



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

® **M** Plataforma Moretti

Disciplina: Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem

UNIDADE 11 – Balanço hídrico

Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza

E-mail: jmoretti@ufpr.br

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

Objetivo da Unidade didática

Caracterizar, diferenciar e calcular balanços hídricos destinados à engenharia rural (do solo, agrícola, irrigacionista, climatológico).

1 CONSIDERAÇÕES

- Definição de Balanço hídrico;
- Escolha do balanço hídrico.

a) Balanço hídrico quanto à escala espacial

- Escala macro;
- Escala intermediária;
- Escala local.

b) Balanço hídrico quanto à escala temporal

- Pode utilizar qualquer unidade de intervalo de tempo:
 - Intervalos usuais: anuais, mensais, decendiais, semanais, pentadiais ou mesmo diários;
 - Finalidade agrícola: 1 a 10 dias;
 - Sensibilidade da cultura ao déficit
 - Disponibilidade de dados

c) Balanço hídrico cíclico (fechado) ou sequencial (contínuo)

2 BALANÇO HÍDRICO GLOBAL

- Trata da circulação da água entre a Terra e atmosfera (próprio ciclo hidrológico)
- Circulação da água: atmosfera, hidrosfera e litosfera;
- Equação do balanço hídrico

$$\frac{dA_L}{dt} = E + S$$

$$P - E \pm Q = 0$$

Sendo: $\frac{dA_L}{dt}$ – variação no armazenamento da água do sistema por unidade de tempo (mm); E – fluxos positivos, com a entrada de água (mm); S – fluxos negativos, com a saída de água (mm).

- Balanço hídrico médio anual para o planeta Terra ([Tabela 11.1](#))

Tabela 11.1. Balanço hídrico médio anual para o planeta Terra.

Componente do ciclo hidrológico	Continentes	Oceanos	Planeta Terra
	----- Volume armazenado (km ³) -----		
Total de água armazenada	59.089.000 (4,05%)	1.400.000.000 (95,949%)	1.459.104.500 (100%)
	----- Volume movimento em um ano (km ³ ano ⁻¹) -----		
Evaporação (<i>E</i>)	-71.000 (14,06%)	-434.000 (85,94%)	-505.000 (100%)
Precipitação (<i>P</i>)	107.000 (21,19%)	398.000 (78,81%)	505.000 (100%)
Vazão (<i>Q</i>)	-36.000	36.000	0
	----- Áreas (km ²) -----		
Superfície coberta	148.900.000	361.100.000	510.000.000
	----- Altura ou lâmina -----		
Total de água armazenada	0,4 km	3,9 km	2,9 km
Evaporação (<i>E</i>)	-476,8 mm ano ⁻¹	-1201,9 mm ano ⁻¹	-990,2 mm ano ⁻¹
Precipitação (<i>P</i>)	718,6 mm ano ⁻¹	1102,2 mm ano ⁻¹	990,2 mm ano ⁻¹
Vazão (<i>Q</i>)	241,8 mm ano ⁻¹	99,7 mm ano ⁻¹	0

Exemplo 11.1 – Para o ciclo global da água em determinado ano disposto na Figura 11.1, em que os números representam 10^{12} m^3 por ano: *i)* Realize a conversão do ciclo de m^3 para mm, considerando que a área continental representa 30% da superfície global ($510.000.000 \text{ km}^2$). Obs.: Para resolução, tome como base o balanço hídrico global apresentado na Tabela 11.1, utilizando a estrutura da Tabela 11.2. Lembrar que $1 \text{ mm} = 1 \text{ L m}^{-2}$ e $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$.

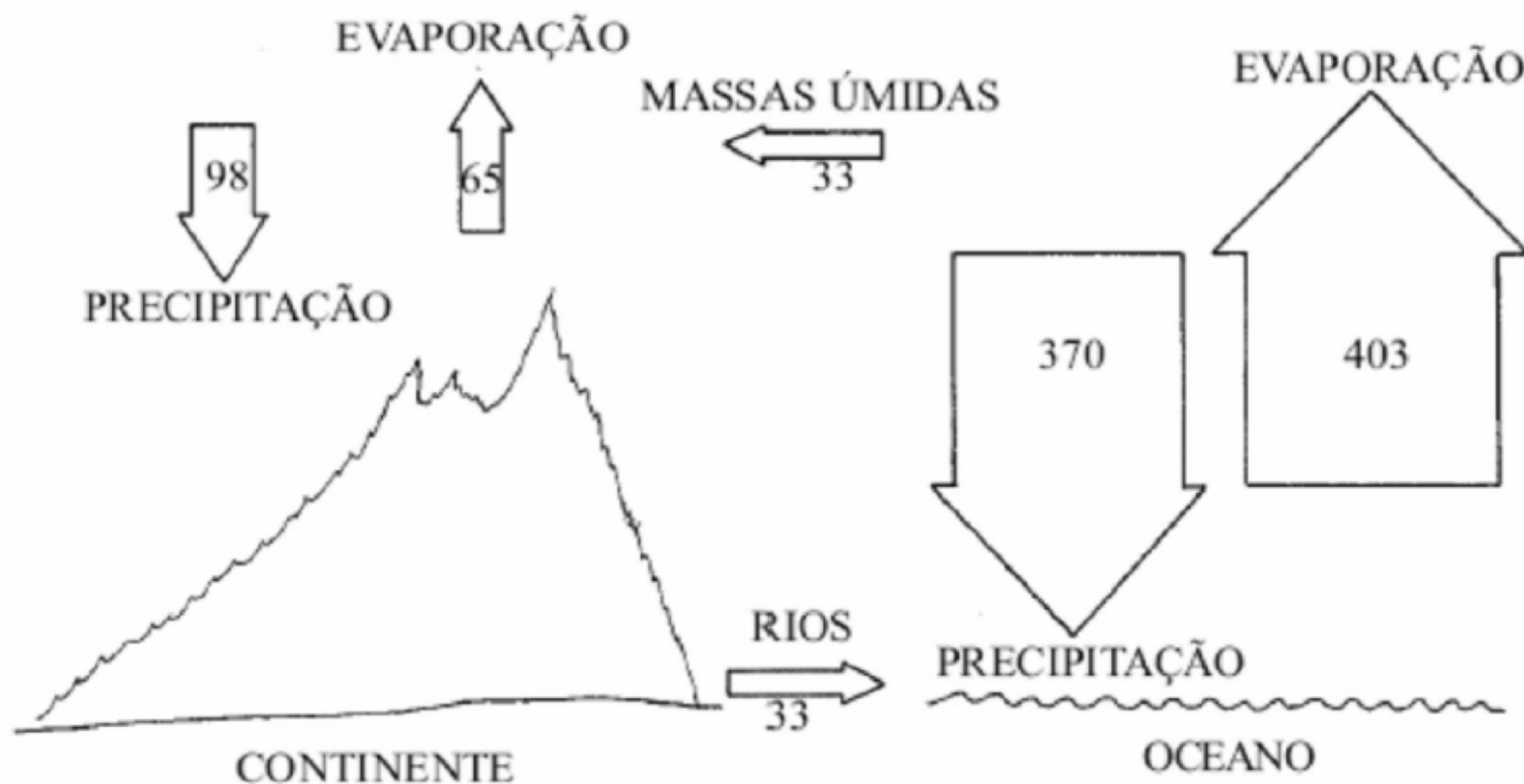


Figura 11.1 – Ciclo anual global da água

Tabela 11.2. Balanço hídrico médio anual para o planeta Terra.

Componente do ciclo hidrológico	Continentes	Oceanos	Planeta Terra
	----- Volume armazenado (km ³) -----		
Total de água armazenada	59.089.000 (4,05%)	1.400.000.000 (95,949%)	1.459.104.500 (100%)
	----- Volume movimento em um ano (km ³ ano ⁻¹) -----		
Evaporação (<i>E</i>)			
Precipitação (<i>P</i>)			
Vazão (<i>Q</i>)			
	----- Áreas (km ²) -----		
Superfície coberta			510.000.000
	----- Altura ou lâmina -----		
Total de água armazenada			
Evaporação (<i>E</i>)			
Precipitação (<i>P</i>)			
Vazão (<i>Q</i>)			

3 BALANÇO HÍDRICO DOS CONTINENTES

- Escala um pouco menor, mas ainda macro ([Tabela 11.3](#));
- América do Sul é o continente mais rico em recursos hídricos;
- Balanço hídrico realizado para o Brasil.

Tabela 11.3. Balanço hídrico médio anual dos continentes.

