

EVAPOTRASPIRAZIONE DA SPECCHIO LIQUIDO E VEGETAZIONE E BILANCIO RADIATIVO ALLA SUPERFICIE TERRESTRE

Versione Ridotta

A cura di

Pierluigi Claps e Paola Allamano

Politecnico di Torino

L'EVAPORAZIONE E LA TRASPIRAZIONE

L'evaporazione è il processo attraverso il quale l'acqua liquida passa allo stato di vapore ed è allontanata dalla superficie sulla quale è avvenuto il passaggio di stato. L'energia necessaria al passaggio di stato è fornita per la maggior parte dalla radiazione solare. In assenza di questa, l'evaporazione può comunque avvenire utilizzando calore sottratto al suolo o alla massa d'acqua. La facilità con cui l'evaporazione avviene è legata alla differenza fra la tensione di vapore sulla superficie di evaporazione (vale a dire la tensione di saturazione) e quella dell'atmosfera circostante, ed alla velocità del vento, che determina l'intensità degli scambi turbolenti in atmosfera. Man mano che il fenomeno dell'evaporazione procede, se l'aria circostante diventa gradualmente satura, tale forzante, detta 'aerodinamica', dell'evaporazione diventa trascurabile. La radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento rappresentano pertanto i parametri climatici fondamentali nel processo dell'evaporazione. Il tasso di evaporazione è usualmente espresso in millimetri d'acqua nell'unità di tempo [mm/day]; Per unità di superficie pari ad 1 m^2 questa quantità corrisponde ad 1 kg di acqua, cosa che consente un facile utilizzo delle grandezze calore specifico e calore latente di evaporazione, usualmente espresse in funzione di unità di massa d'acqua.

La traspirazione, in modo analogo, consiste nel passaggio allo stato di vapore dell'acqua liquida contenuta nei tessuti delle piante e nel conseguente trasferimento del vapore all'atmosfera che avviene attraverso la superficie fogliare. Essa è funzione delle stesse forzanti sopra indicate e si rapporta all'entità dell'evaporazione da superficie liquida attraverso la densità fogliare, che determina superfici effettive di evaporazione che possono essere superiori all'area della proiezione verticale della chioma. I fenomeni dell'evaporazione e della traspirazione avvengono simultaneamente, e vengono considerati come fenomeni posti in serie sulla stessa verticale.

L'entità (o tasso) di evaporazione è proporzionale al flusso netto di calore latente. Si definisce calore latente di vaporizzazione λ_v la quantità di calore necessaria per la rottura dei legami a idrogeno durante il processo di evaporazione di un'unità di massa d'acqua. La stessa quantità di calore è rilasciata nel momento in cui tali legami si riformano per condensazione.

Il fenomeno dell'evaporazione da una superficie d'acqua è quindi sempre accompagnato da un flusso di energia verso la massa d'aria che riceve il vapor d'acqua. Questa quantità di energia può essere resa disponibile a seguito della condensazione. Di conseguenza, il raffreddamento notturno dell'aria è contrastato dalla cessione di calore della massa di vapore che condensa quando ci si trova in condizioni di elevata umidità relativa. Laddove l'umidità assoluta è molto bassa, l'escursione

termica risulta elevata a causa della difficoltà di raggiungere la temperatura di rugiada ed attivare la condensazione.

Il calore latente di vaporizzazione è funzione della temperatura, vale a dire che a temperature elevate, per innescare l'evaporazione sarà necessaria una quantità di energia inferiore rispetto a quella necessaria a basse temperature. A 20°C tale valore può essere assunto pari a 2.45 MJ/kg; vale a dire che per l'evaporazione di 1 kg, o di 0.001 m³ d'acqua, o di 1 mm per metro quadro, occorrono 2.45 MJ, ovvero 0.681 Kwh.. Quindi 1 mm d'acqua evaporata è equivalente a 2.45 MJ/m² di energia (radiante) assorbita dall'acqua. Per calcolare l'ammontare dell'acqua evaporata occorre moltiplicare il termine radiativo che si vuole convertire, espresso in termini di energia specifica (cioè espressa per unità di superficie), per l'inverso del calore latente di vaporizzazione ($1/\lambda_v = 0.408$):

$$\text{Equivalent Evaporation [mm/d]} = 0.408 * \text{Radiation [MJ/m}^2\text{d}] \quad (1)$$

