

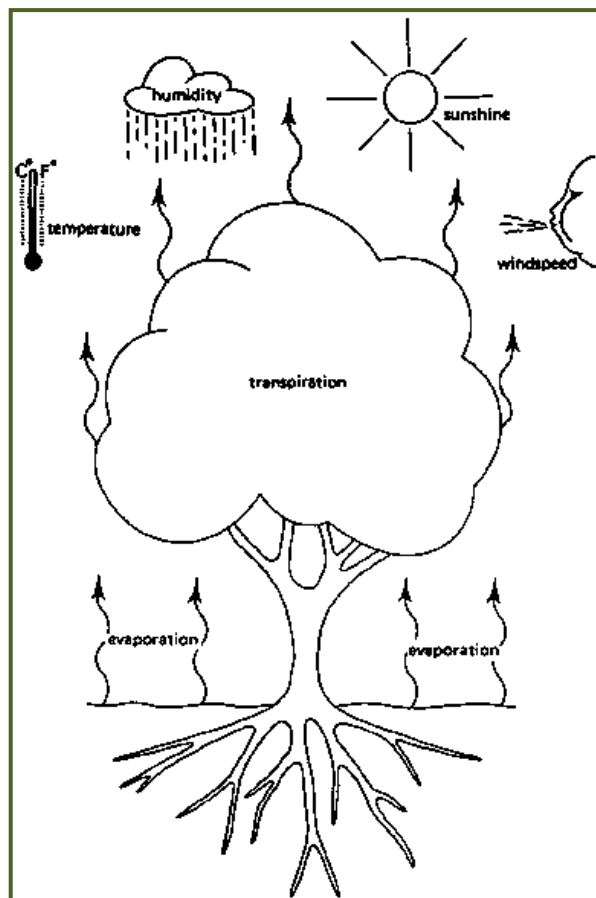
Università della Calabria

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

CORSO DI IDROLOGIA N.O.

Prof. Pasquale Versace



SCHEDA DIDATTICA N° 14

L'EVAPOTRASPIRAZIONE



A.A. 2010-11

1. Introduzione all'evapotraspirazione

L'evaporazione consiste nel passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore. Questo processo fisico è controllato sia dalla disponibilità di energia in corrispondenza della superficie evaporante, sia dalla facilità con cui il vapore acqueo può diffondersi nell'atmosfera. I processi fisici responsabili della diffusione del vapore nell'atmosfera possono essere diversi, ma le leggi fisiche che regolano la perdita di vapore acqueo dalla superficie, ad esempio, di un lago, dal suolo nudo o da una superficie vegetale, sono essenzialmente identici.

Per le superfici vegetali è ormai consuetudine distinguere l'evaporazione (E) del suolo dalla quantità di vapore acqueo che si trasferisce all'atmosfera attraverso i tessuti vegetali (traspirazione, T). Il risultato complessivo è detto appunto evapotraspirazione (ET) e, convenzionalmente, i due termini E e T sono considerati additivi.

Il termine evapotraspirazione è di chiara ispirazione agronomica e vuole segnalare l'intervento di fattori biologici nei processi fisici. Venne introdotto per indicare la dispersione del vapore acqueo verso l'atmosfera a partire dal terreno e dalle piante; in precedenza l'attenzione degli studiosi era concentrata solo sul vapore acqueo disperso dalle piante e quindi sulla traspirazione.

In realtà anche la traspirazione è un processo evaporativo e l'influenza della struttura e della fisiologia vegetale non mutano la natura del fenomeno. L'evaporazione del suolo e la traspirazione delle piante, finché l'acqua è disponibile senza limitazioni, dipendono solo dalle condizioni ambientali (il livello di energia solare disponibile, la ventosità, ecc.). Quando, invece, la disponibilità idrica si riduce, nel suolo e nelle piante si manifestano meccanismi di controllo del flusso di vapore acqueo differenti. La distinzione convenzionale fra traspirazione delle piante ed evaporazione del suolo nasce appunto da questa sostanziale differenza di comportamento delle superfici vegetali rispetto al suolo.

