

## **RADEST 3.00: SOFTWARE PER LA STIMA DELLA RADIAZIONE SOLARE GLOBALE**

### ***RADEST 3.00: software for the estimation of the solar global radiation***

Marcello Donatelli, Gianni Bellocchi

*Istituto Sperimentale per le Colture Industriali*

*m.donatelli@isci.it; g.bellocchi@isci.it*

#### **Riassunto**

RadEst3.00 stima la radiazione globale moltiplicando la trasmittanza atmosferica (stimata dalla temperatura dell'aria) per la radiazione potenziale. Quattro modelli stimano la trasmittanza: Bristow-Campbell, Campbell-Donatelli, Donatelli-Bellocchi, DCBB. I modelli possono essere calibrati iterativamente dai dati misurati. Le stazioni geo-referenziate sono mostrate su mappa. Strumenti statistici e grafici consentono la valutazione di stime e *trend* pluriennali nelle misure. Errori sistematici possono essere rilevati e corretti. Stime e misure radiative possono essere utilizzate per calcolare l'evapotraspirazione potenziale (modelli Priestley-Taylor e Penman-Monteith). I risultati sono riportati su *file* .MDB esportabili in formati diversi. Procedure di *batch run* consentono l'analisi automatizzata su gruppi di *files*.

#### **Abstract**

*RadEst3.00 estimates global radiation as a product by atmospheric transmittance (estimated from air temperature) time potential radiation. Four models estimate transmittance: Bristow-Campbell, Campbell-Donatelli, Donatelli-Bellocchi, DCBB. Model calibration is iteratively performed by measured data. Geo-referenced stations can be shown on a map. Statistical and graphical tools allow evaluating both estimates and multi-year trends in the measurements. Systematic errors can be detected and corrected. Potential evapotranspiration (models Priestley-Taylor and Penman-Monteith) is calculated by estimated and measured radiation. Results are reported by .MDB files, and exported over a variety of formats. Batch run procedures allow analysing a large amount of files.*

#### **Introduzione**

La disponibilità di dati climatici costituisce uno dei principali vincoli allo sviluppo di ricerche nell'ambito di numerose discipline. Nel settore agronomico le condizioni climatiche di una data zona

determinano i livelli produttivi delle colture, e dati climatici giornalieri sono usualmente richiesti per studi di tipo idrologico, per la modellazione di sistemi colturali, per valutazioni agro-ambientali, ecc.

Tra i dati climatici, particolare importanza riveste la radiazione solare, che costituisce la sorgente energetica per la fotosintesi e l'evapotraspirazione, e rappresenta un *input* di base per i modelli di simulazione della crescita delle colture.

Il numero delle stazioni che registrano al suolo la radiazione giornaliera è molto limitato se comparato al numero di quelle che registrano temperatura e piovosità (Running et al., 1987; Thornton and Running, 1999; Scheifinger e Kromp-Kolb, 2000). Inoltre, in molte località anche le stazioni abilitate lavorano in modo irregolare. Queste condizioni costituiscono una grave limitazione per molti studi agronomici e impongono la necessità di stime accurate di radiazione solare laddove le misure siano assenti o di scarsa qualità. Questa necessità è cresciuta nel tempo, con l'ampliamento degli obiettivi della ricerca in campo agronomico e ambientale da scale spaziali di tipo puntuale (es., parcella) verso scale territoriali (es., bacino idrologico) (Thornton and Running, 1999). Peraltro, anche l'utilizzo di immagini da satellite per la stima della radiazione al suolo rimane ancora una possibilità molto ristretta, dati i vincoli tecnici e le risorse economiche richieste (Iehlé et al., 1997).

