

Balanço Hídrico

Climatológico Normal e Seqüênçial,
de Cultura e para Manejo da
Irrigação

INTRODUÇÃO

- É a contabilização da água no solo.
- O balanço hídrico fornece estimativas de:
 - ETR
 - deficiência
 - excedente hídrico
 - armazenamento de água no solo
- É um indicador climatológico da disponibilidade hídrica em uma região → **fundamental no planejamento agrícola.**

INTRODUÇÃO

Planejamento Agrícola



Baseado no clima local e no **balanço hídrico** do solo que define as estações seca e úmida



Zoneamento Agroclimático

Época mais adequada de semeadura

INTRODUÇÃO

•O balanço hídrico de uma área vegetada pode ser representado por:

➤ Entradas

-P = precipitação

-I = irrigação

-O = orvalho

-Ri = escoamento superficial (*Run in*)

-DLi = drenagem lateral

-AC = ascensão capilar

INTRODUÇÃO

➤ Entradas

- **P (Precipitação) e O (orvalho)** → dependem do clima da região.

- **O**: representa uma contribuição máxima de 0,5 mm dia⁻¹ (**1 mm = 1 l m²**) em locais úmidos.

- **Demais entradas** → dependem do tipo de solo e relevo.

- **I (irrigação)** → utilizada para manter o armazenamento (ARM) em nível adequado às necessidades das plantas.

INTRODUÇÃO

•O balanço hídrico de uma área vegetada pode ser representado por:

➤ Saídas

-ET = evapotranspiração

-Ro = escoamento superficial (*Run off*)

-DLo = drenagem lateral

-DP = drenagem profunda

INTRODUÇÃO

➤ Entradas e Saídas

- **Ri e Ro (escorrimento superficial) e DLi e DLo (drenagem lateral)**

→ tendem a se compensar, desde que a superfície externa do volume de controle não seja muito grande.

- **AC (ascensão capilar)** → representa a entrada de água pela área inferior do volume de controle.

- **DP (drenagem profunda)** → representa a saída e expressa o excesso de água que penetrou no volume pelas precipitações ou irrigações.

INTRODUÇÃO

➤ Entradas e Saídas

• Quanto mais profundo o volume de controle maior a **AC** (ascensão capilar) e menor a **DP** (drenagem profunda)

• O balanço hídrico do volume de controle pode ser expresso da seguinte forma:

