

ANALISI E PREVISIONE DI TEMPERATURE MINIME E DI GELATE SUL BACINO DEL TRASIMENO

ANALYSIS AND FORECAST OF MINIMUM TEMPERATURES AND FROSTS ON THE TRASIMENO BASIN

Patrizia Basili¹, Stefania Bonafoni^{1*}, Riccardo Biondi^{1,2}

¹: Dip. di Ingegneria Elettronica e dell'Informazione - Univ. di Perugia, Via Duranti, 93 - 06125 Perugia. Tel. 0755853663, Fax 0755853654, E-mail: bonafoni@diei.unipg.it

²: Consorzio CRESCI, Piazza IV Novembre, 06100

* Corresponding author: E-mail address: stefania.bonafoni@diei.unipg.it]

Ricevuto 22 marzo 2005, accettato 23 marzo 2006

Riassunto

Nell'ambito del crescente interesse verso il monitoraggio atmosferico del Lago Trasimeno, uno degli obiettivi fondamentali è la previsione delle gelate e delle temperature minime nel bacino lacustre. Tali aspetti influenzano direttamente il microclima dell'area del Trasimeno, la qualità e la quantità delle produzioni agricole limitrofe e il livello idrico del lago. Accanto a tale analisi, si sta inoltre procedendo alla realizzazione di un sito web nel quale tali previsioni vengano rese disponibili real-time a tutte le utenze, insieme ai dati meteorologici registrati, come ad esempio già avviene in alcune regioni italiane (Lamma Toscana <http://www.lamma.rete.toscana.it/>, CFMI-PC Arpa Liguria <http://www.meteoliguria.it/>, SAR Sardegna <http://www.sar.sardegna.it/>, ERSA Friuli Venezia Giulia <http://www.csa.fvg.it/>). Infatti alcune previsioni real-time sono possibili grazie alla rete di sensori meteorologici che acquisiscono dati in sincronia e li inviano ad un centro di raccolta comune ogni mezz'ora. Il database a disposizione è costituito da dati provenienti da 4 diverse stazioni meteorologiche distribuite su tutto il bacino lacustre dal 1988. Per prevedere le temperature estreme è stato implementato un algoritmo statistico di tipo regressivo utilizzando i dati raccolti fino alla fine del 2003. Parallelamente lo stesso dataset è stato impiegato per addestrare opportune reti neurali. Per la validazione, gli algoritmi regressivi e le reti neurali sono stati successivamente testati sui dati meteorologici più recenti. Tali metodologie sono state implementate in ambiente Matlab, realizzando una procedura automatica che permette di prevedere le gelate e le temperature estreme giornaliere in real-time a partire dall'ora del tramonto.

L'analisi degli errori commessi nella previsione delle temperature estreme ha permesso di stabilire la metodologia migliore e le variabili atmosferiche necessarie per tale tipo di previsione. Poiché i file grezzi disponibili contenenti i dati raccolti sul bacino del Trasimeno presentavano a volte dei valori privi di significato fisico, si è proceduto ad un controllo di qualità dei dati per ottenere previsioni accurate ed utili ai fini agrometeorologici e per il monitoraggio dell'ecosistema lacustre. L'algoritmo di previsione agrometeorologica assieme ad un sistema informatico di allerta on-line, permetterà di prevenire danni alle colture e di migliorarne la qualità.

Parole chiave: Meteorologia, temperature estreme, algoritmi di previsione, gelate

Abstract

The growing interest for the monitoring of Trasimeno Lake (Central Italy) has led to the frost and minimum temperature forecast on the basin. Such atmospheric variables affect the Trasimeno area climatology, the quality and quantity of the agricultural productions and the lake water level. Besides such analysis, a web site is under construction, where these real-time forecasts and the meteorological data will be available for interested users. In fact real-time forecast of severe temperatures can be carried out exploiting a network of meteorological sensors acquiring and sending data to a centre every half an hour.

The available database offers data collected from 4 weather stations placed on the Trasimeno basin since 1988. For extreme temperature forecast a statistic regressive algorithm has been implemented using data collected until the end of 2003. The same dataset has been employed to train suitable neural networks. For the validation phase, the regressive algorithms and the neural networks have been tested on new meteorological data. The above techniques have been implemented on Matlab platform, leading to an automatic procedure able to forecast frosts and daily severe temperatures starting from sunset.