Continente	----- Componente do ciclo hidrológico (mm ano ⁻¹) -----		
	Precipitação	Evaporação	Deflúvio ou vazão
África	670	510	160
Ásia	610	390	220
Austrália	470	410	60
Europa	600	360	240
América do Norte	670	400	270
América do Sul	1350	860	490

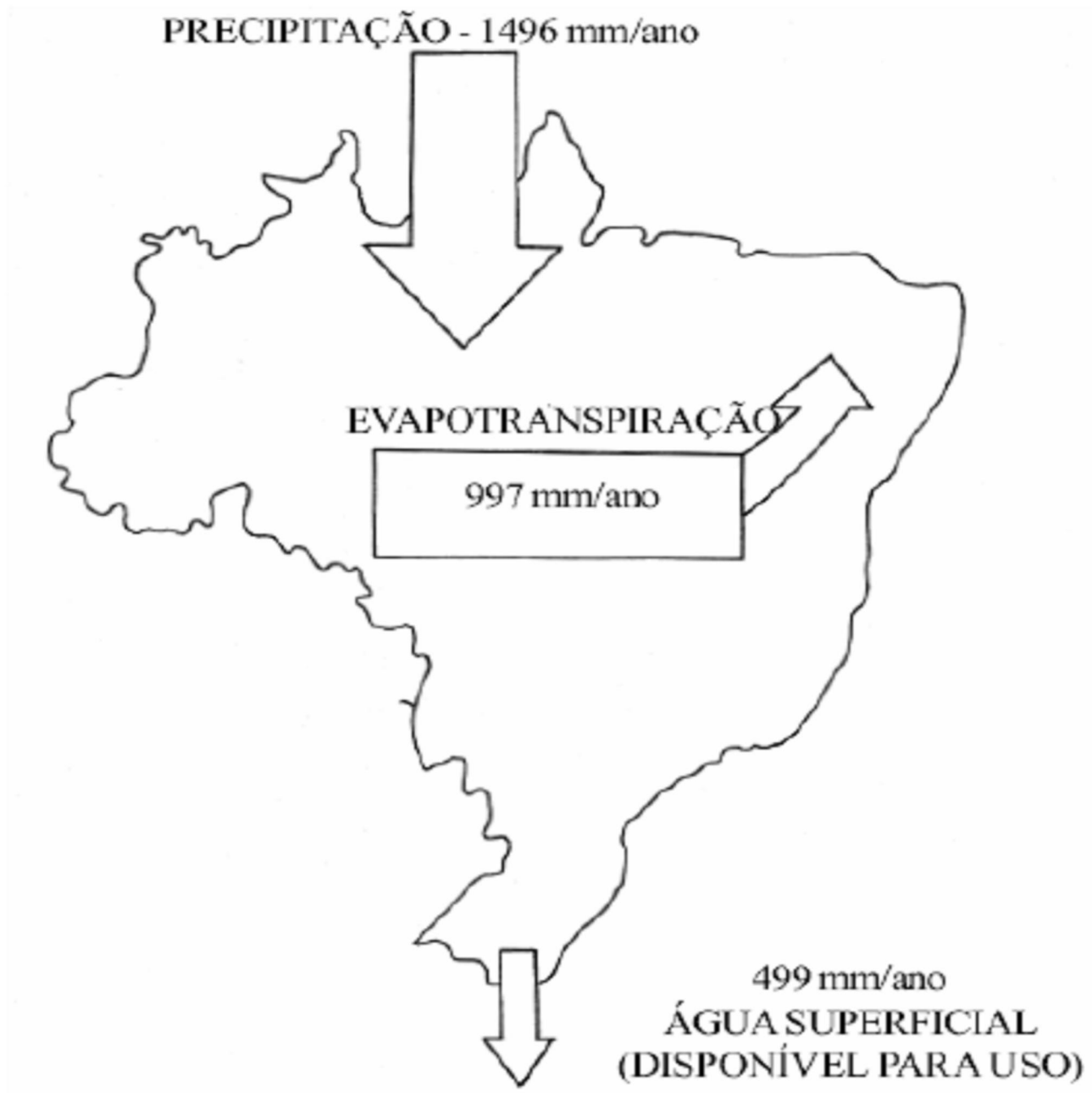
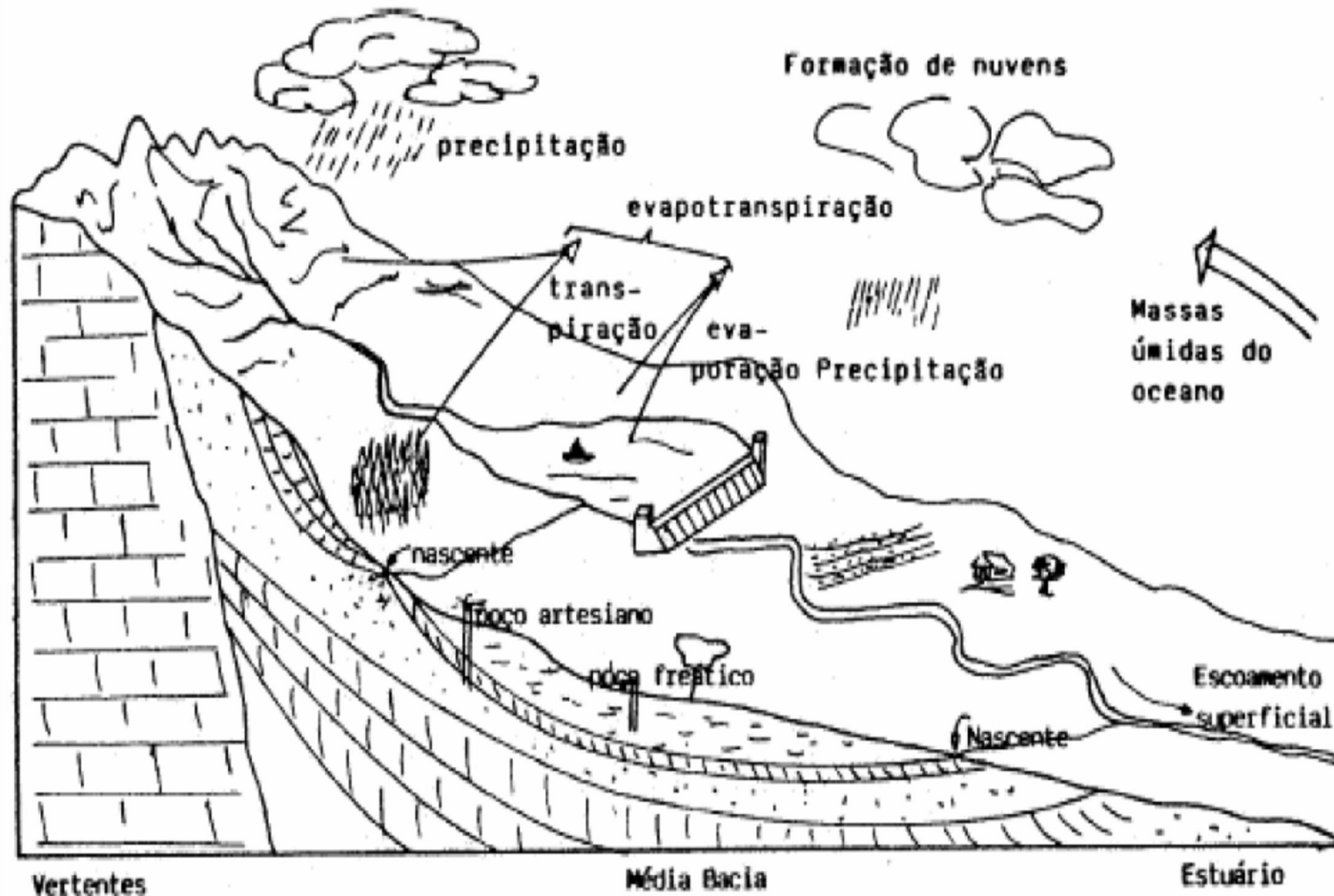


