

Corso di Idraulica ed Idrologia Forestale

Docente: Prof. Santo Marcello Zimbone

Collaboratori: Dott. Giuseppe Bombino - Ing. Demetrio Zema

Lezione n. 17: Le perdite di bacino

Anno Accademico 2008-2009

Indice

- **Le perdite di bacino**
- **L'immagazzinamento nelle depressioni superficiali**
- **L'intercettazione**
- **L'evaporazione**
- **La traspirazione**
- **L'evapotraspirazione**
- **Misura dell'evapotraspirazione**
- **Modelli di stima dell'evapotraspirazione**
- **Il fabbisogno irriguo di una coltura**

Materiale didattico

Slides delle lezioni frontali

Greppi M.: Idrologia. Il ciclo dell'acqua e i suoi effetti, Ed. Hoepli, Milano, 1999

Moisello U.: Idrologia tecnica, Ed. La Goliardica Pavese, Pavia, 1999

Le perdite di bacino

In un bacino idrografico, nel caso in cui il volume di controllo ha come base lo strato superficiale del terreno, l'equazione che esprime il bilancio idrologico a scala di bacino è la seguente:

$$P = ET + Q_s + F + \Delta V_s$$

dove:

P = precipitazione complessiva sul bacino

Q_s = componente superficiale del deflusso

F = infiltrazione

ET = evapotraspirazione

ΔV_s = volume idrico immagazzinato nelle depressioni superficiali

Le perdite di bacino

Non tutta la **precipitazione P** (o “**precipitazione lorda**” o “**afflusso di precipitazione**”) dà luogo a deflusso

Il “**deflusso**” **D** è generato dalla sola “**precipitazione netta**”, cioè dalla “**precipitazione lorda**” **P** depurata dalle “**perdite idrologiche**” **L** (dall'inglese “**loss**”):

$$D = P - L$$

Le perdite di bacino

Le “**perdite idrologiche**”, definite come “i fenomeni per cui il deflusso superficiale alla sezione di chiusura risulta minore dell’afflusso meteorico al bacino”, consistono in:

- immagazzinamento nella depressioni superficiali
- intercettazione (od intercezione)
- evapotraspirazione
- infiltrazione

L'immagazzinamento nelle depressioni superficiali

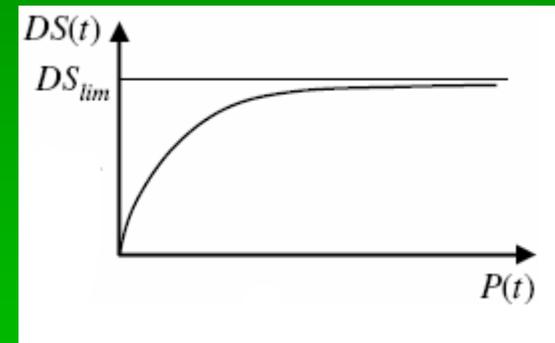
E' la parte della precipitazione che viene catturata dalle depressioni sulla superficie del suolo (quali pozze e piccoli invasi), dalle quali verrà poi restituita all'atmosfera per evaporazione

L'immagazzinamento nelle depressioni superficiali

Modellazione

funzione di tipo asintotico dell'altezza di pioggia P

$$DS(t) = DS_{lim} \cdot (1 - e^{-K \cdot P(t)}) \quad \left. \frac{dDS(t)}{dP(t)} \right|_{t=0} = 1$$



DS_{lim} max. dep. storage / max. intercettazione
 $K=1/DS_{lim}$ saturation rate / costante di saturaz.
 $DS_{lim} = 20 \div 150 \text{ m}^3/\text{ha}$ depending on soil type
and slope / a seconda del tipo di suolo e della sua pendenza

L'intercettazione

E' la parte della precipitazione che, durante la caduta verso il suolo, viene intercettata dalla vegetazione, dalla quale verrà poi restituita all'atmosfera per evaporazione

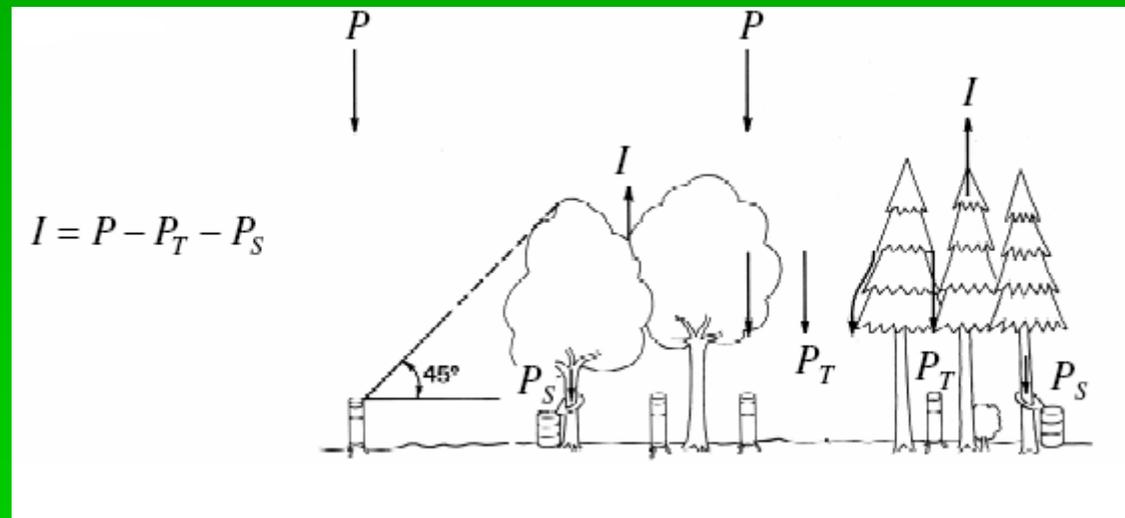
Coincide con la perdita idrica verso l'atmosfera per evaporazione dell'acqua meteorica intercettata



L'intercettazione

Misurazione

La misura dell'intercettazione esercitata dalla vegetazione d'alto fusto viene effettuata per mezzo di pluviografi sia **liberi (P)**, sia disposti **al di sotto della vegetazione (P_T)**, misurando anche lo **scorrimento sul tronco (P_S)**



L'intercettazione

Modellazione (1)

$$I = h_i + c E t_p$$

$$P > h_i$$

essendo:

I = intercettazione totale durante un evento meteorico

h_i = massima altezza di intercettazione

c = superficie coperta dalla vegetazione

E = tasso di evaporazione

t_p = durata dell'evento di pioggia

L'intercettazione

Modellazione (2)

funzione di tipo non-asintotico dell'altezza di pioggia P

$$I = c (a + b P^n)$$

essendo a , b , c , n parametri che dipendono dal tipo di vegetazione

L'intercettazione

Modellazione (3)

