

STUDIO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO NEI COMPENSORI IRRIGUI DELLE REGIONI OBIETTIVO 1. USO INTEGRATO DELLE FORMULE DI HARGREAVES-SAMANI E PENMAN-MONTEITH

Giovanni Dal Monte¹, Luigi Perini¹, Filippo Thiery^{1,2}

¹Ufficio Centrale di Ecologia Agraria - Mi.P.A.F., Via del Caravita 7/a, 00186 Roma,
Tel. 06/6793804 - 06/6793376, Fax 06/69941564, E-Mail ucea@flashnet.it

²Istituto Nazionale di Economia Agraria, Roma

Riassunto - L'applicazione di un modello di bilancio idrico per la stima dei fabbisogni irrigui a vasta scala richiede come strato informativo essenziale una banca dati agrometeorologica che permetta di individuare zone omogenee per i valori dell'evapotraspirazione di riferimento.

Il primo obiettivo che il presente studio si è posto è stato quello del reperimento dei dati meteorologici, valutando la loro affidabilità e verificando che le misurazioni siano avvenute con continuità nel corso di un numero di anni sufficiente a caratterizzare la climatologia di ogni sito. Poiché la trattazione di una tematica tipicamente a scala locale come quella irrigua richiede l'utilizzo di una rete di rilevamento generalmente più fitta di quella disponibile a livello nazionale, si è proceduto all'acquisizione dei dati presenti anche a livello regionale e locale.

La quantità e il tipo dei dati reperiti hanno condizionato la scelta del metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento. I metodi combinati sono da considerarsi più attendibili dei metodi empirici termometrici o radiativi, ma richiedono dati relativi a un maggior numero di parametri. Al fine di utilizzare al meglio le informazioni disponibili in ciascuna stazione di rilevamento, si è deciso di impiegare in maniera integrata un metodo di tipo termometrico (Hargreaves-Samani) e un metodo di tipo "combinato" (Penman-Monteith): i risultati del metodo combinato, ottenuti sui siti aventi una sensoristica più completa, sono stati utilizzati per calibrare i parametri della formula empirica utilizzata nei siti più poveri di dati.

***Abstract** - The use of water balance models to calculate irrigation requirements on a large scale needs suitable agrometeorological data base as basic condition.*

In this work we have used the "National Agrometeorological Data Bank" information; to increase the spatial resolution, we have acquired data also from regional and local meteorological networks. The availability of meteorological data conditions the choice of reference evapotranspiration model: "combined" models are more reliable and accurate than thermometric or radiative empirical models, but they need many parameters as input data.

In order to make the most of data available on each meteorological station, we have utilized, in a integrated manner, a thermometric model (Hargreaves-Samani) and a "combined" model (Penman-Monteith): the output of "combined" model, applied on the stations with more surveyed parameters, has been utilized to calibrate the coefficients of the thermometric model, applied on the thermometric stations.

INTRODUZIONE

La Commissione Europea, il Ministero dei Lavori Pubblici e il Ministero delle Politiche Agricole e Forestali hanno affidato all'Istituto Nazionale di Economia Agraria (INEA) un'indagine sull'uso irriguo della risorsa idrica nel Mezzogiorno, per avere informazioni utili ai fini della programmazione degli interventi nel settore. Tale esigenza si è concretizzata nel Programma Operativo Multiregionale (POM) "Ampliamento e adeguamento della disponibilità e dei sistemi di adduzione e di distribuzione delle risorse idriche nelle Regioni dell'Obiettivo 1" (QCS 1994/99 - Reg. CEE 2081/93), dove agli interventi strutturali è stata affiancata una specifica iniziativa (Sottoprogramma III, Misura 3) di monitoraggio e di analisi, denominata "Studio sull'uso irriguo della risorsa idrica, sulle produzioni agricole irrigate e sulla loro redditività".

Il programma di attività previsto per la realizzazione della misura in questione prevede una azione specifica riguardante la stima dei fabbisogni idrici per uso irriguo, finalizzata alla attuazione di una analisi critica dei consumi idrici stagionali delle colture. L'obiettivo è la definizione di un Sistema di Supporto alle Decisioni in grado di individuare zone omogenee per i valori dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) e di calcolare il bilancio idrico nell'ambito delle otto regioni oggetto dello studio. Lo schema metodologico scelto per il conseguimento di questo risultato prevede la costituzione di tre banche dati (agrometeorologica, pedologica e culturale) che costituiscano un *input* per un opportuno modello di bilancio idrico. Nell'ambito di questa azione l'INEA ha chiesto il contributo dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria sia per la costituzione della banca dati agrometeorologica, sia per la scelta, l'applicazione e la validazione del metodo di calcolo dell' ET_0 . Il presente lavoro illustra le metodologie utilizzate e i risultati finora ottenuti.