Analysing the errors during the estimation process of severe temperatures, it was possible to establish the best methodology and the atmospheric variables needed for the forecasting process. Also, a quality control of collected data on the Trasimeno basin was performed to obtain accurate forecast, useful also for agricultural and meteorological purposes and for the monitoring of the ecosystem of the lake. The forecast algorithm together with an automatic alarm system will prevent damages to the cultivations also improving the quality.

Keywords: Meteorology, extreme temperatures, forecast algorithms, frost.

Introduzione

Negli ultimi decenni si sono verificate notevoli modifiche climatiche in molte zone del pianeta, provocando alterazioni sia del regime pluviometrico che di quello termometrico con conseguente impatto sulla risposta idrologica del suolo, condizionando ad esempio l'uso agricolo dei terreni coltivati e il rischio idrogeologico. In questo contesto si inserisce perfettamente la situazione di criticità del Lago Trasimeno il cui microclima viene oggi monitorato grazie ad una rete di stazioni meteorologiche distribuite su tutto il bacino, in grado di fornire misure di pressione, temperatura, umidità, pioggia, velocità del vento e livello idrometrico delle acque. Grazie a tale rete di acquisizione ed ai relativi dati è possibile tenere sotto controllo la variabilità idrica del lago stesso, annoso problema del bacino umbro, ed è possibile creare algoritmi ad hoc per la previsione delle temperature estreme, parametro di notevole interesse per il settore agricolo, colonna portante dell'economia della regione.

Per cercare di studiare tali problematiche è stato avviato dalla fine del 2004 un progetto di monitoraggio ambientale del Lago Trasimeno. Nell'ambito del crescente interesse verso studi di diagnostica ambientale, grazie allo sviluppo di tecnologie e sensori di telerilevamento in grado di monitorare l'ambiente in cui viviamo con continuità ed elevata precisione, il progetto è finalizzato al monitoraggio del lago Trasimeno prestando particolare attenzione al suo microclima. Infatti, i noti problemi di natura idrologica che da tempo affliggono il lago umbro (il livello del Trasimeno è diminuito dall'inizio degli anni 90 fino al 2004, raggiungendo dei minimi storici nel 2003 con -187 cm sullo zero idrometrico) possono essere analizzati e circoscritti grazie alla elaborazione di dati forniti da una rete di sensori meteorologici e idrologici già presenti.

In particolare, tale progetto è finalizzato alla archiviazione, al controllo e all'analisi dei dati da tali sensori, alla creazione di una banca dati specialistica in cui inserire anche le stime delle temperature estreme e alla creazione di un sito web specifico della zona del Trasimeno, non ancora esistente. Infatti la gestione centralizzata dei sensori facilita i processi di elaborazioni in tempo reale in grado di fornire alcune previsioni meteorologiche a breve termine (nowcasting).

Infine, la creazione di un data-set specialistico continuamente aggiornato e di un sito web di semplice accesso e comprensione sarà di interesse per utenze di vario genere e soprattutto per la comunità scientifica del settore ambientale.

In questo lavoro verranno presentate alcune tecniche di stima (Basili *et al.* 2002) (regressione lineare e rete neurale) utilizzate per la previsione di temperature estreme nel bacino del lago, mostrando la loro potenzialità e applicabilità nei processi di previsione in real-time.

Materiali e metodi

Le stazioni di acquisizione

I dati utilizzati per il monitoraggio del Lago Trasimeno vengono acquisiti da una rete di rilevamento costituita da 4 stazioni meteorologiche dislocate su tutta l'area del bacino lacustre che inviano i dati in sincronia ad un centro



Fig. 1 - Bacino del Lago Trasimeno: mappa delle 4 stazioni meteorologiche analizzate.

Fig. 1 - Trasimeno Lake basin: map of the 4 weather stations analysed.

di acquisizione, posto a Passignano sul Trasimeno, tramite un ponte radio UHF che lavora alla frequenza di 445.425 MHz. La rete esiste attivamente dal 1988 ed oltre ad acquisire dati meteorologici, rileva anche parametri sulla qualità e quantità dell'acqua del Lago.

