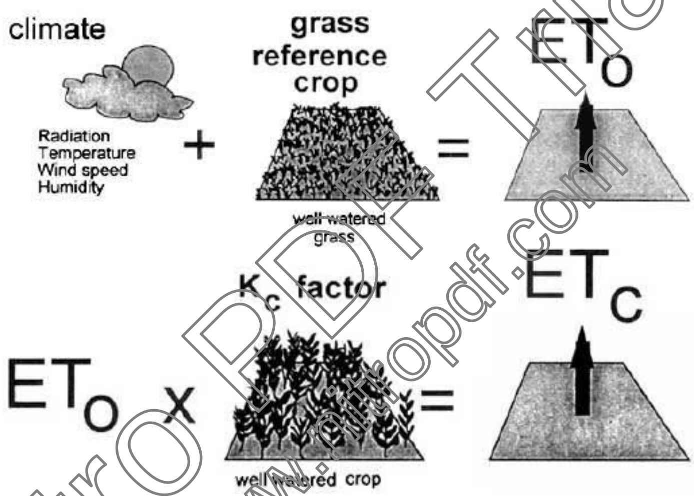
Capítulo 05

Método de Penman-Monteith FAO, 1998 para evapotranspiração de referência ETo



SUMÁRIO

20 páginas

Capítulo 05- Método de Penman-Monteith FAO, 1998 para evapotranspiração de referência ETo

5.1 Introdução

A evaporação é um fenômeno muito importante na natureza, assim como a transpiração das plantas.

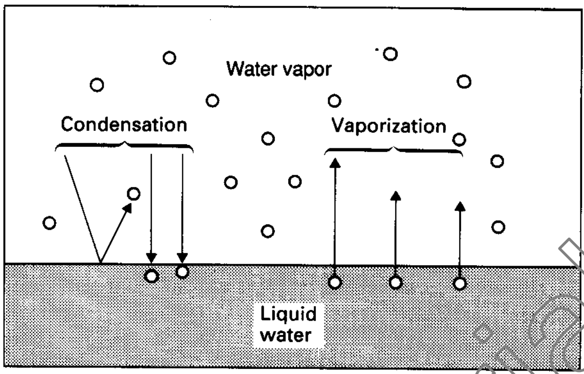


Figura 5.1- Troca molecular entre a superfície do líquido e o vapor d´água. Não são todas as moléculas que atingem a superfície são capturadas, mas algumas se condensam a uma taxa proporcional a pressão de vapor: as moléculas com bastante energia se vaporizam a uma taxa determinada pela temperatura da superfície.
Fonte: Shuttleworth in Maidment, 1993

O Método de Penman-Monteith FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nation*- Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação) é destinado ao cálculo da evapotranspiração de referência ETo em mm/dia, sendo a cultura de referência um gramado com 12cm de altura, praticamente a grama batatais. É considerado também o albedo de 0,23 e a resistência superficial de 70s/m. **É o método padrão da FAO**.

O método é ótimo, pois considera a influência dos estomas à transpiração e a influência da resistência aerodinâmica de uma certa cultura à passagem de massas do ar.

5.2 Nomes técnicos adotados neste trabalho

ETo = evapotranspiração de referência (mm/dia)
ETc = evapotranspiração da cultura (mm/dia). Nota "c" vem de *crop*, ou seja, plantação.

5.3 Dados de entrada

Os dados de entrada do **Método de *Penman-Monteith*, FAO,1998** são os seguintes:

1. Temperatura máxima em ºC
2. Temperatura mínima em ºC
3. Velocidade do vento a 2m de altura u_2 em m/s
4. Umidade relativa do ar máxima (%)
5. Umidade relativa do ar mínima (%)
6. Relação n/N
7. Latitude em graus. Para latitude norte: positivo. Para latitude sul: negativo.
8. Altitude z em m

Um dos grandes problemas do Método de *Penman-Monteith*, 1998 é que são necessários muitos dados de entrada, entretanto, há maneiras de resolver o problema, mas são necessários sempre a temperatura máxima e a temperatura mínima.

5.4 Cálculo da evapotranspiração de referência ETo.

Shuttleworth, 1993 *in Maidment* cita a Equação (5.1), salientando que a mesma não é a equação original de *Penman-Monteith* e sim uma equação na qual alguns termos foram desprezados e informa ainda que tal equação é por ele recomendada para os cálculos de evaporação.

Em outras publicações a Equação (5.1) é chamada de Equação de *Penman- Monteith* FAO, 1998 e também é recomendada pela EMBRAPA.

O método de *Penman-Monteith* FAO, 1998 é considerado o método padrão pela FAO e altamente recomendado.

$$\mathbf{ETo = [0{,}408\ \Delta\ (Rn - G) + \gamma \times 900 \times u_2 \times (es\text{-}ea) / (T+273)] / (\Delta + \gamma\ (1+0{,}34 \times u_2)}$$
(Equação 5.1)

Sendo:
ETo= evapotranspiração de referência (mm/dia)
γ = constante psicrométrica (kPa/ºC)
Δ = derivada da função de saturação de vapor de água (kPa/ºC)
Rn= radiação útil recebida pela cultura de referência (MJ/m^2 xdia)
G= fluxo de calor recebido pelo solo (MJ/m^2 x dia)
u_2= velocidade do vento a 2m de altura (m/s)
T= temperatura média do ar no mês (º C)
es= tensão de saturação de vapor de água (kPa)
ea= tensão de vapor da água atual (kPa)
es-ea= déficit de vapor de pressão de saturação (kPa)