Bilancio energetico alla superficie terrestre

In Appendice vengono riportate le modalità con le quali si riesce a determinare l'entità dell'energia netta ricevuta dal sistema suolo-atmosfera (Radiazione netta, R_n). Il flusso (o tasso) di evaporazione dipende direttamente dal frazionamento della radiazione netta in calore latente (che alimenta l'evaporazione) e calore sensibile (che determina il riscaldamento del suolo e dell'aria). Gli elementi in gioco sono riportati nella relazione:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (2)$$

R_n = radiazione netta [MJ/m²];

E = flusso di vapore conseguente alla conversione dell'energia radiante direttamente ricevuta dalla massa d'acqua [mm/g];

λ = calore latente di vaporizzazione;

H = flusso di calore sensibile ceduto alla corrente d'aria;

G = flusso di calore ceduto al suolo (o ceduto dal suolo);

Di conseguenza, l'entità del flusso evaporativo dipendente dal solo trasferimento di energia è espresso dalla relazione:

$$E = \frac{R_n - H - G}{\lambda} \quad [mm/g] \quad (3)$$

Evaporazione da Suolo o copertura vegetale (canopy)

L'approccio combinato è stato successivamente generalizzato nell'equazione di Penman-Monteith per tener conto dei vari principi fisici che regolano i processi di evaporazione dell'acqua da diversi tipi di copertura vegetale. La relazione di Penman-Monteith assume la forma:

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a C_p (e_{sz} - e_{az}) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (14)$$

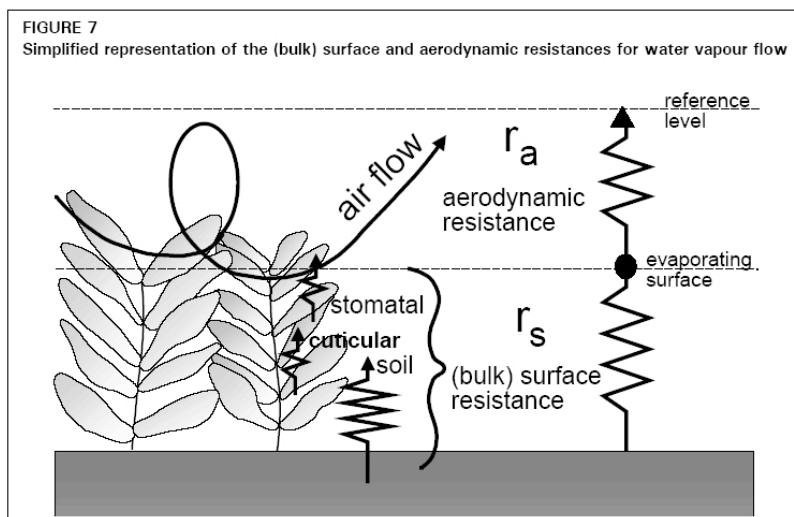
nella quale il simbolo viene ridefinito (ET = evapotraspirazione). La (14) può essere immediatamente ricondotta alla relazione del metodo combinato di Penman, considerando che per una superficie liquida si ha $r_s=0$ e quindi si ottiene:

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a C_p (e_{sz} - e_{az}) / r_a}{\Delta + \gamma} \quad (15)$$

con

$$r_a = \frac{[\ln(z_2 / z_0)]^2}{k^2 u_2} \quad \left[\frac{m}{m} \right] \quad (16)$$

In questo modo si introduce un termine fittizio detto *resistenza aerodinamica* (r_a) che misura gli ostacoli opposti all'evaporazione dalle condizioni di agitazione turbolenta locale sulla superficie. In analogia a questa resistenza viene definita la resistenza offerta dal suolo, in funzione delle sue condizioni, o dalla vegetazione: r_s = *crop canopy (o surface) resistance*.



Questa viene intesa come quella opposta da un elemento collocato ‘in serie’ (in analogia ad un elemento di un circuito elettrico) rispetto alla superficie (liquida o del suolo o fogliare) a contatto con l’atmosfera. Questo giustifica la forma della relazione (14).