$$\pm \Delta ARM = P + I - ET + AC - DP$$

-P = precipitação

-I = irrigação

-ET = evapotranspiração

-AC = ascensão capilar

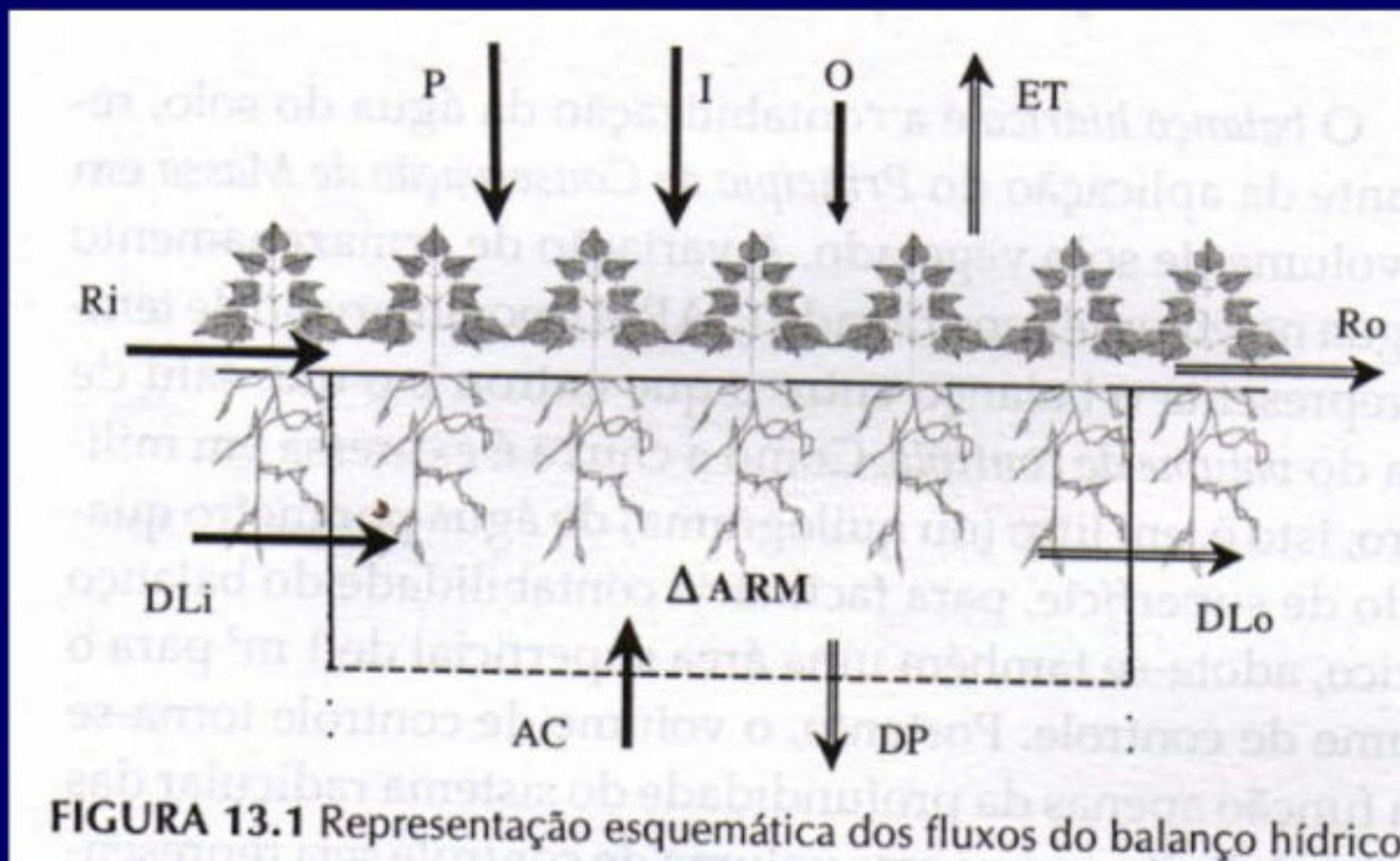
-DP = Drenagem Profunda

INTRODUÇÃO

➤ Entradas e Saídas

- **P (Precipitação) e I (Irrigação)** → podem ser medidas mais facilmente.
- **AC (Ascensão capilar)** → ocorre em períodos secos.
- **DP (Drenagem profunda)** → ocorre em períodos extremamente chuvosos.
- **ET (Evapotranspiração)** → deve ser determinada para se conhecer a disponibilidade hídrica do solo → **ARM.**

INTRODUÇÃO



Fonte: PEREIRA et al. (2002)

INTRODUÇÃO

- **Volume de controle** → determinado pelo conjunto solo – planta – clima.
- **Solo profundo** → raízes se aprofundam na procura de mais água para atender a demanda.
 - plantas → formação do SR (sistema radicular) garantindo a sobrevivência

INTRODUÇÃO

• **Solos argilosos** → maior capacidade de retenção de água → raízes não necessitam se aprofundar tanto.

• **Solos com camada adensada** → impede a penetração de raízes e a DP (drenagem profunda).

- época chuvosa → solo encharcado asfixia as raízes mais profundas.

- terreno inclinado → DLo (drenagem lateral) ameniza o problema pela eliminação do excesso de água.

- época seca → pequeno volume de água disponível não é capaz de suprir as necessidades das plantas.

ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO (BHC)

•No caso do BHC desenvolvido por Thornthwaite e Matter (1955):

-determina-se a ΔARM de água no solo sem irrigação ($I = 0$) pela Equação:

$$\pm \Delta ARM = P + I - ET + AC - DP$$

-outra simplificação para fins práticos é considerar desprezível a AC - **Ascensão capilar** ($AC = 0$).

ELABORAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO (BHC)

-desse modo, torna-se possível estimar a ΔARM , denominada **alteração de armazenamento (ALT)**, a ETR (evapotranspiração), a DP (drenagem profunda), agora denominada **excedente hídrico (EXC)**, resultando na seguinte Equação:

$$\pm ALT = P \text{ (precipitação)} - ETR - EXC$$

DETERMINAÇÃO DA CAD (água disponível).

•É a lâmina de água correspondente ao intervalo de umidade do solo entre a **capacidade de campo (CC%)** e o **ponto de murcha permanente (PMP%)**.

•A seleção da CAD é feita em função do tipo de cultura ao qual se quer o BHC do que do tipo de solo.

-**solo arenoso** → o valor de **(CC% - PMP%)** é menor a profundidade efetiva do SR (sistema radicular) (Z) é maior

Há uma compensação, tornando a CAD aproximadamente igual para o solo arenoso e o argiloso.