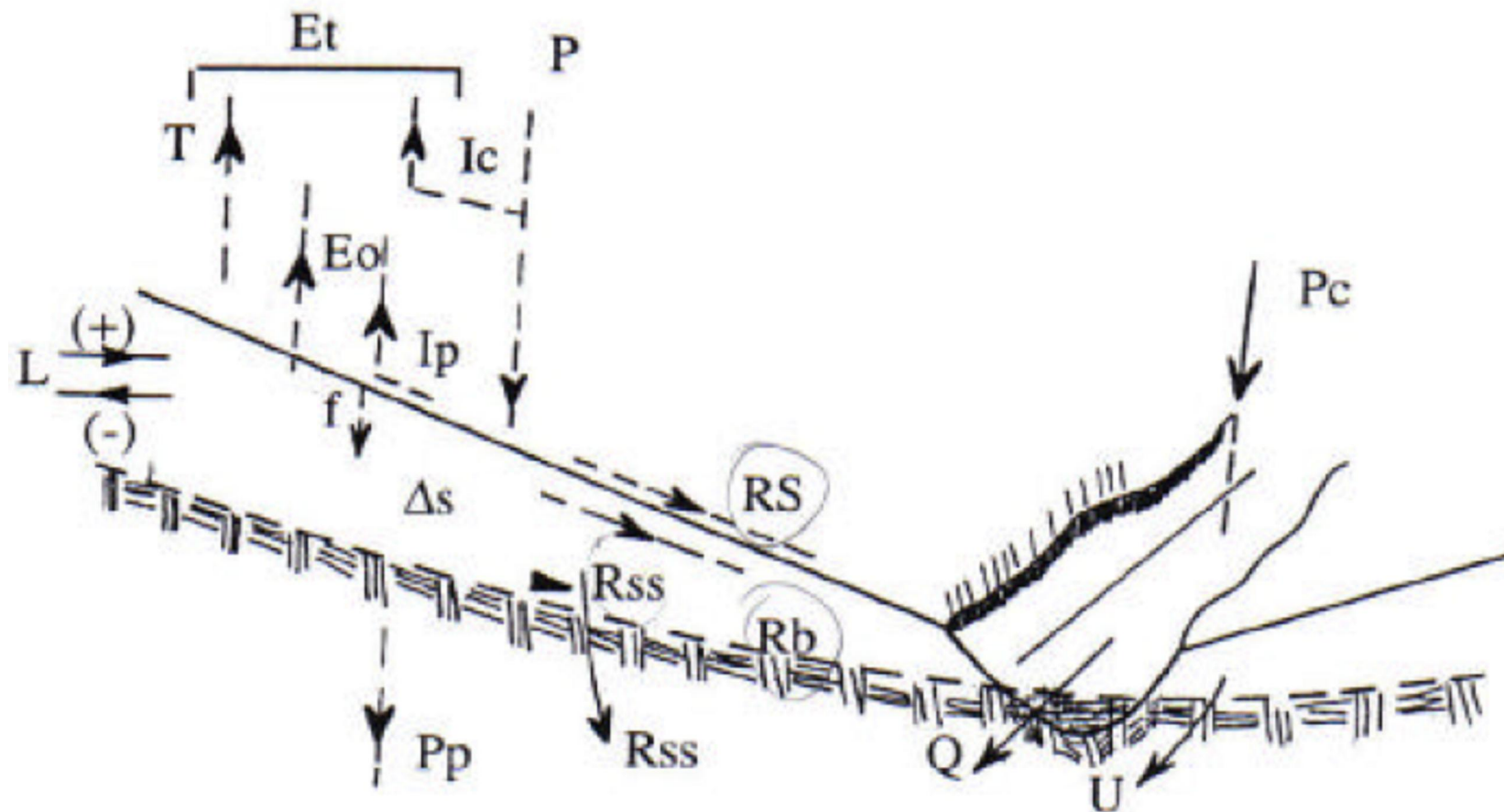
Figura 11.2 – Balanço hídrico para o Brasil

4 BALANÇO HÍDRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

- Escala intermediária (unidade geomorfológica; [Figura 11.3](#));
- É possível detalhar mais os processos do BH ([Figura 11.4](#));



[Figura 11.3](#) – Representação esquemática dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.



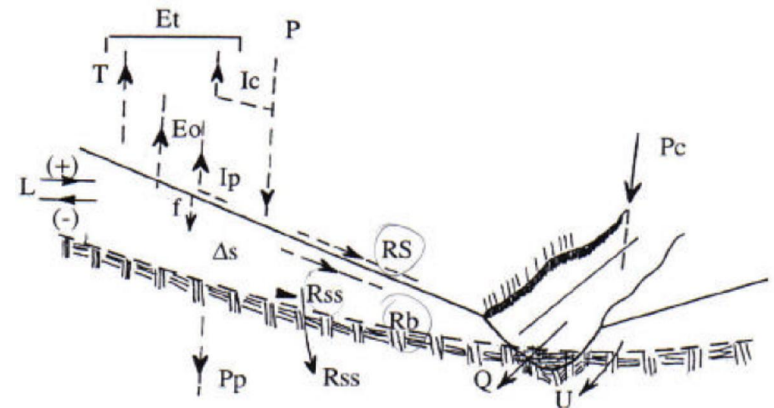
Sendo: P – precipitação total medida em campo aberto; T – transpiração; Ic – interceptação pelas copas; I_p – interceptação pelo piso; E_o – evaporação do solo e superfícies líquidas; E_t – evapotranspiração; Q – deflúvio; ΔS – variação do armazenamento da água do solo; L – vazamento freático; P_p – percolação profunda (vazamento por falhas na rocha); R_s – escoamento superficial (canais ou superfície); R_{ss} – escoamento sub-superficial; R_b – escoamento básico (água subterrânea); f – infiltração; P_c – precipitação direta nos canais; U – vazamento (água que flui por fora do leito).

Figura 11.4 – Seção transversal de uma bacia hidrográfica com as componentes hidrológicas envolvidas no seu balanço hídrico.

4 BALANÇO HÍDRICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

➤ Equação do balanço hídrico

$$P = (T + Ic + Ip + Eo) + (Q + U) \pm \Delta S \pm L$$



Sendo: P – precipitação medida (mm período^{-1}); T – transpiração (mm período^{-1}); Ic – interceptação vegetal (mm período^{-1}); Ip – interceptação pelas superfícies impermeáveis (mm período^{-1}); Eo – evaporação do solo e superfícies líquidas (mm período^{-1}); Q – deflúvio ou vazão superficial (mm período^{-1}); U – vazamento de água que flui por fora do leito (mm período^{-1}); ΔS – variação do armazenamento da água do solo (mm período^{-1}); L – vazamento freático.

➤ Para bacia hidrográfica ideal, com fluxos positivos e negativos sob controle experimental

$$P - ET - Q \pm \Delta S = 0$$

Exemplo 11.2 – Em uma bacia hidrográfica verificou-se no mês de janeiro valores de precipitação $P = 260$ mm e evapotranspiração de referência $ET_o = 105$ mm. Desconsiderando a variação do armazenamento da água no solo ΔS determinar o deflúvio superficial ocorrido no período, bem como o volume de água (V ; m^3) produzido. Dados: Área da bacia $A = 14$ km^2 .

$$P - ET - Q \pm \Delta S = 0$$

$$260 - 105 - Q + 0 = 0 \quad \rightarrow \quad Q = 155 \text{ mm ou } 155 \text{ L m}^{-2}$$

$$V = Q \cdot A = 155 \text{ L} \cdot m^{-2} \cdot 14.000.000 \text{ m}^2 = 2,17 \cdot 10^9 \text{ L ou } 2,17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Modelos desenvolvidos nessa linha são denominados chuva-vazão. A literatura é rica em exemplos de modelos chuva-vazão voltados ao estudo dos mais diferentes tipos de bacias hidrográficas.

Tabela – Balanço hídrico simplificado das principais bacias hidrográficas brasileiras (ANA, 2005)

Região hidrográfica	Precipitação* (P) (mm)	Vazão* (m ³ /s)	Evapotranspiração	
			(mm)	% de P
Amazônica	2.239	131.947	1.164	52
Tocantins/Araguaia	1.837	13.624	1.371	75
Atlântico Nordeste Ocidental	1.790	2.683	1.482	83
Parnaíba	1.117	763	1.045	94
Atlântico Nordeste Oriental	1.218	779	1.132	93
São Francisco	1.037	2.850	896	86
Atlântico Leste	1.058	1.492	937	89
Atlântico Sudeste	1.349	3.179	882	65
Atlântico Sul	1.568	4.174	866	55
Uruguai	1.785	4.121	1.040	58
Paraná	1.511	11.453	1.101	73
Paraguai	1.398	2.368	1.193	85
Brasil	1.797	179.374	1.134	63

* Valores médios de longo período.