5.5 Fluxo de calor recebido pelo solo G

Conforme *Shuttleworth*, 1993, o fluxo de calor recebido pelo solo pode ser estimado por:
Na prática se usam as temperaturas médias mensais dos meses.

$$\mathbf{G = 0{,}14\ (T_i - T_{i-1}) / 2{,}45} \quad \textbf{(para período de um mês)}$$

Sendo:
G= fluxo de calor recebido durante o período considerado (MJ/m^2 x dia)
T_i = temperatura do ar no mês (ºC)
T_{i-1}= temperatura do ar no mês anterior (ºC)

O valor de G tem sinal. Quando a temperatura do mês é maior que a anterior é positivo, caso contrario será negativo.

Dica: geralmente o valor de G é muito baixo e supomos G =0, conforme sugere Shuttleworth, 1993.

Exemplo 5.1
Calcular o fluxo de calor recebido pelo solo no mês de abril sendo:
Março 14,1 ºC
Abril 16,1 ºC

$$G = 0{,}14\ (\mathbf{T_i - T_{i-1}}) / 2{,}45$$
$$G = 0{,}14\ (16{,}1 - 14{,}1) = 0{,}28 MJ/m^2 \times dia$$

Nota: G poderá ser positivo ou negativo.

5.6 Pressão atmosférica P

A pressão atmosférica depende da altitude z.

$$\mathbf{P = 101{,}3 \times [(293 - 0{,}0065 \times z) / 293]^{5{,}26}}$$

Sendo:
P= pressão atmosférica (kPa)

z= altura acima do nível do mar (m)

Exemplo 5.2
Calcular a pressão atmosférica de um local com altitude z=770m.

$$P= 101,3 \times [(293- 0,0065 \times z)/ 293]^{5,26}$$
$$P= 101,3 \times [(293- 0,0065 \times 770)/ 293]^{5,26}$$
$$P= 92,5 \text{ kPa}$$

5.7 Constante psicrométrica γ

A constante psicrométrica γ é dada pela equação:

$$\boldsymbol{\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times P}$$

Sendo:
γ = constante psicrométrica (kPa/º C)
P= pressão atmosférica (kPa)

Exemplo 5.3
Calcular a constante psicrométrica γ para pressão atmosférica P= 92,5 kPa

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times P$$
$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times 92,52 = 0,062 \text{ kPa/ºC}$$

5.8 Resistência dos estômatos

Estômatos são poros nas folhas das plantas com dimensões que variam de 10^{-5}m a 10^{-4}m, os quais abrem e fecham em resposta a estímulos ambientais, permitindo a entrada de dióxido de carbono a ser assimilado durante a fotossíntese e a saída de vapor de água formando o fluxo de transpiração.

Os poros estomáticos controlam o fluxo de CO_2 para as plantas para ser assimilado durante a fotossíntese e o fluxo de água para a atmosfera que é o fluxo de transpiração.

Define-se LAI (***Leaf Área Índex***) como a razão da superfície das folhas com a projeção da vegetação na superfície do solo em m^2/m^2. O valor LAI varia de 3 a 5 conforme o tipo de vegetação e densidade.

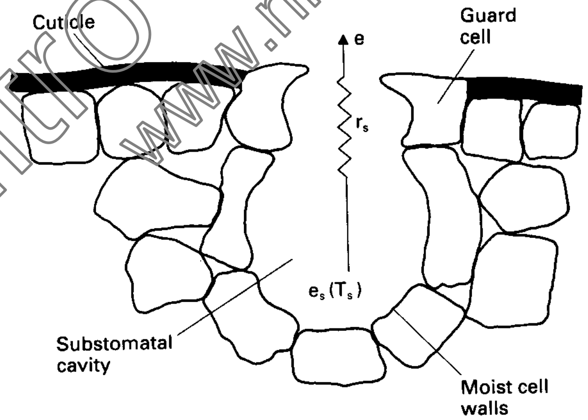


Figura 5.2- Transpiração por difusão molecular do vapor de água através das aberturas dos estômatos de folhas secas. O ar dentro das cavidades dos estômatos está saturada na temperatura da folha e o vapor d'água difuso através da abertura do estômato vai para atmosfera menos saturante contra a resistência do estômato, para cada planta é chamada de superfície de resistência RS.
Fonte: Shuttleworth in Maidment, 1993

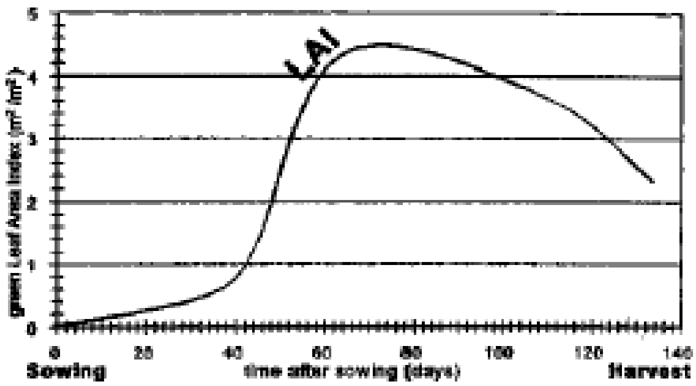


Figura 5.3- Variação da LAI

Fonte: FAO, 1998

A resistência dos estômatos é:

rs= 200/ LAI

Conforme Shuttleworth in Maidment, 1993 o valor de LAI pode ser estimado para as culturas de grama e alfafa.