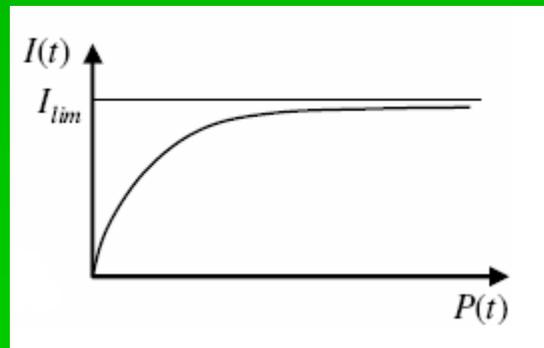
funzione di tipo asintotico dell'**altezza di pioggia P**

essendo:

$$I(t) = I_{lim} \cdot (1 - e^{-K \cdot P(t)}) \quad \left. \frac{dI(t)}{dP(t)} \right|_{t=0} = 1$$

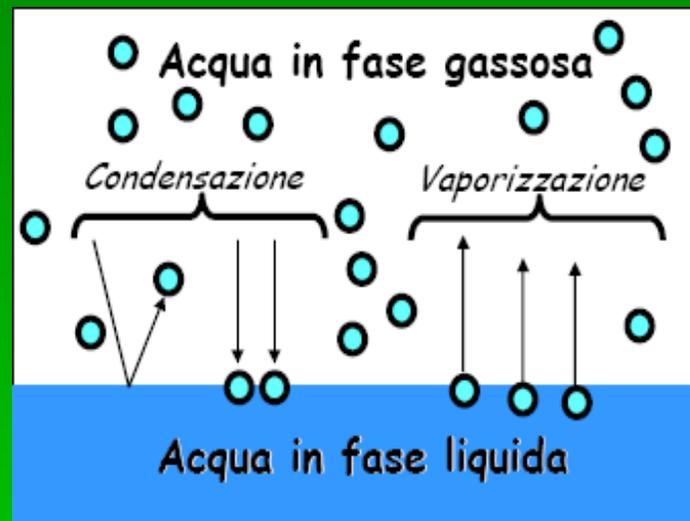
I_{lim} = intercettazione massima

$K = 1/I_{lim}$ = costante di saturazione



L'evaporazione

E' la perdita idrica dal suolo e dalle acque superficiali verso l'atmosfera per via di processi abiotici



Scambio molecolare tra fase liquida e gassosa

L'evaporazione

Nel vapore acqueo contenuto nell'aria, che si muove di **moto turbolento**, si sovrappongono un **moto di trasporto** (orizzontale) ed uno di **agitazione** (**dispersione** o **diffusione turbolenta**); la componente verticale del moto di agitazione determina la diffusione del vapore verso l'alto

Si definisce **concentrazione di vapore** (o **umidità specifica**) il rapporto tra la **massa di vapore acqueo** e la **massa di aria secca**

Si definisce **umidità relativa** il rapporto tra **l'umidità specifica** e quella in **condizioni di saturazione**

L'evaporazione

L'**altezza d'acqua evaporata** da una superficie in un assegnato periodo di tempo è uguale al rapporto tra il volume idrico evaporato e l'area della superficie evaporante

La **velocità di evaporazione** (o **tasso di evaporazione**) è il rapporto tra l'altezza d'acqua evaporata e l'intervallo di tempo in cui avviene l'evaporazione [mm/d]

Si può avere un tasso di evaporazione **medio** od **istantaneo**

L'evaporazione

L'evaporazione è:

- proporzionale al **Deficit di Pressione di Vapore (VPD)** (un elevato VPD è tipico dell'aria molto secca) secondo la **legge di Dalton**
- proporzionale alla velocità del vento, che influenza la pressione di vapore dell'aria ed assicura il ricambio di aria, in genere più secca rispetto a quella prossima alla superficie evaporante
- influenzata dalla salinità, dalla temperatura dell'aria e dalle dimensioni e forma dello specchio d'acqua

L'evaporazione

La legge di Dalton

E' possibile dimostrare che il tasso di evaporazione E è esprimibile come:

$$E = K \frac{e_s(T) - e_a}{p} = K \frac{VPD}{p}$$

dove:

K = costante [m^2/s], funzione della velocità del vento

$e_s(T)$ = pressione di vapore a saturazione alla temperatura dell'acqua T (prossima a quella dell'aria) [bar]

e_a = pressione di vapore effettiva [bar]

p = pressione atmosferica [bar]

L'evaporazione

La legge di Dalton

In base a tale legge, se $e_s > e$, si ha **evaporazione**, altrimenti si ha **condensazione**

La legge di Dalton si può anche esprimere come:

$$E = K \frac{VPD}{p}$$

dove $VPD = e_s(T) - e_a =$ Vapour Pressure Deficit

In funzione dell'umidità relativa $RH (e_a/e_s)$ si ha:

$$E = K \frac{e_s(T)(1 - RH)}{p}$$

L'evaporazione

La legge di Dalton

La pressione parziale di vapore saturo e_s alla temperatura T è determinabile con la formula:

$$e_s(T) = 611 \exp\left(\frac{17,27T}{237,3 + T}\right)$$

La pressione di vapore effettiva e_a si può misurare sperimentalmente con uno strumento chiamato **psicrometro**

L'evaporazione

Calore Latente

Energia richiesta per la rottura del legame intermolecolare nel passaggio tra fase liquida e solida

Calore Latente di Vaporizzazione dell'Acqua

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 T_s, \text{ in MJ/Kg}$$

Temperatura al suolo, in °C

L'evaporazione

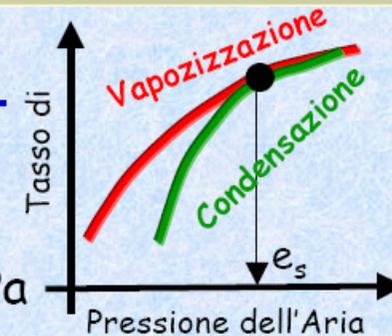
Scambi di Massa ed Energia all'Interfaccia Suolo-Atmosfera

Saturazione dell'Aria

$$\frac{\text{Vapozizzazione} - \text{Condensazione}}{\text{Evaporazione} \#}$$

Pressione di Vapor Saturo

$$e_s = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27 T}{237.3 + T} \right], \text{ in KPa}$$



Gradiente

$$\Delta = \frac{de_s}{dt} = \frac{4.098 e_s}{(237.3 + T)^2}, \text{ in KPa/}^\circ\text{C}$$

Temperatura dell'Aria, in $^\circ\text{C}$

Una parte della radiazione in ingresso alla superficie terrestre non viene usata per l'evaporazione, ma serve a riscaldare l'aria stessa, facendola sollevare

Questo flusso di energia, detto

Calore Sensibile

è proporzionale a $c_p \rho_a$

Densità dell'Aria Umida

$$\rho_a = \frac{3.486 P}{275 + T}, \text{ in Kg/m}^3$$

Temperatura dell'Aria, in $^\circ\text{C}$

Pressione dell'Aria, in KPa



L'evaporazione

4

Bilancio Energetico all'Interfaccia Suolo-Atmosfera

Radiazione Netta a Onde Corte n/N: frazione di ore di pieno sole al giorno

$$S_n = S_+ (1 - \alpha) \approx S_0 (a_s + b_s n/N) (1 - \alpha), \text{ in MJ m}^{-2} \text{ die}^{-1}$$