In letteratura sono state adoperate numerose definizioni per identificare i processi evaporativi ed evapotraspirativi, a seconda che essi avvengano in condizioni di disponibilità idrica ottimale o di stress idrico, oppure in uno specchio d'acqua o in un terreno, oppure ancora in riferimento ad un particolare tipo di pianta o coltura piuttosto che ad un'altra. Prima di procedere alla descrizione dei principali processi fisici regolanti il fenomeno evapotraspirativo, è utile introdurre alcuni termini che ricorreranno spesso e saranno approfonditi nel corso della trattazione, in modo da poterli focalizzare ed evitare, per quanto possibile, confusione e fraintendimenti.

- ✓ **E potenziale (E_p , mm d^{-1}):** è la quantità d'acqua evaporata da una estesa superficie liquida ideale, in definite condizioni atmosferiche. Si tratta di un'entità concettuale che misura il

controllo meteorologico sull'evaporazione da superficie liquida. Non a caso il termine traspirazione non è menzionato in questa definizione. Anche nel caso di terreno spoglio (*bare soil*) è corretto parlare di evaporazione potenziale, ma bisogna specificare (evaporazione potenziale da terreno spoglio), perché, al contrario della superficie liquida, il terreno esercita una resistenza (seppur minima) all'evaporazione.

- ✓ ***ET potenziale (ET_p , mm d⁻¹)***: è il valore limite, dato dall'altezza d'acqua effettivamente evaporata quando la quantità d'acqua disponibile è almeno uguale a quella che può essere trasformata in vapore dal complesso dei fattori atmosferici e della vegetazione. Si tratta in sostanza del valore massimo di evapotraspirazione per un dato tipo di vegetazione, noti lo stato di crescita e le condizioni atmosferiche.
- ✓ ***ET di riferimento (ET_0 , mm d⁻¹)***: è l'evapotraspirazione potenziale di un particolare tipo di coltura. La "FAO Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements" (1990) ha ufficialmente definito la superficie di riferimento come una superficie ricoperta da vegetazione con altezza pari a 0,12 m, una resistenza superficiale pari a 70 s m⁻¹ ed una albedo pari a 0,23.

La superficie di riferimento è molto simile ad una superficie estensiva di erba verde di altezza uniforme, in fase di crescita, che copre completamente il terreno ed è in condizioni idriche ottimali. La richiesta di superficie estensiva ed uniforme deriva dall'assunto che i flussi sono verticali. Per il calcolo dell' ET_0 gli esperti raccomandano l'utilizzo della equazione FAO Penman-Monteith, direttamente ricavata dalla formulazione proposta da Penman (1948) e modificata da Monteith (1965), con le assunzioni date dalla superficie di riferimento.

L'uso di denominazioni diverse da evapotraspirazione di riferimento è fortemente sconsigliata dagli esperti FAO perché ambigua¹, ma appare in numerosi articoli pubblicati in riviste scientifiche anche successivamente al 1998, anno di pubblicazione dell'ultimo documento FAO sulla *ET* delle colture².

La formulazione di Penman & Monteith, estremamente importante nella storia della stima dell'evapotraspirazione, sarà successivamente approfondita.

- ✓ ***ET della coltura (ET_c , mm d⁻¹)***: quantità d'acqua dispersa nell'atmosfera, attraverso i processi di evaporazione del suolo e traspirazione delle piante, da una specifica coltura di ampia estensione, i cui processi di crescita e produzione non sono limitati dalla disponibilità

¹ FAO Irrigation and Drainage Paper, n.56, cap. 1, 1998

² Es.: Xu e Singh, "Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation", Hydrological Processes, 14, 339-349 (2000) – usano misure mensili da evaporimetri, ma non spiegano come le hanno trattate;

idrica, da carenze nutrizionali o da stress biotici. Dipende non solo dalle condizioni meteorologiche (come l' ET_0), ma anche dalla coltura esaminata e dalle tecniche colturali adottate. La ET_c è derivata direttamente dalla ET_0 tramite i *coefficienti colturali* K_c ³:

$$ET_c = K_c ET_0$$

In pratica i coefficienti colturali permettono, una volta nota l'evapotraspirazione di riferimento ET_0 , di risalire all'evapotraspirazione potenziale di qualsiasi tipo di coltura. L' ET_c ha dunque lo stesso significato fisico dell' ET_p , ma alla sua stima si giunge solo tramite l'utilizzo dei coefficienti colturali.

