

CAPÍTULO 10**BALANÇO HÍDRICO SEGUNDO THORNTHWAITE E MATHER, 1955****1. Introdução**

A avaliação das condições de disponibilidade de água no espaço de solo ocupado pelas raízes das plantas fornece informações importante para diversos fins como: classificação climática de uma região e projeto e manejo de sistemas de irrigação (COSTA, 1994).

Existem duas maneiras de se conhecer o armazenamento de água no solo disponível para determinada cultura em cada época do ano: a) Medindo direta ou indiretamente a umidade do solo; b) Estimando esse valor por meio de modelos que relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com os componentes de entrada e saída de água no solo. Esses modelos são conhecidos como Balanços de Água no Solo ou simplesmente Balanços Hídricos.

Existem diversos tipos de balanços hídricos, cada um com a sua finalidade principal. Um desses modelos mais conhecidos foi o proposto por Thornthwaite, em 1948, posteriormente modificado por Mather, em 1955, que ficou conhecido como “Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather, 1955”. A principal função deste balanço hídrico é servir como base para uma classificação climática (OMETTO, 1981).

2. Metodologia**2.1 Capacidade máxima de água disponível**

Uma vez que o objetivo é determinar o armazenamento de água no solo (ARM), é imprescindível saber qual a máxima quantidade de água que o solo em questão pode reter, na forma líquida. A essa grandeza determina-se Capacidade Máxima de Água Disponível (CAD), a qual pode ser determinada por meio da seguinte expressão:

$$CAD = \frac{(CC-PMP)}{Da} z$$

(eq. 1)

10

Em que,

CAD = capacidade máxima de água disponível (mm);

CC = umidade do solo à capacidade de campo (%peso);

PMP = umidade do solo ao ponto de murcha permanente (%peso);

Da = densidade aparente do solo (g/cm^3);

z = profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm).

O armazenamento de água no solo num dado momento (ARM) pode ser determinado utilizando-se a equação 1, substituindo-se o termo CC pelo teor de umidade atual no solo (%peso).

Observe que CAD não é o total de água no solo, e sim o total de água no solo disponível para a planta.

Israelsen e Hansen (1967), citado por COSTA (1994) resumiram algumas propriedades físicas de diversos tipos de solos no Quadro 1.

Quadro1. Propriedades físicas representativas de alguns solos e suas faixas normais de variação (entre parênteses).

Textura do solo	Da (g/cm³)	CC(%peso)	PMP(%peso)
Arenoso	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	4 (2-6)
Franco arenoso	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 (4-8)
Franco	1,40 (1,35-1,50)	22(18-26)	10 (8-12)
Franco argiloso	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	13 (11-15)
Siltoso argiloso	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)
Argiloso	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)

2.2 Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1955

Resolver o balanço hídrico de um solo é, na essência, resolver a equação da continuidade para aquele solo. Considerando-se um sistema formado por uma certa camada de solo, e assumindo-se a água como um fluido incompressível, “a diferença entre a quantidade que entra no sistema e a que sai do mesmo sistema é igual à variação do armazenamento de água neste sistema”. Sob a forma analítica, escreve-se:

$$E - S = \Delta A$$

(eq.2)

Em que,

E = entrada de água no sistema;

S = saída de água do sistema;

ΔA = variação do armazenamento de água neste sistema.

Se considerarmos apenas o movimento vertical da água, o que entra neste sistema é apenas a água devida à precipitação (P), enquanto o que sai é devido à evapotranspiração (ETR) e à água que percola abaixo do alcance do sistema radicular da cultura (EXC). Assim, pode-se reescrever a eq.2 na forma:

$$P - (ETR + EXC) = \Delta A$$

(eq.3)

ou

$$P = ETR + EXC + \Delta A$$

(eq.4)

Em que,

P = precipitação média mensal (mm);

ETR = evapotranspiração real média mensal (mm);

EXC = excessos hídricos, representando a percolação abaixo do sistema radicular (mm);

ALT = alteração da umidade do solo (ARM), do último dia do mês anterior para o último dia do mês em questão.

2.3 Modelo para retirada da água do solo

A água no solo está sujeita a ação de diversas forças, dentre as quais as mais importantes são:

- Tensão superficial, que é responsável pela atração entre as partículas de solo e as moléculas de água;
- Força gravitacional, responsável pela percolação da água;
- Força de sucção das raízes.