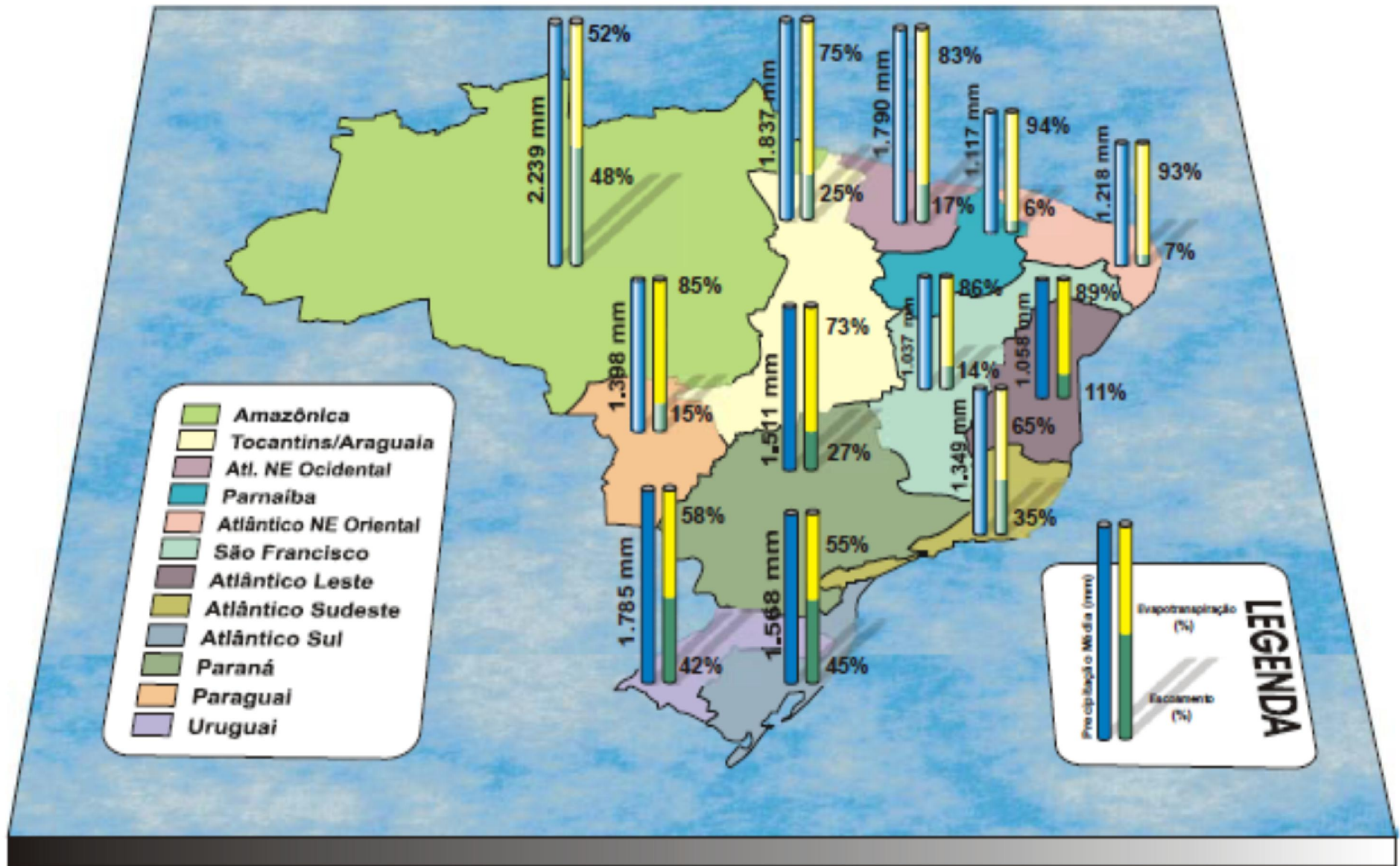


Figura – Balanço hídrico simplificado das principais bacias hidrográficas brasileiras (ANA, 2005)

5 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

$$P + Po + Ee + DLe + AC + I + ET + Es + DLs + DP \pm \Delta ARM = 0$$

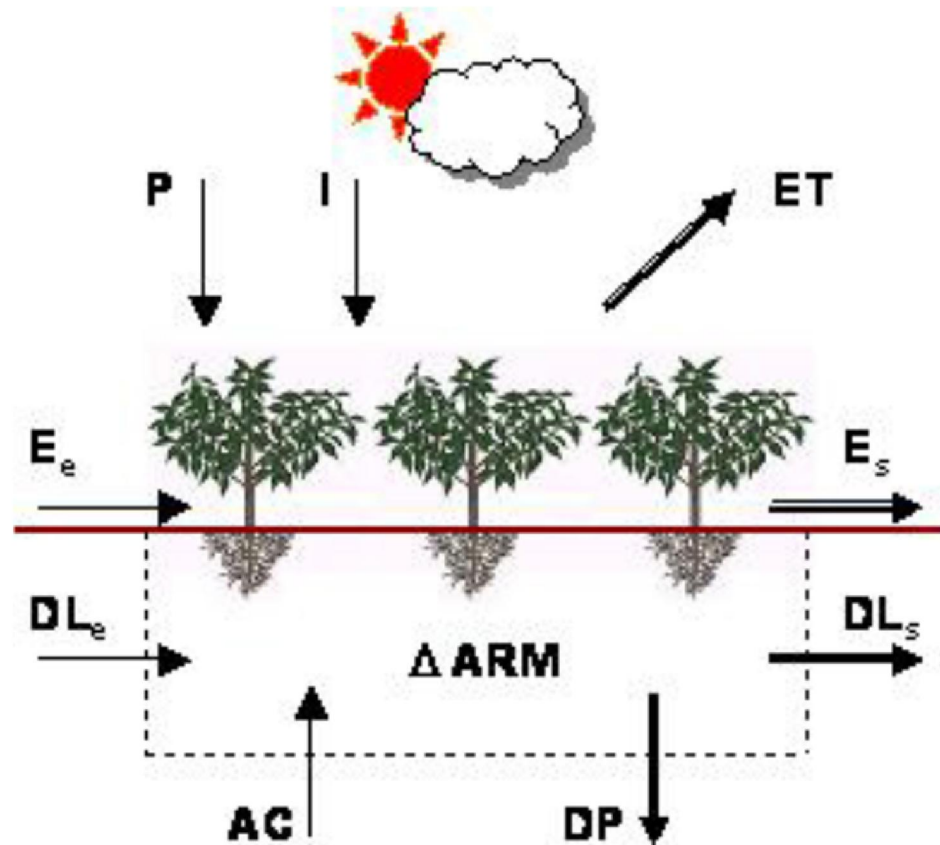


Figura 11.5 – Balanço das componentes de entrada e saída de água em um volume de solo.

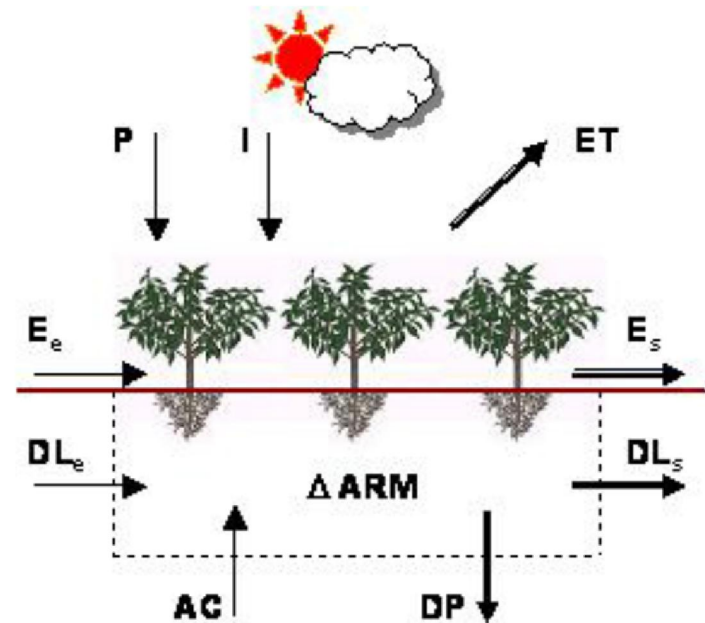
5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

a) Simplificações consideradas na realização dos cálculos:

- Orvalho (P_o);
- Escoamento superficial de entrada (ES_E) e saída (ES_S);
- Drenagem lateral de entrada (DL_E) e saída (DL_S);
- A ascensão capilar (AC)

$$P + P_o + E_e + DLe + AC + I + ET + Es + DLs + DP \pm \Delta ARM = 0$$

$$P + ET \pm \Delta ARM = 0$$



5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

5.1.1 Roteiro de cálculo do balanço hídrico cíclico mensal de **Thornthwaite & Mather (1955)**

- Caso de BH apresentado: $\sum_{m=1}^n (P_m - ET_{o_m}) \geq 0$
- Cálculo da *CAD*: $CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z$
- Preenchimento da coluna precipitação (*P*);
- Preenchimento da coluna Evapotranspiração (*ET_o*);
- Cálculo da coluna $(P_m - ET_{o_m})$
- Preenchimento da coluna negativo acumulado (*L_m*):
 - Inicia a preenchimento no primeiro mês em que $(P_m - ET_{o_m})$ for negativo

5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

5.1.1 Roteiro de cálculo do balanço hídrico cíclico mensal de **Thornthwaite & Mather (1955)**

- Preenchimento da coluna negativo acumulado (L_m):
 - Estimativa do armazenamento (ARM) e negativo acumulado (L_m):

$$ARM_m = CAD \cdot e^{\left(-\frac{L_m}{CAD}\right)}$$

$$L_m = -CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM_m}{CAD}\right)$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível (mm); ARM_m – armazenamento de água do solo no m -ésimo mês (mm); L_m – valor do negativo acumulado do m -ésimo mês (mm).