- ✓ ***ET reale/effettiva della coltura (ET, mm d⁻¹)***: Nelle condizioni reali di campo la disponibilità di acqua per le piante, in un qualsiasi momento del loro ciclo, non è illimitata ma è soggetta, per diverse ragioni, a restrizioni che la rendono inferiore a quella su cui si basano i concetti di ET_0 e di ET_c . Di conseguenza l'intensità del flusso evapotraspirativo reale di una coltura è di solito inferiore a quella massima, e quindi

$$ET \leq ET_c$$

In sostanza l' ET rappresenta il flusso evapotraspirativo di una determinata coltura nelle condizioni meteorologiche, fisiologiche e colturali reali. Il valore di ET può essere inferiore al corrispondente valore di ET_c quando la coltura è sottoposta a limitazioni idriche, nutrizionali o a condizioni di stress di diversa origine.

2. Misura dell'evapotraspirazione

Per alcune grandezze, ad esempio la temperatura o la velocità del vento, le operazioni di misura avvengono generalmente senza grossi problemi attraverso l'utilizzo di una strumentazione relativamente semplice (a meno che non si ricerchino delle misure estremamente precise). Per quanto riguarda l'evapotraspirazione, il problema principale è capire cosa si intende esattamente misurare. Se si adopera, ad esempio, un contenitore riempito d'acqua e si verifica la velocità con cui questa evapora, certamente si avrà un'indicazione del potere evaporante dell'atmosfera, ma per ottenere informazioni circa l'entità dell'evapotraspirazione di riferimento sarà necessario effettuare delle correzioni, che tengano conto anche della traspirazione della vegetazione.

³ Doorenbos and Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements", FAO Irrigation and Drainage Paper, n.24, 1977; poi revisione dei coefficienti in FAO Irrigation and Drainage Paper n.56, in particolare capp. 6-11, 1998

L'evapotraspirazione di riferimento, poi, è una grandezza potenziale (la massima evapotraspirazione possibile per definite condizioni atmosferiche), cioè una sorta di limite superiore, quindi non necessariamente la reale quantità d'acqua che sta effettivamente evaporando da una superficie ricoperta da vegetazione.

I problemi connessi alla misura dell'evapotraspirazione sono molteplici, così come gli strumenti attraverso cui questa grandezza è investigata. Di seguito analizzeremo alcuni tra i principali metodi di misura.

2.1 Misure di perdita d'acqua liquida: gli evaporimetri

Dato un certo volume di suolo, il metodo teoricamente più corretto per misurare l'evapotraspirazione effettiva che in esso avviene in un determinato periodo di tempo è servirsi dell'equazione del bilancio di massa, ottenendo la misura dell'evaporato come differenza tra precipitazione e variazione del contenuto d'acqua nel volume di suolo più deflusso. Questa metodologia è ovviamente applicabile solo per porzioni molto piccole di terreno, soprattutto a causa dell'estrema difficoltà a misurare con esattezza il contenuto d'acqua del suolo ed il deflusso (superficiale e profondo) su un'area di vaste dimensioni. Molto spesso il volume in analisi è contenuto in un recipiente, detto *lisimetro*, nel quale è idrologicamente isolato (cioè non vi è alcuno scambio di massa liquida con l'esterno).

Un metodo più pratico per la stima dell'evapotraspirazione è quello della vasca evaporimetrica (o evaporimetro). Tale strumento è in grado di misurare in continuo il tasso di evaporazione, ed è sostanzialmente costituito da una vasca contenente acqua. Tra gli evaporimetri più comuni vi sono i cosiddetti *sunken pans* (letteralmente evaporimetri a dispersione), il più noto dei quali è il tipo Colorado (quadrato, lato 0,92m e profondità 0,46m, in acciaio inossidabile, posto col fondo sopraelevato di 0,05m dal suolo). Altro tipo di evaporimetro, ancora più comune di quelli precedentemente descritti, è l'evaporimetro Classe A dell'U.S. Weather Bureau (circolare, 1,21m in diametro, profondo 0,255m, in acciaio inossidabile, col fondo sopraelevato di 0,15m dal suolo), mostrato in figura 5.