La ricostruzione di dati di radiazione solare giornaliera a partire da dati climatici più facilmente reperibili è un processo iniziato fin dagli anni '20, con gli approcci basati sull'eliofania (Ångström, 1924). Tuttavia, solo a partire dai primi anni '80 sono emersi gli approcci più consistenti, basati sulla temperatura atmosferica. Bristow e Campbell (1984) individuarono la relazione esponenziale che lega la trasmittanza della radiazione solare attraverso l'atmosfera all'escursione termica giornaliera in superficie. Il modello che ne è derivato è stato impiegato in numerosi studi e ha subito modifiche successive. In particolare, nei modelli di Donatelli e Marletto (1994) e di Donatelli e Campbell (1998) è stato introdotto un fattore di correzione di effetti stagionali tipicamente registrati a latitudini temperate. Più recentemente, Donatelli e Bellocchi (2000) hanno

introdotto un fattore di correzione più generale, per correggere anche gli effetti stagionali tipici delle latitudini tropicali.

I modelli menzionati hanno costituito la base per la creazione del *software* RadEst. La versione qui presentata (RadEst3.00) utilizza i modelli Bristow-Campbell (BC), Campbell-Donatelli (CD) e Donatelli-Bellocchi (DB). I tre modelli sono stati testati con *data set* pluriennali provenienti da 200 stazioni site a diversa latitudine. RadEst3.00 include anche un quarto modello (DCBB), di tipo modulare, che incorpora le caratteristiche dei precedenti e si presta a studi sito-specifici. Il software e materiale informativo sono accessibili tramite il sito: <http://www.isci.it/RadEst>.

### **Descrizione del programma**

La versione 3.00 di RadEst permette di eseguire stime giornaliere di radiazione solare globale a una data latitudine mediante quattro modelli e di valutare i risultati ottenuti.

Tutti i modelli stimano la trasmittanza atmosferica della radiazione globale, utilizzando l'escursione termica giornaliera. Il valore di radiazione solare è calcolato dal prodotto tra la trasmittanza stimata e la radiazione solare all'esterno della atmosfera. Il programma include *utility* grafiche e procedure statistiche per la valutazione delle stime effettuate contro un anno o più anni di misure. La valutazione statistica, affidata a un *set* di indici statistici, può essere fatta sia sui valori giornalieri che sulle medie decadali.

I parametri dei modelli possono essere stimati attraverso procedure iterative di ottimizzazione, minimizzando il valore dei residui (parametro *b* di tutti i modelli) e la presenza di *pattern* nei residui in rapporto alla temperatura minima (parametro *Tnc* del modello CD) o al giorno dell'anno (parametri *c1* e *c2* del modello DB).

I valori stimati possono essere salvati come *file* ASCII. Errori sistematici nelle misure di radiazione possono essere individuati e corretti. Il programma include la stima dell'evapotraspirazione di riferimento mediante i modelli di Priestley-Taylor (versione modificata da Steiner et al., 1991) e Penman-Monteith (Monteith, 1965), utilizzando per il calcolo i valori stimati e misurati di radiazione. I risultati delle analisi sono riportati su *file* .MDB,

esportabili in una molteplicità di formati (MS Excel, HTML, ecc.). Procedure di tipo *batch run* consentono di elaborare facilmente un numero elevato di *file*. L'interfaccia del programma è di facile approccio per l'utente, permettendo facilmente il caricamento degli *input*, la calibrazione dei parametri, la preparazione e l'esecuzione delle simulazioni (singole o in *batch run*), la selezione degli *output* e la produzione dei *report*.

### ***Input e Output***

I *file* di *input*, di tipo ASCII (.DAT), includono dati climatici giornalieri di un anno secondo il formato CropSyst/ClimGen (Stöckle et al., 2000; Stöckle and Nelson, 2001). I dati richiesti per la preparazione del *file* di *input* sono, essenzialmente, il giorno dell'anno (*doy*), la piovosità (*Rain*), la temperatura massima (*Tmax*) e la temperatura minima (*Tmin*). *Rain* non è usata per i calcoli di *RadEst* e può essere sostituita da valori generici. In aggiunta, il *file* può contenere la radiazione solare (*Rad*), l'umidità relativa massima (*RHmax*) e minima (*RHmin*) e la velocità del vento (*WSpeed*). *Rad* è usata per la valutazione dei modelli e la stima dei parametri. Le variabili *RHmax*, *RHmin* e *WSpeed* possono essere impiegate per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento secondo il metodo di Penman-Monteith.

Un campione di *data set* annuali è fornito insieme al programma.

