

METODOLOGIE E ALGORITMI PER IL CONTROLLO DI QUALITÀ DI DATI ORARI E GIORNALIERI ACQUISITI DA UNA RETE AGROMETEOROLOGICA: APPLICAZIONI ALLE RETE LUCANA SAL

METHODS AND ALGORITHMS FOR EVALUATING THE DATA QUALITY AT HOURLY AND DAILY TIME SCALES FOR AN AGROMETEOROLOGICAL NETWORK: APPLICATION TO THE REGIONAL NET OF BASILICATA (ITALY)

Gianfranco Rana*, Michele Rinaldi, Michele Introna

Istituto Sperimentale Agronomico, Via C. Ulpiani, 5 70125 Bari Italy

Riassunto

In questo lavoro sono esaminate le tecniche che si dovrebbero utilizzare per effettuare un controllo di qualità di grandezze agrometeorologiche acquisite in campo da stazioni standard. Primo passo necessario è calibrare periodicamente i sensori, per calcolarne i moltiplicatori. Qui, inoltre, sono stati descritti i metodi e gli algoritmi che si utilizzano per i controlli fisici e formali che hanno come obiettivo quello di determinare se un dato è accettabile; poi si è descritto brevemente il metodo da utilizzare per costruire l'algoritmo necessario a ristabilire l'integrità dei dati quando uno di essi è stato dichiarato inaccettabile. I metodi descritti sono stati applicati ad un caso reale: una serie di dati acquisiti dalla rete agrometeorologica della regione Basilicata. I risultati mostrano che, se viene effettuata periodicamente una calibrazione corretta, i valori non risultano affetti da un errore significativo e risultano di qualità accettabile per le applicazioni pratiche.

Parole chiave: controlli fisici, controlli statistici, rete agrometeorologica, calibrazione dei sensori, errore.

Abstract

In this paper the techniques to be used for the quality control of standard agrometeorological measurements are studied. First, it is necessary to calibrate periodically the sensors, in order to compute the conversion coefficients. Furthermore, the methods and algorithms used for the physical and statistical controls are detailed here, in order to determine if the data are correct; moreover, a short discussion on the subject of replacing incorrect data by a suitable value is carried out. The methods described have been applied to a series of data acquired by the local agrometeorological network of Basilicata (Southern Italy). The results showed that if a correct periodical calibration has been made periodically, the errors affecting the data are small, at least for practical applications.

Keywords: physical controls, statistical controls, agrometeorological network, sensor calibration, error.

Introduzione

Partiamo dal presupposto che: *è meglio non prendere in considerazione un cattivo dato che tenerne conto in ogni caso*. Infatti, se si prende per buono un dato che buono non è, si commette senz'altro un errore molto maggiore di quello che si commetterebbe considerando un dato "medio", magari ricavato dalla serie storica (anche limitata nel tempo) della stazione. Per cui, prima di utilizzare un valore misurato da un sensore, è necessario controllarne l'integrità e la correttezza, in altre parole è necessario effettuare un controllo sulla sua qualità (WMO, 1983a).

Se poi un dato climatico affetto da errore sistematico viene utilizzato in un modello matematico, ciò può portare ad errori, anche molto consistenti, sul risultato finale del modello. Per dare un'idea dell'ordine di grandezza

degli errori che si possono commettere facciamo un esempio: supponiamo di dover calcolare l'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) con il modello di Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998); questo modello richiede misure di temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento e radiazione solare globale. Se si suppone di commettere un errore sistematico di +2 °C sulla temperatura l'errore finale sull' ET_0 nel periodo irriguo estivo (giugno, luglio e agosto) è di ben 40 mm, ovvero di 400 m³/ha di acqua. I dettagli relativi a questo esempio sono riportati in Tabella 1; nella stessa tabella è anche presentato l'effetto sull' ET_0 di un errore sistematico di 10 punti percentuali nell'umidità relativa dell'aria.

Se il dato dovesse risultare errato anche dopo i controlli descritti nel seguito, sarà necessario sostituirlo con un valore appropriato, perché la serie storica resti integra e/o perché possano essere effettuate tutte le operazioni previste con quel dato.

*Corresponding author. tel. +39 080 5475011
fax +39 080 5475023
e-mail: g_rana@libero.it (G.Rana).

Si presuppone ovviamente che il valore misurato provenga da un sensore opportunamente calibrato secondo i procedimenti indicati in WMO (1981; 1983b). Le modalità di calibrazione sono descritte in un paragrafo successivo.

Il controllo di qualità dei dati agrometeorologici va fatto in due momenti distinti (SIAN, 1990): prima si effettuano dei controlli formali o fisici (controllo sulla accettabilità generale del dato), poi si eseguono dei controlli statistici, basati sia sull'analisi delle serie storiche sia sul controllo dei dati provenienti da stazioni limitrofe.

Dal punto di vista operativo, si procede per i seguenti due passi:

- 1) Controlli fisici e formali per determinare se un dato è accettabile;
- 2) Adozione di un opportuno algoritmo per ristabilire l'integrità del dato quando esso è stato dichiarato inaccettabile.

I controlli statistici, dettagliati in successivi paragrafi, devono far riferimento sia al clima della zona interessata, sia ai dati misurati nei giorni precedenti, sia alle misure effettuate dalle stazioni limitrofe. In sintesi, si effettuano i seguenti controlli (SIAN, 1990):

- a) controllo sulla variabilità interannuale (clima);
- b) controllo sulla persistenza temporale (dati rilevati nei giorni precedenti);
- c) controllo sulla coerenza spaziale (dati rilevati nelle stazioni limitrofe).

Un discorso a parte merita il problema della standardizzazione dei dati agrometeorologici, ovvero il controllo della uniformità dei sensori utilizzati e delle condizioni ambientali in cui la misura è stata effettuata, ovvero la valutazione del sito in cui il dato è stato rilevato.

La calibrazione dei sensori per confronto

Per la calibrazione dei sensori e la verifica della loro funzionalità si seguono le indicazioni dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM), in particolare, le procedure standard indicate nei documenti ufficiali WMO-no. 49 (1988 e successive modifiche e integrazioni), WMO-no. 134 (1981 e successive modifiche e integrazioni) e WMO-no. 8 (1983).

La calibrazione di routine viene effettuata per confronto, ovvero mettendo in relazione i dati provenienti dalla stazione sotto controllo con quelli acquisiti da una stazione dotata di sensori di classe di precisione superiore (Schwerdtfeger, 1976). Nel caso della rete del Servizio Agrometeorologico Lucano (SAL) sono stati calibrati i sensori relativi alle seguenti grandezze: radiazione solare globale, temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento, bagnatura fogliare. Le misure sono state effettuate con le stesse modalità di acquisizione della rete SAL.

Da una breve analisi di serie storiche di dati agrometeorologici relative ad alcune località della regione Basilicata (vedi Tab. 2), è risultato che il periodo di confronto

ottimale tra stazione di calibrazione e stazione in osservazione è di circa una settimana. In alcuni casi, dopo l'immediata analisi dei dati, si è proceduto a prolungare la calibrazione per confronto fino ad una ulteriore settimana.