MATERIALI E METODI

Per quanto riguarda il reperimento dei parametri meteorologici necessari al calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento, i dati della Banca Dati Agrometeorologica Nazionale, provenienti dalle reti dell'Aeronautica Militare, del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale e dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria, sono stati integrati con quelli derivanti da una ricognizione delle risorse presenti a livello locale e regionale (Servizi Agrometeorologici Regionali e Consorzi di Bonifica). All'interno di questo variegato insieme di risorse sono state individuate come interessanti ai fini del progetto le stazioni per cui risultino disponibili almeno dieci anni di rilevazioni dei parametri richiesti, in modo da permettere la ricostruzione di un dato medio sufficientemente rappresentativo della climatologia dei siti in esame. Rispetto alla definizione del trentennio come finestra temporale *standard* per caratterizzare le condizioni climatiche di un sito, il criterio qui scelto è evidentemente un compromesso con l'esigenza di avere a disposizione un numero di punti di rilevamento sufficiente per una spazializzazione del dato a scala locale.

Per quanto riguarda il calcolo dell' ET_0 , la formula ormai considerata come riferimento *standard* è senz'altro quella di Penman-Monteith (Monteith *et al.*, 1990; Choisnel *et al.*, 1992), così come recepita in ambito FAO (Jensen *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1998). Si tratta di un metodo di tipo "combinato", cioè che tiene conto sia di un termine radiativo che di uno aerodinamico, in modo da schematizzare i processi di trasferimento di massa ed energia fra la coltura e l'ambiente circostante. Nella sua formulazione più generale

(relativa cioè al calcolo dell'evapotraspirazione potenziale di una generica coltura in date condizioni atmosferiche) l'equazione di Penman-Monteith può essere così espressa:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \cdot (R_N - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma^*)} \cdot \frac{(e_s - e_a) \cdot u_2}{r_a u_2} \cdot 8.64 \cdot 10^3 \quad (1)$$

dove il primo termine a secondo membro (componente radiativa) tiene conto dell'energia necessaria al passaggio di stato dell'acqua, mentre il secondo termine (componente aerodinamica) tiene conto dei meccanismi che consentono e controllano la perdita di vapore acqueo da parte della coltura. Nella formula (1) R_N e G sono rispettivamente la radiazione netta totale giornaliera e il flusso di calore nel suolo espressi in KJm^{-2} , e_s e e_a sono rispettivamente la tensione di vapore dell'aria alla saturazione e alle condizioni misurate, espresse in KPa , Δ è la pendenza della curva $e_s(T)$ in $KPa^{\circ}C^{-1}$, λ è il calore latente di evaporazione dell'acqua in $KJKg^{-1}$, ρ è la densità dell'aria in Kgm^{-3} , c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante in $KJKg^{-1}^{\circ}C^{-1}$, u_2 è la velocità del vento a 2 m in ms^{-1} ed infine $\gamma^* = \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)$ ove γ è il coefficiente psicrometrico in $KPa^{\circ}C^{-1}$, mentre r_c e r_a sono rispettivamente la resistenza del manto vegetale e quella aerodinamica al flusso di vapore, espresse in sm^{-1} . Il primo membro della (1) è espresso in mm di acqua giornalieri.

Nel calcolo dei vari termini intervengono i parametri astronomici relativi al giorno dell'anno considerato, i parametri culturali (Leaf Area Index, altezza della coltura, albedo) e i parametri meteorologici misurati (valori estremi di temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, velocità del vento, radiazione solare giornaliera). La scelta attualmente raccomandata dagli esperti FAO è quella di lavorare nel *two-step-approach*, utilizzando cioè i valori dei parametri relativi alla coltura scelta come *standard* di riferimento per calcolare l' ET_0 (funzione a questo punto solo dalle variabili meteorologiche) ottenendo poi l'evapotraspirazione potenziale della specifica coltura (ET_c) tramite semplice moltiplicazione per un appropriato coefficiente culturale (K_c) dipendente essenzialmente dal tipo e dal grado di sviluppo del manto vegetale in esame (Doorenbos *et al.*, 1977). Il presente lavoro è come detto finalizzato alla completa definizione e determinazione del primo passo di questa metodologia a due gradini, per cui la formula (1) è stata utilizzata con i valori dei parametri culturali relativi al prato di riferimento.