Una stazione meteo standard è costituita da:

- termometro ad aria: campo di misura $-30^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$, risoluzione 0.1°C ;
- igrometro a film sottile capacitivo: campo di misura $0\%/100\%$, risoluzione 1% ;
- goniometrometro a banderuola: campo di misura 360° , sensibilità 1° , soglia 1 km/h;
- anemometro a 3 coppe: campo di misura $0/180$ km/h, soglia 0.5 km/h;
- pluviometro a vaschetta oscillante: bocca da 0.1 m, sensibilità 0.2 mm;

Nel presente lavoro sono stati considerati i dati forniti da 4 stazioni di acquisizione, (Isola Polvese, Villastrada, Passignano, Strada Provinciale 302), mostrate in Fig. 1, in quanto sono le uniche stazioni provviste di tutti i sensori sopra elencati. Inoltre, nella stazione di Isola Polvese sono presenti anche un barometro ed un sensore di radiazione solare totale incidente.

Algoritmi di previsione: regressione lineare e reti neurali.

Considerando un generico numero di variabili di ingresso e di uscita di un sistema, la regressione lineare ha l'obiettivo di quantificare in quale misura il set di variabili di ingresso è in relazione con quelle di uscita e tale quantificazione è affidata all'insieme dei coefficienti di regressione da determinare.

Nel caso in esame, la variabile di uscita è la temperatura minima T_{\min} di ogni giorno, mentre in ingresso sono stati considerati i parametri atmosferici disponibili forniti dalla stazione in esame: temperatura al tramonto (T_{tr}), temperatura 1 ora dopo il tramonto ($T_{\text{tr}1\text{h}}$), temperatura 2 ore dopo il tramonto ($T_{\text{tr}2\text{h}}$), umidità relativa (RH), direzione

del vento (DV), velocità del vento (VV), pressione (P), radiazione solare totale (RAD). I parametri RH, DV, VV, P e RAD sono riferiti all'ora del tramonto. La predizione di T_{\min} è ottenibile attraverso la seguente combinazione lineare:

$$T_{\min} = a_0 + a_1 * T_{tr} + a_2 * T_{tr1h} + a_3 * T_{tr2h} + a_4 * RH + a_5 * DV + a_6 * VV + a_7 * P + a_8 * RAD$$

in cui $a_0 \dots a_8$ rappresentano i coefficienti di regressione che nel caso in esame sono stati calcolati in ambiente Matlab disponendo di dati ogni mezz'ora per ciascuna stazione a partire dal 1988 fino alla fine del 2003. In particolare, volendo predire le temperature estreme in periodi a rischio di gelate, sono state considerate le acquisizioni per i mesi di Novembre, Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo. Per determinare l'ora del tramonto è stato implementato un algoritmo noto in letteratura che permette di risalire giorno per giorno all'ora dell'alba e del tramonto conoscendo le coordinate della stazione di interesse (<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/sunrise.html>).

Accanto alla tecnica della regressione, sono state allestite in ambiente Matlab opportune reti neurali (Demuth e Beale, 2002): l'utilizzo di reti neurali già in passato ha mostrato buone prestazioni e flessibilità nel caso di processi di stima di parametri atmosferici (Basili et al., 2004), anche in presenza di sistemi non lineari.

Per analizzare i dati del Trasimeno abbiamo utilizzato delle reti neurali con diverse configurazioni e i vari test effettuati hanno mostrato le migliori prestazioni con una rete feedforward costituita da due strati nascosti rispettivamente di 7 e 4 neuroni con funzione di trasferimento sigmoideale, e uno strato di uscita di 1 neurone con funzione di trasferimento lineare. Invece di utilizzare la tecnica standard di backpropagation, per un più rapido allenamento della rete, è stato utilizzato l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (Hagan e Menhaj, 1994). Ovviamente i dati di ingresso e di uscita delle reti neurali sono gli stessi impiegati per la tecnica regressiva.

Risultati

Come primo passo sono stati individuati i parametri atmosferici che influenzano maggiormente la previsione delle gelate e delle temperature minime nei mesi invernali. Come evidenziato in precedenza, l'algoritmo di nowcasting è stato sviluppato in modo che riesca a prevedere le temperature estreme a partire dalla temperatura al tramonto e nelle due ore successive, in quanto è proprio dall'ora del tramonto che le temperature cominciano a diminuire fino all'alba successiva. Il dataset a disposizione (Gennaio 1988 – Giugno 2005) è stato suddiviso in un file di training o calibrazione (1988 – 2003) ed un file di test o validazione (2004 – 2005), per i mesi che vanno da Novembre a Marzo. I risultati riportati in seguito si riferiscono alla fase di test. Inizialmente è stata sviluppata la tecnica della regressione lineare considerando come uscita T_{\min} di ogni giorno e come ingresso solamente T_{tr} , T_{tr1h} e T_{tr2h} .