DETERMINAÇÃO DA CAD

• Assim, independentemente do tipo de solo, pode-se adotar

os seguintes valores de CAD:

-25 e 50 mm → hortaliças

-75 e 100 mm → culturas anuais

-100 e 125 mm → culturas perenes

-150 e 300 mm → espécies florestais

EXEMPLO - ROTEIRO PARA ELABORAÇÃO DO BHC

Mês	T (°C)	ET _T mm	Cor	ETP mm	P mm	P - ETP	NEG. ACUM	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	23,6	3,5	1,14	120	268	+148	0	100	0	120	0	148
Fev	23,6	3,5	1,00	105	218	+113	0	100	0	105	0	113
Mar	23,4	3,2	1,05	101	159	+58	0	100	0	101	0	58
Abr	22,0	2,9	0,97	84	81	-3	-3	97	-3	84	0	0
Mai	19,7	2,2	0,95	63	55	-8	-11	90	-7	62	1	0
Jun	18,7	1,9	0,90	51	31	-20	-31	73	-17	48	3	0
Jul	18,7	1,9	0,94	54	28	-26	-57	57	-16	44	10	0
Ago	20,9	2,6	0,99	77	25	-52	-109	34	-23	48	29	0
Set	22,5	3,2	1,00	96	58	-38	-147	23	-11	69	27	0
Out	23,3	3,2	1,09	104	139	+35	-54	58	+35	104	0	0
Nov	23,5	3,5	1,10	116	174	+58	0	100	+42	116	0	16
Dez	23,3	3,2	1,16	111	298	+187	0	100	0	111	0	187
Ano	21,9	-	-	-	1534	452	-	-	0	1012	70	522

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO BHC

- Permite visualizar o ritmo anual dos elementos básicos e facilitar sua interpretação quanto à determinação de épocas com excedentes ou com deficiências de água no solo, para atendimento das necessidades agrícolas.

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO BHC

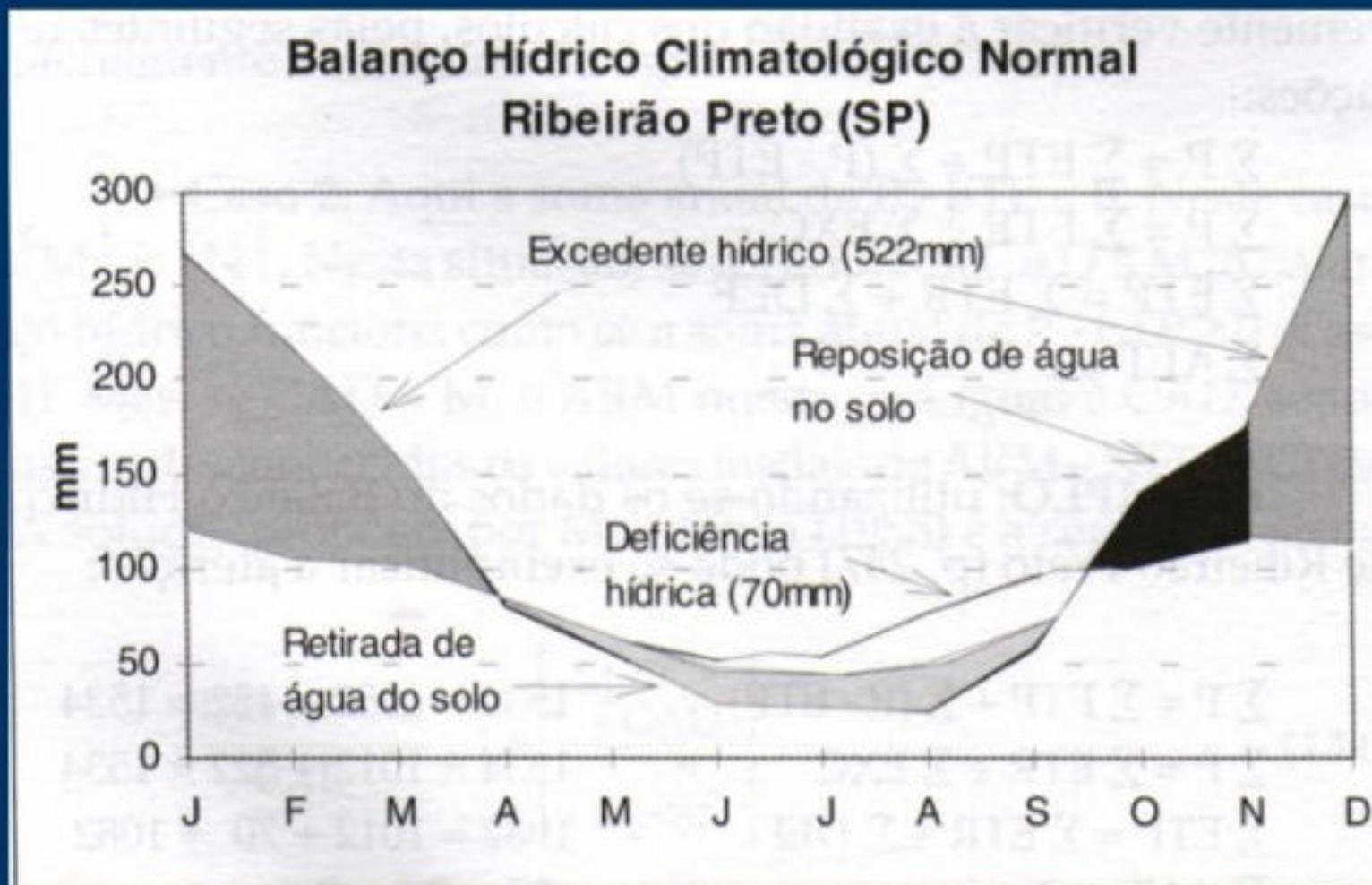


FIGURA 13.3 Representação gráfica completa do BH Climático.