La numerosità dei parametri richiesti, però, rende possibile l'applicazione della formula solo al ristretto numero di stazioni che rilevano tutti i dati necessari. Se poi, come nel nostro caso, si richiede anche una serie storica di almeno dieci anni, il numero di stazioni utili si restringe ulteriormente. Tra i metodi di stima dell' ET_0 che richiedono parametri di più diffusa rilevazione, la formula di Hargreaves-Samani (Hargreaves *et al.*, 1982, Choisnel *et al.*, 1992) si segnala per la sua semplicità di applicazione e per la bontà dei suoi risultati a scala decennale o maggiore (Dal Monte *et al.*, 1995). Si tratta di una formula di tipo "termometrico", basata cioè sulla correlazione empirica tra il volume d'acqua evaporato e la temperatura dell'aria secondo la seguente equazione:

$$ET_0 = C R_a (T + 17.8) \sqrt{\Delta T} \quad (2)$$

ove C è una costante empirica che in letteratura assume in genere un valore pari a 0.0023, R_a indica la radiazione extraterrestre in millimetri di acqua evaporata al giorno, mentre T e ΔT sono rispettivamente la temperatura media e la differenza fra temperatura minima e massima nel periodo di osservazione, espresse ovviamente in °C. Anche in questo caso il risultato del volume d'acqua evaporato è espresso in mm giornalieri.

Per utilizzare al meglio le risorse disponibili in ciascun sito di rilevamento, si è scelto di integrare i due metodi di calcolo, applicando il metodo di Hargreaves-Samani a tutte le stazioni presenti nella banca dati costituita, e parallelamente utilizzando la formula di Penman-Monteith dove fossero disponibili anche i dati aggiuntivi richiesti da questo metodo. La presenza su alcune stazioni dei dati di ET_0 calcolati con entrambi i metodi permette di calibrare il coefficiente empirico C della formula di Hargreaves-Samani sulla base del confronto regressivo con i dati ottenuti secondo Penman-Monteith. Le figure seguenti mostrano, per una stazione scelta a titolo di esempio (l'osservatorio di Napoli dell'Aeronautica Militare, con dati 1961-1990) la semplice procedura scelta per effettuare tale calibrazione.

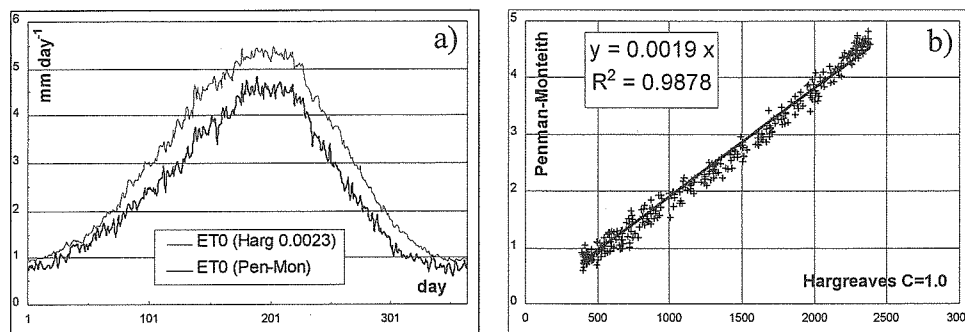


Figura 1. Calibrazione della formula di Hargreaves-Samani (vedi testo).
Figure 1. Calibration of Hargreaves-Samani formula (see text).

La figura 1a) evidenzia come il valore di C suggerito in letteratura porta ad una curva di evapotraspirazione giornaliera che si discosta sensibilmente dal risultato ottenuto applicando il metodo combinato di Penman-Monteith (nel caso specifico sovrastimandolo). Assumendo quest'ultimo come metodo più affidabile, in grado di simulare più realisticamente i processi fisici in atto nel sistema pianta-atmosfera, lo si può facilmente utilizzare come riferimento per tarare la procedura di Hargreaves-Samani.

La figura 1b) mostra la regressione esistente tra la ET_0 calcolata con la formula di Penman-Monteith ed il valore dell'espressione (2) in cui sia posto $C=1$. Il coefficiente angolare della retta che, in base al metodo dei minimi quadrati ed imponendo una intercetta nulla, meglio interpola la serie di dati fornisce quindi la migliore stima del coefficiente C da utilizzare nella formula di Hargreaves-Samani per ottenere una curva di ET_0 quanto più possibile sovrapposta a quella derivante dalla formula di Penman-Monteith. Il valore di C da utilizzare nel caso in esame è 0.0019.