LAI= 24 x hc 0,05m<hc<0,15m grama
LAI= 5,5+ 1,5 ln(hc) 0,10m<hc<0,50m alfafa

Para um gramado com 0,12m de altura temos:

rs= 200/ LAI= 200/ (24x0,12)= 200/2,9=69 s/m

A FAO, 1998 adota **rs=70 s/m**

Shuttleworth, 1993 compara a resistência rs com a resistência da energia elétrica usando a Lei de Ohm, onde a tensão U é igual a resistência R multiplicada pela corrente.

U=Rx I e R= U/I

Semelhantemente teremos para o estomata de uma folha:

E= k(es-e)/ rs

Onde a pressão de vapor é proporcional ao fluxo de valor E.

5.9 Albedo

Conforme FAO, 1998 uma considerável parte da radiação solar é refletida. A fração α é denominada albedo, que é muito variável para diferentes superfícies e do ângulo de incidência à superfície com declividade.

O albedo pode ser grande como α=0,95 para uma neve recém caída ou pequeno como α=0,05 de um solo nu molhado. Uma vegetação verde tem um albedo entre 0,20 a 0,25. A grama usada como vegetação de referência, tem albedo α=0,23.

Chin, 2000 apresenta uma a Tabela (5.1) do albedo conforme o tipo de cobertura do solo.

Tabela 5.1- Valores do albedo α conforme a cobertura do solo

Cobertura do solo	Albedo α
Superfície da água	0,08
Floresta alta	0,11 a 0,16
Cultura alta	0,15 a 0,20
Cultura de cereais	0,20 a 0,26
Cultura baixa	0,20 a 0,26
Gramado e pastagem	0,20 a 0,26
Solo nú molhado	0,10
Solo nú seco	0,35

Fonte: Chin, 2000

5.10 Radiação extraterrestre Ra

A radiação solar extraterrestre Ra no topo da atmosfera em (MJ/m^2 x dia) pode ser estimada por:

Ra= (24x60/PI) x dr x Gscx [ws x sen (Φ) x sen (δ)+ cos(δ) x cos(Φ) sen (ws)].

Sendo:

Ra= radiação solar no topo da atmosfera ou radiação extraterrestre (MJ/m^2 x dia)

Gsc= constante solar= 0,0820 MJ/m^2 x min

ws= ângulo solar (rad)

Φ= latitude (rad)

δ =declinação solar (rad)

dr= distância relativa da Terra ao Sol (rad)

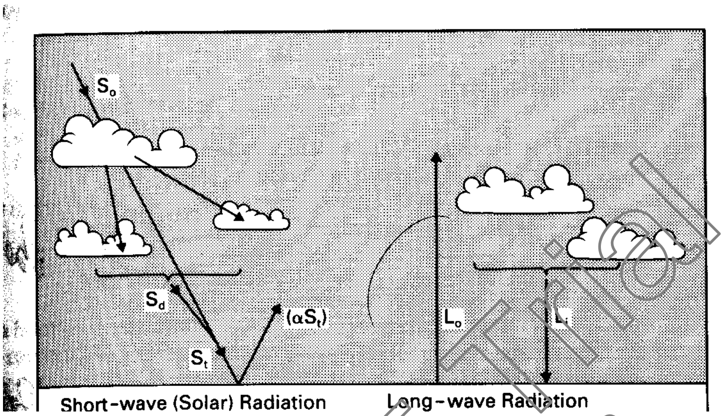


Figura 5.4- Balanço da radiação na superfície da Terra. A radiação St que incide no topo da atmosfera So alcança o solo e algumas Sd indiretamente são refletidas pelo ar e pelas nuvens. A proporção α do albedo é refletida. As ondas de radiação longa Lo é parcialmente compensada pela radiação de onda longa Li. Si é tipicamente 25 a 75% de So, enquanto So pode variar entre 15 a 100% de St; Ambas são influenciadas pela cobertura das nuvens. O valor α é tipicamente 0,23 para superfície de terra e 0,018 para superfície de água.