La calibrazione per confronto fornisce i due coefficienti (s e i), rappresentanti la pendenza e l'intercetta della regressione lineare:

$$M_{rif} = s \cdot M + i \quad (1)$$

dove M_{rif} rappresenta la misura effettuata dal sensore di riferimento e M la misura effettuata con il sensore della stazione. I due coefficienti vanno poi utilizzati per correggere i dati provenienti dalle stazioni.

Tab. 1 - Errori totali commessi sull'evapotraspirazione di riferimento mensile calcolata con il modello di Penman-Monteith, supponendo di commettere errori sistematici sulla misura della temperatura dell'aria (T) e dell'umidità relativa dell'aria (UR).

Tab. 1 - Total errors on the reference evapotranspiration computed by the Penman-Monteith model, supposing that constant errors have been made on the measurements of air temperature (T) and relative humidity (UR).

Errore	giugno	luglio	agosto	Totale
2 °C (T)	10 mm	20 mm	10 mm	40 mm
10% (UR)	15 mm	25 mm	15 mm	55 mm

Applicazioni alla rete SAL

Nel periodo maggio 2000-ottobre 2001 sono state calibrate le 39 stazioni SAL riportate in Tabella II (tra parentesi la sigla di codifica della stazione).

I sensori presenti nelle stazioni SAL sono di tipo standard, di differenti case costruttrici e modello, alcuni non largamente commercializzati. Vista, dunque, la loro grande varietà si preferisce fornire solo l'intervallo di precisione in cui cadono tutti i sensori analizzati, per ogni grandezza fisica considerata.

- *Radiazione solare globale*, $\pm 1\%$ - $\pm 3\%$ del fondo scala.
- *Temperatura dell'aria*, ± 0.5 °C.
- *Umidità relativa*, ± 5 - $\pm 10\%$ del fondo scala.
- *Velocità del vento*, $\pm 5\%$ del fondo scala, minimo 0.5 m s^{-1} soglia di avvio.
- *Bagnatura fogliare*, precisione ± 7 - $\pm 10\%$ del fondo scala.

Le caratteristiche metrologiche dei sensori utilizzati per la calibrazione sono qui di seguito riportate.

- *Radiazione solare globale*, sensore Eppley PSP di classe I (Fritschen e Gay, 1979), linearità $\pm 0.5\%$ del valore di fondo scala, tempo di risposta 1 s, sensibilità $9 \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^2$.
- *Temperatura dell'aria*, sensore Rotronic MP 101, precisione ± 0.3 °C, tempo di risposta 15 s.
- *Umidità relativa*, sensore Rotronic MP101, precisione $\pm 1\%$ del fondo scala, stabilità $< 1\%$ all'anno, tempo di risposta 10 s.

- *Velocità del vento*, sensore Met One 010C, precisione $\pm 1\%$ del fondo scala, soglia di avvio, 0.27 m s^{-1} .
- *Bagnatura fogliare*, sensore Campbell Sci. Mod. 237, precisione $\pm 5\%$ del fondo scala.

In Tabella 3 sono indicati i giudizi complessivi dati alle stazioni, seguendo i suggerimenti dell'OMM, il significato del giudizio sintetico è il seguente:

A - sito rappresentativo, stazione in buona posizione (standard), sensori opportunamente disposti;

B - sito rappresentativo, stazione in posizione accettabile ma migliorabile (quasi standard), posizione dei sensori da ottimizzare;

C - sito non rappresentativo, stazione in posizione non standard, consigliabile lo spostamento.

Per illustrare i risultati e presentare i principali problemi incontrati, i dati del confronto (tra sensori da calibrare e sensori di riferimento (rif)) sono illustrati per alcuni sensori nelle Figure 1-10. Qui di seguito è riportato il commento e le osservazioni alle figure.

Tab. 2 - Elenco delle stazioni della rete SAL calibrate e loro ubicazione; in parentesi le sigle.

Tab 2 - List of the calibrated stations of the SAL network and their site; in brackets the short name.

Numero stazione	Denominazione e sigla
1	Policoro - C.da Troyli (PO1)
2	Tursi - C.da Marone (MO6)
3	Pisticci - C.da Castelluccio (PI1)
4	Pisticci Scalo - C.da Paolona (PI3)
5	Policoro - Loc. Pantano Sottano (PO3)
6	Grassano Scalo (GR1)
7	Villa d'Agri - AASD Bosco Galdo (BG1)
8	Metaponto - AASD Pantanello (PAN)
9	S. Giorgio Lucano - P. delle Rose (SGL)
10	Stigliano - C.da Torre (STI)
11	Nova Siri - Az. La Collinetta (NS3)
12	Montescaglioso-Az.Fortunato,C.da Fiumicello (MTS)
13	Grottole - C.da Castellana (GRD)
14	Grottole - C.da Serre (GRU)
15	Campomaggiore - C.da Montescristo (CMP)
16	Brindisi di Montagna - Serra del Ponte (BRM)
17	Laurenzana - Loc. Abetina (LAU)
18	Ferrandina - C.da Follia (FER)
19	San Mauro Forte - C.da S. Chiara (SMF)
20	Montalbano - CC Del Fico (MO4)
21	Guardia Perticara - C.da Lupara (GUP)
22	Nemoli - Loc. Ventrona (NEM)
23	Viggianello - Loc. Pedali (VIG)
24	Rotonda - Loc. Piana Incoronata (ROT)
25	Rotonda - Loc. Lori (ROS)
26	Castelsaraceno - Loc. Fusci (CSR)
27	Sarconi - C.da Trutolo (SAR)
28	Stariano di Lucania - C.da S. Lucia (SAT)
29	Acerenza - Villaggio Taor (ACE)
30	Aliano - Az. Baderita della M. (ALI)
31	Senise - Piano delle Maniche (SEN)
32	Genzano - C.da Ripa d'Api (GE1)
33	Santa Maria d'Irsi (SMI)
34	Lavello - AASD Gaudio (LAV)
35	Matera - C.da Matinelle (MTP)
36	Matera - C.da Due Gravine (MTQ)
37	Craco Peschiera (CRP)
38	Bernalda - C.da San Marco (ME3)
39	Metaponto - Agrobios (AGR)

Tab. 3 - Giudizio complessivo (vedi testo per i significati).

Tab. 3 - Evaluation of each station (see text for the meaning of the score).