5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

5.1.1 Roteiro de cálculo do balanço hídrico cíclico mensal de **Thornthwaite & Mather (1955)**

- Cálculo da coluna alteração (ALT): $ALT_m = ARM_m - ARM_{m-1}$
- Cálculo da evapotranspiração real (ER):

$$\text{Se:} \quad P_m - ET_{om} \geq 0 \quad \rightarrow \quad ER_m = ET_{om}$$

$$\text{Senão:} \quad P_m - ET_{om} < 0 \quad \rightarrow \quad ER_m = P_m + |ALT_m|$$

- Cálculo da deficiência (DEF): $DEF_m = ET_{om} - ER_m$
- Cálculo do excedente hídrico (EXC):

$$\text{Se:} \quad ARM_m = CAD \quad \rightarrow \quad EXC_m = (P_m - ET_{om}) - ALT_m$$

$$\text{Senão:} \quad ARM_m < CAD \quad \rightarrow \quad EXC_m = 0$$

5.1 Balanço hídrico de **Thornthwaite & Mather (1955)**

5.1.1 Roteiro de cálculo do balanço hídrico cíclico mensal de **Thornthwaite & Mather (1955)**

➤ Verificação dos cálculos do *BH*:

$$\sum_{m=1}^n P_m = \sum_{m=1}^n ET_{o_m} + \sum_{m=1}^n (P_m - ET_{o_m})$$

$$\sum_{m=1}^n P_m = \sum_{m=1}^n ER_m + \sum_{m=1}^n EXC_m$$

$$\sum_{m=1}^n ET_{o_m} = \sum_{m=1}^n ER_m + \sum_{m=1}^n DEF_m$$

$$\sum_{m=1}^n ALT_m = 0$$

Exemplo 11.3 – Baseando-se nos valores normais (1961 a 1990) de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_o) dispostos na Tabela 11.4:

i) Realize o balanço hídrico climatológico mensal cíclico, conforme a metodologia Thornthwaite & Mather (1955), para a cidade de Franca – SP. Considerar a $CAD = 100$ mm e estimar o armazenamento da água no solo (ARM_m) ou negativo acumulado (L_m) de cada mês com a equação:

$$ARM_m = CAD \cdot e^{\left(-\frac{L_m}{CAD}\right)} \quad \text{ou} \quad L_m = -CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM_m}{CAD}\right)$$

ii) Conforme o balanço hídrico mensal que foi calculado para Franca, realizar a representação gráfica da precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_o) e real (ER), indicando os períodos e regiões em que ocorreram: reposição de água no solo; excedente hídrico; retirada de água do solo; e, deficiência hídrica (Figura 11.6).

Tabela 11.4. Cálculo do balanço hídrico climatológico cíclico de Thornthwaite e Matter (1955) para a cidade de Franca – SP.

Local: Franca-SP		Período dos dados: 1961 a 1990			Latitude: 21° 10' S				
		CAD: 100 mm			Longitude: 47° 24' W				
Meses	----- Componentes do balanço hídrico (mm) -----								
	<i>P</i>	<i>ET_o</i>	<i>P – ET_o</i>	<i>L</i>	<i>ARM</i>	<i>ALT</i>	<i>ER</i>	<i>DEF</i>	<i>EXC</i>
Janeiro	275	117	158	0	100	0	117	0	158
Fevereiro	218	102	116	0	100	0	102	0	116
Março	180	104	76	0	100	0	104	0	76
Abril	60	79	-19	-19	83	-17	77	2	0
Maio	25	60	-35	-54	58	-25	50	10	0
Junho	20	49	-29	-83	44	-14	34	15	0
Julho	15	54	-39	-122	30	-14	29	25	0
Agosto	12	74	-62	-184	16	-14	26	48	0
Setembro	48	93	-45	-229	10	-6	54	39	0
Outubro	113	107	6	-182	16	6	107	0	0
Novembro	180	108	72	-13	88	72	108	0	0
Dezembro	245	117	128	0	100	12	117	0	116
Total	1391	1064	327	—	—	0	925	139	466

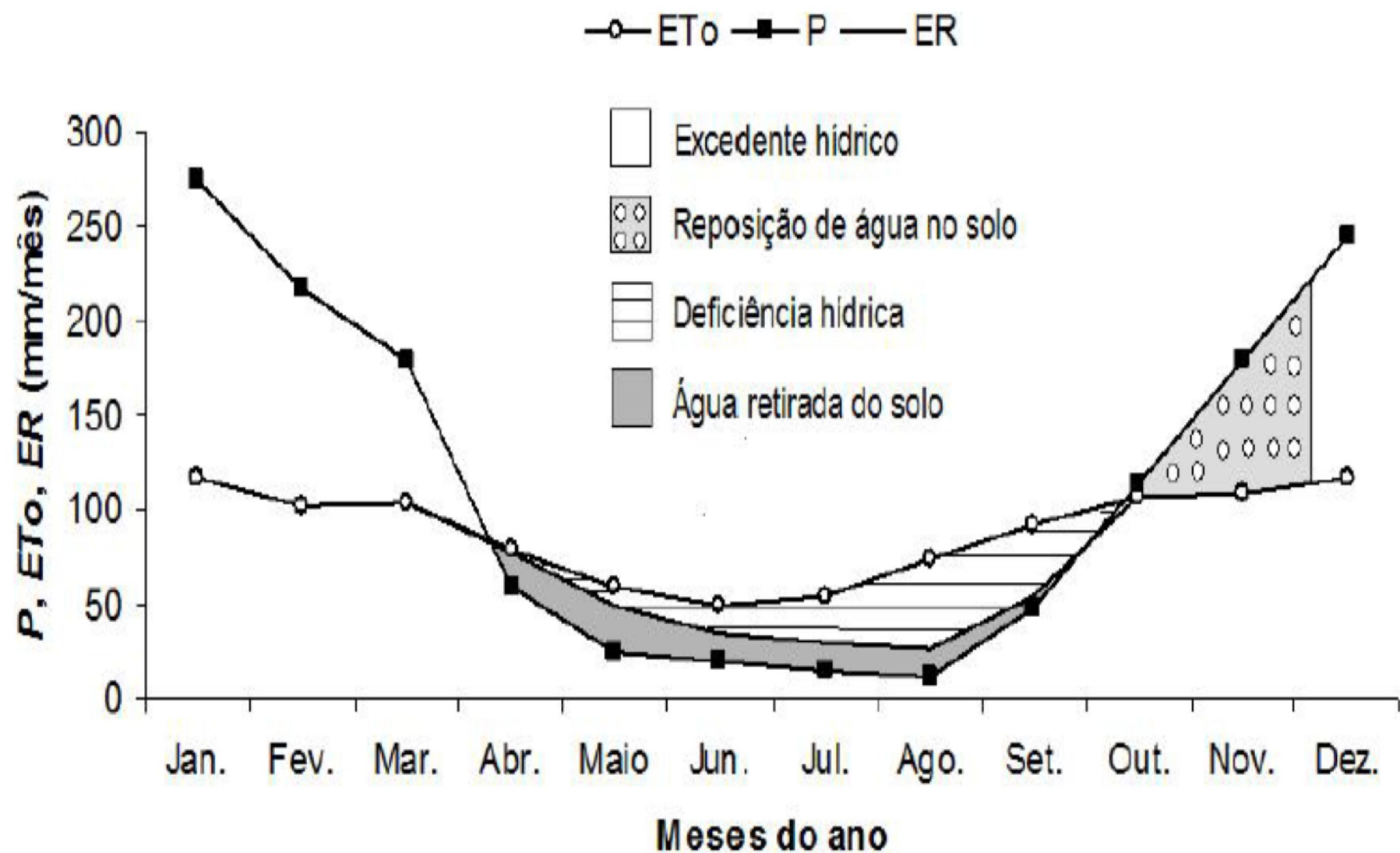


Figura 11.6 – Balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Matter (1955) para a cidade de Franca – SP

6 BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO PARA O CONTROLE OU MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS

- Classificação da irrigação quanto à lâmina aplicada:
 - Irrigação total: somente irrigação;
 - Irrigação complementar: irrigação + precipitação;
- Manejo da irrigação:
 - Irrigação plena: 100% da ET_c é reposta no solo;
 - Irrigação com deficiência: parte da ET_c e resposta no solo
 - Irrigação de “salvação”: realizada apenas em períodos curtos

6 BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO PARA O CONTROLE OU MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS

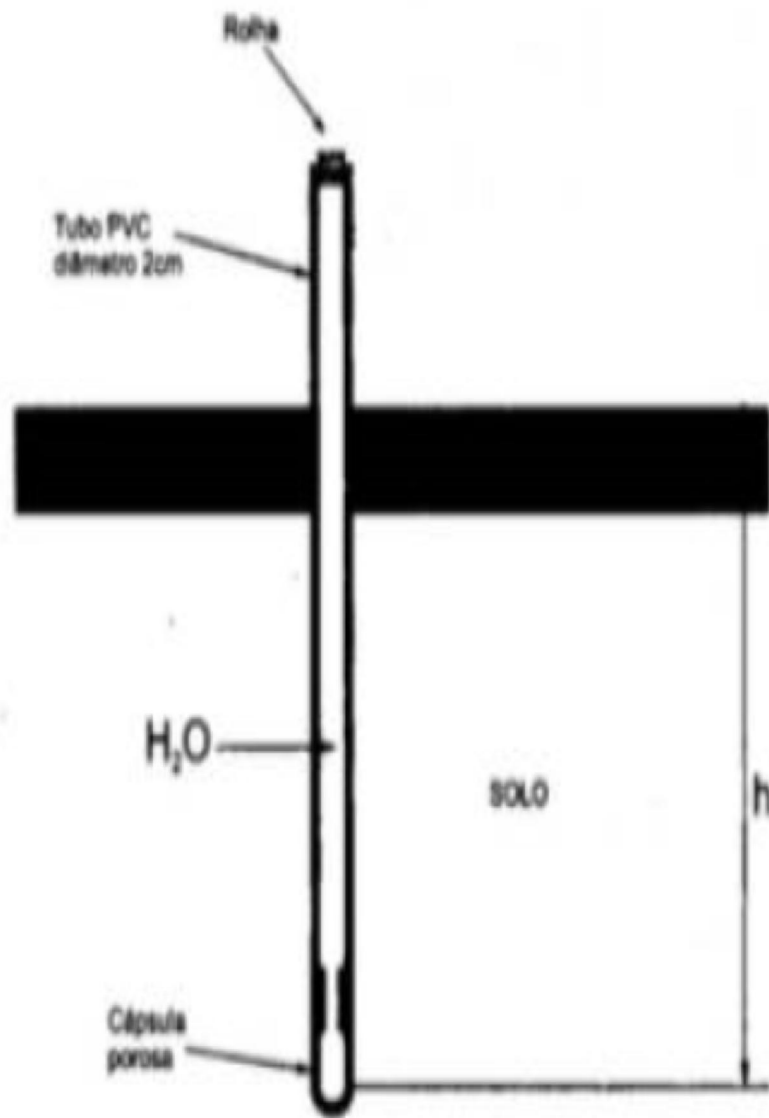
- Técnicas de controle ou manejo das irrigações:
 - Via solo: Monitoramento da água no solo:
 - Considerando medidas da umidade gravimétrica (u) ou volumétrica (θ) do solo;
 - Considerando medidas do potencial matricial do solo (ψ_m).
 - Via clima: Baseando-se na ET_c , θ_{CC} , θ_{PMP} e $\theta_{crit.}$:
 - Considerando o turno de rega (TR) fixo;
 - Considerando o turno de rega (TR) variável.
 - Via planta: Baseando-se nos aspectos fisiológicos apresentados pela planta:
 - Medindo a deficiência de água na planta;
 - Detectando sintomas de deficiência de água na planta.

6.1 Manejo da irrigação via solo considerando o potencial matricial do solo

- As irrigações baseiam-se no valor pré-estabelecido da tensão da água no solo: **tensão (ψ_m) vs umidade (θ)**
 - Precisa da curva de retenção: Camada e tipo de solo;
 - As medidas do ψ_m : Tensiômetro e tensímetro (**Figura 11.8**)
 - Leituras de $\psi_m \leq -80$ kPa: Indicam baixo teor de água no solo;
 - $\psi_m > -10$ kPa: solo na zona de saturação;
 - Entre -30 kPa $\leq \psi_m \leq -10$ kPa: solo próxima da capacidade de campo (u_{cc} ou θ_{cc});
 - Entre -75 kPa $\leq \psi_m \leq -25$ kPa: Indica momento de iniciar a irrigação para a maioria das culturas (**Tabela 11.5**).

Tabela 11.5. Potencial matricial crítico de água no solo ($\psi_{m.crit}$), indicando o momento de irrigar para obter a produtividade máxima com a cultura.

Cultura	$\psi_{m.crit}$ (kPa)	Cultura	$\psi_{m.crit}$ (kPa)
Alface	-30 a -20	Melão	-50 a -30
Banana	-50 a -30	Milho grão	-70 a -50
Batata	-50 a -30	Milho verde	-60 a -40
Cebola	-60 a -40	Pimenta	-40 a -20
Citros	-70 a -50	Pimentão	-50 a -30
Ervilha verde	-30 a -20	Repolho	-50 a -30
Feijão grão	-75 a -50	Soja	-80 a -50
Maçã	-80 a -50	Tomate	-25 a -10
Melancia	-50 a -30	Uva	-60 a -40



(a)



(b)

Figura 11.8 – (a) Esquema de um tensiômetro instalado na profundidade h do solo; (b) Modelo de tensímetro digital de punção.

Exemplo 11.4 – Conforme a curva de retenção de água no solo disposta na Figura 11.7, determine a umidade volumétrica no solo nas tensões (ψ_m , potenciais matriciais) correspondentes à capacidade de campo $\psi_{m.CC} = 10$ kPa e crítica $\psi_{m.crit.} = 20$ kPa:

- Para $\psi_{m.CC} = 10$ kPa (0,1 atm ou 1 m.c.a) $\rightarrow \theta_{CC} = 0,291 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou 29,1% (291 mm de água por metro de profundidade de solo)
- Para $\psi_{m.crit.} = 20$ kPa (0,2 atm ou 2 m.c.a) $\rightarrow \theta_{crit.} = 0,252 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou 25,2% (252 mm de água por metro de profundidade de solo).

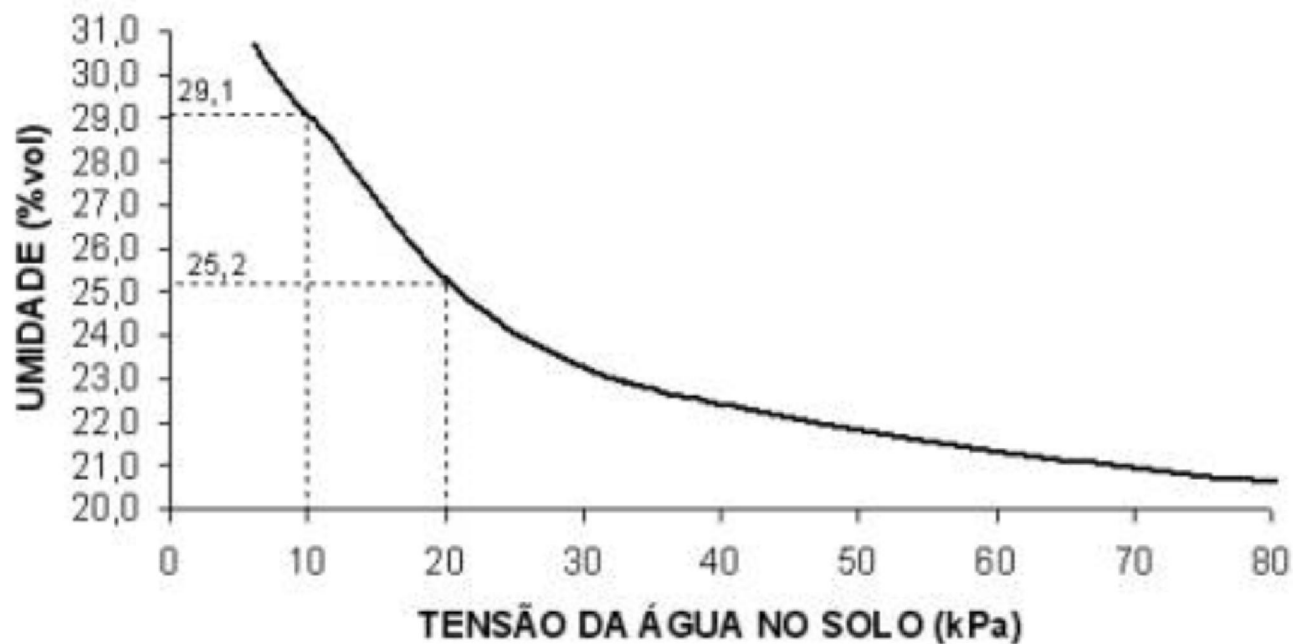


Figura 11.7 – Curva de retenção de água no solo

6.1 Manejo da irrigação via solo considerando o potencial matricial do solo

- Local de instalação das estações de tensiômetros:
 - Para cultivos em linha;
 - Para árvores.
- Profundidade de instalação dos tensiômetros:
 - $z \leq 50$ cm: Medições com tensiômetro à “ $1/2 \cdot z$ ”;
 - Entre $50 \text{ cm} < z \leq 70$ cm: Medições com tensiômetros à “ $1/4 \cdot z$ ” (controla quando irrigar) e “ $3/4 \cdot z$ ”;
 - $z > 70$ cm: Medições com tensiômetro à “ $1/6 \cdot z$ ”, “ $1/2 \cdot z$ ” (controla quando irrigar) e “ $5/6 \cdot z$ ”.
- Tensiômetro para verificação da drenagem após irrigações;
- Instalação e manutenção dos tensiômetros.