Fonte: Shuttleworth in Maidment, 1993

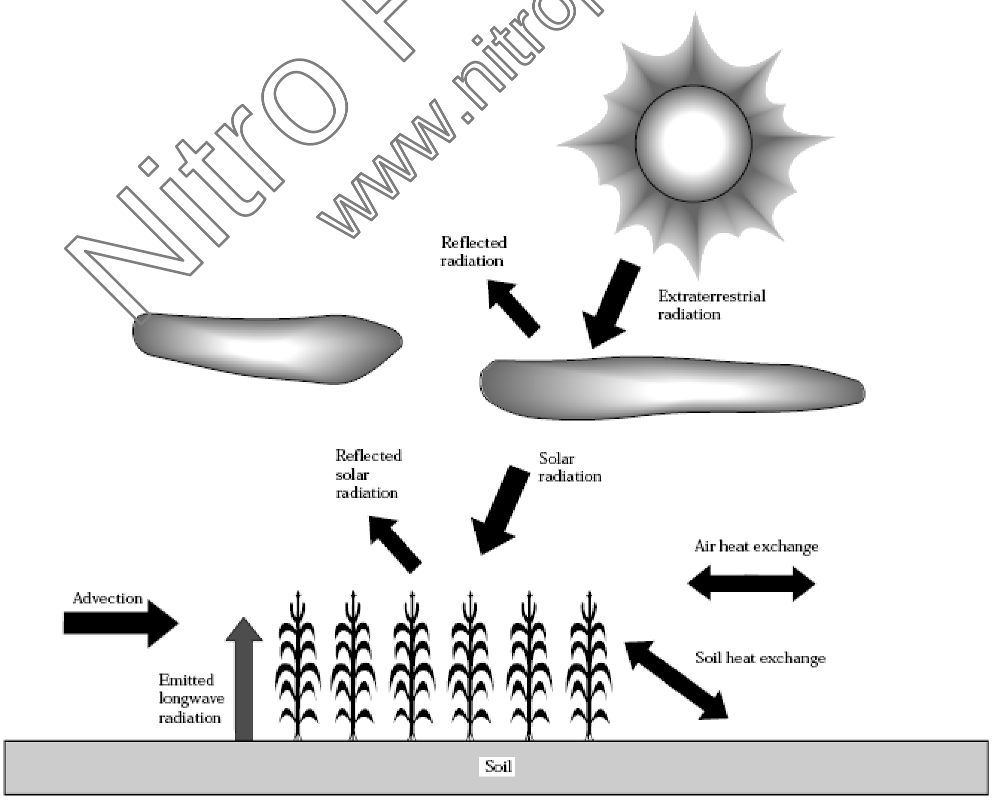


Figura 5.1- Energia disponível para evapotranspiração da cultura
Fonte: USA, Soil Conservation Service (SCS) , 1993

5.11 Distância relativa da Terra ao Sol dr

Mas a dr é a distância relativa da terra ao sol que é fornecida pela equação em radianos:

dr= 1 + 0,033 x cos [(2 x PI / 365) x J]

Sendo:
dr= distância da terra ao sol (rad)
J= dia Juliano que varia de 1 a 365dias.

N= (24/ PI) x ws

Mas:

ws= arccos [-tan(Φ) x tan (δ)]

Sendo:
ws= ângulo da hora do por do sol em (rad)
Φ= latitude do local considerado. Positivo no hemisfério norte e negativo no hemisfério Sul (Cuidado!).
Para Guarulhos Φ=- 23º e 30min = -23,5º (hemisfério sul é negativo). Também deve estar em (rad).
δ = declinação solar (rad)
N= número de horas de luz solar em um dia (h)

5.12 Declinação solar δ (rad)

A declinação solar δ pode ser calculada por:

δ= 0,409 x sen [(2x PI/ 365) x J - 1,39]

5.13 Dia Juliano

Vai de 1 a 365 dias. Geralmente é o meio do mês contado deste o dia primeiro. Usaremos como base sempre o dia 15 de cada mês.

Assim para janeiro o dia Juliano é 15; para fevereiro é 46; para março é 74 e para abril 105 e assim por diante conforme Tabela (5.2). Usamos a planilha Excel da Microsoft com a função TRUNCAR

=TRUNCAR (Coluna 1 x 30,5 – 14,6) dará o valor 15 e assim por diante.

Tabela 5.2-Dia Juliano

Ordem	**Mês**	**Dia Juliano (1 A 365)**
Coluna 1	**Coluna 2**	**Coluna 3**
		=TRUNCAR (Coluna 1 x 30,5 -14,6
1	**Janeiro**	15
2	**Fevereiro**	46
3	**Março**	74
4	**Abril**	105
5	**Maio**	135
6	**Junho**	166
7	**Julho**	196
8	**Agosto**	227
9	**Setembro**	258
10	**Outubro**	288
11	**Novembro**	319
12	**Dezembro**	349

Tabela 5.2- Calendário do dia Juliano

Day of month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

Fonte: USA, SCS, 1993

Exemplo 5.4

Calcular a declinação solar para o mês de março em local.

O dia Juliano para o mês de março conforme Tabela (5.1) é J=74dias.

δ= 0,4093 x sen [(2x PI/ 365) x J - 1,405]

δ= 0,4093 x sen [(2x 3,1416/ 365) x 74 - 1,405]= - 0,040 rad

Exemplo 5.5

Calcular o ângulo do por do sol ws em local com latitude Φ= -23,5º (sinal negativo porque está no hemisfério sul) e declinação solar

δ = -0,040 em radianos.

23 graus + 30min/ 60 = 23 + 0,5= 23,5º

Primeiramente transformemos Φ= 23,5º em radianos:

Radiano= -23,5º x PI / 180=-23,5 x 3,1416/180=-0,410= Φ

ws= arccos [-tan(Φ) x tan (δ)]

ws= arccos [- tan(-0,410) x tan (-0,040)]= 1,59rad

Exemplo 5.6
Calcular a distância relativa da terra ao sol para o mês de março, sendo o dia Juliano J=74

dr= 1 + 0,033 x cos [(2 x PI / 365) x J]

dr= 1 + 0,033 x cos [(2 x 3,1416 / 365 x 74]

dr=1,010 rad

Exemplo 5.7
Calcular o número máximo de horas de sol por dia N em horas para o mês de março sendo ws= 1,59 rad

N= (24/ PI) x ws

N= (24/ 3,1416) x 1,59=1**2,1h**

Figura 5.5- Dispositivo para achar o valor de n denominado Campbell Stokes
http://www.russell-scientific.co.uk/meteorology/campbell_stokes_sunshine_recorder.html

Exemplo 5.8
Calcular a relação n/N sendo N= 12,1h e n=5h
Nebulosidade = n/N = 5/ 12,1= 0,41 ou seja 41%

O valor de "n" pode ser medido no local usando o dispositivo da Figura (5.5).