Stazione	Giudizio
MO6	A
PI1	B
PI3	A
PO3	B
GR1	A
BG1	A
PAN	A
SGL	B
STI	A
NS3	A
PO1	C
MTS	B
GRD	A
GRU	B
CMP	A
BRM	C
LAU	C
FER	A
SMF	A
MO4	B
GUP	A
NEM	A
VIG	B
ROT	A
ROS	A
CSR	A
SAR	A
SAT	B
ACE	C
ALI	A
SEN	A
GE1	A
SMI	A
LAV	A
MTP	C
MTQ	C
CRP	A
ME3	B
AGR	A

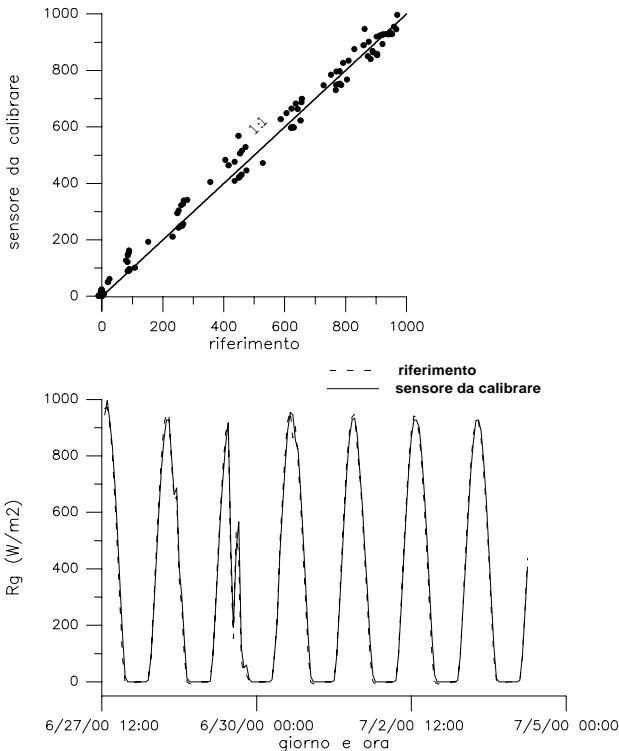


Fig. 1 - Confronto tra la radiazione globale misurata dal sensore sotto osservazione e la radiazione di riferimento, per la stazione di Grassano Scalo (GR1).

Fig.1 - Comparison between global radiation measured by the sensor under calibration and the reference radiation, in the station of Grassano Scalo (GR1).

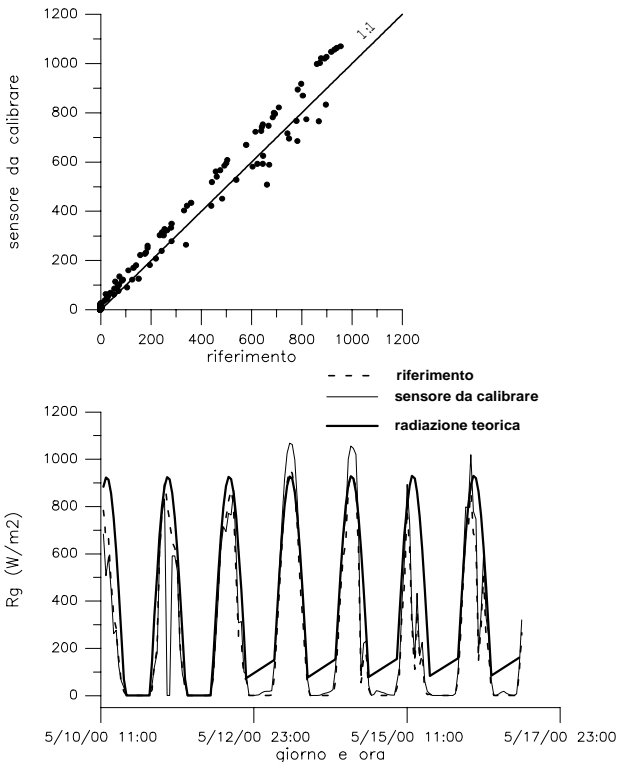


Fig. 2- Confronto tra la radiazione globale misurata dal sensore sotto osservazione, la radiazione di riferimento e la radiazione teorica, per la stazione di Policoro - C.da Tryli (PO1).

Fig. 2- Comparison between global radiation of the sensor under calibration, reference radiation and theoretical radiation, for the station of Policoro - C.da Tryli (PO1).

Radiazione solare globale

La Figura 1 mostra il confronto tra la radiazione globale oraria misurata dal sensore di riferimento e quella misurata dal sensore da calibrare per la stazione di Grassano Scalo (GR1), nel periodo 27 giugno - 4 luglio 2000. Visto che i due andamenti si sovrappongono, è evidente che i due sensori danno valori molto prossimi per tutto il periodo di osservazione e in tutte le ore della giornata. Il risultato della calibrazione è il seguente:

$$R_{g,rif} = 1.0074 \cdot R_g - 8.5853 \quad (r^2=0.9935) \quad (2)$$

Come si può vedere, in questo caso, il valore della pendenza è quasi identico all'unità, mentre il valore dell'intercetta (in $W\ m^{-2}$) non è significativamente diverso da 0. Tale constatazione è confermata anche dai test statistici effettuati tramite il pacchetto STAT del SAS. Dai risultati di questa calibrazione si può affermare che il sensore di radiazione globale della stazione di Grassano Scalo è in ottime condizioni e non ha bisogno di nessuna correzione.

In Figura 2 è riportato il risultato del confronto della radiazione globale, nella stazione di Policoro - C.da Troyli (P01) tra il 5 e il 12 maggio 2000. Per i due giorni più sereni (il quarto e il quinto), nelle ore centrali della giornata, il sensore in osservazione dà delle radiazioni molto elevate, ben oltre i $1000\ W\ m^{-2}$, non riscontrabili dal sensore di riferimento. Per valutare tale comportamento, seguendo Allen (1996), abbiamo calcolato la radiazione teorica per il sito in oggetto e riportato questi valori in Figura 2 (linea punteggiata). Si può osservare che la radiazione solare misurata dal sensore di riferimento è sempre al di sotto della radiazione teorica, si può dunque concludere che è il sensore della stazione SAL a non funzionare correttamente per questi particolari giorni. Per il resto sembra procedere tutto regolarmente.

E' evidente che per questo sensore non vi è alcuna possibilità di correzione del dato prima di aver compreso esattamente il suo comportamento e aver analizzato una serie di dati sufficientemente congrua (alcuni giorni di seguito per ciascuna stagione). Particolare attenzione va rivolta alla posizione del sensore all'interno del recinto della stazione in quanto la misura può essere notevolmente influenzata dalla presenza di pali o altre superfici riflettenti poste nelle vicinanze dell'apparecchio.

Temperatura dell'aria

In Figura 3 è illustrato il confronto tra la temperatura misurata con il sensore in osservazione e quella misurata con il sensore di riferimento, per la stazione di Pantanello, tra il 20 e il 27 giugno 2000. Si può chiaramente osservare che il sensore della stazione SAL funziona bene, infatti la regressione lineare dà il seguente risultato:

$$T_{rif} = 1.0296 \cdot T - 0.1273 \quad (r^2=0.9979) \quad (3)$$

con una pendenza leggermente superiore a 1 e un'intercetta appena superiore al decimo di grado.