Per la vegetazione si assume

$$r_s = \frac{200}{L} [\text{s m}^{-1}], \quad \text{con } L = \text{Leaf Area Index} \quad (17)$$

$$L = 24 \cdot h_c = 5.5 + 1.5 \cdot \ln(h_c), \quad \text{con } h_c = \text{altezza minima del crop} \quad (18)$$

Stima dell’evapotraspirazione di riferimento col metodo FAO Penman-Monteith

La FAO ha riunito un panel di esperti che ha definito degli standard oggi universalmente accettati. Nella pubblicazione prodotta dal comitato (Allen et al., 1998) si fa la distinzione tra “reference crop evapotranspiration” ET_0 , “crop evapotranspiration under standard conditions” ET_c e “crop evapotranspiration under non standard conditions” $ET_{c adj}$.

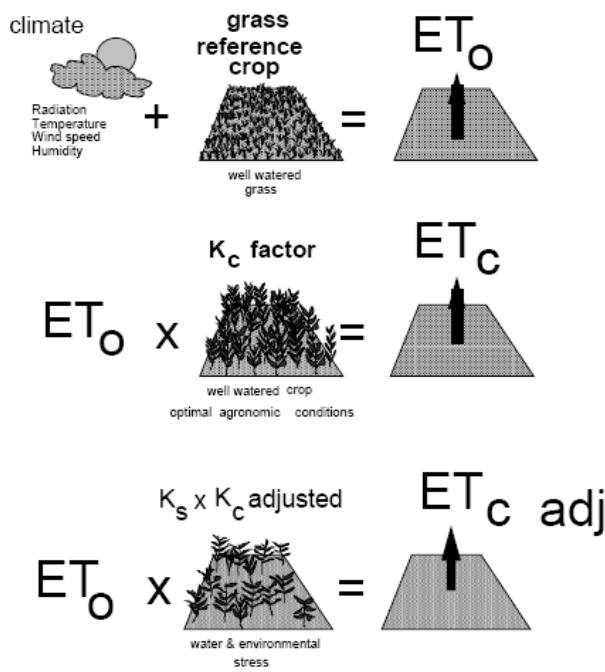
ET_0 è un parametro climatico che esprime la capacità dell’atmosfera di permettere l’evaporazione. Il concetto di evapotraspirazione “di riferimento” nasce dall’esigenza di definire oggettivamente questo potere evaporativo dell’atmosfera, a prescindere dall’uso del suolo sottostante.

La definizione della superficie di riferimento è la seguente: “*A hypothetical reference crop with an assumed uniform crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s m⁻¹ and an albedo of 0.23, actively growing and adequately watered*”. Questa corrisponde ad una superficie estesa d’erba di altezza uniforme, nella fase di crescita, che nasconde completamente il terreno ed adeguatamente irrigata.

Il metodo raccomandato per il calcolo dell’evapotraspirazione “di riferimento” ET_0 è quello di Penman-Monteith rivisitato, in cui sono stati esplicitati i fattori di resistenza riferibili al ‘reference crop’:

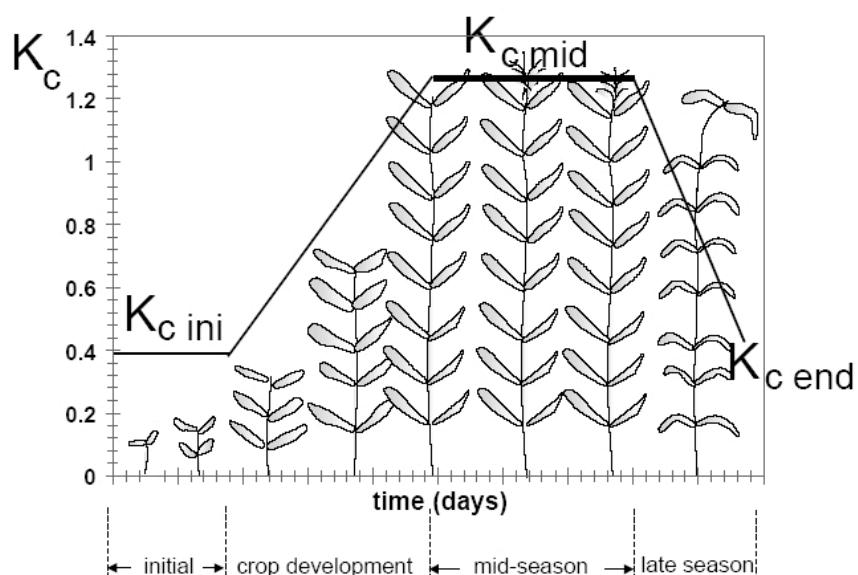
$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (19)$$

ET_0 è espressa in mm/g



$ET_c = K_c \cdot ET_o$ indica invece l'evapotraspirazione da una generica superficie coltivata, gestita ottimamente, molto estesa e ben irrigata. Per il calcolo di ET_c si usano dei coefficienti K_c (culturali) ottenuti sperimentalmente come rapporto ET_c/ET_o per i vari tipi di coltura.