Quando o solo está saturado, a força gravitacional é a mais importante, pois predomina sobre as demais, puxando a água para baixo até que cessem os movimentos verticais. Neste instante, diz-se que o solo está à capacidade de campo.

A partir daí até o ponto de murcha permanente, o caminho que a água irá tomar será definido pelo balanço entre as forças de tensão superficial e de sucção das raízes.

É claro que a força que retém a água no solo é inversamente proporcional à distância entre a molécula de água e a partícula de solo. Uma molécula de água mais próxima à partícula de solo é retida com mais força, enquanto uma mais distante pode ser retirada com facilidade (Figura 1).

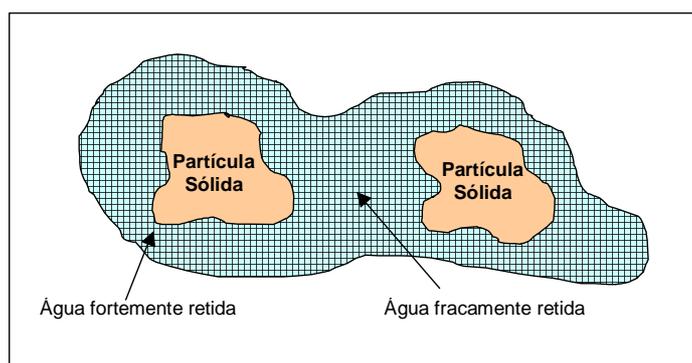


Figura 1. Água retida no solo.

Pela Figura 1 fica claro que quanto mais seco estiver o solo, maior é a resistência do solo à retirada de água.

O modelo de Thornthwaite e Mather (1955) considera esse aumento de resistência. Para tanto, ele propõe a seguinte metodologia para determinar o teor de umidade do solo (ARM) em condições de retirada de água do solo.

- Calcular o teor de umidade que o solo teria se não houvesse aumento da resistência do solo à retirada da água, ou seja, se a resistência fosse sempre aquela em que o solo está à capacidade de campo. Na prática, esse valor é determinado pelo somatório das diferenças (P-ETP) mensais na época seca do ano, época em que (P-ETP) é sempre negativo. Por essa razão, este valor é chamado de *Negativo Acumulado* (Neg. Ac.):

$$\text{Neg. Ac.} = \sum(\text{P-ETP}) \text{ (se P-ETP negativo)}$$

(eq. 5)

- Determinar ARM pela seguinte expressão:

$$\text{ARM} = \text{CAD} e^{[\text{Neg. Ac.}/\text{CAD}]}$$

(eq.6)

A Figura 2 mostra a variação gráfica entre o armazenamento de água no solo (ARM) e o Negativo Acumulado. Verifique que, quanto mais seco o solo, menor é a variação de ARM.

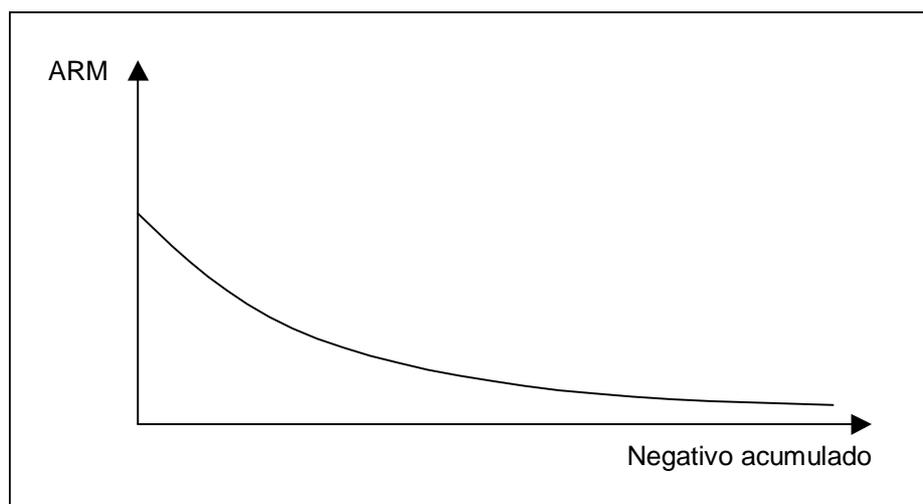


Figura 2. Variação de ARM com o negativo acumulado.