Exemplo 5.9
Calcular a radiação solar extraterrestre Ra para o mês de março para local com latitude sul de Φ=-23,5º = -0,410 , ws= 1,59rad δ= - 0,040 rad e dr=1,009rad

Ra= (12 x 60/PI) x Gsc x dr x [ws x sen (Φ) x sen (δ)+ cos(δ) x cos(Φ) sen (ws)]
Ra= (12 x 60/PI) x 0,0820x 1,009 x [1,59 x sen (-0,410) x sen (-0,040)+ cos(-0,040) x cos(-0,410) sen (1,59)]= 36,03 MJ/m^2xdia

5.14 Mudança de unidades

A radiação solar pode ser expressa em mm/dia e MJ/m^2 x dia através da seguinte equação:

Para transformar MJ/m^2 x dia para mm/dia.

Rn (mm/dia) = 1000 x Rn x (MJ/m^2 x dia) / (ρ_w x λ) = Rn x(MJ/m^2 x dia) / λ

Sendo:

ρ_W= massa específica da água (1000kg/m^3)

λ= calor latente de vaporização em MJ/kg. Geralmente λ=2,45.

λ = 2,501- 0,002361 x T

T= temperatura em graus centígrados.

Para transformar mm/dia para MJ/m^2 x dia.

Rn (MJ/m^2 x dia) = Rn x (mm/dia) x λ

Exemplo 5.10

Mudar as unidades de 15mm/dia para MJ/m^2 x dia do mês de março que tem temperatura de 23,2º.

Primeiramente calculemos o calor latente de vaporização λ.

λ = 2,501- 0,00236 x T

Sendo:

λ = calor latente de evaporação (MJ/kg)

T= temperatura média mensal º C.

λ = 2,501- 0,00236 x23,2 =2,45 MJ/kg

So= 15mm/dia (exemplo de unidade a ser mudada)

So (mm/dia) = 1000 x So x (MJ/m^2 x dia) / (1000 x λ) = So x(MJ/m^2 x dia) / λ

So (MJ/m^2 x dia) = So (mm/dia) x λ = 15 x 2,45= 36,75 MJ/m^2 x dia

5.15 Rs

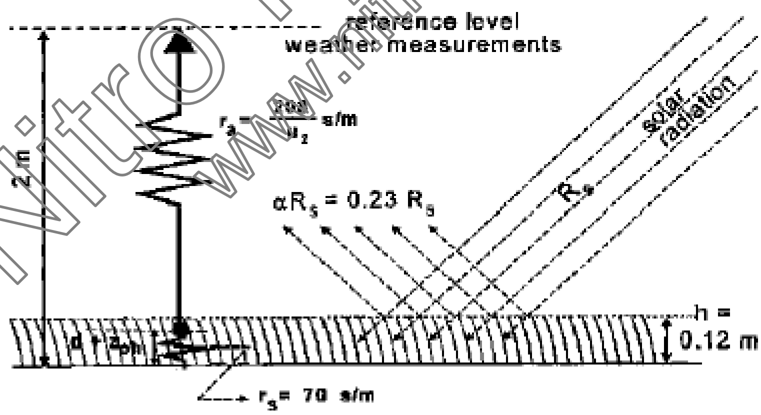


Figura 5.1- Radiação
Fonte: FAO, 1998

Rs= (as + bs x n /N)x Ra

Exemplo 5.11

Calcular a energia total incidente sobre a superfície terrestre Rs, sendo dado n/N=0,42 e as= 0,25 e bs= 0,50 e Ra=36,75 MJ/m^2 x dia

Ra= radiação solar extraterrestre (MJ/m^2 xdia)

Rs= (as + bs x n /N)x Ra

Rs= (0,25 + 0,50 x 0,42)x 36,75= 16,9 MJ/m^2 x dia

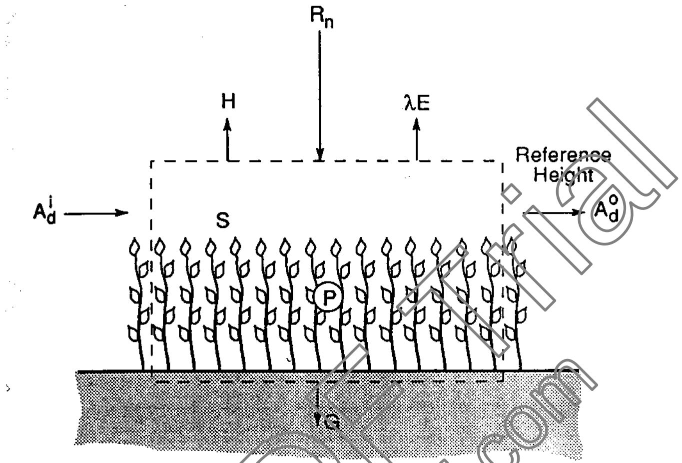


Figura 5.6- Os componentes do balanço de energia de um volume abaixo da superfície do solo com a altura na água a radiação é determinada. Fonte: Shuttleworth in Maidment, 1993