Costante solare, in MJ m⁻² die⁻¹

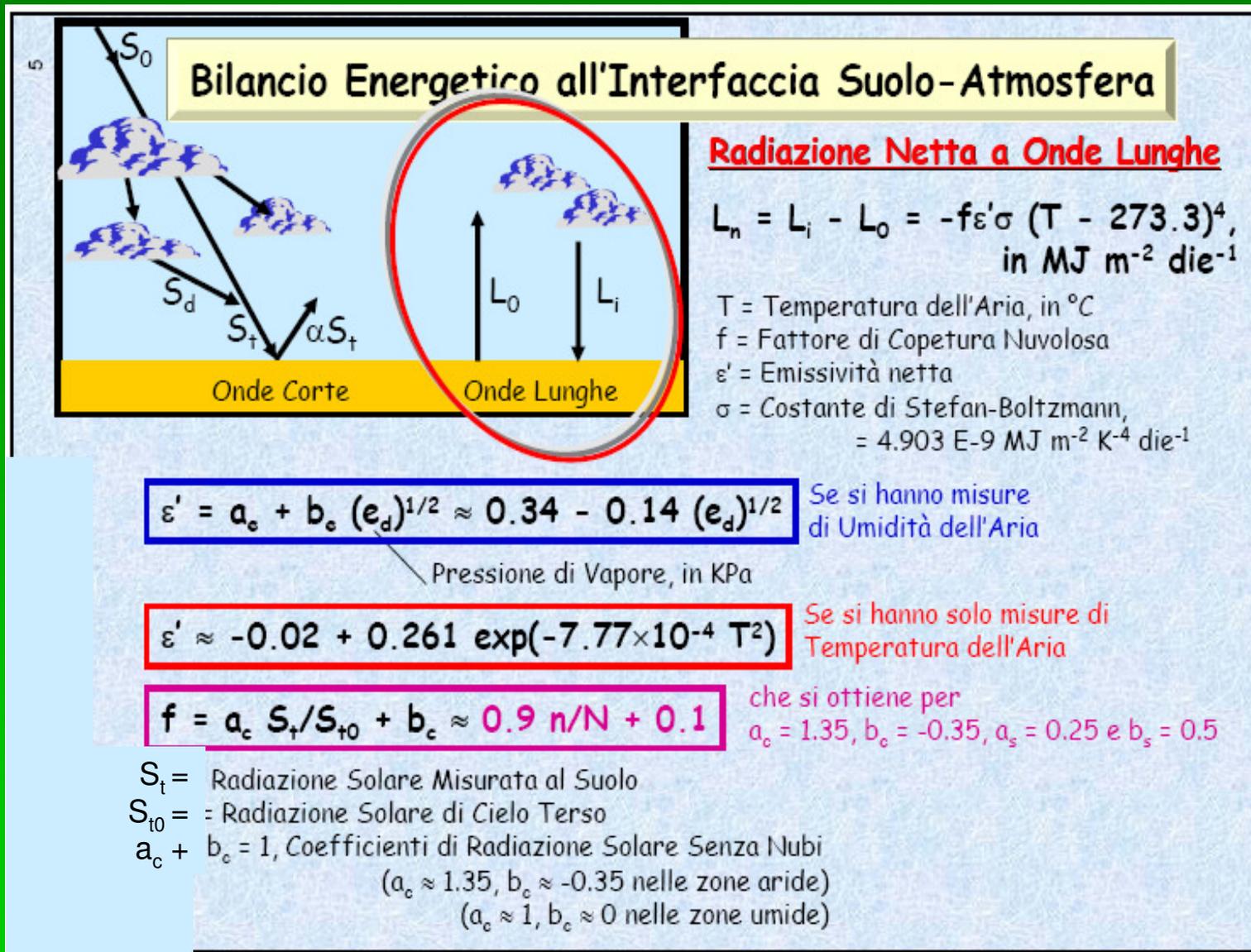
a_s = Frazione della Costante Solare con Cielo Coperto

$a_s + b_s$ = Frazione della Costante Solare Senza Nubi ($a_s \approx 0.25, b_s \approx 0.50$)

Albedo

- specchio idrico: 0.08
- suolo nudo: da 0.10 (secco) a 0.35 (umido)
- neve: da 0.2 (vecchia) a 0.8 (nuova)
- pascolo erboso: 0.20÷0.26
- canna da zucchero: 0.15÷0.20
-

L'evaporazione



L'evaporazione

Bilancio Energetico all'Interfaccia Suolo-Atmosfera

S_0
 S_+
 αS_+
 L_0
 L_i
 Onde Corte Onde Lunghe

Radiazione Netta Incidente
 $R_n = S_n - L_n$, in $\text{MJ m}^{-2} \text{ die}^{-1}$

Se si dispone solo di misure di
 Insolazione, di Umidità dell'Aria e
 di Temperatura dell'Aria, la
 Radiazione Netta Incidente è
 calcolabile come

$$R_n \approx (0.25 + 0.5 n/N)(1 - \alpha)S_0 - (0.9n/N + 0.1)(0.34 - 0.14e_d^{1/2})\sigma T^4$$

in $\text{MJ m}^{-2} \text{ die}^{-1}$

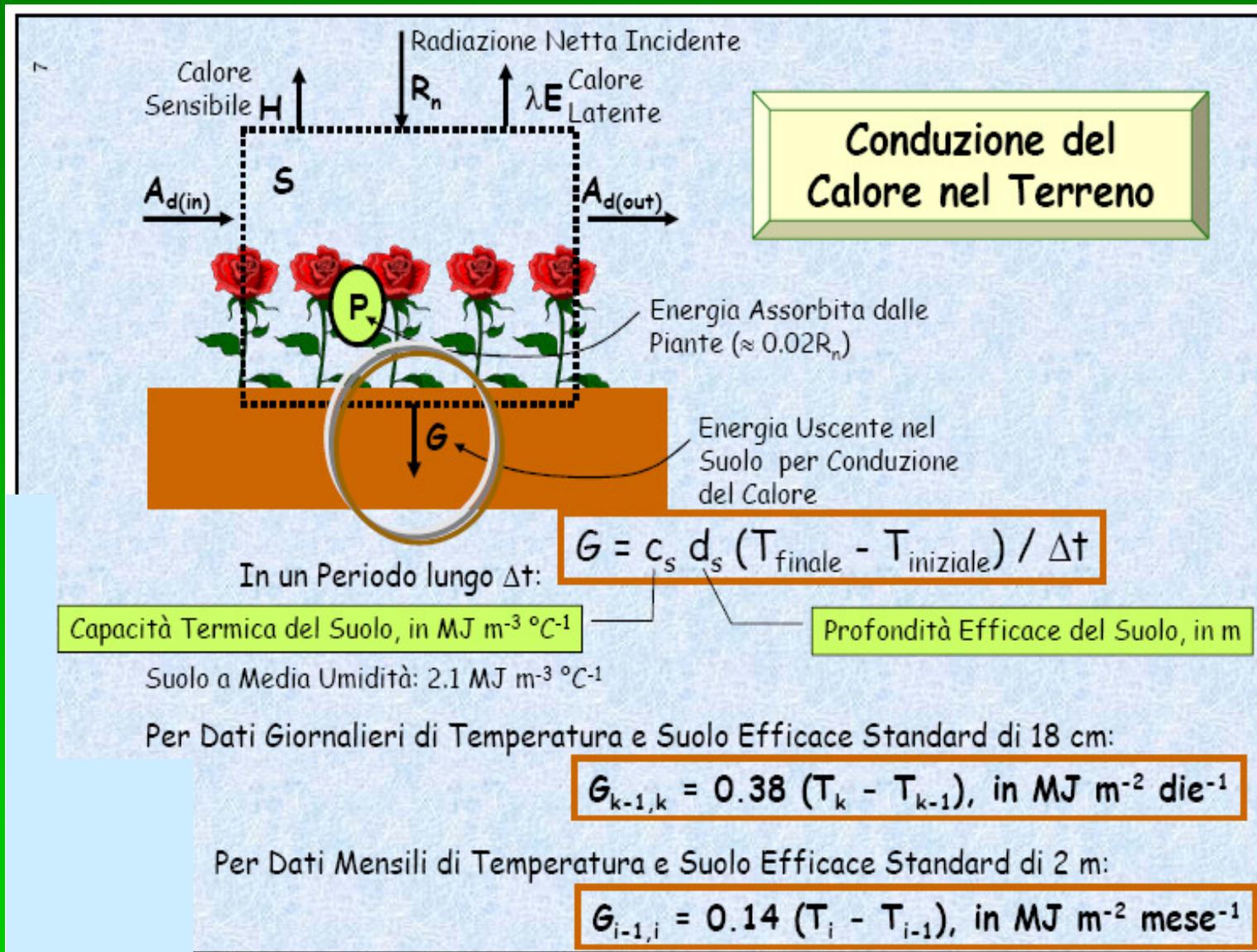
Il Rapporto $\frac{R_n}{(\rho_w \lambda)}$