2.4 Passos para resolução do balanço hídrico (regra dos 16 passos)

Deve-se preencher uma planilha (Quadro 2), que foi elaborado para facilitar a resolução do balanço hídrico.

Quadro2. Planilha para o cálculo do balanço hídrico.

1 Mês	2 t (°C)	3 EP (mm)	4 Corr (q)	5 ETP (mm)	6 P (mm)	7 P-ETP (mm)	8 NegAc (mm)	9 ARM (mm)	10 ALT (mm)	11 ETR (mm)	12 DEF (mm)	13 EXC (mm)	14 R (mm)
JAN													
FEV													
MAR													
ABR													
MAI													
JUN													
JUL													
AGO													
SET													
OUT													
NOV													
DEZ													
Soma/Média													

1º Passo:

Preencher as colunas 1 (meses), 2 (Temp - temperatura) e 6 (P - precipitação) do Quadro 2.

2º Passo:

Somar as médias das temperaturas mensais e tirar a média.

3º Passo:

Calcular o valor do índice térmico anual I, utilizando a seguinte equação:

$$I = 1,049(\bar{T}_{anual})^{1,514}$$

(eq. 7)

Em que,

I = índice térmico anual (-);

\bar{T}_{anual} = temperatura média anual.

4º Passo:

Calcular o valor da constante “a” que depende do local, utilizando a seguinte equação:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

(eq.8)

5º Passo:

Preencher a coluna 3 (EP – evapotranspiração potencial para um mês de 30 dias, considerando –se a duração do período diurno igual a 12 horas), utilizando a seguinte equação:

$$EP = 16 \left(\frac{t_i}{I} \right)^a$$

(eq. 9)

Em que,

EP = evapotranspiração potencial (mm);

t_i = temperatura média mensal, °C;

I = índice térmico anual (-);

a = constante que depende do local (-).

6º Passo:

Preencher a coluna 4 (Corr – correção), conforme os valores do Quadro 3.

7º Passo:

Preencher a coluna 5 (ETP – evapotranspiração potencial corrigida), utilizando a seguinte equação:

$$ETP = EP \text{ Corr}$$

(eq.10)

Em que,

ETP = evapotranspiração potencial corrigida (mm).

8º Passo:

Preencher a coluna 7 (P – ETP).

Quadro 3. Valores de correção (Corr) de acordo com a Latitude e os meses do ano.

Latit.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2° N	1,02	0,93	1,03	1,00	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,03	1,00	1,03
0°	1,03	0,93	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03
2° S	1,04	0,94	1,04	1,00	1,03	0,99	1,02	1,02	0,99	1,03	1,00	1,04
4° S	1,05	0,95	1,04	1,00	1,03	0,98	1,01	1,02	0,99	1,03	1,01	1,05

6° S	1,06	0,96	1,05	1,00	1,02	0,98	1,00	1,01	0,98	1,03	1,01	1,06
8° S	1,07	0,97	1,06	1,00	1,02	0,97	0,99	1,00	0,98	1,03	1,01	1,06
10° S	1,08	0,97	1,06	1,00	1,01	0,96	0,98	0,99	0,97	1,03	1,02	1,07
12° S	1,09	0,98	1,07	1,01	1,01	0,95	0,97	0,98	0,97	1,02	1,02	1,08
14° S	1,10	0,99	1,07	1,01	1,01	0,95	0,96	0,97	0,96	1,02	1,02	1,09
16° S	1,12	1,00	1,08	1,01	1,00	0,94	0,95	0,96	0,95	1,02	1,03	1,10
18° S	1,13	1,01	1,09	1,01	1,00	0,93	0,94	0,95	0,95	1,02	1,03	1,10
20° S	1,14	1,02	1,09	1,01	0,99	0,92	0,93	0,94	0,94	1,02	1,03	1,11
22° S	1,15	1,03	1,10	1,01	0,99	0,91	0,92	0,93	0,93	1,02	1,04	1,12
24° S	1,16	1,04	1,10	1,01	0,98	0,90	0,91	0,92	0,93	1,02	1,04	1,13
26° S	1,17	1,05	1,11	1,01	0,98	0,89	0,89	0,91	0,92	1,01	1,05	1,14
28° S	1,19	1,06	1,12	1,01	0,98	0,88	0,88	0,89	0,91	1,01	1,05	1,15
30° S	1,20	1,07	1,13	1,02	0,90	0,87	0,87	0,88	0,91	1,01	1,05	1,16