I due grafici della figura 2 mostrano -rispettivamente su base giornaliera e mensile- il confronto tra i risultati delle due formule, avendo stavolta utilizzato per quella di Hargreaves-Samani il nuovo valore del coefficiente C . L'alto valore del coefficiente di

correlazione (nel caso mostrato $R^2 = 0.988$) giustifica quantitativamente l'approccio seguito. Il coefficiente C così calibrato su una stazione viene poi utilizzato per ricalcolare l' ET_0 secondo Hargreaves-Samani in tutte le stazioni limitrofe.

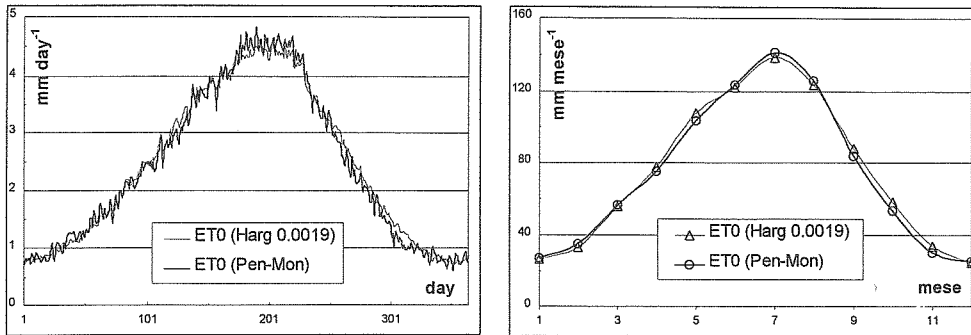


Figura 2. Calibrazione della formula di Hargreaves-Samani: ET_0 ricalcolata con il nuovo valore del coefficiente C (vedi testo).

Figure 2. Calibration of Hargreaves-Samani formula: ET_0 recalculated with the new value of coefficient C (see text).

Le due formule appena discusse sono state applicate ai dati meteorologici giornalieri, ottenendo quindi un valore dell'evapotraspirazione di riferimento per ogni giorno dell'anno. Sia in base agli scopi del progetto, sia in base alla scala di validità delle formule utilizzate (in particolare quella di Hargreaves-Samani), il passo temporale più appropriato per esprimere i totali di evaporato in mm di acqua è risultato essere la decade. Quindi per ogni stazione era necessario ottenere 36 valori medi (o "climatici") di evapotraspirazione, uno per ogni decade dell'anno, calcolati su tutta la serie storica disponibile. Per ridurre la mole di dati da trattare e i tempi di elaborazione si è voluto valutare, con una serie di test, l'errore che si commette calcolando l' ET_0 sui valori dei parametri meteorologici giornalieri già mediati sull'intera serie storica disponibile, piuttosto che effettuare il calcolo su ogni giorno della serie storica stessa e trarre il valore medio di ET_0 a posteriori (come sarebbe più rigoroso operare). A titolo di esempio si riportano in figura 3 i grafici relativi al test effettuato sull'osservatorio di Pescara dell'Aeronautica Militare (dati 1977-1986), che autorizzano a ritenere valido il primo approccio senza commettere errori che risultino significativi nel contesto degli scopi del progetto. Tale risultato è piuttosto scontato per quanto riguarda la formula di Hargreaves-Samani, la cui forma funzionale presenta solo una debole deviazione dalla linearità, mentre assume un significato meno banale per la più complessa formula di Penman-Monteith.

Poiché in diverse stazioni l'unico dato mancante per applicare la formula di Penman-Monteith è la radiazione solare, ma spesso sono disponibili i dati di eliofania, si pone la questione di stimare il primo parametro a partire dal secondo. Lo schema che ci si è proposti di utilizzare è quello della formula di Angström, cioè una regressione lineare tra le due quantità opportunamente normalizzate (Choisnel *et al.*, 1992). I valori consigliati in ambito FAO per l'intercetta e la pendenza sono rispettivamente $a=0.25$ e $b=0.50$ (Allen *et al.*, 1998), ma come contributo originale da parte di questo progetto si è ritenuto

interessante controllare ed eventualmente migliorare tali valori, adattandoli alla peculiarità delle regioni oggetto dello studio ed utilizzando ovviamente a tale proposito i dati delle stazioni in cui siano attivi sia il sensore di eliofania che quello di radiazione solare.