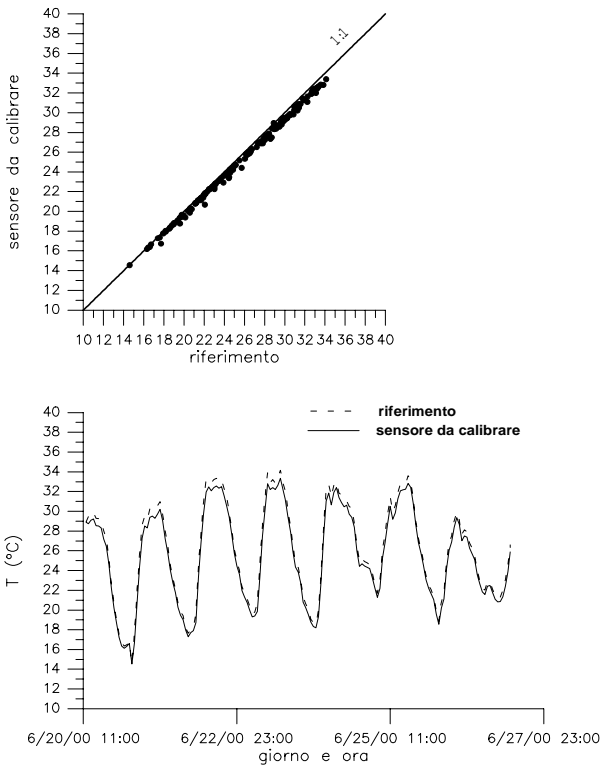


Fig. 3 - Confronto tra temperatura misurata dal sensore sotto osservazione e la temperatura di riferimento, per la stazione di Metaponto -AASD Pantanello (PAN).
Fig. 3- Comparison between temperature of the sensor under calibration and reference temperature, for the station of Metaponto -AASD Pantanello (PAN).

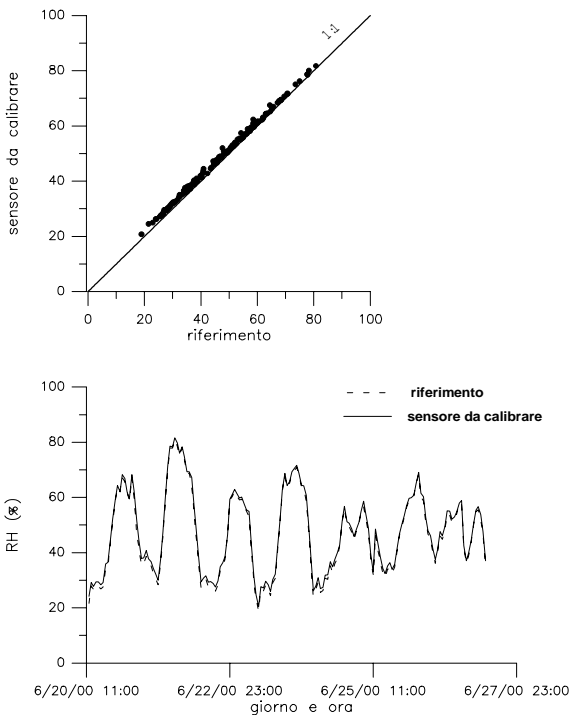


Fig. 4 - Confronto tra temperatura misurata dal sensore sotto osservazione e la temperatura di riferimento, per la stazione di Grassano Scalo (GR1).
Fig. 4 - Comparison between temperature measured by the sensor under calibration and the reference temperature, for the station of Grassano Scalo, (GR1).

L'errore di sovrastima (ca. 3%) può essere considerato trascurabile agli effetti pratici.

In Figura 4 è mostrato il confronto delle temperature per la stazione di Grassano Scalo (GR1), nel periodo 27 giugno - 4 luglio 2000. In questo caso il sensore della stazione sottostima notevolmente, infatti il risultato della regressione lineare dà:

$$T_{rif} = 1.0365 \cdot T + 1.1304 \quad (r^2=0.9957) \quad (4)$$

con un'intercetta piuttosto elevata, pari a 1.1 °C circa. Poiché l'andamento nel periodo di osservazione è sostanzialmente corretto, sembrerebbe che sia presente uno scarto sistematico negativo, probabilmente dovuto all'errore di ripetibilità del sensore (errore sistematico relativo all'intercambiabilità del sensore), ed eliminabile via programma.

Umidità dell'aria

In Figura 5 è illustrato il confronto tra l'umidità relativa misurata con il sensore in osservazione e quella misurata con il sensore di riferimento per la stazione di Pantanello, tra il 20 e il 27 giugno 2000.

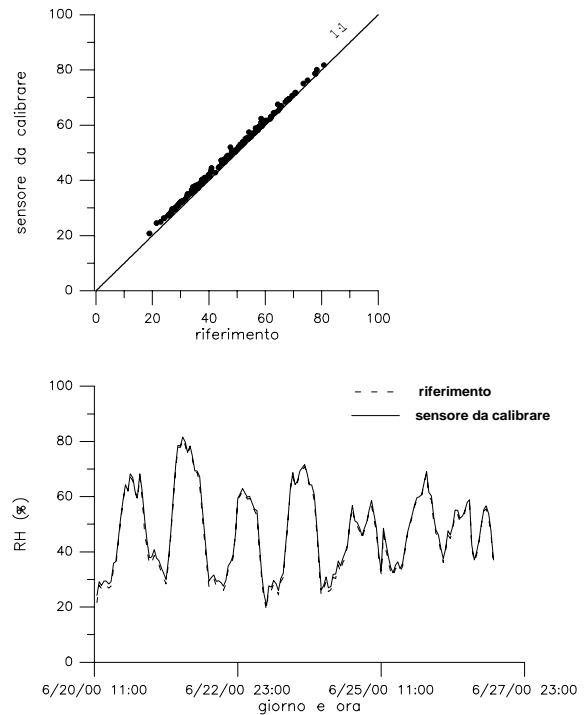


Fig. 5 - Confronto tra umidità relativa dal sensore sotto osservazione e l'umidità relativa di riferimento, per la stazione di Metaponto - AASD Pantanello (Pan).
Fig. 5 - Comparison between the relative humidity measured by the sensor under calibration and the reference relative humidity, for the station of Metaponto -AASD Pantanello(Pan).

Anche in questo caso, si può chiaramente osservare che il sensore della stazione SAL funziona bene, infatti la statistica dà il seguente risultato:

$$RH_{rif} = 1.0183 \cdot RH - 2.1485 \quad (r^2=0.9984) \quad (5)$$

con una pendenza leggermente superiore 1 e un'intercetta molto bassa, intorno ai 2 punti percentuali.

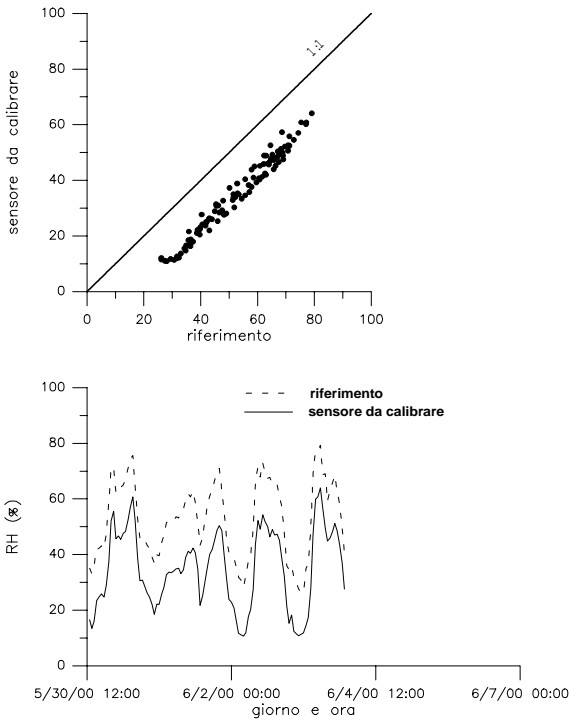


Fig. 6 - Confronto tra umidità relativa dal sensore sotto osservazione e umidità relativa di riferimento, per la stazione di Tursi - C.da Marone (MO6).