5.16 Tensão de saturação de vapor es.

Depende da temperatura do ar.

es= 0,61 x exp [17,27 x T/ (237,3 + T)]

Sendo:
es= tensão de saturação de vapor (kPa)
T= temperatura média do mês (ºC)
exp= 2,7183... (base do logaritmo neperiano)

Exemplo 5.12

Calcular a tensão de saturação de vapor es para o mês de março sendo a temperatura de 23,2ºC.

es= 0,6108 x exp [17,27 x T/ (237,3 + T)]
es= 0,6108 x exp [17,27 x 23,2/ (237,3 + 23,2)]
es=2,837 kPa

5.16 Derivada da função de saturação de vapor Δ

$$\Delta = 4098 \times es / (237,3 + T)^2$$

Sendo:
Δ=derivada da função de saturação de vapor de água (kPa/ºC)
es=tensão de saturação de vapor (kPa)
T= temperatura média do mês (ºC)

Exemplo 5.13

Calcular a derivada da função de saturação de vapor de água Δ para o mês de março com temperatura média mensal de 23,2ºC e tensão de saturação de vapor es=2,837kPa.

$$\Delta = 4098 \times es / (237,3 + T)^{2}$$
$$\Delta = 4098 \times 2,837 / (237,3 + 23,2)^{2}$$
$$\Delta = 0,171 \text{ kPa/ºC}$$

5.17 Pressão de vapor da água à temperatura ambiente

ea= (UR /100) x es

Sendo:

ea= pressão de vapor de água a temperatura ambiente (kPa)
UR= umidade relativa do ar média mensal fornecida (%)
es= tensão de saturação de vapor (kPa)

Exemplo 5.14

Calcular a pressão de vapor de água à temperatura ambiente para o mês de março sendo T= 23,2º C e es=2,837 kPa e a umidade relativa do ar UR= 75%

ea= (UR /100) x es
ea= (75 /100) x 2,837 =2,120 kPa

5.18 Déficit de vapor de pressão D

D= es – ea

Sendo:

D= déficit de vapor de pressão (kPa)
es= tensão de saturação de vapor (kPa)
ea= pressão de vapor da água à temperatura ambiente (kPa)

Exemplo 5.15

Calcular o déficit de vapor de pressão D para o mês de março sendo es=2,837 kPa e ea= 2,120 kPa.

D= es – ea
D= 2,837 – 2,120=0,717 kPa

5.19 Cálculo da Radiação Rn

A radiação Rn é a diferença entre a radiação que entra Rns e a radiação que sai Rnl.

Rn= Rns - Rnl

5.20 Radiação solar em dias de céu claro Rso

É fornecida pela equação:

$$\mathbf{Rso = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z) \times Ra}$$

Sendo;

Rso= radiação solar em dias de céu claro (MJ/m^2xdia)
z= altura do local em relação ao nível do mar (m)
Ra= radiação solar extraterrestre (MJ/m^2 xdia)

Exemplo 5.16

Calcular o valor de Rso para município com altura z=770m e Ra já calculado para o mês de março de 36,03MJ/m^2xdia.

$$Rso = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z) \times Ra$$
$$Rso = (0,75 + 0,00002 \times 770) \times 36,0 = 27,58 \text{ MJ/m}^2\text{xdia}$$

5.21 Radiação útil de curto comprimento Rns

$$\mathbf{Rns = (1 - \alpha) \times Rs}$$

Exemplo 5.17

Calcular a radiação solar extraterrestre Rns, sendo a energia total incidente sobre a superfície terrestre Rs= 16,9 MJ/m^2 x dia e o albedo α =0,23.

$$\mathbf{Rns = (1 - \alpha) \times Rs}$$

$$\mathbf{Rns = (1 - 0{,}23) \times 16{,}9 = 12{,}7\ MJ/m^2 \times dia}$$

A radiação útil de curto comprimento de onda Rs pode ser calculada por:

$$\mathbf{Rns = (1 - \alpha) \times Rs}$$

$$\mathbf{Rs = (as + bs \times n/N) \times Ra = (0{,}25 + 0{,}50 \times n/N) \times Ra}$$

Sendo:
α= albedo. Para solo gramado α=0,23
as=0,25 e bs=0,50 são coeficientes que para climas médios
n= número de horas de sol por dia (h)
N= número máximo de horas de sol por dia (h)
n/N= nebulosidade ou fração de luz. Pode também ser fornecido em porcentagem. É uma medida qualitativa não muito precisa. Para Guarulhos a média é n/N= 0,42, ou seja, 42%.
Ra= radiação solar extraterrestre (MJ/m^2 xdia)
Rs= radiação solar de entrada. Energia total incidente sobre a superfície terrestre (MJ/m^2xdia)
Rns= radiação de curto comprimento (MJ/m^2xdia)

5.22 Radiação de ondas longas Rnl

$$\mathbf{Rnl = \sigma \times [\,(Tmax^4 + Tmin^4)/2] \times (0{,}34 - 0{,}14 \times ea^{0{,}5}) \times [(1{,}35 \times Rs/Rso - 0{,}35]}$$