9º Passo:

Calcular a capacidade de água disponível (CAD), utilizando a seguinte equação:

$$CAD = \frac{(CC-PMP) Da z}{10} \quad (\text{eq. 11})$$

Na direção horizontal deve-se:

10º Passo:

Preencher a coluna 8 (NegAc), de acordo com os seguintes critérios:

a) Estação seca:

$$\text{- Se } P - ETP \geq 0 \quad \text{NegAc} = 0 \quad (\text{eq. 12})$$

$$\text{- Se } P - ETP < 0 \quad \text{NegAc} = \text{NegAc}_{i-1} + (P - ETP) \quad (\text{eq. 13})$$

b) Início da estação chuvosa:

$$\text{NegAc} = \text{CAD} \ln(\text{ARM}/\text{CAD}) \quad (\text{eq.14})$$

Obs: Neste caso o valor de ARM deve ser calculado primeiro.

11º Passo:

Preencher a coluna 9 (ARM –armazenamento de água no solo), de acordo com os seguintes critérios:

- a) Estação seca:
- Se $\text{NegAc} = 0$ $\text{ARM} = \text{CAD}$ (eq. 15)
 - Se $\text{NegAc} < 0$ $\text{ARM} = \text{CAD} e^{[\text{Neg. Ac.}/\text{CAD}]}$ (eq. 16)

- b) Início da estação chuvosa:
 $\text{ARM}_i = \text{ARM}_{i-1} + (\text{P}-\text{ETP})_i$ (eq. 17)

12º Passo:

Preencher a coluna 10 (ALT - alteração da umidade do solo), utilizando a seguinte equação:

$$\text{ALT} = \text{ARM}_i - \text{ARM}_{i-1}$$

(eq.18)

13º Passo:

Preencher a coluna 11 (ETR – Evapotranspiração real), de acordo com os seguintes critérios:

- a) Estação seca:
- Se $(\text{P} - \text{ETP}) \geq 0$ $\text{ETR} = \text{ETP}$ (eq. 19)
 - Se $(\text{P} - \text{ETP}) < 0$ $\text{ETR} = \text{P} - \text{ALT}$ (eq. 20)

14º Passo:

Preencher a coluna 12 (DEF – deficiência hídrica), utilizando a seguinte equação:

$$\text{DEF} = \text{ETP} - \text{ETR}$$

(eq. 21)

15º Passo:

Preencher a coluna 13 (EXC – excedente hídrico), de acordo com os seguintes critérios:

- Apenas quando $(P - ETP) > 0$ e $ARM = CAD$

$$EXC = (P - ETP) - ALT \quad (\text{eq. 22})$$

16º Passo:

Preencher a coluna 14 (R – reposição), de acordo com os seguintes critérios:

- Se $ALT \leq 0$ $R = ETR$ (eq. 23)
- Se $ALT > 0$ $R = ETR + ALT$ (eq. 24)

2.4.1 Conferências

Visando validar o balanço hídrico é aconselhável que se faça as seguintes conferências:

$$\sum ALT = 0 \quad (\text{eq. 25})$$

$$\sum ETP = \sum ETR + \sum DEF \quad (\text{eq. 26})$$

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXC \quad (\text{eq. 27})$$

$$\sum P = \sum ETP + (P - ETP) \quad (\text{eq. 28})$$

2.4.2 Balanço hídrico para a cidade de Viçosa – MG, de acordo com as normais climatológicas de 1961 a 1990

O Quadro 4 mostra o Balanço hídrico para a cidade de Viçosa – MG, de acordo com as normais climatológicas de 1961 a 1990, considerando uma CAD de 100 mm.

2.4.3 Visualização gráfica dos resultados

A Figura 3 mostra o gráfico de linhas gerado baseado nos valores de P, ETP e ETR plotados em relação aos meses do ano. Observa-se nesta figura as áreas hachuradas correspondentes a excesso hídrico, deficiência hídrica, retirada e reposição de água no solo.

Quadro 4. Balanço hídrico, segundo Thornthwaite e Mather, 1955, de Viçosa, MG, Latitude 20°45'S, Longitude 42°51'W, Altitude 673 m.