Exemplo 11.5 – Considerando a curva de retenção de água no solo disposta na Figura 11.7, determinar a lâmina de água a ser aplicada na irrigação do tomateiro, para que o potencial matricial crítico da cultura ($\psi_{m.crit} = -20$ kPa) seja elevado para a condição de potencial na capacidade de campo ($\psi_{m.CC} = -10$ kPa). A profundidade efetiva do sistema radicular do tomateiro $z = 0,50$ m. Determine:

i) O momento de irrigar (quando):

– Na Figura 11.7 tem-se que:

$$\psi_{m.crit} = -20 \text{ kPa} \quad \rightarrow \quad \theta_{crit.} = 0,252 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ ou } 252 \text{ mm m}^{-1}$$

$$\psi_{m.CC} = -10 \text{ kPa} \quad \rightarrow \quad \theta_{CC} = 0,291 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ ou } 291 \text{ mm m}^{-1}$$

ii) A quantidade de água a ser aplicada na irrigação:

– O conteúdo volumétrico de água facilmente disponível no solo às plantas será:

$$\theta_{fd} = \theta_{CC} - \theta_{crit} = 0,291 - 0,252 = 0,039 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$

– A lâmina a ser aplicada (h ; mm) pelo sistema de irrigação, que também é igual à água facilmente disponível AD no solo (mm) para o tomateiro será:

$$AD = h = \theta_{fd} \cdot z = 0,039 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \cdot 500 \text{ mm} = 19,5 \text{ mm}$$

6.2 Manejo da irrigação via clima

- Considera-se um balanço hídrico simplificado:

$$P + Po + Ee + DLe + AC + I + ETc + Es + DLs + DP \pm \Delta ARM = 0$$

$$P + I + ETc \pm \Delta ARM = 0$$

$$\Delta ARM = ARM_{\text{inicial}} - ARM_{\text{final}}$$

$$ARM_{\text{final}} = ARM_{\text{inicio}} - ETc + P + I$$

a) Considerações para os cálculos:

- ARM_j não pode ser maior que a CAD ;
- $ARM_{j \text{ inicio}} = ARM_{j-1 \text{ final}}$
- $I_j = CAD - ARM_{j \text{ final}}$ (conforme turno de rega)
- Intervalo da irrigação: Turno de rega fixo ou variável.

6.2 Manejo da irrigação via clima

6.2.1 Turno de rega fixo (lâmina variável na irrigação)

- Utilizado em regiões com baixa precipitação pluvial

$$TR = \frac{AD}{ETc}$$

$$AD = CAD \cdot p$$

Exemplo 11.6 – Baseando-se nos dados de evapotranspiração de referência (ET_0), coeficiente de cultivo (kc) e precipitação (P) dispostos na Tabela 11.6, calcule o balanço hídrico simplificado para a cultura do feijoeiro, considerando o **turno de rega fixo**. Dados: umidade na capacidade de campo $\theta_{cc} = 0,291 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; umidade no ponto de murcha permanente $\theta_{PMP} = 0,213 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; fração de água disponível no solo $p = 0,4$; profundidade efetiva do sistema radicular da cultura $z = 0,5 \text{ m}$; e, evapotranspiração média da cultura na região $ETc = 4 \text{ mm dia}^{-1}$.

i) Determinação da capacidade de água disponível (CAD) e água facilmente disponível no solo (AD):

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z = (0,291 - 0,213) \cdot 500 = 39 \text{ mm}$$

$$AD = CAD \cdot p = 39 \cdot 0,4 = 15,6 \text{ mm}$$

ii) Determinação do turno de rega, sendo que seu valor será considerado fixo para a realização das irrigações (TR):

$$TR = \frac{AD}{ET_c} = \frac{15,6}{4,0} = 3,9 \text{ dias} \cong 4 \text{ dias}$$

iii) O cálculo e preenchimento das colunas irrigação (I) e armazenamento da água no solo (ARM) são realizados ao mesmo tempo, considerando que:

$$ARM_{j \text{ final}} = ARM_{j \text{ inicio}} - ET_{c_j} + P_j + I_j \quad (\text{Obs.: } ARM_j \text{ máxima é igual a } CAD)$$

$$ARM_{j \text{ inicio}} = ARM_{j-1 \text{ final}}$$

$$I_j = CAD - ARM_{j \text{ final}} \text{ (no último dia de cada turno de rega)}$$

Tabela 11.6. Balanço hídrico simplificado para a cultura do feijoeiro, considerando o manejo da irrigação com **turno de rega fixo**.

Dia	<i>ET_o</i>	<i>kc</i>	<i>ET_c</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	----- <i>ARM</i> (mm) -----		
	(mm)	(ad.)	(mm)	(mm)	(mm)	Início	Final	
03/Fev.	Obs.: Considerou-se o <i>ARM</i> final do solo antes de iniciar o <i>BH</i> igual a <i>CAD</i> →						39,0	
04/Fev.	2,5	0,96	2,4			39,0	36,6	
05/Fev.	2,4	0,98	2,4			36,6	34,2	
06/Fev.	3,2	0,99	3,2			34,2	31,0	
07/Fev.*	3,5	1,00	3,5		11,5	31,0	27,5/39,0	
08/Fev.	3,2	1,01	3,2			39,0	35,8	
09/Fev.	3,1	1,02	3,2			35,8	32,6	
10/Fev.	2,8	1,02	2,9	5,0		32,6	29,7/34,7	
11/Fev.*	3,1	1,02	3,2		7,5	34,7	31,5/39,0	
12/Fev.	3,5	1,02	3,6			39,0	35,4	
13/Fev.	3,6	1,02	3,7			35,4	31,7	
14/Fev.	3,5	1,02	3,6			31,7	28,1	
15/Fev.*	3,8	1,02	3,9		14,8	28,1	24,2/39,0	
16/Fev.	3,7	1,01	3,7			39,0	35,3	
17/Fev.	2,4	0,98	2,4	8,0		35,3	40,9/39,0	
18/Fev.	3,0	0,97	2,9			39,0	36,1	
19/Fev.*	3,4	0,96	3,3		6,2	36,1	32,8/39,0	
20/Fev.	3,5	0,95	3,3			39,0	35,7	

* Dias em que as irrigações foram realizadas, conforme turno de rega fixo

iv) Verificar se o valor do armazenamento da água no solo (ARM) ficou abaixo do ponto crítico, indicando que a cultura sofreu algum tipo de deficiência hídrica entre as irrigações:

$$ARM_{crit} = CAD - AD = 39,0 - 15,6 = 23,4 \text{ mm}$$

ou

$$ARM_{crit} = CAD \cdot (1 - p) = 39,0 \cdot (1 - 0,4) = 23,4 \text{ mm}$$

6.2.2 Turno de rega variável

- Utilizado em regiões visando a irrigação complementar:
 - Quando $ARM_j \cong ARM_{crit.}$

$$ARM_{crit.} = CAD - AD$$

ou

$$ARM_{crit.} = CAD \cdot (1 - p)$$

Exemplo 11.7 – Para as mesmas condições e dados apresentados no exemplo do balanço hídrico simplificado para a cultura do feijoeiro, irrigado com **turno de rega fixo**, realize os mesmos cálculos, porém considerando o balanço hídrico simplificado, irrigado com **turno de rega variável** (Tabela 11.7). Logo, tem-se os dados: $\theta_{CC} = 0,291 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\theta_{PMP} = 0,213$; $p = 0,4$; $z = 0,5 \text{ m}$; $ET_c = 4 \text{ mm dia}^{-1}$; $CAD = 39 \text{ mm}$; $AD = 15,6 \text{ mm}$

$$ARM_{crit} = CAD \cdot (1 - p) = 39,0 \cdot (1 - 0,4) = 23,4 \text{ mm}$$

O cálculo e preenchimento das colunas irrigação (I) e armazenamento da água no solo (ARM) também são realizados ao mesmo tempo, considerando que:

$$ARM_{j \text{ final}} = ARM_{j \text{ inicio}} - ET_{c_j} + P_j + I_j \quad (\text{Obs.: } ARM_j \text{ máxima é igual a } CAD)$$

$$ARM_{j \text{ inicio}} = ARM_{j-1 \text{ final}}$$

$$I_j = CAD - ARM_{j \text{ final}} \text{ (no último dia de cada turno de rega)}$$

Tabela 11.7. Balanço hídrico simplificado para a cultura do feijoeiro, considerando o manejo da irrigação com **turno de rega variável**.

Dia	<i>ETo</i>	<i>kc</i>	<i>ETc</i>	<i>P</i>	<i>I</i>	----- <i>ARM</i> (mm) -----		
	(mm)	(ad.)	(mm)	(mm)	(mm)	Início	Final	
03/Fev.	Obs.: Considerou-se o <i>ARM</i> final do solo antes de iniciar o <i>BH</i> igual a <i>CAD</i> →							39,0
04/Fev.	2,5	0,96	2,4			39,0	36,6	
05/Fev.	2,4	0,98	2,4			36,6	34,2	
06/Fev.	3,2	0,99	3,2			34,2	31,0	
07/Fev.	3,5	1,00	3,5			31,0	27,5	
08/Fev.	3,2	1,01	3,2			27,5	24,3	
09/Fev.*	3,1	1,02	3,2		17,9	24,3	21,1/39,0	
10/Fev.	2,8	1,02	2,9	5,0		39,0	41,1/39,0	
11/Fev.	3,1	1,02	3,2			39,0	35,8	
12/Fev.	3,5	1,02	3,6			35,8	32,2	
13/Fev.	3,6	1,02	3,7			32,2	28,5	
14/Fev.	3,5	1,02	3,6			28,5	24,9	
15/Fev.*	3,8	1,02	3,9		18,0	24,9	21,0/39,0	
16/Fev.	3,7	1,01	3,7			39,0	35,3	
17/Fev.	2,4	0,98	2,4	8,0		35,3	40,9/39,0	
18/Fev.	3,0	0,97	2,9			39,0	36,1	
19/Fev.	3,4	0,96	3,3			36,1	32,8	
20/Fev.	3,5	0,95	3,3			32,8	29,5	

* Dias em que as irrigações foram realizadas.