FIGURE 25
Generalized crop coefficient curve for the single crop coefficient approach



Tab. 1 - Coefficienti culturali (Kc) per colture erbacee consigliati nell'ambiente emiliano-romagnolo.

Specie	Kc	Fase fenologica	Specie	Kc	Fase fenologica	Specie	Kc	Fase fenologica
Asparago	0,3	fine raccolta turioni	Fagiolo	0,4	semina	Melanzana	0,4	trapianto
	0,6	bottone florale	e fagiolino	0,6	emergenza		0,9	sino ad attecchimento
	0,8	fiori e foglie		0,8	quattro foglie vere		1,0	fase vegetativa
	1,0	80% bacche rosse		1,0	abbozzi florali		1,2	inizio e piena produzione
Bietola da seme	0,4	semina/trapianto		0,8	raccolta	Patata	0,4	semina
		emissione foglie basali	Fragola	0,3	risveglio vegetativo		0,6	emergenza
		chiusura sulla fila e tra le file		0,6	primi fiori		0,8	inizio formazione tuberi
	0,6	fase piena floritura		0,8	primi frutti bianchi		1,1	massimo sviluppo vegetativo
	1,2	fase piena allegagione		1,0	prima raccolta		1,0	ingiallimento fogliare
	0,7	giomenuli suberosi		1,0	raccolta in aprile	Pisello	0,4	semina
Bietola a seme	0,4	semina		1,0	raccolta in maggio		0,6	emergenza
	0,6	sesta foglia	Girasole	0,3	semina		0,8	quattro foglie vere
	0,8	ottava foglia		0,4	emergenza		1,0	abbozzi florali
	1,0	dodicesima foglia		0,6	comparsa calatide (infiorescenza)	Pomodoro	0,4	semina o trapianto
	0,8	diciottesima foglia		0,8	fioritura	da industria	0,6	primi frutti
Cipolla	0,4	semina		1,1	allegagione		0,8	secondo palco con frutti
	0,6	emergenza	Mais	0,4	semina		1,0	10% bacche rosse
	0,8	due foglie vere		0,5	sesta foglia		0,8	25% bacche rosse
	1,0	inizio formazione bulbi		0,8	levata	Soia	0,4	semina o trapianto
	0,8	20% piante collassate		1,2	emissione pennacchio		0,8	quarta foglia
Cocomero	0,4	trapianto		1,0	imbruttimento sete		1,0	fioritura primo palco
	0,6	rimozione copertura		0,8	fine maturazione lattea		0,8	riempimento baccelli 5° palco
	0,8	diametro frutti 10 cm					0,8	completo ingrossamento semi
	1,0	inizio raccolta						
	0,8	fine raccolta						

Tab. 2 - Coefficienti culturali (Kc) per colture arboree consigliati nell'ambiente emiliano-romagnolo.

Kc				Kc			
Specie	Terreno inerbito	Terreno lavorato	Mese e/o fase fenologica	Specie	Terreno inerbito	Terreno lavorato	Mese e/o fase fenologica
Actinidia	0,5	0,45	aprile	Melo	0,45	0,5	aprile
	0,75	0,5	maggio		0,75	0,55	maggio
	1,1	0,9	giugno		1,0	0,75	giugno
	1,25	1,15	da luglio a ottobre		1,1	0,85	da luglio a settembre
Albicocco	0,45	0,5	aprile		0,6	0,45	agosto o post raccolta
	0,5	0,7	maggio	Pero	0,5	0,45	aprile
	0,65	0,9	giugno		0,6	0,7	maggio
	0,75	1,0	luglio (anche post raccolta)		0,9	0,8	giugno
	0,4	0,5	agosto post raccolta		1,0	0,9	da luglio a settembre
Ciliegio	0,45	0,5	aprile		0,5	0,4	agosto o post raccolta
	0,75	0,55	maggio	Pesco	0,5	0,45	aprile
	1,0	0,75	giugno		0,7	0,5	maggio
	1,1	0,85	luglio		0,9	0,65	giugno
	0,6	0,45	luglio e agosto post raccolta		1,0	0,75	luglio e agosto
					0,5	0,4	luglio e agosto in post raccolta
				Vite	0,75	0,55	pre-chiusura grappolo
					0,6	0,8	inizio inavaiatura