$\left\{ \rho_w: \text{densità dell'acqua, in Kg/m}^3 \right\}$

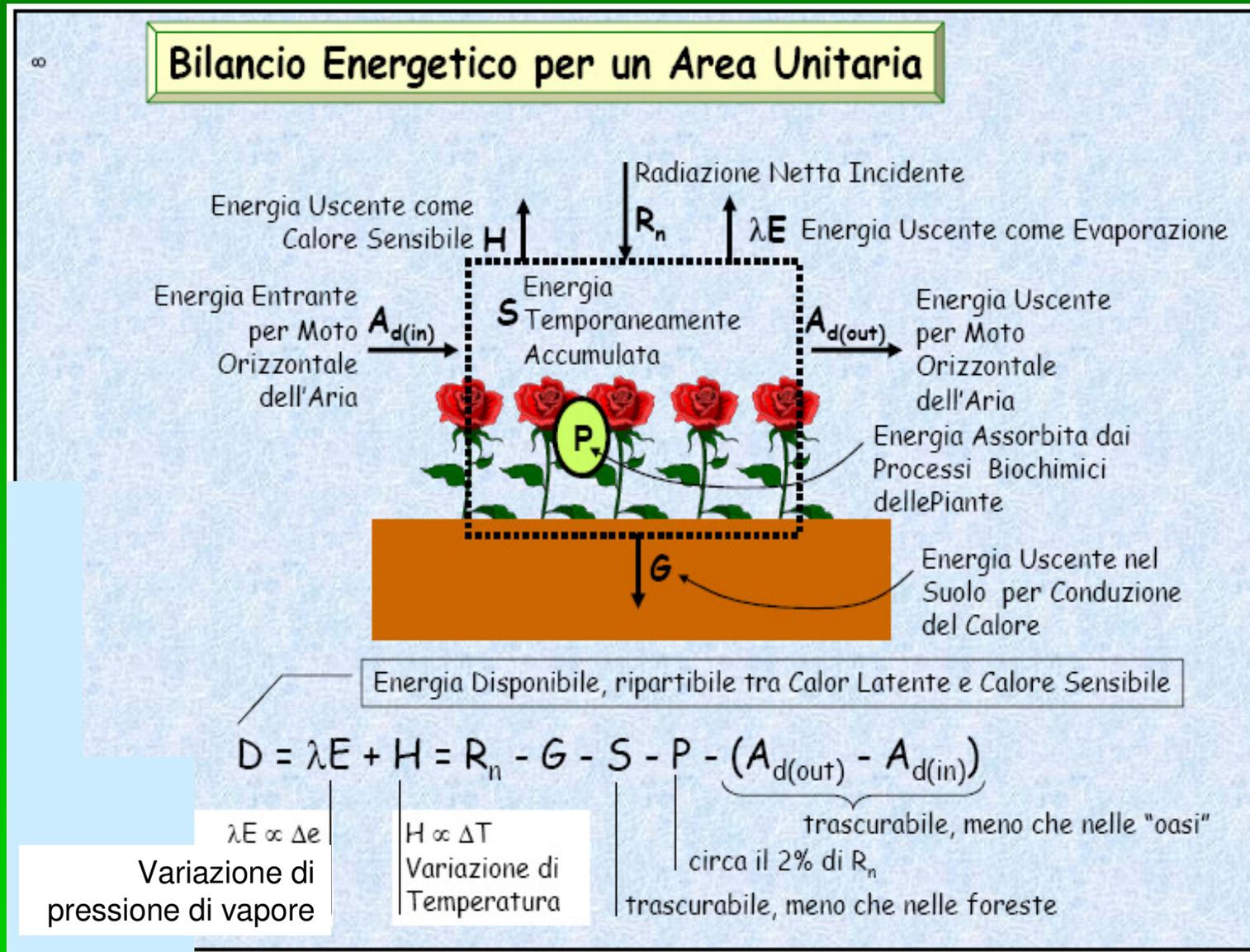
$\left\{ \lambda: \text{calore latente di vaporizzazione, in MJ/Kg} \right\}$

porge l'altezza idrica equivalente dell'acqua evaporata per unità di tempo,
 p.es. in mm/die

L'evaporazione



L'evaporazione



L'evaporazione

Misurazione tramite 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 è l'**evaporimetro Classe A dell'U.S. Weather Bureau** (circolare, diametro 1,21 m, profondo 0,255 m, in acciaio inossidabile, con il fondo sopraelevato di 0,15 m dal suolo)



L'evaporazione

Gli evaporimetri forniscono misure del tasso di evaporazione che, pur costituendo una buona indicazione del potere evaporante dell'atmosfera, risultano molto vicine, ma non uguali, 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

L'evaporazione

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'**evaporazione di riferimento** E_0 ; i **valori misurati** E_p (pari all'**evaporazione potenziale**, ossia alla quantità d'acqua evaporata da una estesa superficie liquida ideale) necessitano della seguente correzione:

$$ET_0 = K_p E_p$$

L'evaporazione

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

Vi sono anche differenze relative alla turbolenza, alla temperatura e all'umidità dell'aria immediatamente al di sopra delle rispettive superfici, nonché un trasferimento di calore attraverso le pareti dell'evaporimetro

L'evaporazione

A dispetto delle differenze esistenti, l'uso di evaporimetri per la misura dell'evaporazione di riferimento per periodi superiori ai 10 giorni può considerarsi corretto