Sendo:
Rnl= radiação solar de ondas longas (MJ/m^2 x dia).
ea= pressão atual de vapor (kPa)
Rs= radiação solar (MJ/m^2xdia)
Rso= radiaçao solar em dias de céu claro (MJ/m^2xdia)
Rs/Rso= radiação de onda curta limitada a $\leq$ 1,0.
σ=constante de Stefan-Boltzmann=4,903 x 10^{-9} MJ/(m^2 K^4)
Tmax= tmax(ºC) + 273,16. Em graus Kelvin: K= ºC + 273,16
Tmini= tmin (ºC)+ 273,16

Exemplo 5.18

Calcular a radiação de onda longa "Ln" para o mês de março sendo:
Tmin=15,3 ºC
Tmax= 31,7ºC
ea= 2,40kPa
Rs= 16,63 MJ/m^2xdia
Rso= 27,58 MJ/m^2xdia
Rs/Rso= 0,60 <1 OK.
Rnl= σ x [($Tmax^4$ + $Tmin^4$)/2]x (0,34-0,14x ea ^{0,5})x [(1,35 x Rs/Rso – 0,35]
Rnl= 4,903 x 10^{-9} x [((31,7+273,16)^4 + (15,3+273,16)^4)/2]x (0,34-0,14x 2,4^{0,5})x [(1,35 x 0,60 – 0,35] = 2,18 MJ/m^2x dia
Rnl= 2,18 MJ/m^2xdia

Exemplo 5.19

Calcular a evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith FAO, para o mês de março, município de Guarulhos, com velocidade de vento a 2m de altura de V= 1,5m/s.

Consideramos G=0.

$$ETo= [0{,}408\ \Delta\ (Rn - G)\ +\ \gamma \times 900 \times u_2 \times (es\text{-}ea)\ /(T+273)]\ /\ (\ \Delta + \gamma\ (1+0{,}34 \times u_2)$$

(Equação 5.2)

Sendo:

ETo= evapotranspiração potencial (mm/dia)

γ = constante psicrométrica (kPa/ºC)

Δ = derivada da função de saturação de vapor de água (kPa/ºC)

Rn= radiação útil recebida pela cultura de referência (MJ/m^2 xdia)

G= fluxo de calor recebido pelo solo (MJ/m^2 x dia)

u_2= velocidade do vento a 2m de altura (m/s)

T= temperatura média do ar no mês (º C)

es= tensão de saturação de vapor de água (kPa)

ea= tensão de vapor da água atual (kPa)

es-ea= déficit de vapor de pressão de saturação (kPa)

Os cálculos de janeiro a dezembro estão nas Tabela (5.3) a (5.8).

Tabela 5.3- Método de Penman-Monteith – FAO

Dias no mês		Precipitação	Temp max	Temp min	(Media ºC)
		(mm)			23,9
31	Janeiro	254,1	32,6	16,0	24,7
28	fevereiro	251,7	31,8	16,2	24,0
31	março	200,9	31,7	15,3	24,0
30	abril	58,3	30,0	12,8	22,5
31	maio	70,3	27,9	9,7	19,3
30	junho	39,0	26,3	8,3	18,2
31	julho	30,8	26,8	8,1	17,8
31	agosto	24,9	29,3	8,6	19,6
30	setembro	75,1	31,5	9,7	20,2
31	outubro	137,4	32,3	12,2	21,8
30	novembro	130,5	32,1	12,8	22,5
31	dezembro	214,7	32,3	15,0	23,9
365		1487,8			

Tabela 5.4- Método de Penman-Monteith – FAO

UR umidade média relativa do ar	n/N	Umidade	Saturação	U_2 Velocidade do ar
%		kPa	kPa	m/s
75	**0,31**	2,54	3,37	1,5
75	**0,39**	2,44	3,28	1,6
75	**0,42**	2,40	3,21	1,5
73	**0,47**	2,09	2,86	1,5
75	**0,47**	1,85	2,48	1,4
75	**0,49**	1,70	2,26	1,3
73	**0,49**	1,67	2,30	1,5
68	**0,53**	1,78	2,60	1,4
72	**0,37**	2,09	2,91	1,7
73	**0,35**	2,29	3,12	1,9
73	**0,37**	2,28	3,13	1,9
74	**0,33**	2,42	3,27	1,7
73	**0,42**		Média=	**1,6**

Tabela 5.5- Método de Penman-Monteith – FAO

λ (MJ/kg)	Albedo gramado	Dia Juliano (1 a 365)	dr (rad)	delta (rad)	Latitude Guarulhos
2,50	0,23	15	1,032	-0,373	-23,5
2,44	0,23	46	1,023	-0,236	-23,5
2,44	0,23	74	1,010	-0,054	-23,5
2,45	0,23	105	0,992	0,160	-23,5
2,46	0,23	135	0,977	0,325	-23,5
2,46	0,23	166	0,968	0,406	-23,5
2,46	0,23	196	0,968	0,377	-23,5
2,45	0,23	227	0,976	0,244	-23,5
2,45	0,23	258	0,991	0,043	-23,5
2,45	0,23	288	1,008	-0,164	-23,5
2,45	0,23	319	1,023	-0,332	-23,5
2,44	0,23	349	1,032	-0,407	-23,5