Gli *output* sono salvati su *file* .GEN (stime) o .ERR (stime e misure).

### **Modelli**

L'approccio generale implementato in *RadEst* per la stima della radiazione solare è il seguente:

$$\text{Rad} = t_{t_i} \cdot R_{\text{pot}}$$

dove  $t_{t_i}$  è la trasmittanza atmosferica al giorno  $i$ ,  $R_{\text{pot}}$  è la radiazione potenziale.  $R_{\text{pot}}$  è calcolata utilizzando *routine* generali (Swift, 1976; Bristow e Campbell, 1984; Campbell e Norman, 1998). Per la stima della trasmittanza atmosferica possono essere utilizzati, alternativamente, i seguenti quattro modelli:

---

Modello BC	$tt_i = \tau \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T_i^c}{\Delta T_m}\right) \right]$
Modello CD	$tt_i = \tau \cdot \left[ 1 - \exp(-b \cdot f(T_{avg}) \cdot \Delta T_i^2 \cdot f_1(T_{min})) \right]$
Modello DB	$tt_i = \tau \cdot [1 + f(\text{doy})] \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T_i^2}{\Delta T_w}\right) \right]$
Modello DCBB	$tt_i = \tau \cdot [1 + f(\text{doy})] \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T_i^2 \cdot f_2(T_{min})}{\Delta T_{avg}}\right) \right]$

---

$\tau$ =coefficiente di trasmittanza con cielo sereno

$i$ =giorno dell'anno

$\Delta T = T_{\max_i} - (T_{\min_i} + T_{\min_{i+1}})/2$

$\Delta T_m = \Delta T$  media mensile (fissa)

$\Delta T_w = \Delta T$  media settimanale (mobile)

$\Delta T_{avg} = \Delta T_m$  o  $\Delta T_w$

$f(T_{avg}) = 0.017 \cdot \exp[\exp(-0.053 \cdot T_{avg})]$

$T_{avg} = (T_{\max_i} + T_{\min_i})/2$

$f_1(T_{min}) = \exp(T_{min}/T_{nc})$

$f_2(T_{min}) = 1$  o  $\exp(T_{min}/T_{nc})$

$f(\text{doy}) = c_1 \cdot [\sin(i_r \cdot \pi/180 \cdot c_2) + \cos(i_r \cdot \pi/180 \cdot f(c_2))]$

$i_r = i$  o  $(361-i)$

$f(c_2) = 1 - 1.90 \cdot c_3 + 3.83c_3^2$

$b, c, c_1, c_2, T_{nc}$  sono parametri empirici

---

### ***Database delle località***

Il *core* del programma è il *database* delle stazioni meteorologiche (*file* MS Access), che include le informazioni relative al sito di interesse (latitudine, longitudine, altitudine, coefficiente di trasmittanza con cielo sereno) e viene utilizzato per l'esecuzione dei calcoli. La trasmittanza giornaliera può essere stimata per ciascuna località mediante uno dei modelli inclusi in RadEst, dopo aver assegnato valori appropriati ai parametri. I valori dei parametri possono essere salvati nel *database* delle località. Se sono disponibili dati di radiazione per uno o più anni, il programma permette di stimare i parametri di ciascun modello mediante procedure di

ottimizzazione (con l'eccezione del parametro  $c$  del modello Bristow-Campbell, generalmente fissato pari a due, Donatelli, 1995).

### **Ottimizzazione dei parametri**

Tutti i modelli utilizzano l'escursione termica giornaliera per stimare la radiazione solare attraverso il parametro principale  $b$ . Le funzioni che usano i parametri  $T_{nc}$ ,  $c_1$  e  $c_2$  aggiustano le stime in base a effetti stagionali. Il carattere empirico dei parametri e la parziale auto-correlazione che li caratterizza rendono critica la stima, dato che in alcune condizioni le soluzioni possono essere molteplici. RadEst include *utility* per l'ottimizzazione dei parametri che permettono di attenuare il problema della auto-correlazione.