Per ricavare il valore di K_p sono state predisposte tabelle e formule dipendenti dalla velocità del vento, dal fetch (distanza su cui il vento spira) e dall'umidità

L'evaporazione

Modellazione da superfici liquide (Formula di Lugeon)

$$E = 0.398 \cdot n \cdot (P_{Smax} - P) \cdot \frac{273+t}{273} \cdot \frac{760}{B - P_{Smax}} \quad \begin{array}{l} \text{[mm/month]} \\ \text{/[mm/mese]} \end{array}$$

essendo:

n = numero di giorni del mese

t = media mensile delle temperature massime giornaliere
[°C]

P_{Smax} = pressione di vapore saturo alla temperatura t
[mm di Hg]

P = pressione di vapore effettiva alla temperatura t [mm
di Hg]

$$P = P_{smax} \cdot \bar{U}$$

U = umidità media mensile

B = pressione barometrica media mensile [mm di Hg]

Corso di Idraulica ed Idrologia Forestale - Lezione 17

L'evaporazione

Modellazione da superfici liquide (Formula di Mayer)

$$E = C \cdot (P_{Smax} - P) \cdot \left(1 + \frac{V}{10}\right) \quad \begin{array}{l} \text{[inches/month]} \\ \text{ / [pollici/mese]} \end{array}$$

essendo:

C = 15 (bacinelle evaporimetriche), 11 (serbatoi e laghi profondi)

P = pressione di vapore effettiva media alla temperatura dell'aria [pollici di Hg]

P_{Smax} = pressione di vapor saturo media alla temperatura dell'aria (bacinelle evaporimetriche) o dell'acqua (laghi e serbatoi) [mm di Hg]

V = velocità media del vento a 25 piedi dal suolo [miglia/ora]

L'evaporazione

Modellazione da suolo (Formula di Turc)

$$E = (P - a) \cdot \left[1 + \left(\frac{P + a}{L} \right)^2 \right]$$

[mm / ten days]
/ [mm / decade]

essendo:

P = pioggia della decade [mm]

a = 1÷10 mm = acqua evaporabile per **P** = 0

L = fattore eliotermico [mm]

$$L = \frac{1}{16} (t + 2\sqrt{I_g})$$

t = temperatura media decadica [°C]

I_g = radiazione solare globale [cal/cm²/giorno]

L'evaporazione

Modellazione da suolo (Formula di Turc)

$$I_g = I_o \cdot \left(0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H} \right)$$

I_0 = radiazione solare massima teorica [cal/cm²/giorno]

h = durata dell'insolazione effettiva [h]

H = durata dell'insolazione teorica [h]

La traspirazione

E' il fenomeno per cui la pianta estrae l'acqua dal terreno e la trasferisce all'atmosfera sotto forma di vapore

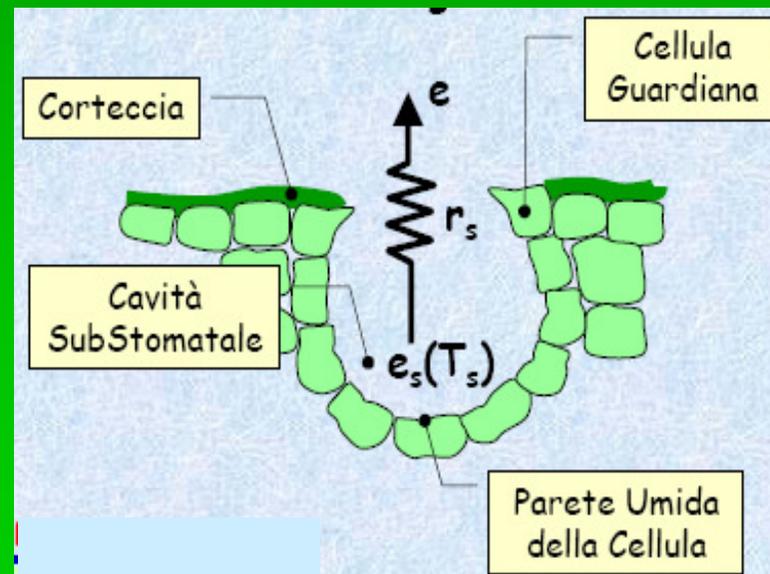
Coincide con la perdita idrica verso l'atmosfera dovuta ai processi biotici (prelievo d'acqua dalle radici e fotosintesi nelle foglie)

E' funzione del potere evaporante dell'atmosfera, dell'apertura degli stomi e dall'umidità del suolo nella zona radicale

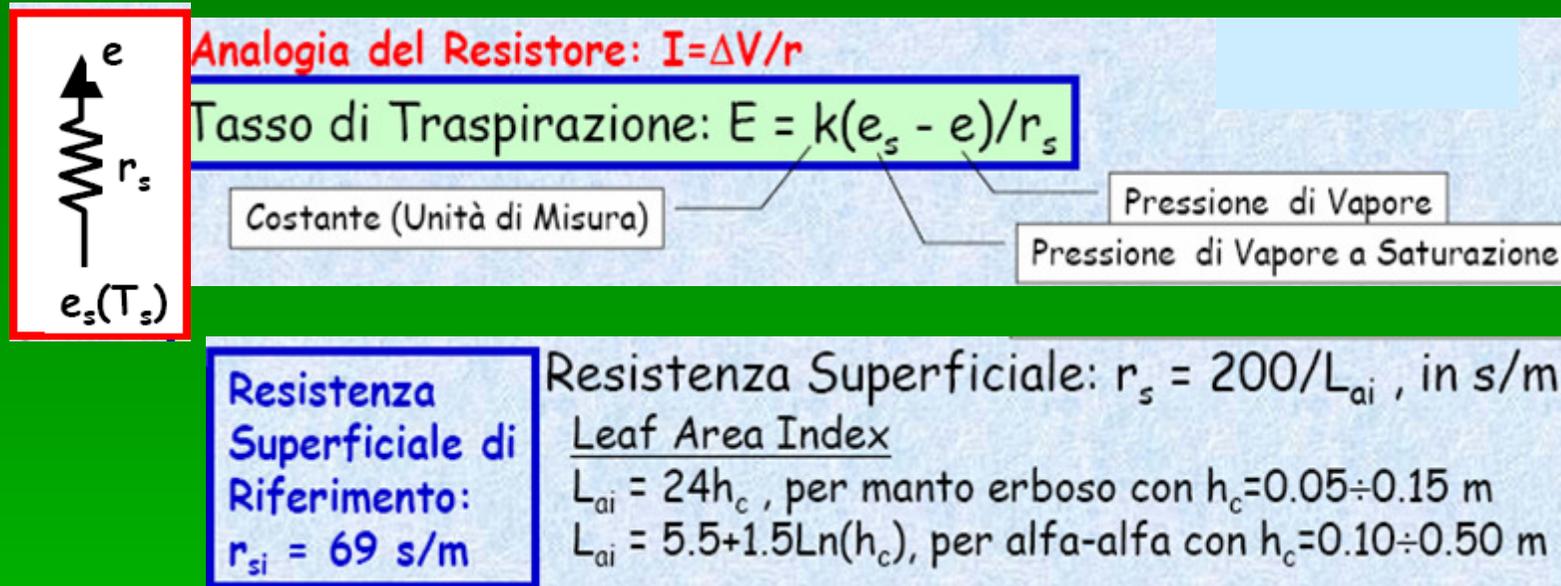
La traspirazione

Subisce variazioni giornaliere (per l'azione degli stomi) e stagionali (a causa dell'attività vegetativa della pianta e delle variazioni climatiche)