Tratte da: http://www.ermesagricoltura.it/rivista/2004/supp_18/supp18087.pdf

METODI APPROSSIMATI DIPENDENTI DALLA RADIAZIONE

Metodo di Priestley-Taylor (*applicazione a scala giornaliera*)

Ipotesi: la componente aerodinamica (dell'equazione di Penman) vale una frazione della componente energetica. L'altezza di evapotraspirazione giornaliera risulta quindi:

$$\lambda ET = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n - G \quad [mm/g] \quad (20)$$

$\alpha = 1.3$ in zone umide

$\alpha = 1.7$ in zone aride, con $u_r < 60\%$

Il valore di α si presta ad essere calibrato in modelli idrologici.

Metodo di Makkink (*applicazione a scala giornaliera*)

Il metodo di Makkink risulta simile a quello elaborato da Priestley-Taylor, ma fa riferimento alla radiazione solare globale:

$$\lambda ET = 0,61 \cdot R_s \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,12 \quad [mm/g] \quad (21)$$

R_s è espresso in acqua evaporabile equivalente, ottenibile dalla (1).

METODI APPROSSIMATI SEMI-EMPIRICI

Metodo di Hargreaves

1. *applicazione a scala giornaliera*

L'equazione è funzione della temperatura e fornisce un'espressione per la valutazione dell' ET di reference crop:

$$ET_{rc} = 0,0023 \cdot R_0 \cdot \sqrt{\delta'_T} \cdot (T + 17,8) \quad [mm/g] \quad (22)$$

ET_{rc} = evapotraspirazione da reference crop [mm/g];

R_0 = altezza di evaporazione equivalente alla radiazione extratmosferica per il sito ed il giorno di interesse [mm/g] = $0,408 R_0$ [MJ/m²g] (vedi Maidment, 1993 eq. 9-14, 31);

δ'_T = escursione termica giornaliera ($T_{max}-T_{min}$) [°C];
 T = temperatura media dell'aria [°C] nel giorno considerato.

2. applicazione a scala mensile

La stessa formula può essere utilizzata con riferimento alla scala mensile, calcolando il valore di ET_{rc} nel giorno medio del mese e moltiplicandolo per i giorni effettivi del mese stesso. Il fattore δ'_T assume però un diverso significato:

δ'_T = differenza tra la media delle temperature massime e la media delle temperature minime calcolate su tutti i giorni del mese [°C];

Metodo di Thornthwaite (applicazione a scala mensile)

In questo metodo ETp dipende solo dalle temperature medie mensili e dalla latitudine del sito (attraverso i fattori correttivi L_j)

$$ETp_j = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{t_j}{I} \right)^a \cdot L_j \quad [mm / mese] \quad (22)$$

ETp_j = evapotraspirazione potenziale media mensile [mm/mese];

t_j = temperatura media mensile [°C];

L_j = indice di calore (vedi tabella).

a = coefficiente che dipende dall'indice termico medio annuo I

I = indice termico medio annuo

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1,514} \quad (23)$$

$$a = 0.49239 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot I - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 \quad (24)$$

L'indice di calore tiene conto della durata teorica dell'irraggiamento solare al variare della latitudine e del numero di giorni di ciascun mese.

Fattore correttivo L_j , in funzione della latitudine e del mese j dell'anno

Lat.	Gen.	Feb.	Marz	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
36°	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,84
40°	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
44°	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	0,95	0,80	0,76

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

Brutsaert W. (1982), “*Evaporation into the Atmosphere*” Theory, History, and Applications, Reidel, 128-153 pp.

FAO (1990), “*Report on the Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*”, FAO

Rosso R. (1994), “*Effetto serra. Istruzioni per l'uso*”, Progetto Leonardo Bologna

Strahler, A.N. (1984), “*Geografia Fisica*”, Piccin, 105-116 pp.

Viglione, A. (2004), “*Stima dell'evapotraspirazione media mensile sul territorio piemontese*”, *Working Paper 2004-01*, DITIC, Politecnico di Torino
[\(http://www2.polito.it/strutture/ditic/Ricerca/Working_papers.htm\).](http://www2.polito.it/strutture/ditic/Ricerca/Working_papers.htm)