1 Mês	2 t (°C)	3 EP (mm)	4 Corr (g)	5 ETP (mm)	6 P (mm)	7 P-ETP (mm)	8 NegAc (mm)	9 ARM (mm)	10 ALT (mm)	11 ETR (mm)	12 DEF (mm)	13 EXC (mm)	14 R (mm)
JAN	22,1	93	1,14	106	197	91	0	100	0	106	0	91	106
FEV	22,3	95	1,02	97	149	52	0	100	0	97	0	52	97
MAR	21,8	90	1,09	98	121	23	0	100	0	98	0	23	98
ABR	20,0	76	1,01	77	50	-27	-27	76	-24	74	3	0	74
MAI	17,7	59	0,99	58	30	-28	-55	58	-18	48	10	0	48
JUN	16,0	48	0,92	44	19	-25	-80	45	-13	32	12	0	32
JUL	15,4	44	0,93	41	24	-17	-97	38	-7	31	10	0	31
AGO	16,9	54	0,93	50	19	-31	-128	28	-10	29	21	0	29
SET	18,3	63	0,94	59	54	-5	-133	26	-2	56	3	0	56
OUT	20,2	77	1,02	79	110	31	-56	57	31	79	0	0	110
NOV	20,2	77	1,04	80	205	125	0	100	43	80	0	82	123
DEZ	21,3	86	1,12	96	245	149	0	100	0	96	0	149	96
Soma/Média	19,4	-	-	885	1223	338	-	-	0	826	59	397	-

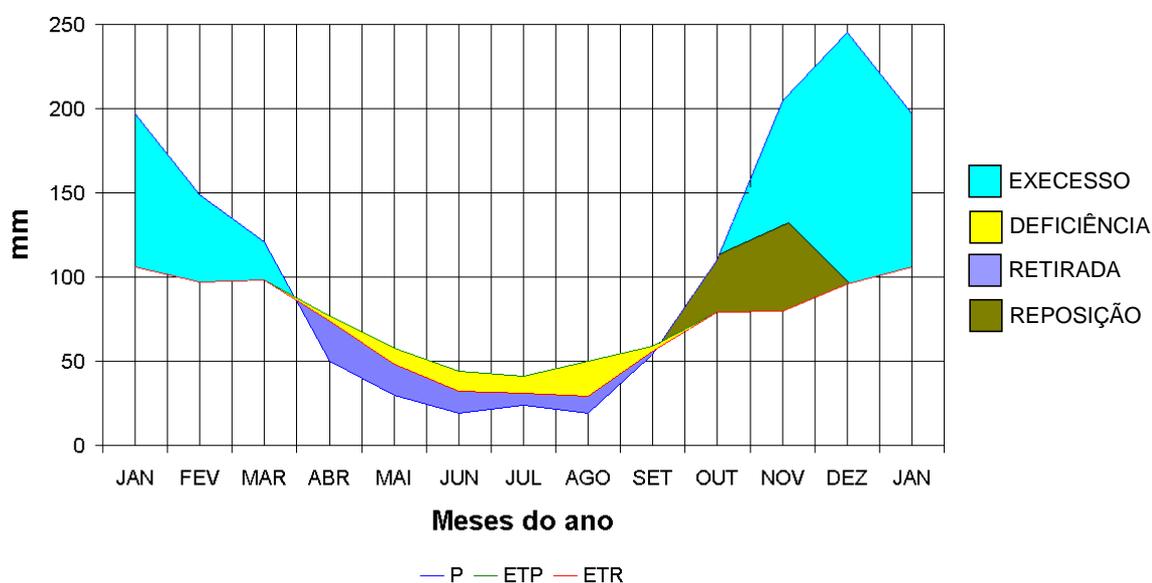


Figura 3. Gráfico de linhas do balanço hídrico de Viçosa, MG.

3. Referências bibliográficas

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Agronômico Ceres. 440p. 1981.

COSTA, M. H. **Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1995**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. Engenharia na Agricultura, Caderno didático 19. 22 p. 1994.

1 Mês	2 t (°C)	3 EP (mm)	4 Corr. (mm)	5 ETP (mm)	6 P (mm)	7 P-ETP (mm)	8 NegAc (mm)	9 ARM (mm)	10 ALT (mm)	11 ETR (mm)	12 DEF (mm)	13 EXC (mm)	14 "R" (mm)
JA													
FEV													
MAR													
AB													
MAI													
JU													
JUL													
AGO													
SET													
OU													
NOV													
DEZ													
Σ/média													