Exemplo 11.8 – Baseando-se nos dados de evapotranspiração de referência (ET_0), coeficiente de cultivo (kc) e precipitação (P) dispostos na Tabela 11.8, calcule o balanço hídrico simplificado para a cultura da soja, considerando a realização da irrigação em turno de rega “**fixo**” e “**variável**”. Dados: umidade na capacidade de campo $\theta_{CC} = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; umidade no ponto de murcha permanente $\theta_{PMP} = 0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; fração de água disponível no solo $p = 0,55$; profundidade efetiva do sistema radicular da cultura $z = 0,3 \text{ m}$; e, evapotranspiração média da cultura na região $ET_c = 5 \text{ mm dia}^{-1}$. Determine ou estabeleça:

i) A capacidade de água disponível (CAD) e água facilmente disponível no solo (AD):

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot z = (0,35 - 0,26) \cdot 300 = 27 \text{ mm}$$

$$AD = CAD \cdot p = 27 \cdot 0,55 = 14,85 \text{ mm}$$

ii) O turno de rega das irrigações (TR), sendo que seu valor será utilizado apenas no manejo considerando turno de **rega fixo**:

$$TR = \frac{AD}{ET_c} = \frac{14,85}{5} = 2,97 \cong 3 \text{ dias}$$

iii) Preenchimento das colunas irrigação (I) e armazenamento da água no solo (ARM) para os dois manejos considerados (Tabela 11.8):

– Para o turno de rega variável tem-se o armazenamento crítico,

$$ARM_{crit.} = CAD \cdot (1 - p) = 27 \cdot (1 - 0,55) = 12,15 \text{ mm}$$

Tabela 11.8. Balanço hídrico simplificado para a cultura da soja, considerando os manejos da irrigação com turno de rega **fixo e variável**.

Dia	ETo (mm)	kc (ad.)	ETc (mm)	P (mm)	-- Turno de rega fixo --		-- Turno de rega variável --			
					I (mm)	--- ARM (mm) --- Início Final	I (mm)	--- ARM (mm) --- Início Final	Final	
20/Nov.	Obs.: Considerar o ARM final do solo antes de iniciar o BH igual a CAD						27,0			27,0
21/Nov.	3,8	0,55	2,1			27,0	24,9		27,0	24,9
22/Nov.	4,5	0,55	2,5			24,9	22,4		24,9	22,4
23/Nov.*	4,2	0,55	2,3		6,9	22,4	20,1/27,0		22,4	20,1
24/Nov.	4,1	0,55	2,3			27,0	24,7		20,1	17,8
25/Nov.	4,8	0,55	2,6	2,0		24,7	22,1/24,1		17,8	15,2/17,2
26/Nov.*	4,5	0,55	2,5		5,4	24,1	21,6/27,0		17,2	14,7
27/Nov.	4,8	0,55	2,6	7,0		27,0	31,4/27,0		14,7	12,1/19,1
28/Nov.	5,1	0,55	2,8			27,0	24,2		19,1	16,3
29/Nov.*	5,0	0,55	2,8		5,6	24,2	21,4/27,0		16,3	13,5
30/Nov.	5,4	0,55	3,0			27,0	24,0	16,5	13,5	10,5/27,0
01/dez.	4,8	0,55	2,6			24,0	21,4		27,0	24,4
02/dez.*	5,2	0,55	2,9		8,5	21,4	18,5/27,0		24,4	21,5
03/dez.	5,5	0,55	3,0			27,0	24,0		21,5	18,5
04/dez.	4,7	0,65	3,1			24,0	20,9		18,5	15,4
05/dez.*	4,5	0,65	2,9	15,0		20,9	33,0/27,0		15,4	12,5/27,0
06/dez.	4,9	0,65	3,2			27,0	23,8		27,0	23,8
07/dez.	5,3	0,65	3,4			23,8	20,4		23,8	20,4
08/dez.*	45	0,65	2,9		9,5	20,4	17,5/27,0		20,4	17,5

iv) Faça um gráfico cartesiano indicando o armazenamento inicial e final da água no solo para os dois tipos de manejo da irrigação analisados (turnos de rega fixo e variável), no período considerado, bem como disponha os limites superior, inferior e crítico de água no solo. Descreva as diferenças ocorridas com a utilização dos dois tipos de manejo (turno de rega fixo e variável);

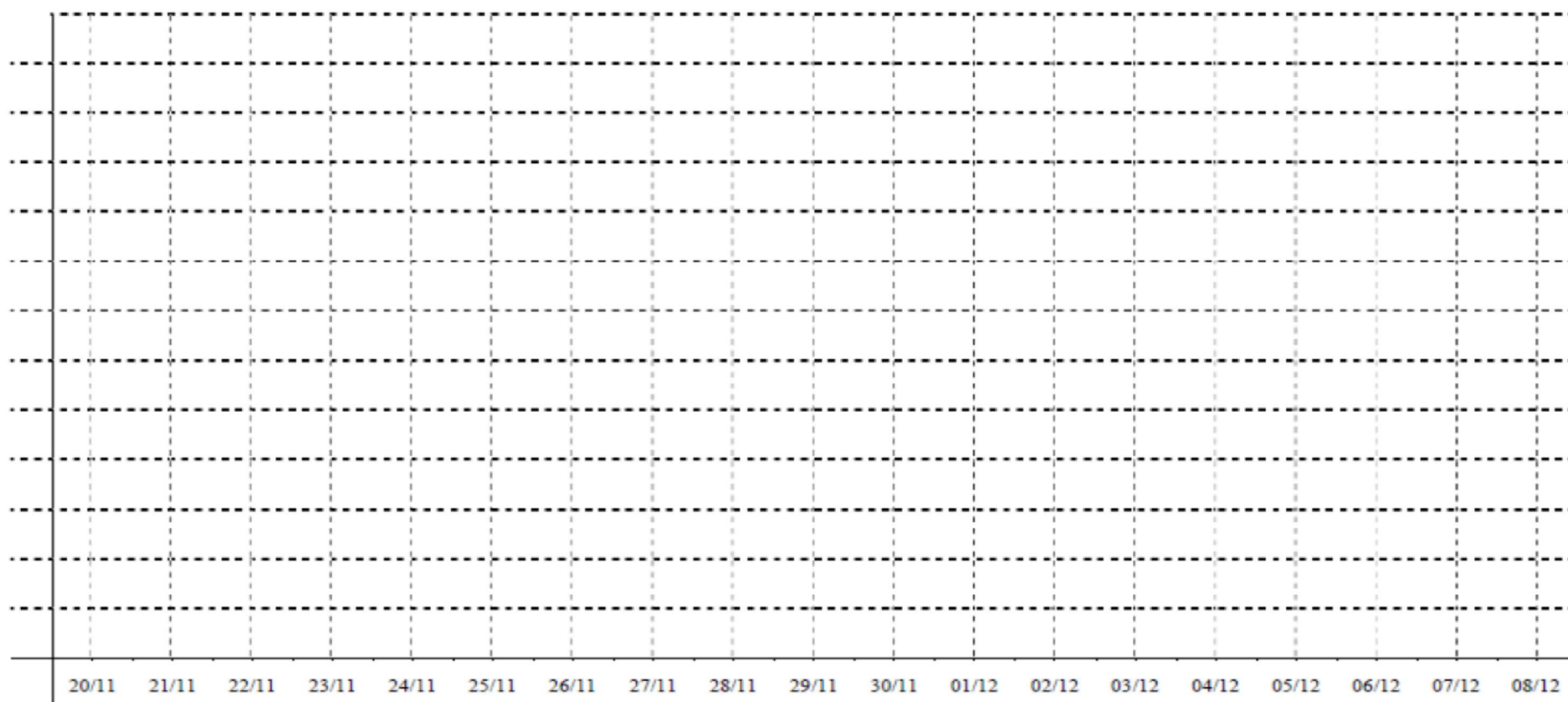


Figura 11.9 – Armazenamento inicial e final da água no solo para dois tipos de manejo da irrigação (turnos de rega fixo e variável), e limites superior, inferior e crítico de água no solo.

v) Verifique se o valor do armazenamento da água no solo (ARM) ficou abaixo do limite crítico para a cultura com a utilização dos dois tipos de manejos:

REFERÊNCIAS

- ADAMUCHIO, J. G. Respostas de um balanço hídrico devido às periodicidades e equações de estimativa do armazenamento da água no solo. Curitiba, 2011. 253p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Roma: FAO, p. 301. 1998.
- FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; SOUZA, J. L. M. de; ZOCOLER, J. L. **Planejamento da Irrigação**: análise de decisão de investimento. Brasília: EMBRAPA, 2005. 627p.
- GOMES, S. Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná. Curitiba, 2005. 103p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 329p.
- LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: Walter de Paula Lima, 2008. 245p.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p. Piracicaba: Walter de Paula Lima, 2008. 245p.
- PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: ESALQ, 1997.
- SOUZA, J. L. M. Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. Piracicaba, 2001. 253p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2001.
- SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Avaliação do desempenho de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico irrigacionista. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 433-443, 2007.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 1, n. 8, p. 1-104, 1955.

FIM