Trasporto per diffusione molecolare del vapore acqueo attraverso le aperture stomatali delle foglie asciutte



La traspirazione



La sua misurazione è estremamente difficile (consiste nel misurare la variazione nel tempo della vegetazione appena tagliata, che continua a traspirare per un certo periodo anche dopo il taglio) e non significativa

L'evapotraspirazione

Il termine “**evapotraspirazione**” è di chiara ispirazione agronomica e vuole segnalare l'intervento di fattori biologici nei processi fisici, quali l'evaporazione

Venne introdotto per indicare la **dispersione del vapore acqueo verso l'atmosfera da parte del terreno e delle piante**; in precedenza l'attenzione degli studiosi era concentrata solo sul vapore acqueo disperso dalle piante e quindi sulla traspirazione

L'evapotraspirazione

Per le superfici vegetali è ormai consuetudine distinguere l'**evaporazione (E) dal suolo** (ossia la perdita d'acqua verso l'atmosfera per evaporazione dell'acqua meteorica intercettata) dalla quantità di vapore acqueo che si trasferisce all'atmosfera attraverso i tessuti vegetali (**traspirazione, T**), ossia la perdita d'acqua verso l'atmosfera per via dei processi biotici (prelievo d'acqua dalle radici e fotosintesi nelle foglie)

Il risultato complessivo è detto, appunto, **evapotraspirazione (ET)**; i due termini E e T sono convenzionalmente considerati additivi

L'evapotraspirazione

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 grado di insolazione, la ventosità, ecc.)

L'evapotraspirazione

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

L'evapotraspirazione

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

L'evapotraspirazione

Si definiscono:

➤ **Evaporazione potenziale** (E_p , mm d⁻¹): **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

Anche nel caso di terreno spoglio 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

Corso di Idraulica ed Idrologia Forestale - Lezione 17

L'evapotraspirazione

➤ **Evapotraspirazione potenziale** (ET_p , mm d⁻¹): **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

L'evapotraspirazione

➤ **Evapotraspirazione di riferimento** (ET_0 , mm d⁻¹):
evapotraspirazione potenziale di un particolare tipo di coltura

La “FAO” (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 un albedo pari a 0,23**

L'evapotraspirazione

➤ **Evapotraspirazione 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 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

L'evapotraspirazione

La ET_c è derivata direttamente dalla ET_0 tramite i **coefficienti colturali K_c** :

$$ET_c = K_c ET_0$$

Nella 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'evapotraspirazione

➤ **Evapotraspirazione reale/effettiva della coltura** (ET, mm d⁻¹): **flusso evapotraspirativo di una determinata coltura nelle condizioni meteorologiche, fisiologiche e colturali reali**

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

L'evapotraspirazione

Di conseguenza l'intensità del flusso evapotraspirativo reale di una coltura è di solito inferiore a quella massima e quindi:

$$ET \leq ET_c$$

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

Misura dell'evapotraspirazione

Lisimetro

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 l'utilizzo dell'**equazione del bilancio di massa**, ottenendo la misura del flusso evaporato come **differenza tra precipitazione, variazione del contenuto d'acqua nel volume di suolo e deflusso**

Misura dell'evapotraspirazione

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 esso è idraulicamente isolato (cioè non vi è alcuno scambio di massa liquida con l'esterno)

Misura dell'evapotraspirazione

L'equazione del bilancio di massa del volume di controllo si può scrivere come segue:

$$ET = P - R - G - F$$

essendo:

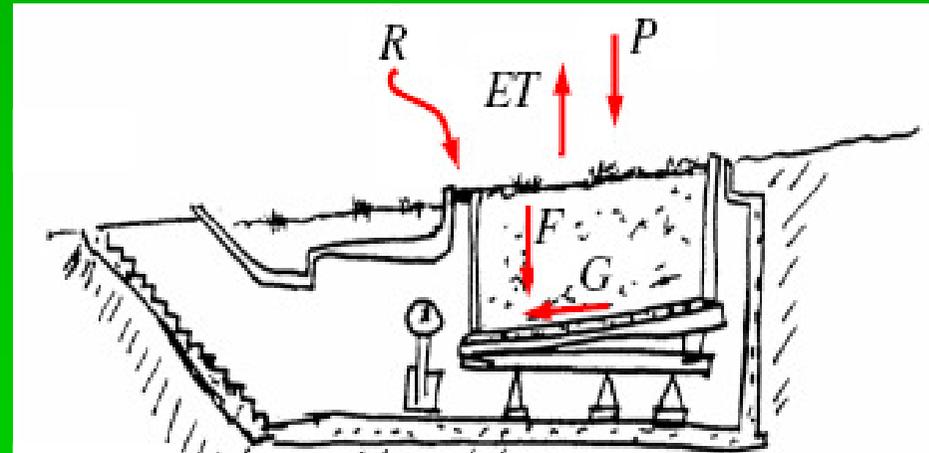
ET = evapotraspirazione

P = precipitazione

R = deflusso superficiale

G = deflusso sotterraneo

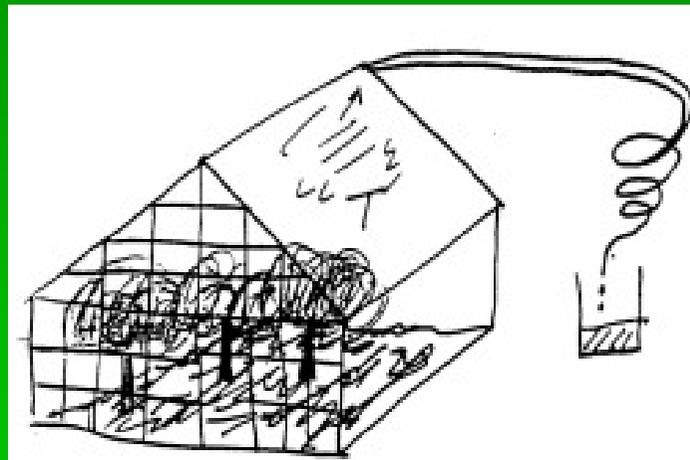
F = infiltrazione



Misura dell'evapotraspirazione

In serra

Si basa sul principio che il vapore acqueo si condensa sui vetri e si può pertanto raccogliere e misurare



Stima dell'evapotraspirazione

Il flusso evapotraspirativo è caratterizzato da due processi fondamentali:

- ✓ il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello di vapore
- ✓ la diffusione del vapore acqueo dalla superficie vegetale all'atmosfera circostante

Stima dell'evapotraspirazione

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

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodo del Bilancio Energetico

Con certe approssimazioni, EP dipende solo dalla Radiazione Netta R_n e dalla Temperatura al Suolo T_s