Successivamente sono stati aggiunti agli ingressi, ad uno ad uno, gli altri parametri atmosferici disponibili ad ogni stazione (RH, DV, VV, P e RAD): valutando la radice

Tab. 1 - Contributo delle diverse variabili alla riduzione dell'errore rms nella previsione della temperatura minima giornaliera (errore rms medio sulle 4 stazioni).

Tab. 1 - *Different sensors contribution to the rms error reduction for daily minimum temperature forecast (average rms error for the four stations)*

Sensore radiazione solare (RAD)	0.03°C
Igrometro (RH)	0.20°C
Gonioanemometro (DV)	0.09°C
Anemometro (VV)	0.14°C
Barometro (P)	0.04°C

Tab. 2 - Previsione della temperatura minima giornaliera (T_{\min}) con la **regressione lineare**. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005).

Tab. 2 - *Daily minimum temperature forecast (T_{\min}) using linear regression. Test from November to March (2004 and 2005).*

STAZIONE	Errore rms (°C)	R ²
Isola Polve-se	1.696	0.9130
Villastrada	1.531	0.9322
Passignano	1.667	0.9156
SP 302	2.172	0.8876
Totale	1.810	0.901

Tab. 3 - Previsione della temperatura minima giornaliera (T_{\min}) con la **rete neurale**. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005).

Tab. 3 - *Daily minimum temperature forecast (T_{\min}) using neural network. Test from November to March (2004 and 2005).*

STAZIONE	Errore rms (°C)	R ²
Isola Polve-se	1.543	0.926
Villastrada	1.418	0.942
Passignano	1.444	0.935
SP 302	2.026	0.897
Totale	1.636	0.926

dell'errore quadratico medio (errore rms) tra T_{\min} misurate e T_{\min} predette, si è visto che tali parametri contribuiscono, anche se alcuni in minima parte, al miglioramento della previsione di T_{\min} . Infatti ogni parametro contribuisce in media, per le 4 stazioni considerate, ad una riduzione dell'errore rms inferiore a 0.2 °C, come riportato nella Tab. 1.

Si è quindi proceduto alla previsione giornaliera di T_{\min} sviluppando una regressione lineare per ogni singola stazione utilizzando tutti i parametri atmosferici disponibili: nella Tab. 2 sono riportati, per le 4 stazioni analizzate, sia i valori dell'errore rms che il coefficiente di correlazione (r^2). È possibile notare un errore rms inferiore a 1.7 °C, tranne nel caso della stazione della Strada Provinciale 302 (SP 302) in cui l'errore è superiore a 2 °C. Un evidente miglioramento dei risultati, per tutte le sta-

zioni, si ottiene applicando gli stessi dati alla rete neurale prima descritta, come riportato in Tab. 3.

Per quanto riguarda l'individuazione delle gelate, si è tenuto conto della seguente situazione: poiché durante la notte il terreno perde calore per irraggiamento fino all'alba successiva, come l'aria sovrastante, ma in maggior misura, l'aria è più fredda vicino al suolo piuttosto che all'altezza del sensore della stazione meteo (circa 1.8 m). In genere la differenza di temperatura tra il suolo e l'altezza del sensore è circa 0.8°C (Cicogna et al., 1999): per questo fenomeno è stato considerato il limite di 0.8°C, invece di 0°C, come limite di congelamento a terra.

Nella Tab. 4 sono riportati i risultati relativi alla capacità di predizione delle gelate da parte della regressione lineare applicata ad ogni singola stazione. In tale tabella, le *gelate previste* corrispondono ai casi in cui gli algoritmi di previsione hanno fornito una temperatura inferiore a 0.8 °C, le *gelate mancate* ai casi in cui gli algoritmi hanno fornito una temperatura superiore a 0.8 °C mentre le stazioni hanno registrato una temperatura inferiore a 0.8°C, i *falsi allarmi* corrispondono alla previsione di gelate mentre le stazioni non hanno mai riscontrato temperature inferiori a 0.8 °C (Thornes e Stephenson, 2001). Sono state ottenute delle percentuali di corretta previsione variabile tra il 61.7% per la stazione dell'Isola Poveise e il 75% per la stazione di Villastrada; tali percentuali migliorano notevolmente con l'applicazione della rete neurale passando da una percentuale minima di previsione di 68.1% ad una massima di 87%, come riportato in Tab. 5.