Fig. 6 - Comparison between relative humidity measured by the sensor under calibration and the reference humidity, for the station of Tursi - C.da Marone (MO6).

In Figura 6 è mostrato il confronto delle temperature per la stazione di Tursi - C.da Marone (MO6), tra il 30 maggio e il 3 giugno 2000. In questo caso il sensore della stazione sottostima notevolmente, infatti il risultato della regressione lineare dà:

$$RH_{rif} = 0.974 \cdot RH + 19.019 \quad (r^2=0.9732) \quad (6)$$

con un'intercetta piuttosto elevata pari a 20 punti percentuali. Inoltre, i dati del giorno 2 giugno, dalle 11:00 alle 23:00 sono completamente errati. L'impressione, in questo caso, è che il sensore debba essere sostituito e che i dati in archivio siano comunque recuperabili applicando la (6).

Velocità del vento

In Figura 7 è illustrato il confronto tra velocità del vento misurata con il sensore in osservazione e quella misurata con il sensore di riferimento per la stazione di Pantanello, tra il 20 e il 27 giugno 2000. Ancora una volta si può osservare che il sensore della stazione SAL ha delle ottime prestazioni, e a conferma di ciò la statistica dà il seguente risultato:

$$V_{rif} = 0.9719 \cdot V - 0.0156 \quad (r^2=0.9974) \quad (7)$$

con una pendenza leggermente inferiore 1 e un'intercetta trascurabile.

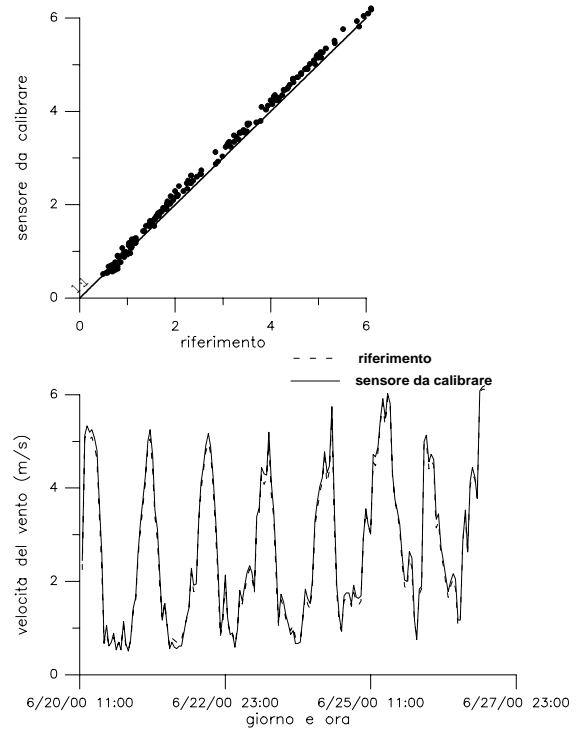


Fig. 7 - Confronto tra velocità del vento del sensore sotto osservazione e velocità del vento di riferimento, per la stazione di Metaponto - AASD Pantanello (Pan).

Fig. 7 - Comparison between the wind speed measured by the sensor under calibration and reference wind speed, for the station of Metaponto - AASD Pantanello (Pan).

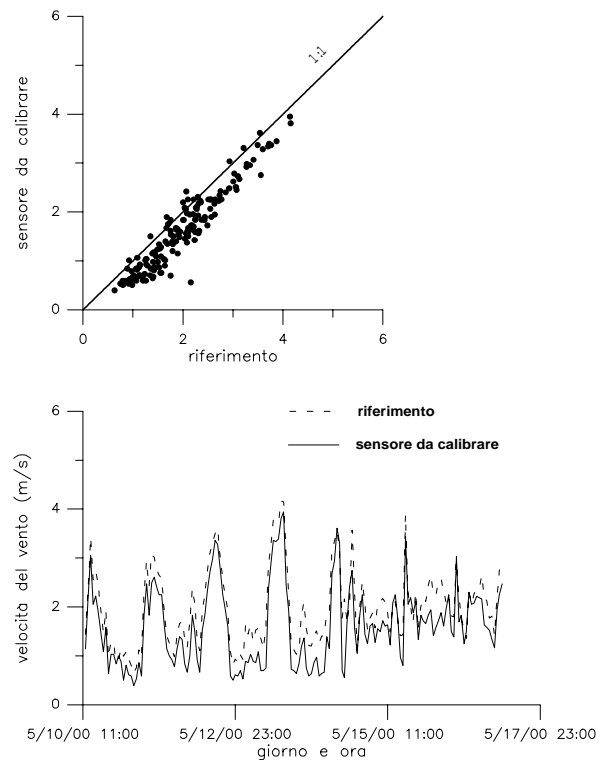


Fig. 8 - Confronto tra velocità del vento del sensore sotto osservazione e velocità del vento di riferimento, per la stazione di Policoro - C.da Tryli (PO1).

Fig. 8 - Comparison between wind speed measured by the sensor under calibration and reference wind speed, for the station of Policoro - C.da Tryli (PO1).

In Figura 8 è mostrato il confronto delle velocità del vento per la stazione di Policoro - C.da Troyli (PO1), nel periodo 10 maggio - 16 maggio 2000. In questo caso il sensore della stazione sottostima, infatti il risultato della regressione lineare dà:

$$V_{rif} = 0.9114 \cdot V + 0.5265 \quad (r^2=0.9015) \quad (8)$$

con un'intercetta piuttosto elevata, pari a 0.5 m s^{-1} . Molti anemometri degli anemometri SAL analizzati hanno presentato questo problema, cioè una intercetta piuttosto alta, segno che i sensori devono essere lubrificati più spesso.

Bagnatura fogliare

Il confronto tra il sensore della stazione e quello di riferimento ha mostrato che questa grandezza è misurata in maniera sostanzialmente corretta. C'è comunque da sottolineare che la misura dipende molto dalla corretta posizione del sensore (che va curata anche al centimetro) e dal modello di apparecchio utilizzato, per cui in questo caso si è trattato di un test di funzionalità piuttosto che di una calibrazione vera e propria.

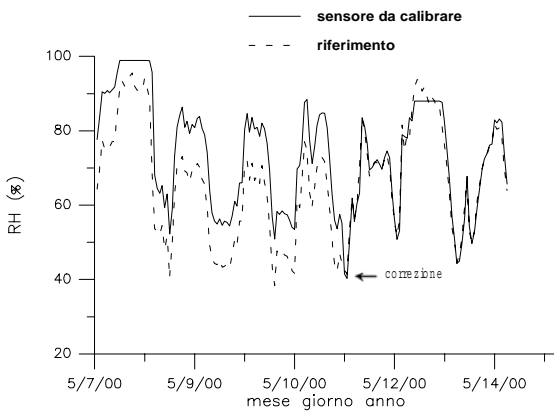


Fig. 9 - Confronto tra umidità relativa del sensore sotto osservazione e umidità di riferimento, per la stazione di Policoro - C.da Troyli (PO1), prima e dopo la correzione dei moltiplicatori.