Date le diverse finalità per cui i vari parametri sono stati inclusi nei modelli, l'ottimizzazione automatica minimizza differenti "funzioni di costo", cioè differenti indici statistici:

- il parametro  $b$  è calibrato minimizzando il valore di RMSE;
- il parametro  $T_{nc}$  è calibrato minimizzando il valore di PITmin;
- i parametri  $c_1$  e  $c_2$  sono calibrati minimizzando il valore di PIDoy.

Queste procedure derivano dal fatto che il parametro  $b$  è responsabile per l'ammontare globale dei residui,  $T_{nc}$  ha il significato di controllare i *pattern* dei residui vs. la temperatura minima, mentre  $c_1$  e  $c_2$  controllano i *pattern* dei residui nel corso dell'anno.

Nel processo di calibrazione è opportuno stimare innanzitutto il parametro principale (cioè  $b$ ), successivamente i parametri della stagionalità.

### **Analisi dei risultati**

Quando si eseguono le stime di radiazione, il programma consente di valutarne l'accuratezza mediante un insieme di indici statistici:

- numero di dati usati;
- pendenza della regressione stimati vs. misurati;
- intercetta della regressione stimati vs. misurati;
- $r^2$ : bontà dell'adattamento della regressione stimati vs. misurati;
- RMSE: deviazione standard (e.g., Fox, 1981);
- RMSEs: componente sistematica di RMSE (e.g., Willmott, 1981);
- CV: coefficiente di variazione (e.g., Loague and Green, 1991);

- ME: efficienza della modellazione (e.g., Loague and Green , 1991);
- CRM: coefficiente di massa residua (e.g., Loague and Green , 1991);
- Pldoy: indice di *pattern* dei residui vs. il giorno dell'anno (Donatelli et al., 2000);
- PITn: indice di *pattern* dei residui vs. la temperatura minima (Donatelli et al., 2000).

Viene anche calcolato un indice integrato, per aggregazione di indici diversi in base alle regole della logica *fuzzy* (Bellocchi et al., in revisione).

L'interpretazione dei risultati è inoltre agevolata da alcuni strumenti grafici: Rad stimata vs. Rad misurata, trasmittanza stimata vs. trasmittanza misurata, residui vs. diverse variabili indipendenti.

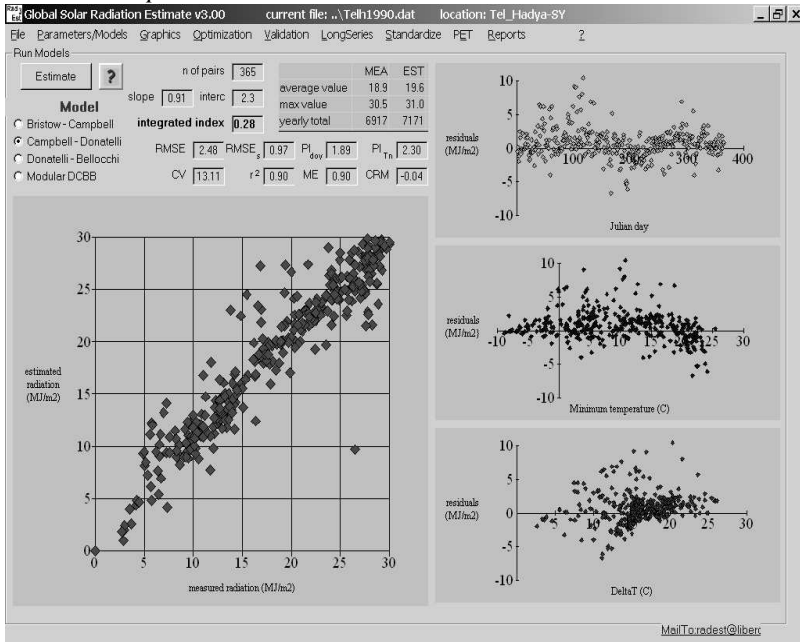
Come esempio, si veda la figura 1, in cui sono mostrati i risultati di una stima eseguita a Tel Hadya (Siria) con il modello Campbell-Donatelli.

RadEst esegue anche la valutazione delle stime su più anni. In figura 2 sono riportati i risultati delle stime eseguite su tre anni a Tel Hadya (Siria) con il modello Campbell-Donatelli.