In definitiva nella previsione delle gelate, così come nella predizione della temperatura minima giornaliera, risulta evidente come l'applicazione della rete neurale conduca a risultati migliori. Quanto riportato nelle Tabelle 2 e 3 è mostrato per le quattro stazioni contemporaneamente sotto forma grafica di scatter-plot rispettivamente in Fig. 2, nel caso della regressione lineare, e in Fig. 3, nel caso delle reti neurali. Nelle figure è evidenziato il limite di 0.8 °C per l'individuazione delle gelate e si intuisce la minore dispersione nella previsione nel caso delle reti neurali. Infatti nel caso delle reti neurali si ha un errore rms totale di 1.64 °C e un coefficiente di correlazione di 0.92, rispetto a 1.81 °C e 0.90 della regressione.

Nel tentativo di migliorare ulteriormente tali risultati, si è proceduto ad allenare e testare, per ogni stazione, tre diverse reti neurali su tre distinti set di dati suddivisi in base al valore della temperatura al tramonto: $T_{tr} < 7^\circ\text{C}$, $7^\circ\text{C} < T_{tr} < 12^\circ\text{C}$, $T_{tr} > 12^\circ\text{C}$. I risultati ottenuti si sono però rivelati sostanzialmente simili a quelli ottenuti in Tabella 5, in cui non è stata applicata alcuna suddivisione dei dati, evidenziando dunque che la scelta migliore e meno onerosa dal punto di vista computazionale risulta essere quella di una unica rete neurale per tutte le stazioni. Per completezza, vengono riportati i valori dei coefficienti di regressione nel caso dell'analisi contemporanea delle 4 stazioni:

$$\begin{aligned} a_0 &= -2.2838 & a_1 &= -0.3920 & a_2 &= 0.0321 & a_3 &= 1.2218 \\ a_4 &= 0.0246 & a_5 &= -0.0017 & a_6 &= 0.0036 & a_7 &= -0.0008 \\ a_8 &= -0.0052. \end{aligned}$$

Tab. 4 - Previsione delle gelate: risultati ottenuti con la regressione lineare. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005)

Tab. 4 - Frost forecast: results using **linear regression**. Test from November to March (2004 and 2005).

STAZIONE	Gelate previste	Gelate mancate	Falsi allarmi	% corretta previsione
Isola Poveise	31	18	2	61.7
Villastrada	44	14	2	75.0
Passignano	32	16	4	63.6
SP 302	52	25	9	63.2
Totale	159	73	17	66

Tab. 5 - Previsione delle gelate: risultati ottenuti con la rete neurale. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005)

Tab. 5 - Frost forecast: results using **neural network**. Test from November to March (2004 and 2005).

STAZIONE	Gelate previste	Gelate mancate	Falsi allarmi	% corretta previsione
Isola Poveise	35	14	5	68.1
Villastrada	51	7	4	87
Passignano	35	13	5	69.7
SP 302	60	17	12	73.8
Totale	181	51	26	75.2

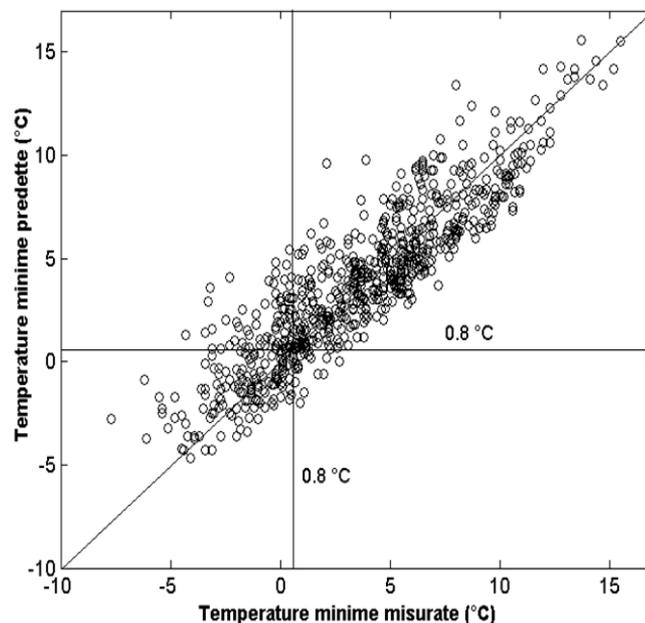


Fig. 2 - Scatter-plot delle temperature minime predette rispetto a quelle misurate dalle 4 stazioni utilizzando la **regressione lineare**. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005)

Fig. 2 - Scatter-plot of forecasted minimum temperatures vs. measured minimum temperatures from the 4 weather stations using **linear regression**. Test from November to March (2004 and 2005).