Fig. 9 - Comparison between relative humidity measured by the sensor under calibration and reference humidity, for the station of Policoro - C.da Troyli (PO1), before and after the correction of the sensor coefficients.

Efficacia della calibrazione per confronto

Per valutare l'efficacia e la validità del metodo di calibrazione da noi adottato, ricorriamo al confronto effettuato sull'igrometro della stazione di Policoro - Troyli (PO1). Dal confronto effettuato tra il 7 e il 10 maggio 2000 (Figura 9), risulta che:

$$RH_{rif} = 0.95 \cdot RH_{sensore} - 3.11 \quad (9)$$

con un $r^2=0.84$. Applicando i coefficienti della (9) ai dati acquisiti nei giorni 11 - 13 maggio 2000 otteniamo l'umidità relativa riportata nella coda del grafico in Figura 9. Come si vede si passa da una sottostima di circa il

10% a un valore sostanzialmente identico a quello misurato dal sensore di riferimento (Figura 10).

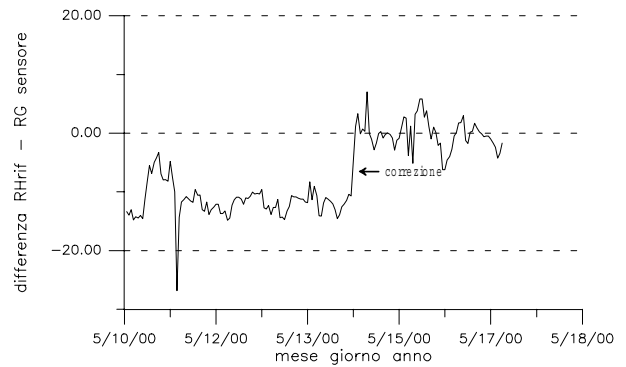


Fig. 10 - Effetto della calibrazione sulla misura di umidità relativa, per la stazione di Policoro - C.da Troyli (PO1).

Fig. 10 - Effect of the calibration, on the measurement of relative humidity for the station of Poliporo - C.da Troyli (PO1)

Calcolo dell'intervallo di variabilità dei dati agrometeorologici

Prenderemo in considerazione le seguenti variabili agrometeorologiche: la radiazione solare (globale), la temperatura dell'aria, l'umidità dell'aria, la velocità del vento, la direzione del vento. Per ognuna di esse proporrò un intervallo di variabilità, basandoci su considerazioni fisiche e sul metodo di misura adottato per rilevare la variabile. Si prenderanno in considerazione sia i dati rilevati su scala temporale oraria che giornaliera, specificando di volta in volta il tipo di controllo.

La radiazione solare (globale)

Il flusso di radiazione solare (R_s) misurato da un solariometro in una data località per un certo intervallo di tempo, deve essere inferiore o uguale a quello misurato in una giornata limpida e serena per lo stesso intervallo di tempo (R_{s0})

$$R_s \leq R_{s0} \quad (10)$$

Una stima accurata della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre R_{s0} , può essere fatta utilizzando la radiazione solare extraterrestre R_a e la trasmittanza atmosferica, rappresentabile tramite l'indice di trasparenza (K_T , adimensionale)

$$R_{s0} = K_T \cdot R_a \quad (11)$$

L'indice di trasparenza può essere stimato (Allen *et al.*, 1994; Monteith e Unsworth, 1990) dalla relazione:

$$K_T = 0.75 + 2^{-5} z \quad (12)$$

con z (m) altezza sul livello del mare del sito in oggetto. Questa relazione è stata ricavata per un angolo solare medio di 45° sull'orizzonte. La relazione (12) è stata scelta dopo un'accurata sperimentazione e per la sua semplicità, vi è però la possibilità di migliorare le stime di K_T nel caso di siti particolarmente inquinati o in cui

l'umidità dell'aria è, normalmente, molto più elevata della media dell'area in esame (si veda Allen, 1996). Nella (11) rimane da calcolare la radiazione extraterrestre R_a .

Controllo sulla radiazione solare a scala giornaliera

In questo caso R_a , per una data località, è funzione della latitudine e del giorno dell'anno ed è data dalla relazione (Brutsaert, 1982):

$$R_a = \frac{24 \cdot 3600}{10^6} \frac{G_{sc}}{\pi} d_r (\omega_s \text{sen} \varphi \text{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta \text{sen} \omega_s) \quad (13)$$

con G_{sc} costante solare (1367 W m^{-2}); d_r è la distanza relativa terra-sole, φ è la latitudine in radianti, δ è la declinazione solare e ω_s è l'angolo solare. Qui di seguito sono illustrate, separatamente, le relazioni da utilizzare per determinare queste ultime grandezze. d_r è data dalla relazione:

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (14)$$

con J giorno dell'anno (1- 365).

La conversione della latitudine φ da a gradi ($^\circ$), b primi ($'$) e c secondi ($''$) a radianti si effettua secondo la seguente relazione:

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \cdot \left(a + \frac{b}{60} + \frac{c}{3600}\right) \quad (15)$$

La declinazione solare δ è data da:

$$\delta = 0.4093 \cdot \text{sen}\left[2\pi \frac{(284 + J)}{365}\right] \quad (16)$$

L'angolo solare ω_s in radianti può essere calcolato come:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (17)$$

Controllo sulla radiazione solare a scala oraria

Per intervalli di tempo di un'ora, o più brevi, la radiazione solare extraterrestre media nel periodo considerato (R_{ah} , in Wm^{-2}) è data dalla relazione (Allen, 1996)

$$R_{ah} = \frac{12}{\Delta t \pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \text{sen} \varphi \text{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta (\text{sen} \omega_2 - \text{sen} \omega_1)] \quad (18)$$

con ω_1 e ω_2 rispettivamente l'angolo solare all'inizio e alla fine del periodo considerato in radianti:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \Delta t}{24} \quad (19)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi \Delta t}{24} \quad (20)$$

con ω angolo solare all'istante centrale del periodo considerato Δt (lunghezza del periodo in ore) in radianti, dato dalla relazione:

$$\omega = \frac{\pi}{12} \{ [t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c] - 12 \} \quad (21)$$

con:

t , ora standard all'istante centrale del periodo considerato in ore (per esempio, per l'intervallo tra le 9:00 e le 10:00 è $t=9.5$; per l'intervallo tra le 14:00 e le 15:00 è $t=14.5$); L_z è la longitudine della località geografica in cui per convenzione viene misurata l'ora standard, in gradi Ovest da Greenwich (per esempio, per Greenwich è $L_z=0^\circ$, nel nostro caso l'ora standard è misurata nel fuso orario di Parigi, per cui è $L_z=345^\circ$); L_m è la longitudine del sito di misura, in gradi Ovest da Greenwich.

