fenomeno in maniera più accurata rispetto alle altre, ma, se si osservano i valori riportati dalle tabelle 5.14÷5.19, è quella più imprecisa nella determinazione degli eventi acuti, con il 33% di eventi acuti previsti sui totali osservati (POD) ed appena il 33% di previsioni "di soglia" corrette.

La rete "Mm-Net3" fornisce la prestazione migliore dal punto di vista delle previsioni di eventi acuti: riesce a segnalare il 71% delle concentrazioni al di sopra della soglia prefissata ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con una percentuale di falso allarme nulla. In fase di addestramento, inoltre, riproduce abbastanza fedelmente la serie storica delle concentrazioni d'ozono sperimentali, ma non altrettanto riesce a fare nella fase di testing, perdendo, seppure lievemente, in capacità di generalizzazione.

Un ultimo indizio sulla qualità dei dati viene fornito dai diagrammi 5.16÷5.18, i quali riportano uno spaccato dell'andamento delle uscite fornite da ciascuna rete sovrapposte ai corrispondenti valori sperimentali.

Fig. 5.16. Rete "Mm-Net1": confronto tra O_3 sperimentale ed O_3 simulato.

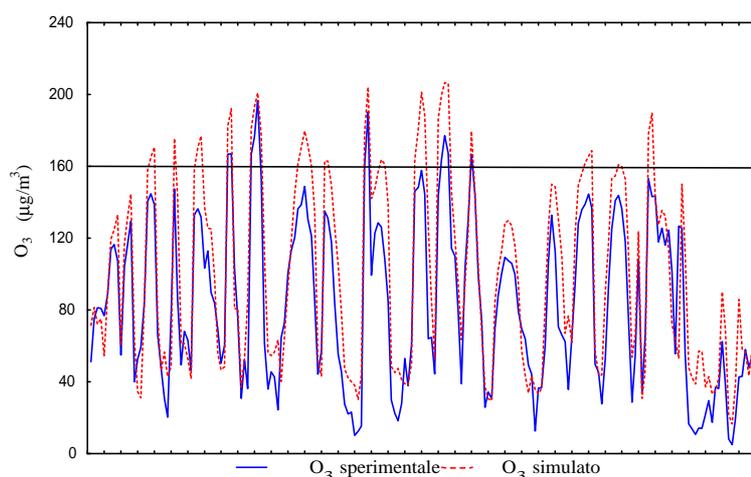


Fig. 5.17. Rete “Mm-Net2”: confronto tra O_3 sperimentale ed O_3 simulato.

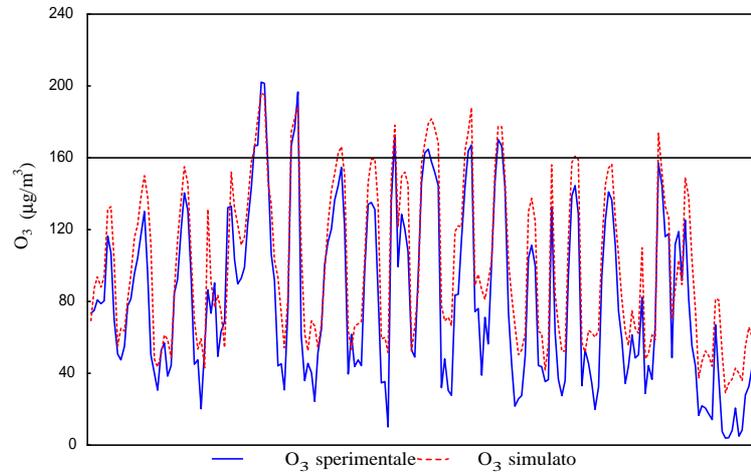
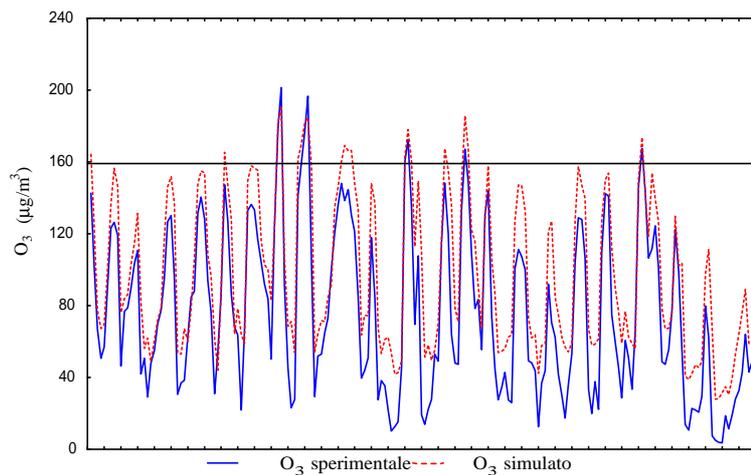