### **Standardizzazione dei dati affetti da errori sistematici**

Il programma include una *utility* , designata come RadStandardize, che permette di standardizzare i dati di radiazione, assumendo come riferimento una media dei cinque valori più alti dell'anno pari a  $31 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Valori superiori a  $35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sono esclusi dal computo. L'assunzione di fondo è che un errore sistematico influenza i dati che, pertanto, devono essere aggiustati moltiplicandoli per un fattore di proporzionalità, calcolato o definito dall'utente. I nuovi *file* sono salvati aggiungendo 'STD' al nome originale del *file*. Alcune opzioni grafiche permettono di valutare i dati standardizzati.

Figura 1 – Indici statistici e grafici relativi alla stima della radiazione solare globale relativa a Tel Hadya (Siria), anno 1990, eseguita con il modello Campbell-Donatelli.

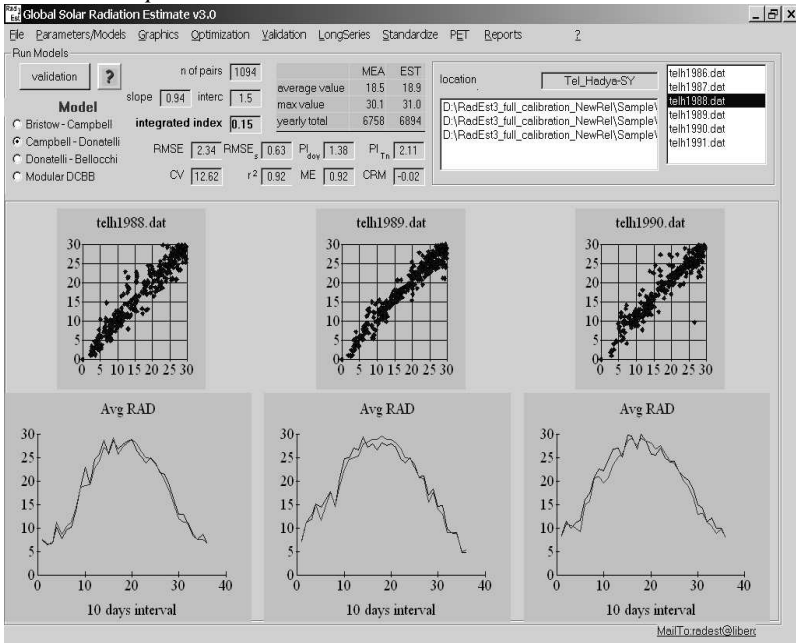


## Mappatura delle stazioni

Le stazioni geo-referenziate possono essere visualizzate su mappa, caricando le stazioni dal *database* di RadEst e creando uno *shape file* ESRI, che viene sovrapposto a una porzione di territorio. Le aree su mappa possono essere selezionate, messe in risalto tramite *zoom* ed esportate creando uno *shape file* contenente solo le stazioni incluse nell'area individuata.



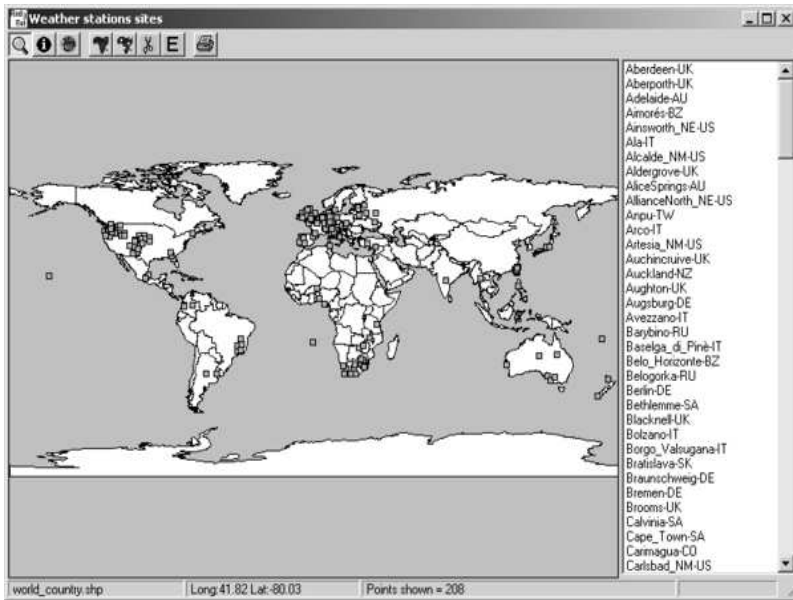
Figura 2 – Indici statistici e grafici relativi alla stima della radiazione solare globale relativa a Tel Hadya (Siria), anni 1988-1990, eseguita con il modello Campbell-Donatelli.