S_c è una grandezza per correggere l'ora solare stagionale in ore:

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (22)$$

con b :

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (23)$$

Nota bene che è possibile che la misura istantanea della radiazione solare R_s possa superare il valore "teorico" R_{s0} in giornate parzialmente nuvolose. Questo fenomeno è causato dalla riflessione di raggi solari diretti da nubi vicine; ciò si verifica comunemente in montagna se il solarimetro è situato in una valle. In ogni caso, tali valori non possono superare la radiazione teorica per più del 20-30%, per cui ne va valutata la reale esistenza e portata tramite un confronto con i dati rilevati in istanti precedenti e/o da stazioni limitrofe.

Temperatura dell'aria

L'intervallo di variazione della temperatura dell'aria varia, ovviamente, da stazione a stazione. Esso va, dunque, ricavato dall'analisi delle serie storiche; dall'analisi dei dati lucani in nostro possesso risulta che un valore di temperatura può essere ritenuto teoricamente "accettabile" se varia tra -10°C e $+50^\circ\text{C}$. Nel caso un valore misurato cada al di là di questi limiti è necessario effettuare i controlli formali descritti nei paragrafi successivi (variabilità interannuale, persistenza temporale e coerenza spaziale).

Umidità dell'aria

Poiché la pressione di vapore è difficile da misurare si ricorre spesso a sensori elettronici per la misura diretta dell'umidità relativa in percentuale (UR). Tali sensori presentano, normalmente, difetti insiti nel processo costruttivo (isteresi, non linearità, coefficiente di calibrazione non accurato). Altri errori possono essere legati all'esposizione all'aperto del sensore, dunque a polvere, insetti, sostanze inquinanti, usura.

Se il dato di umidità relativa dell'aria è di fondamentale importanza, per il servizio che la rete agrometeorologica deve fornire, l'unico mezzo sicuro per il controllo di qualità del dato è la duplicazione del sensore. Ovvero bisogna porre due sensori identici a pochi centimetri di distanza l'uno dall'altro (WMO, 1983b; Allen, 1996), e il dato dell'uno sarà confermato o confutato dalla misura effettuata con l'altro.

Purtroppo questa è una tecnica costosa e quasi sempre impossibile da attuare nelle stazioni standard, per cui vediamo come effettuare altri controlli automatici su questa

grandezza. Un primo controllo da effettuare sull'*UR* riguarda la tendenza: normalmente, durante la giornata, l'umidità ha un andamento opposto a quello della temperatura, ovvero quando T aumenta *UR* diminuisce e viceversa.

Un altro controllo va fatto sulla temperatura di rugiada T_d (°C), variabile legata alla pressione parziale di vapore dell'aria (e). Partiamo dalla considerazione che e è esprimibile tramite l'umidità relativa (*UR*) e la pressione di vapor saturo alla temperatura, $e_s(T)$ (kPa), come:

$$e = \frac{UR}{100} e_s(T) \quad (24)$$

La relazione tra e e la temperatura di rugiada T_d (temperatura alla quale l'aria diventerebbe satura se venisse raffreddata senza che intervenga una variazione di pressione) è la seguente (Tetens, 1930):

$$T_d = \frac{116.91 + 237 \cdot \ln(e)}{16.78 - \ln(e)} \quad (25)$$

Mentre l'*UR* varia considerabilmente durante l'arco delle 24 ore e, come si è detto, in maniera opposta alla temperatura, T_d ed e sono relativamente stabili nella giornata, se non vi è avvezione (trasporto di vapore e/o calore dalle zone limitrofe alla stazione), presentando un debole andamento a "campana", nelle giornate serene, conforme all'andamento della temperatura. A meno che non vi sia un fronte umido (da valutare con altri mezzi, per esempio la pressione atmosferica) le variazioni massime di T_d da un'ora all'altra non devono superare il 20%, se ciò avviene questo può essere sintomo di malfunzionamento dell'igrometro.

Un ulteriore controllo sulla T_d va fatto anche in relazione alla temperatura minima dell'aria (T_{min}), infatti, per la maggior parte dei giorni la differenza tra T_d e T_{min} non supera i 2°C. Solo eccezionalmente, in giornate particolarmente secche e in ambienti aridi e semi-aridi in presenza di avvezione, tale differenza può raggiungere i 3°C (Allen *et al.*, 1998), valore che dunque può ritenersi un limite da non superare.

In presenza di rugiada mattutina T_d rimane molto vicina a T_{min} e in questo caso l'*UR* è vicina al 100%. Tali considerazioni sono valide anche in caso di pioggia.

Se un sensore elettronico di umidità relativa supera il valore massimo (100%) di più del 5% (ovvero sia >105%) vi è necessità di ricalibrazione e di riaggiustamento dei dati raccolti.

Velocità del vento

L'intervallo di funzionamento di un anemometro può essere posto tra 0.5 e 50 ms⁻¹ (WMO, 1983b).

Anche in questo caso, per stazioni di particolare importanza e se il dato di velocità del vento (v) è fondamentale, l'ideale sarebbe duplicare il sensore.

Particolare importanza va data alla soglia dello strumento, ovvero a quel valore minimo di v (normalmente presente nei programmi di gestione della stazione) che vince l'attrito del rotore sul corpo dell'anemometro. E' un valore dato dal costruttore, ma vanno verificati conti-

nuamente i periodi di calma (velocità del vento inferiore a 0.5 ms⁻¹) nell'arco dell'intera giornata (che normalmente sono abbastanza rari), in quanto la velocità di soglia di un anemometro è fortemente dipendente dall'usura e dall'esposizione. In pratica, se la calma è misurata per più di un'ora durante il giorno, il sensore va tenuto sotto controllo. Durante le ore notturne è possibile che i periodi di calma siano più lunghi di un'ora.

Un altro controllo necessario per la velocità del vento in una rete agrometeorologica consiste nell'effettuare il cosiddetto "bilancio di massa" per il quale è necessario mettere in relazione i valori cumulati giornalieri delle v misurate in due stazioni limitrofe. La pendenza negli andamenti di questi due cumulati non dovrebbe cambiare sensibilmente nel tempo (Allen, 1996).

Direzione del vento

L'intervallo di funzionamento va ovviamente tra 0° e 360°. Se il territorio non è omogeneo la direzione del vento (*dir*) può variare sensibilmente da stazione a stazione. Un controllo può essere fatto tra dati provenienti da stazioni limitrofe, se si è in possesso di una adeguata serie storica di misure di *dir*. Normalmente, l'orografia del territorio rende quasi sempre costante la differenza tra le *dir* misurate in stazioni limitrofe.

Controlli statistici

Dopo aver effettuato i controlli di tipo fisico sopra descritti, sia su scala oraria che, nel caso della radiazione, su scala giornaliera vanno eseguiti i controlli formali che convalidano definitivamente il dato proveniente dalla stazione (WMO, 1983a; 1983c). Si farà riferimento ai soli dati giornalieri.