Tabela 5.6- Método de Penman-Monteith – FAO

Latitude (rad)	ws (rad)	N (h)	Altitude z D(m)	atmos kPa	rs s/m	Ra MJ/m^2xdia
-0,410	1,74	13,31	770,00	92,52	70	42,46
-0,410	1,68	12,80	770,00	92,52	70	40,10
-0,410	1,59	12,18	770,00	92,52	70	36,03
-0,410	1,50	11,46	770,00	92,52	70	30,12
-0,410	1,42	10,88	770,00	92,52	70	24,91
-0,410	1,38	10,56	770,00	92,52	70	22,18
-0,410	1,40	10,68	770,00	92,52	70	23,08
-0,410	1,46	11,17	770,00	92,52	70	27,29
-0,410	1,55	11,86	770,00	92,52	70	33,13
-0,410	1,64	12,55	770,00	92,52	70	38,23
-0,410	1,72	13,15	770,00	92,52	70	41,56
-0,410	1,76	13,44	770,00	92,52	70	42,85

Tabela 5.7- Método de Penman-Monteith – FAO

Rs MJ/m^2xdia	Rso MJ/m^2 x dia	Rs/Rso	Rsn MJ/m^2 x dia	Rnl MJ/m^2 x dia	Rn=Rns - Rnl MJ/m^2x dia	Δ (kPa/ ºC)
17,23	32,50	0,53	13,26	1,65	11,62	0,1858
17,76	30,69	0,58	13,67	2,00	11,67	0,1795
16,63	27,58	0,60	12,81	2,18	10,63	0,1788
14,62	23,05	0,63	11,25	2,58	8,68	0,1652
12,11	19,07	0,64	9,33	2,71	6,61	0,1396
10,98	16,98	0,65	8,46	2,89	5,57	0,1315
11,46	17,67	0,65	8,83	2,93	5,89	0,1283
14,11	20,89	0,68	10,86	3,09	7,77	0,1416
14,35	25,36	0,57	11,05	2,09	8,96	0,1465
16,32	29,26	0,56	12,56	1,93	10,63	0,1596
18,01	31,81	0,57	13,87	2,00	11,87	0,1653
17,80	32,80	0,54	13,71	1,78	11,92	0,1781

Tabela 5.8- Método de Penman-Monteith – FAO

	Constante psicrométrica			
temp ar		**troca radiação com o solo G**	**Penman-Monteih FAO**	**PM FAO**
graus C	**γ**	**G**	**ETo**	**ETo**
23,7	**(kPa/C)**	**(MJ/m² x dia=**	**(mm/dia)**	**(mm/mês)**
24,7	0,061528	0,141	4,0	123
24,0	0,061528	-0,093	4,0	113
24,0	0,061528	-0,011	3,7	115
22,5	0,061528	-0,210	3,2	95
19,3	0,061528	-0,439	2,5	76
18,2	0,061528	-0,151	2,0	61
17,8	0,061528	-0,062	2,2	68
19,6	0,061528	0,252	2,8	87
20,2	0,061528	0,087	3,3	98
21,8	0,061528	0,224	3,7	116
22,5	0,061528	0,093	4,1	123
23,9	**0,061528**	0,197	**4,1**	**126**
				Total=1201

5.23 Método de Hargreaves

A FAO, 1998 cita o método de Hargreaves:

ETo= 0,0023 x (Tmédio + 17,8) x (Tmax- Timin) ^{0,5} x Ra

Sendo:
ETo= evapotranspiração de referência pela fórmula de Hargreaves (mm/dia)
Tmédio= temperatura média em º C
Tmax= temperatura máxima em ºC
Tmin= temperatura mínima em ºC
Ra= radiação extraterrestre (mm/dia)

5.24 Radiação extraterrestre Ra

A radiação solar extraterrestre Ra no topo da atmosfera em (MJ/m^2 x dia) pode ser estimada por:

Ra= (24x60/PI) x dr x Gscx [ws x sen (Φ) x sen (δ)+ cos(δ) x cos(Φ) sen (ws)].

Sendo:
Ra= radiação solar no topo da atmosfera ou radiação extraterrestre (MJ/m^2 x dia)
Gsc= constante solar= 0,0820 MJ/m^2 x min
ws= ângulo solar (rad)
Φ= latitude (rad)
δ =declinação solar (rad)
dr= distância relativa da Terra ao Sol. (rad)

A FAO recomenda o uso do Método de Hargreaves após calibração do mesmo com a equação:

ETo= a + b x ETo Hargreaves

Para o município de Guarulhos através de análise de regressão linear comparando o valor do Método de Penman-Monteith FAO, 1998 com o Método de Hargreaves fornece:

ETo= a + b x ETo Hargreaves

ETo= 16,04 + 0,52 x ETo Hargreaves (mm/mês) com R^2=0,97 OK.

5.25 Conclusão:

O método de *Penmam-Monteith* FAO, 1998 é o método padrão que forneceu 1.201mm/ano para Guarulhos para o cálculo da evapotranspiração de referência ETo.

5.26 Bibliografia e livros consultados

-OLIVEIRA, RODRIGO PROENÇA. *Cálculo da evapotranspiração potencial*. Portugal, 1998,

-CHIN, DAVID A. *Water Resources Engineering.* Prentice Hall, 2000. 750páginas, ISBN 0-201-35091-2. New Jersey.

-SHUTTLEWORTH, W. JAMES. *Evaporation*, in Maidment, David R. 1993, Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New Yor**k**, ISBN 0-07-039732-5.

-FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION). Cr*op evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO- Irrigation and drainage paper* 56.Rome, 1998. ISBN 92-5-1042105.

-USA, SOIL CONSERVATION SERVICE, setembro 2003 *Chapter 2 – Irrigation water requirements, 310 páginas*