Metodo Aerodinamico

Con certe approssimazioni, EP dipende solo dalla Velocità del Vento U_z , dalla Pressione P e dalla Temperatura al Suolo T_s

Metodo Combinato (Bilancio Energetico + Aerodinamico)

EP dipende dalla Radiazione Netta R_n , dalla Velocità del Vento U_z , dalla Pressione P e dalla Temperatura al Suolo T_s

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

4

Metodo del Bilancio Energetico

Eq.ne di Bilancio Energetico

$$R_n = H + G + \rho_w \lambda EP$$



$$EP = (R_n - H - G) / (\lambda \rho_w)$$

Calore Latente di Vaporizzazione

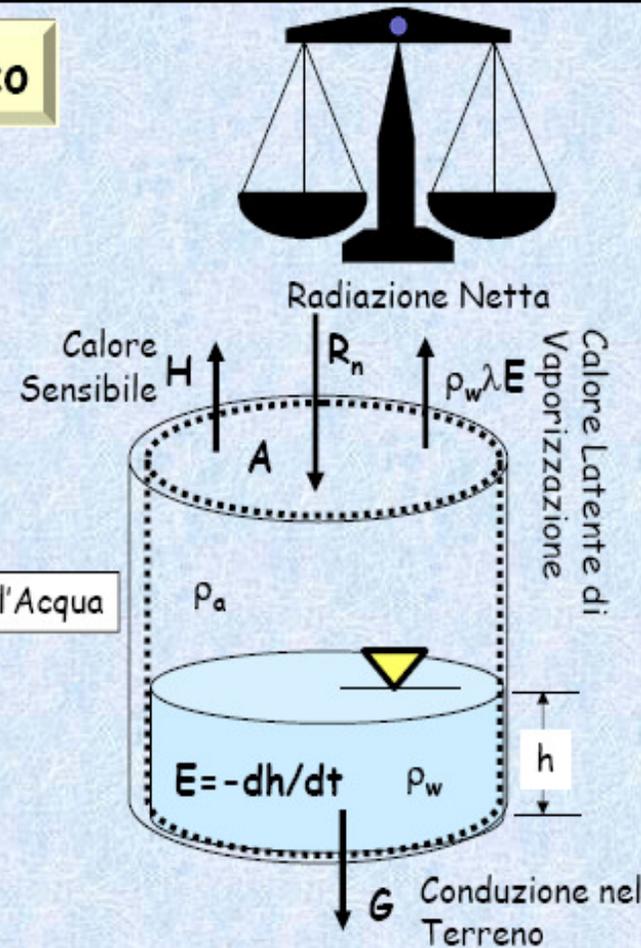
Densità dell'Acqua

$$\lambda = 2501 - 2.361 T_s, \text{ in KJ/Kg}$$

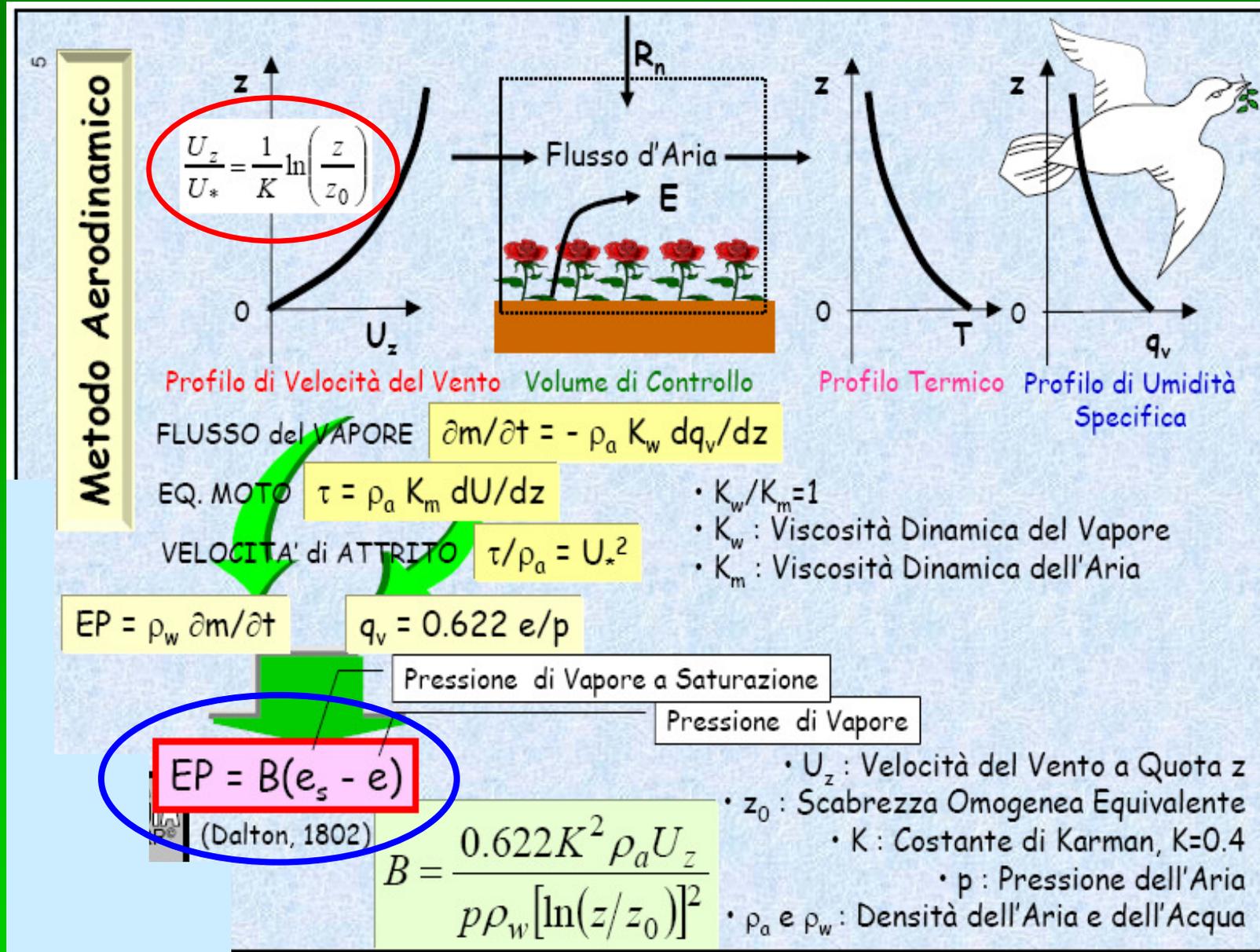
Se $H \ll R_n$, $G \ll R_n$ e $H+G \ll R_n$

$$EP = R_n / (\lambda \rho_w)$$

EP dipende solo dalla Radiazione Netta R_n e dalla Temperatura al Suolo T_s



Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale



Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

6

Metodo Combinato (Bilancio Energetico + Aerodinamico)



$$EP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (EP_{rad}) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (EP_{aer})$$

pendenza della curva che esprime la pressione di vapore saturo in funzione della temperatura [kPa/°C]

$$\Delta = de_s/dt = 4098 e_s / (237.3 + T)^2, \text{ in KPa/}^\circ\text{C}$$

$$\gamma = \frac{p C_p}{0,622 \lambda}, \text{ in KPa/}^\circ\text{C} = 0.066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Costante Psicrometrica