Fig. 5.18. Rete “Mm-Net3”: confronto tra O_3 sperimentale ed O_3 simulato.



Le figure 5.16÷5.18 mettono in evidenza la migliore prestazione in fase di testing effettuata dalla rete “Mm-Net2” rispetto alle altre, che tendono ad una sovrastima dei valori sperimentali.

Le reti neuronali fungono oltre che da strumento di tipo previsionale anche come interpreti del fenomeno in atto, grazie all’analisi di sensitività dell’output nei confronti degli elementi d’ingresso.

L’analisi di sensitività eseguita sulle tre reti ha fornito i seguenti risultati:

- per quanto riguarda la “Mm-Net1” esiste una forte dipendenza dei risultati dalle variabili $T(t-1)Mm$, $O_3(t)Bg$ ed $O_3(t)Vo$;
- gli output forniti dalla rete “Mm-Net2” sono stati determinati con maggior forza dalle variabili $NO_2(t-1)Mm$, $O_3(t-1)Mm$, $O_3(t)Bg$ ed $O_3(t)Vo$;
- la rete “Mm-Net3” è maggiormente sensibile alle stimolazioni provenienti dagli ingressi corrispondenti a $Rst(t-2)Mm$, $T(t-1)Mm$, $O_3(t-1)Mm$, $O_3(t-1)Bg$ ed $O_3(t-1)Vo$.

Le osservazioni fatte sulla sensitività di ciascuna rete portano ad interpretare lo smog fotochimico a Montecchio Maggiore come un fenomeno fortemente dipendente dalle variabili meteorologiche legate alla radiazione solare e dotato di carattere diffuso. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, risultano maggiormente determinanti l'ozono di Bassano del Grappa e di Vicenza Ovest.

5.3. Modelli per l'ozono a Schio

Anche per Schio sono stati sviluppati gli stessi tre modelli neurali descritti per Bassano del Grappa e Montecchio Maggiore. Unica differenza riguarda l'assenza dell'umidità relativa perché la stazione di Schio non è dotata del relativo misuratore. Le reti utilizzate sono descritte in tab. 5.20.

Tabella 5.20. Reti neurali per la previsione dell'ozono a Schio.

| Rete | Tipo | N° patterns | | Elementi del vettore d'input |
|---------|---------|-------------|------|--|
| | | Trn. | Tst. | |
| Sc-Net1 | f-6-4-1 | 1000 | 561 | $Rst(t-2)Sc-T(t-1)Sc-O_3(t)Bg-O_3(t)Mm-O_3(t)VI-O_3(t)Vo$; |
| Sc-Net2 | f-8-5-1 | 600 | 373 | $NO_2(t-1)Sc-T(t-1)Sc-Rst(t-2)Sc-O_3(t-1)Sc-O_3(t)Bg-O_3(t)Mm-O_3(t)VI-O_3(t)Vo$; |
| Sc-Net3 | f-8-5-1 | 600 | 374 | $NO_2(t-1)Sc-T(t-1)Sc-Rst(t-2)Sc-O_3(t-1)Sc-O_3(t-1)Bg-O_3(t-1)Mm-O_3(t-1)VI-O_3(t-1)Vo$; |