Conclusioni

Nell'ambito del monitoraggio atmosferico del bacino del Lago Trasimeno utilizzando dati provenienti da una rete di stazioni meteorologiche già esistenti, la previsione delle temperature estreme per il periodo compreso tra Novembre a Marzo, con la conseguente individuazione delle gelate, si è rivelata piuttosto confortante. In particolare l'utilizzo di una semplice rete neurale addestrata in ambiente Matlab, poco onerosa da un punto di vista del tempo di calcolo, fornisce i risultati migliori e soprattutto risulta facilmente utilizzabile in maniera automatica: ciò rende tale tecnica particolarmente adatta e robusta nel fornire previsioni di temperature estreme in real-time.

Inoltre l'analisi preliminare relativa all'apporto dei vari sensori di una stazione meteorologica standard per la previsione delle temperature minime ha evidenziato come sia sufficiente disporre di una stazione con sensori di temperatura, umidità relativa e velocità del vento per ottenere dei risultati accurati.

Come prospettiva futura, i promettenti risultati ottenuti con la rete neurale per il periodo invernale costituiscono una valida base per estendere il lavoro al periodo primaverile e autunnale, in cui una accidentale occorrenza di gelate provocherebbe danni maggiori alle colture vista la loro più marcata vulnerabilità.

Bibliografia

- Basili P., Ciotti P., Fionda E., Bonafoni S., 2002. Retrieval of atmospheric water by ground-based microwave radiometry: comparison of physical, statistical and neural network based algorithms. *Fondazione Giorgio Ronchi*, ISSN: 03912051, Anno LVII, n. 4, pp. 727-730.
- Basili P., Bonafoni S., Biondi R., Ciotti P., Fionda E., 2004. Neural Networks and polynomial regressions for the retrieval of atmospheric water vapour and rain rate by ground-based microwave radiometry. *Fondazione Giorgio Ronchi*, ISSN: 03912051, Anno LIX, n. 1-2, pp. 57-60.
- Cicogna A., Bellan A., Giaotti D., 1999. Previsione di gelata in Friuli Venezia Giulia. *Notiziario ERSa* 3-4/99, pp. 41-44.
- Demuth H., Beale M., 2002. *Neural Network Toolbox for Use with Matlab. User's Guide v.5*, The MathWorks.
- Hagan M.T and Menhaj M., 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 5, pp. 989-993.
- Thornes J. E., Stephenson D. B., 2001. How to judge the quality and value of weather forecast products. *Meteorol. Appl.*, vol.8, pp. 307-314.

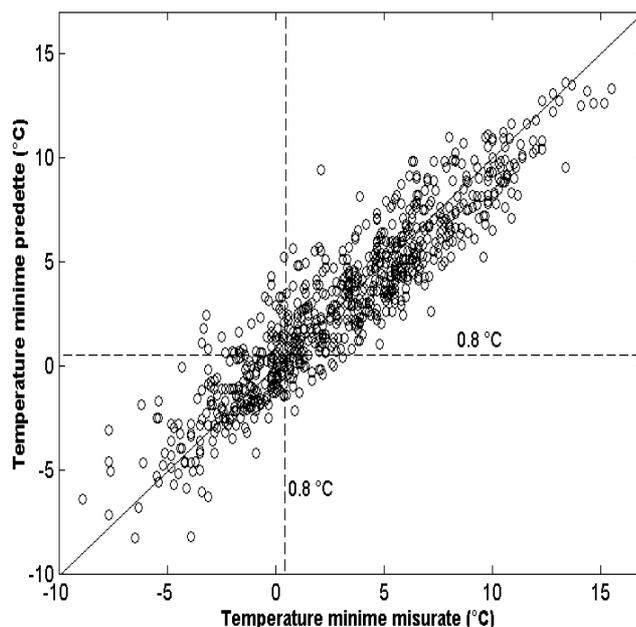


Fig. 3 - Scatter-plot delle temperature minime predette rispetto a quelle misurate dalle 4 stazioni utilizzando la rete neurale. Test da Novembre a Marzo (2004 e 2005)

Fig. 3 - Scatter-plot of forecasted minimum temperatures vs. measured minimum temperatures from the 4 weather stations using neural network. Test from November to March (2004 and 2005).