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sulla temperatura: relazione di Hargreaves-Samani

L'evapotraspirazione potenziale ET_p (su scala minima decadale) è data da [mm d^{-1}]:

$$ET_p = 2.3 \frac{S_0}{\rho \lambda} \sqrt{\Delta T} (T + 17.8)$$

dove:

S_0 = radiazione solare extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

ΔT = differenza tra temperatura massima e minima medie [$^{\circ}\text{C}$]

T = temperatura media [$^{\circ}\text{C}$]

ρ = densità dell'acqua [kg m^{-3}]

λ = calore latente di evaporazione dell'acqua [MJ kg^{-1}]

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sulla temperatura: relazione di Blaney-Criddle

La formula stima l'evapotraspirazione potenziale ET_p come media giornaliera del mese (o di un periodo di rilevamento più lungo) [mm d^{-1}]:

$$ET_p = c p (0.46 T + 8)$$

dove:

T = temperatura media mensile, ottenuta come media aritmetica delle medie giornaliere

p = percentuale media giornaliera delle ore di eliofania all'anno (valore ricavato da specifiche tabelle in funzione della latitudine)

segue

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sulla temperatura: relazione di Blaney-Criddle

c = coefficiente di correzione, introdotto dalla FAO, che tiene conto dell'umidità relativa minima, dell'eliofania relativa e della velocità del vento nelle ore notturne

Il coefficiente **c** si applica implicitamente con un calcolo grafico eseguito su specifici diagrammi dal quale si ottiene il valore dell'evapotraspirazione potenziale standard

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sulla radiazione solare: relazione di Priestley-Taylor

Approssimazione di Priestley-Taylor

Poichè

$$\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (EP_{aer}) \approx 0.3 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (EP_{rad})$$

si può calcolare approssimativamente l'evaporazione potenziale come:

$$EP \approx 1.3 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (EP_{rad})$$

con

$$EP_{rad} \approx R_n / (\lambda \rho_w)$$

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sul modello fisico del processo di evapotraspirazione: relazione di Penman-Monteith

Si tratta di un metodo di complessa applicazione, ma più preciso dei precedenti, in quanto prende in considerazione molteplici variabili climatiche

Il modello di Penman (1948) considera le variabili relative all'apporto energetico e al trasporto turbolento dell'aria

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sul modello fisico del processo di evapotraspirazione: relazione di Penman-Monteith

La modifica introdotta da Monteith (1965) tiene conto anche del complesso meccanismo che regola il passaggio del vapore acqueo dal mesofillo attraverso gli stomi all'atmosfera, applicando un modello semplificato riassunto da due variabili, ossia rispettivamente la resistenza degli stomi e la resistenza aerodinamica

La FAO ha ulteriormente rimodulato il metodo definendo le caratteristiche morfologiche e fisiologiche della coltura di riferimento, in modo da ottenere per le variabili di resistenza un modello ripetibile in differenti contesti

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sul modello fisico del processo di evapotraspirazione: relazione di Penman-Monteith

La formula calcola il flusso di evapotraspirazione giornaliero (in MJ m⁻² d⁻¹ oppure su scala oraria):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

dove:

λ = calore latente di evaporazione [MJ/kg]

$\Delta = de_s/dt$ = pendenza della curva che esprime la pressione di vapore saturo in funzione della temperatura [kPa/°C] segue

Corso di Idraulica ed Idrologia Forestale - Lezione 17

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sul modello fisico del processo di evapotraspirazione: relazione di Penman-Monteith

G = flusso di calore nel terreno [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$]

R_n = radiazione solare netta [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$]

ρ_a = densità dell'aria [kg/m^3]

c_p = calore specifico dell'aria [$\text{kJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}$]

e_s = tensione di vapore saturo dell'aria [kPa]

e_a = tensione di vapore dell'aria [kPa]

r_a = resistenza aerodinamica al flusso di vapore [s/m]

r_s = resistenza degli stomi al flusso di vapore [s/m]

γ = costante psicrometrica [in $\text{kPa}/^\circ\text{C}$]

Modelli di stima dell'evapotraspirazione potenziale

Metodi basati sul modello fisico del processo di evapotraspirazione: relazione di Penman-Monteith

L'equazione di Penman-Monteith si è rivelata valida in molti ambienti, con un margine d'errore del 10%; la FAO raccomanda questo metodo per stimare l'evapotraspirazione potenziale e per determinare i coefficienti colturali da applicare per estrapolare l'evapotraspirazione effettiva

Il limite operativo del metodo sta nella necessità di disporre di una stazione di rilevamento agrometeorologico nell'ambiente di applicazione

Il fabbisogno irriguo di una coltura

Il rendimento delle colture è massimo quando per l'intera stagione colturale è massima la traspirazione, dalla quale dipende in modo essenziale lo sviluppo delle piante

A parità di altre condizioni la quantità d'acqua che l'apparato radicale estrae dal suolo è massima quando il contenuto d'acqua eguaglia la **capacità di ritenzione del terreno (o **capacità di campo**)**

Il fabbisogno irriguo di una coltura

Pertanto il rendimento delle colture è massimo se l'evapotraspirazione raggiunge il valore massimo, pari all'evapotraspirazione potenziale

L'effettuazione del bilancio idrologico su un volume di controllo (mediante l'applicazione dell'equazione di continuità dell'idraulica) permette di scrivere con le opportune semplificazioni:

$$ET = P_e + I_n - \Delta V_u$$

Il fabbisogno irriguo di una coltura

dove:

ET = evapotraspirazione reale della coltura

P_e = pioggia efficace (la parte della precipitazione che, non andando perduta per evaporazione, ruscellamento od infiltrazione, risulta utile ai fini agricoli)

I_n = irrigazione netta (la parte dell'apporto irriguo che, non andando perduta per evaporazione, ruscellamento od infiltrazione, risulta utile ai fini agricoli)

ΔV_u = contributo fornito all'evapotraspirazione dalla riserva d'acqua del terreno (se negativa) od il contributo dato alla riserva d'acqua dalla pioggia efficace e dall'irrigazione netta (se positiva)

Il fabbisogno irriguo di una coltura

Se ET è uguale a ET_p (\rightarrow massimo rendimento della coltura) e l'umidità del terreno è uguale capacità di campo ($\rightarrow \Delta V_u = 0$), si ricava:

$$I_n = ET_p - P_e$$

I_n prende il nome di **fabbisogno irriguo netto**, mentre ET_p quello di **fabbisogno d'acqua della coltura**

Il fabbisogno irriguo di una coltura

Il **fabbisogno irriguo della coltura** è dato dal rapporto fra il **fabbisogno irriguo netto** ed un coefficiente di rendimento (**rendimento di campo**) che tiene conto delle varie perdite per infiltrazione, ruscellamento ed evaporazione (**perdite di campo**)

Il **fabbisogno irriguo all'opera di presa** è fornito dal rapporto fra il **fabbisogno irriguo della coltura** ed un secondo coefficiente di rendimento (**rendimento di distribuzione**) che tiene conto delle perdite idriche nei canali o nelle tubazioni di irrigazione