Fig. 1 – Evaporimetro Classe A

Gli evaporimetri forniscono misure del tasso di evaporazione che, pur costituendo una buona indicazione del potere evaporante dell'atmosfera, risultano soltanto prossime ai valori osservati nei casi di pratico interesse. La differenza di comportamento rispetto a superfici liquide di dimensioni estese (stagni, laghi) è essenzialmente dovuta alla diversa inerzia termica e alla diversa possibilità di scambio di calore tra lo strumento e l'ambiente circostante. In ogni caso, per ottenere i valori del tasso di evaporazione relativi alle superfici liquide di pratico interesse occorre moltiplicare i valori forniti dagli evaporimetri per dei fattori di riduzione, generalmente prossimi a 0,8.

Attraverso le vasche evaporimetriche è possibile ottenere anche una stima dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 . I valori misurati E_p necessitano della seguente correzione:

$$ET_0 = K_p E_p$$

Il coefficiente correttivo K_p è essenzialmente dovuto al fatto che, sebbene gli evaporimetri rispondano in maniera simile agli stessi fattori climatici che influiscono sulla vegetazione, diversi elementi producono una differenza significativa nelle perdite d'acqua tra uno specchio liquido e una superficie coltivata. Ad esempio, l'albedo può essere diversa da 0,23, l'immagazzinamento di calore nell'evaporimetro può essere significativo e può causare un'evaporazione non indifferente durante la notte, mentre la vegetazione subisce il fenomeno evapotraspirativo solo durante il giorno. Vi sono anche differenze relative alla turbolenza, alla temperatura e all'umidità dell'aria immediatamente al di sopra delle rispettive superfici. Vi è anche trasferimento di calore attraverso le pareti dell'evaporimetro. Ad ogni modo, a dispetto delle differenze esistenti, l'uso di evaporimetri per la misura dell'ET di riferimento per periodi superiori ai 10 giorni può considerarsi corretto⁴.

Tabelle e formule dipendenti dalla velocità del vento, dal fetch e dall'umidità sono date per ricavare il valore di K_p ⁵. I metodi dell'evaporimetro riflettono chiaramente le problematiche derivanti dal misurare l'evapotraspirazione delle piante da uno specchio liquido. Essi sono suscettibili delle condizioni microclimatiche sotto cui operano, e dal rigore con cui è mantenuta la stazione. Nel passato le loro performance, confrontate con misure da lisimetri, non si sono dimostrate soddisfacenti. In particolare non è stata rispettata la condizione di considerare le misure degli evaporimetri solo per periodi superiori ai 10 giorni. Ad ogni modo, anche considerando le misure degli evaporimetri in modo adeguato, in svariate situazioni i coefficienti di correzione presentati nelle tabelle necessitano di ulteriori correzioni (es. aree non a sviluppo agricolo, o dove gli evaporimetri sono circondati da vegetazione alta). Nel passato è stato proposto di considerare come

⁴ FAO Irrigation and Drainage Paper, n.56, cap. 4, 1998

⁵ *ib.*, ed inoltre R. G. Allen, W. O. Pruitt, "FAO-24 reference evapotranspiration factors", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 117, no. 5, 1991

superficie di riferimento uno specchio liquido. Tuttavia, le differenze aerodinamiche, il controllo della vegetazione e le caratteristiche della radiazione procurano forti difficoltà nel mettere in relazione l' ET_0 con misure su uno specchio liquido. Porre l' ET_0 in relazione ad una coltura specifica ha il vantaggio di incorporare i processi biologici e fisici coinvolti nei processi evapotraspirativi da superfici coltivate.