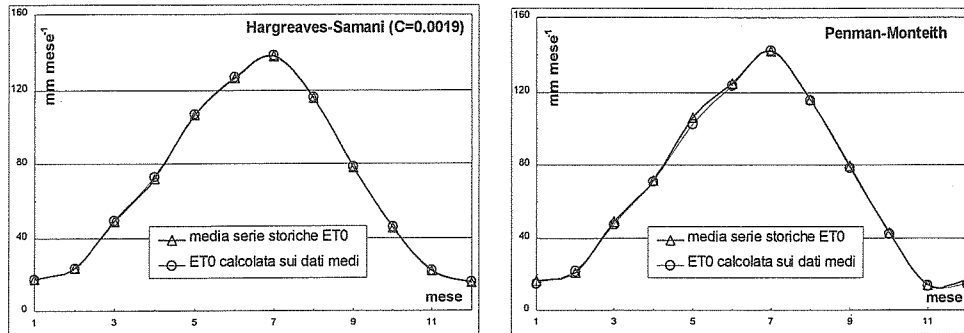


Figura 3. Confronto delle ET_0 calcolate nei due diversi approcci (media delle ET_0 calcolate sulla serie storica e ET_0 calcolata sui dati medi del decennio).

Figure 3. Comparison of ET_0 calculated by two different ways (average of ET_0 calculated with time series data and ET_0 calculated with average data).

La figura 4 è relativa all'osservatorio di Messina dell'Aeronautica Militare (dati 1958-1987) e mostra nel primo grafico la regressione tra la radiazione solare giornaliera e l'eliofania, rispettivamente normalizzate al valore della radiazione extraterrestre giornaliera e alla durata del giorno.

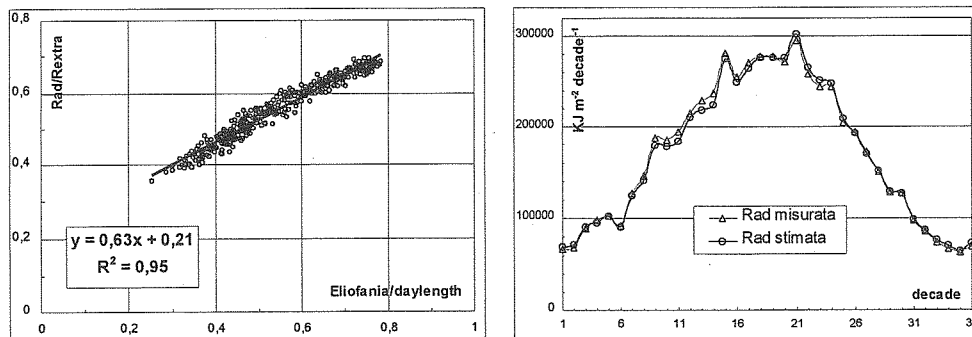


Figura 4. Stima della radiazione solare a partire dai dati di eliofania (vedi testo).

Figure 4. Solar radiation estimated by sunshine duration data (see text).

La retta di interpolazione ha un buon valore del coefficiente di correlazione ($R^2 = 0,95$) e permette di stimare i valori $a=0,21$ e $b=0,63$ per i coefficienti da utilizzare nella stima. Nel secondo grafico viene mostrato su base decadale il confronto tra la radiazione solare misurata e quella stimata con lo schema proposto, avendo utilizzato nel calcolo i

valori dei parametri ottenuti dalla regressione. Come nel caso della calibrazione del coefficiente C della formula di Hargreaves-Samani, anche queste stime dei coefficienti a e b sono state estese alle stazioni limitrofe, dove l'assenza del sensore di radiazione solare è stata così colmata utilizzando i dati di eliofania giornaliera.

RISULTATI

La banca dati complessivamente costruita comprende circa quattrocento stazioni, distribuite sulle otto regioni in esame, per le quali sono stati calcolati i dati giornalieri medi di temperatura (minima e massima) e precipitazione, sulla base delle serie storiche disponibili che, come detto, sono almeno decennali (ove possibile è stato utilizzato il trentennio 1961-1990, fissato come *standard* dalla *World Meteorological Organization*). In una trentina di stazioni sono disponibili anche i dati per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento secondo il metodo combinato di Penman-Monteith.