### Creazione dei report

RadEst3.00 include numerose opzioni di *reporting*. Dopo avere eseguito una stima della radiazione solare (con uno dei modelli disponibili) il programma crea un *database* nel formato di MS Access. Il *database* contiene diverse tabelle che includono i risultati dell'analisi su uno o più anni. Stime successive vengono riportate in un nuovo *database* che sovrascrive il precedente. I *report* possono essere esportati in una varietà di formati diversi (.XLS, .RTF, .HTML, ecc.)

Figure 3 - Distribuzione su mappa delle stazioni meteorologiche del database di RadEst.



## Bibliografia

- Ångström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quart. Jou. of the Royal Meteorol. Soc.* 50, 121-125.
- Bellocchi, G., Acutis, M., Fila, G., Donatelli, M., 2001. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. *Agron. J.* (in revisione).
- Bristow, K.L., Campbell, G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.* 31, 159-166.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. An introduction to environmental biophysics, II edition. Springer, New York, NY.
- Donatelli, M., 1995. Sistemi nella gestione integrata delle colture. PANDA project, General Series, Paper 1, ISA, Modena, Italy.
- Donatelli, M., M. Acutis, Bellocchi, G., 2000. Two statistical indices to quantify patterns of errors produced by models. In: *Proceedings of the 3rd International Crop Science Conference, Hamburg, Germany*, p. 186.

- Donatelli, M., Bellocchi, G., 2000. New methods to estimate daily global solar radiation. Proc. 3rd International Crop Science Conference, 17-22 August, Hamburg, Germany, p. 186.
- Donatelli, M., Campbell, G.S., 1998. A simple model to estimate global solar radiation. Proc. 5th Congress of the European Society for Agronomy, Nitra, Slovakia, II, pp. 133-134.
- Donatelli, M., Marletto, V., 1994. Estimating surface solar radiation by means of air temperature. Proc. 3rd Congress of the European Society for Agronomy, Padova, Italy, pp. 352-353.
- Fox, D.G., 1981. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 62, 599-609.
- Iehlé, A., Lefèvre, M., Bauer, O., Martinoli, M., Wald, L., 1997. Meteosat: A valuable tool for agro-meteorology. Study report, Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. J. Contam. Hydrol. 7:51-73.
- Monteith, J. 1965. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil. Tans. Res. Soc. London, 281, 277-329.
- Running, S.W., Nemani, R.R., Hungerford, R.D., 1987. Extrapolation of synoptic meteorol. data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis. Can. J. For. Res. 17, 472-483.
- Scheifinger, H., Kromp-Kolb, H., 2000. Modelling global radiation in complex terrain: comparing two statistical approaches. Agr. For. Meteorol. 100, 127-136.
- Steiner, J.L., Howell, T.A., Schneider, A.D., 1991. Lysimetric evaluation of pot.evapotranspiration models for grain sorghum. Agron. J. 83, 240-247.
- Stöckle, C.O., Campbell, G.S., Nelson, R.L., Castellví, F., Donatelli, M., 2000. ClimGen, a weather generator program. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.
- Stöckle, C.O., Nelson, R.L., 2001. CropSyst, cropping systems simulator. User's online manual. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.
- Swift, L.W., 1976. Algorithm for solar radiation estimation on mountain slopes. Wat. Resour. Res. 12, 108-112.
- Thornton, P.E., Running, S.W., 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. Agr. For. Meteorol. 93, 211-228.
- Willmott, C. J., 1981. On the validation of models. Phys. Geogr. 2, 184-194.