Controllo sulla variabilità interannuale

Per ogni stazione, a partire da una serie storica dei dati, viene definita la "climatologia" di ogni giorno dell'anno (SIAN, 1990), come la media temporale, su tutti gli anni a disposizione, dei valori osservati nell'intervallo di 31 giorni centrato nel giorno in esame. Per esempio, la climatologia delle temperature medie di una data stazione, per il giorno 16 marzo, è la media delle osservazioni rilevate dal 1 al 31 marzo di tutti gli anni a disposizione. Dal punto di vista formale, si tratta, per la stazione x_i , di prendere la media mobile della variabile z , su n anni (a disposizione nella serie storica), di 31 giorni centrati sul giorno τ :

$$\bar{z}_{z,\tau} = \frac{1}{m} \sum_{a=1}^n \sum_{t=\tau-15}^{\tau+15} z_{sat} \quad (26)$$

con z_{sat} valore misurato dalla stazione s nell'anno a (con $a=1, \dots, m$) e giorno dell'anno t (con $t=\tau-15, \dots, \tau+15$). Si definisce "anomalia" della variabile z misurata nella stazione x_i nel giorno t_a , la differenza tra la climatologia e il valore misurato $z(x_i, \tau_a) = z_{sat}$:

$$y_{sat} = \bar{z}_{s,\tau} - z_{sat} \quad (27)$$

Per ogni stazione e per ogni giorno-tipo viene calcolata la deviazione standard delle anomalie, ovvero delle dif-

ferenze tra il valore misurato e la climatologia di stazione:

$$\sigma_{s,\tau} = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{a=1}^n \sum_{t=\tau-15}^{\tau+15} y_{sat}^2} \quad (28)$$

Il valore misurato $z(x_i, t_a)$ viene considerato sospetto se fuoriesce da un intervallo di 3 deviazioni standard, $\sigma(x_i, t)$ dalla climatologia di stazione. In altre parole il valore misurato è valido se è verificata la seguente relazione:

$$|y_{sat}| \leq 3\sigma_{s,\tau} \quad (29)$$

Controllo sulla persistenza temporale

L'analisi dell'autocorrelazione temporale del segnale mostra che il 95% della varianza viene perso dopo circa 15 giorni, e il coefficiente autoregressivo (ovvero la percentuale di varianza temporale spiegata dalla covarianza tra il giorno t e il giorno $t+1$ in ciascuna stazione x_i) è di circa il 70% d'inverno e leggermente inferiore d'estate: ciò indica una buona correlazione tra misure rilevate in giorni successivi. Per cui, generalmente, brusche variazioni nei valori osservati vengono considerate sospette, anche se nella realtà questa evenienza può verificarsi.

Viene dunque calcolata la deviazione standard, $\sigma(k, k-1)$, degli incrementi tra un giorno e il giorno precedente (che viene definita "tendenza") per tutte le sequenze di dati validi a disposizione. Si considerano sospetti quei valori la cui differenza in valore assoluto δ tra il valore della variabile al giorno k e quello nel giorno precedente $k-1$ supera di 3 volte la deviazione standard delle tendenze:

$$\delta = |z_{sat,k} - z_{sat,k-1}| \leq 3\sigma(k, k-1) \quad (30)$$

Controllo sulla coerenza spaziale

Il primo e il secondo controllo statistico danno indicazioni sulla coerenza climatologica e temporale (tra anni successivi e giorni successivi) in una singola stazione. Tuttavia, un valore ritenuto sospetto dopo questi due controlli, può essere causato da una reale anomalia meteorologica e pertanto ogni dato segnalato come sospetto deve essere confrontato con i dati rilevati nello stesso giorno dalle stazioni limitrofe (test della coerenza spaziale), in un intorno definito dal intervallo di correlazione spaziale e con un intervallo fiduciale definito dalla deviazione standard delle differenze di misura tra stazioni. Anche in questo caso la deviazione standard delle differenze tra la stazione x_i e le stazioni limitrofe x_j :

$$d_{ij} = z_{sati} - z_{saj} \quad (31)$$

viene calcolata con una media mobile su 31 giorni e mediata sulle j stazioni limitrofe.

Se un dato viene confermato da almeno una stazione limitrofa, ovvero se la differenza con il dato rilevato nella stazione limitrofa è compresa nell'intervallo fiduciale definito in precedenza, allora esso viene considerato corretto, altrimenti viene ritenuto definitivamente errato.

Questo procedimento può essere applicato tranquillamente alla verifica di tutte le variabili agroclimatiche precedentemente elencate, mentre va applicato con precauzione nel caso della pioggia, in quanto possono real-

mente verificarsi forti differenze tra le precipitazioni effettivamente cadute in stazioni limitrofe. Sono comunque da considerarsi sospetti i dati di precipitazione nulla quando nell'intorno piove.

Risultato del controllo e sostituzione dati mancanti

Se, dopo i controlli descritti in precedenza, il valore in esame dovesse risultare errato, si procede all'accensione di un segnale di dato non corretto e all'aggiunta di un valore sostitutivo opportunamente calcolato in un altro campo.

Dovendo sostituire dei valori ritenuti errati, si utilizzerà un metodo basato sull'interpolazione del dato mancante a partire dai dati presi dalle stazioni limitrofe. Si dovrà dunque tener conto del grado di correlazione del valore misurato in una stazione con quelli acquisiti nelle stazioni vicine. Vi è dunque la necessità di uno studio ad hoc sulla rete agrometeorologica lucana.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Nicola Cardinale, Domenico Fiorino e Giovanni Lazzari di Metapontum Agrobios per la stretta collaborazione nella raccolta dei dati e gestione della rete SAL e Pasquale Introna per suo prezioso contributo nella calibrazione dei sensori in campo.

Bibliografia

- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier, A., 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 4(2), 35-94.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irr. Drain Paper no. 56, Rome, 299 pp.
- Allen, R.G., 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *J. Irr. Drain. Eng.*, 122(2), 97-106.
- Fritschen, L.J., Gay, L.W., 1979. *Environmental instrumentation*. Springer-Verlag, New York, 215 pp.
- Brutsaert, W., 1982. *Evaporation into atmosphere*. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 1990. *Principles of environmental physics*, 2nd ed., Edward Arnold, London, UK.
- Schwerdtfeger, P., 1976. *Physical principles of micro-meteorological measurement*. Elsevier Sci. Pub. Co, Amsterdam, 116 pp.
- SIAN (Sistema Informativo Agricolo Nazionale), 1990. *Analisi climatologica e progettazione della rete agrometeorologica nazionale*. Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste, Direzione Generale della Produzione Agricola, aprile 1990.
- Tetens, O. 1930. *Über einige meteorologische Begriffe*. *Z. Geophys.* 6 : 297-309.
- WMO, 1981. *Guide to agricultural meteorological practices*, no. 134. Geneva, Switzerland.
- WMO, 1983a. *Document no. 8. Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Secretariat of World Meteorological Practices, Geneva, Switzerland.
- WMO, 1983b. *Document no. 49. Technical regulation Volume I, General meteorological standards and recommended practices*. Secretariat of World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- WMO, 1983c. *Document no. 100, Guide to climatological practices*. Secretariat of World Meteorological Practices, Geneva, Switzerland.