I dati di precipitazione saranno utilizzati in una fase successiva per il calcolo del bilancio idrico (WMO, 1997), mentre i dati relativi agli altri parametri meteorologici sono stati utilizzati per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento, coerentemente con le metodologie esposte nel paragrafo precedente. Dal punto di vista operativo, tutti gli algoritmi e le formule necessarie sono stati codificati in FORTRAN, costruendo ed ottimizzando un programma che per ogni giorno dell'anno legge in *input* i valori dei parametri meteorologici e, a seconda dei valori impostati per la latitudine della stazione in esame e per i parametri colturali (di *default* impostati come detto ai valori della coltura di riferimento), calcola il corrispondente dato giornaliero dell'evapotraspirazione di Hargreaves-Samani e (se i dati di *input* lo consentono) di Penman-Monteith. Il medesimo programma calcola le somme decadali e mensili, fornendo in output delle tabelle in formato ASCII. Oltre al dato evapotraspirativo, affiancato al dato medio di precipitazione, per ogni stazione rimangono ovviamente disponibili i parametri meteorologici utilizzati come *input* nel calcolo dell' ET_0 . Segue a titolo di esempio un estratto della tabella relativa alle medie decadali dell'osservatorio UCEA di Taranto (dati 1961-1990):

Decade	Tmin (°C)	Tmax (°C)	UR (%)	u_2 (m·s ⁻¹)	Radiazione (KJ·m ⁻² ·day ⁻¹)	Precipitazioni (mm·decade ⁻¹)	ET_0 (mm·decade ⁻¹)
1	5.8	12.3	72.9	3.1	6166.5	10.1	11.4
2	5.7	12.1	74.3	3.3	6348.6	16.2	11.4
...
17	17.8	26.6	60.8	2.7	23359.9	6.0	49.5
18	19.3	28.5	57.9	2.8	24460.9	4.2	55.0
...
35	7.1	13.7	74.0	3.3	5908.4	17.3	11.8
36	6.6	13.2	74.5	3.1	5969.2	18.5	11.9

Le procedure di calibrazione dei vari coefficienti sono state invece automatizzate tramite opportuna impostazione di una serie di fogli di calcolo Excel tra loro collegati. E' stato in particolare possibile effettuare la calibrazione del coefficiente C in una trentina di

stazioni, dislocate sul territorio a coprire tutte e otto le regioni, e i risultati di tale procedura sono stati estesi su base regionale a tutte le altre stazioni.

CONCLUSIONI

L'integrazione delle risorse della Banca Dati Agrometeorologica Nazionale con quelle raccolte a livello locale ha permesso di costituire una base di dati meteorologici utile a stimare i valori climatici decadal dell'evapotraspirazione di riferimento e della precipitazione, parametri che sono alla base di ogni tipo di bilancio idrico, in quasi quattrocento punti distribuiti su tutto il territorio delle otto regioni Obiettivo 1. Il calcolo del flusso evapotraspirativo è stato effettuato tramite l'uso integrato di due diversi metodi, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith, per ottimizzare le informazioni disponibili in ciascun sito della rete di rilevamento. I risultati fin qui ottenuti saranno oggetto di un successivo livello di analisi, teso a spazializzare opportunamente il dato per renderlo compatibile con gli altri strati informativi che interverranno nel modello di calcolo del bilancio idrico (banca dati colturale e pedologica) e nel database gestionale la cui realizzazione è prevista nell'ambito del POM.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. Guido D'Urso per gli utili suggerimenti nelle fasi di scelta della modellistica e di definizione delle migliori procedure di integrazione tra i due metodi utilizzati.

BIBLIOGRAFIA

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. - *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper n. 56 (1998), Roma.
- Choisnel E., de Villele O., Lacroze F. - *Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne*, Commission des Communautés Européennes, Luxembourg (1992).
- Dal Monte G., Perini L., Brunetti A. - *Indici Agroclimatici - Quantità attese di precipitazione ed evapotraspirazione potenziale*, UCEA (1995), Roma.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. - *Crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper n. 24, 2^a ed. (1977), Roma.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. - *Estimating potential evapotranspiration*, Tech. Note, J. Irrig. and Drain Eng. (1982), ASCE, 108 (3), 225-230.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. - *Evapotranspiration and irrigation water requirements*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70 (1990), New York.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. - *Principles of environmental physics*, 2^a ed. (1990), Edward Arnold, London.
- World Meteorological Organization (WMO) - *Estimation of areal evapotranspiration*, Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 56 (1997), Geneva.