3. Stima dell'evapotraspirazione di riferimento

Il flusso evapotraspirativo è caratterizzato da due processi fondamentali: il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore e la diffusione del vapore acqueo dalla superficie vegetale all'atmosfera circostante. La fonte di energia che consente il passaggio di stato è la radiazione solare (componente radiativa), mentre lo scambio di vapore acqueo con l'atmosfera è determinato dalla temperatura e umidità dell'aria e dal vento (componente aerodinamica). La conoscenza di queste grandezze meteorologiche consente quindi di stimare il flusso evapotraspirativo.

I diversi metodi di stima dell'evapotraspirazione basati sulla stima delle grandezze meteorologiche possono essere così classificati:

- ✓ metodi basati sulla misura della temperatura dell'aria;
- ✓ metodi basati sulla misura o sulla stima della radiazione solare;
- ✓ metodi combinati.

I primi due gruppi di metodi sono di natura empirica, in quanto si basano sulla correlazione fra uno o più parametri meteorologici e l'evapotraspirazione. I metodi combinati si basano invece sulla modellazione fisica del processo evapotraspirativo e tengono conto sia dell'energia richiesta per il passaggio di stato dell'acqua sia di tutti i meccanismi che consentono la rimozione del vapore acqueo. Questi metodi considerano quindi entrambe le componenti, quella energetica e quella aerodinamica, in cui può essere schematizzato il flusso evapotraspirativo. Per quanto presentino maggiori difficoltà applicative, sia per la maggiore complessità formale sia per la dotazione strumentale che richiedono, i metodi combinati forniscono in generale stime più accurate.

3.1 Metodi basati sulla radiazione: il metodo di Turc

Un metodo di stima dell'evapotraspirazione (potenziale, non di riferimento) basato sulla radiazione era stato in passato già proposto da Turc (1954), tramite la seguente formula:

$$ET_p = 0.0013 * g * (t / (t+15)) * (IG + 50) * (1 + (50 - UR) / 70)$$

con

$$IG = Q_s * (0.18 + 0.62 * n / N)$$

dove:

ET_p = evapotraspirazione potenziale in millimetri d'acqua

g = numero di giorni del periodo considerato

t = temperatura media dell'aria, espressa in °C (se $t < 0$ °C allora $t = 0$)

UR = valore percentuale dell'umidità relativa media nel periodo considerato (se $UR > 50\%$ allora $UR = 50\%$)

IG = valore medio giornaliero della radiazione solare globale, espresso in cal/cm^2 , per il periodo considerato. I valori di IG variano con la latitudine e la stagione. I coefficienti adottati nella formula sono quelli suggeriti da Turc.

Q_s = radiazione solare al limite dell'atmosfera ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{giorno}$). I valori per la latitudine 40° nell'emisfero nord sono inseriti nella seguente tabella:

G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
380	505	675	845	965	1020	985	895	740	565	415	335

n/N = rapporto d'insolazione (rapporto tra il numero di ore osservate e quello teoricamente possibile)

Una versione semplificata dell'equazione di Turc, utilizzabile se l'umidità relativa è sufficientemente elevata e per periodi di tempo di un mese, è la seguente:

$$EP \text{ (mm/mese)} = 0.4 * (t / (t+15)) * (IG + 50)$$

3.2 Metodi basati sulla temperatura: il metodo di Thornthwaite

Tra quelli proposti, i metodi basati sulla temperatura sono i più obsoleti, tuttavia in numerosi casi pratici vengono ancora adoperati.

Il metodo di Thornthwaite (1948) è il più noto, e si basa soltanto sui dati di temperatura media mensile; esso detta:

$$ETp_i = 16 p_i (10 t_i / I)^{(0.5 + 0.016 I)}$$

nella quale ETp_i è l'evapotraspirazione potenziale in mm dell'i-mo mese, t_i è la temperatura media (in °C) nel mese in esame (in quello specifico anno) ed I è l'indice calorico annuo, pari a:

$$I = \sum_{j=1,12} (\bar{t}_j / 5)^{1.514}$$

dove \bar{t}_j è la temperatura media mensile (es. media di tutti i mesi di gennaio registrati) in °C, e p_i indica un coefficiente correttivo che dipende dalla latitudine, e vale, per la latitudine 40° nord:

G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81

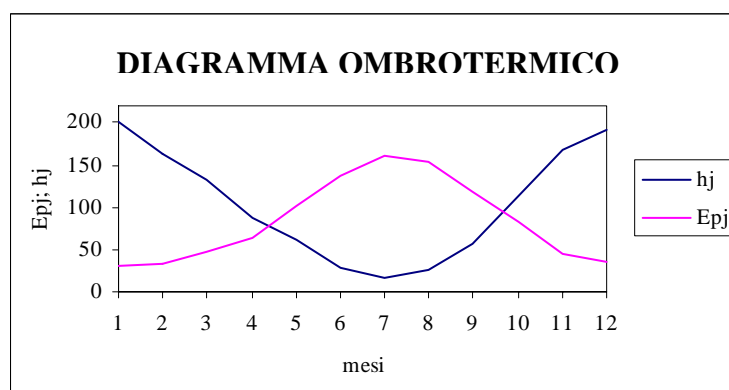
Dal confronto tra precipitazione atmosferica ed evapotraspirazione potenziale mensile è possibile ricavare una caratterizzazione del clima di una data regione attraverso l'identificazione di:

- *mesi umidi*, in cui l'altezza media di pioggia $\overline{h_j}$ nel mese j ($j=1, 2, \dots, 12$) è in eccesso rispetto all'evapotraspirazione potenziale media $\overline{E_{pj}}$ nello stesso mese j ;
- *mesi secchi*, in cui $\overline{h_j} < \overline{E_{pj}}$ e si ha un deficit idrico;
- *periodo umido* l'insieme dei mesi umidi;
- *periodo secco* l'insieme dei mesi secchi.

E' necessario quindi disporre delle seguenti grandezze:

- $\overline{h_j}$, in mm, come media aritmetica degli n valori delle altezze di pioggia mensile registrate nel periodo di osservazione;
- $\overline{E_{pj}}$, in mm, evapotraspirazione potenziale media nel mese j , ottenuta considerando la temperatura media mensile normale $\overline{t_j}$ (es. media di tutti i mesi di gennaio registrati) nella formula empirica di Thornthwaite.

Il diagramma che rappresenta l'andamento della precipitazione atmosferica e dell'evapotraspirazione potenziale viene denominato *diagramma ombrotermico*. Attraverso tale diagramma è possibile individuare la durata del periodo secco.



4. Bibliografia essenziale e links

La redazione della presente dispensa si è basata essenzialmente sui seguenti testi:

- *AA. VV.*, FAO Penman-Monteith Formula, *FAO Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*, Rome, 1990.
- *Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M.*, Crop Evapotranspiration, *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, 1998.
- *Brutsaert, W.*, Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications, *D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1982*.
- *Mendicino, G.*, Idrologia delle perdite, *Patron, 1993*.
- *Moisello U.*, Idrologia Tecnica, *La Goliardica Pavese, Pavia, 1998*
- *Shuttleworth, J.W.*, Evaporation. In: *D.R. Maidment (Ed.), Handbook of Hydrology, McGraw Hill, Inc., 1993, pp. 4.1-4.53*

Nel testo di Allen et al., in particolare, sono presenti numerose tabelle utili per la determinazione del coefficiente colturale. La versione on-line del testo è reperibile all'indirizzo:

- <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>

Le formule più affidabili per ricavare il coefficiente correttivo evaporimetrico K_p sono invece riportate nel seguente articolo:

- *Allen, R.G. & Pruitt, W.O.*, FAO-24 reference evapotranspiration factors, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1991, 117(5), 758-773.

Ai fini didattici, si consiglia di visitare i seguenti siti:

- <http://agrometeo.sar.sardegna.it/documentazione/am/amet=idx.htm>, di cui sono state riportate alcune parti nella presente dispensa, ed in cui è proposta una breve panoramica su ulteriori metodi per la stima dell'evapotraspirazione
- <http://www.camilab.unical.it/interreg/default.htm> e
- http://www.idrocz.it/OsservatorioSiccita/tipologia_mappe.asp; in questi siti è possibile visionare mappe di evapotraspirazione potenziale mensile della Calabria e della Basilicata.