Fonte: PEREIRA et al. (2002)

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO BHC

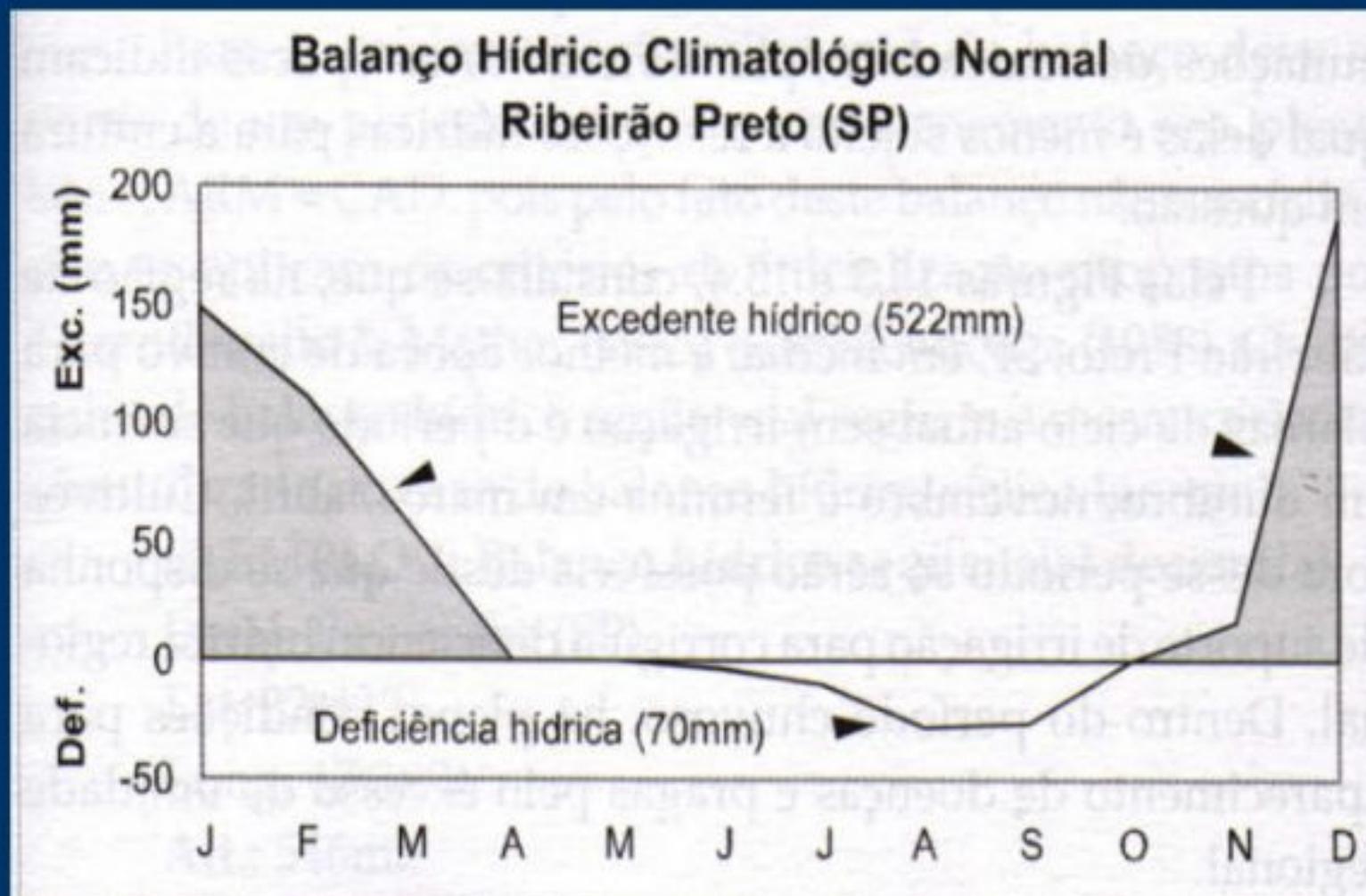


FIGURA 13.4 Representação gráfica simplificada do BH climático (extrato).

Fonte: PEREIRA et al. (2002)

APLICAÇÕES DO BHC

• Possui várias aplicações, entre as quais destacam-se:

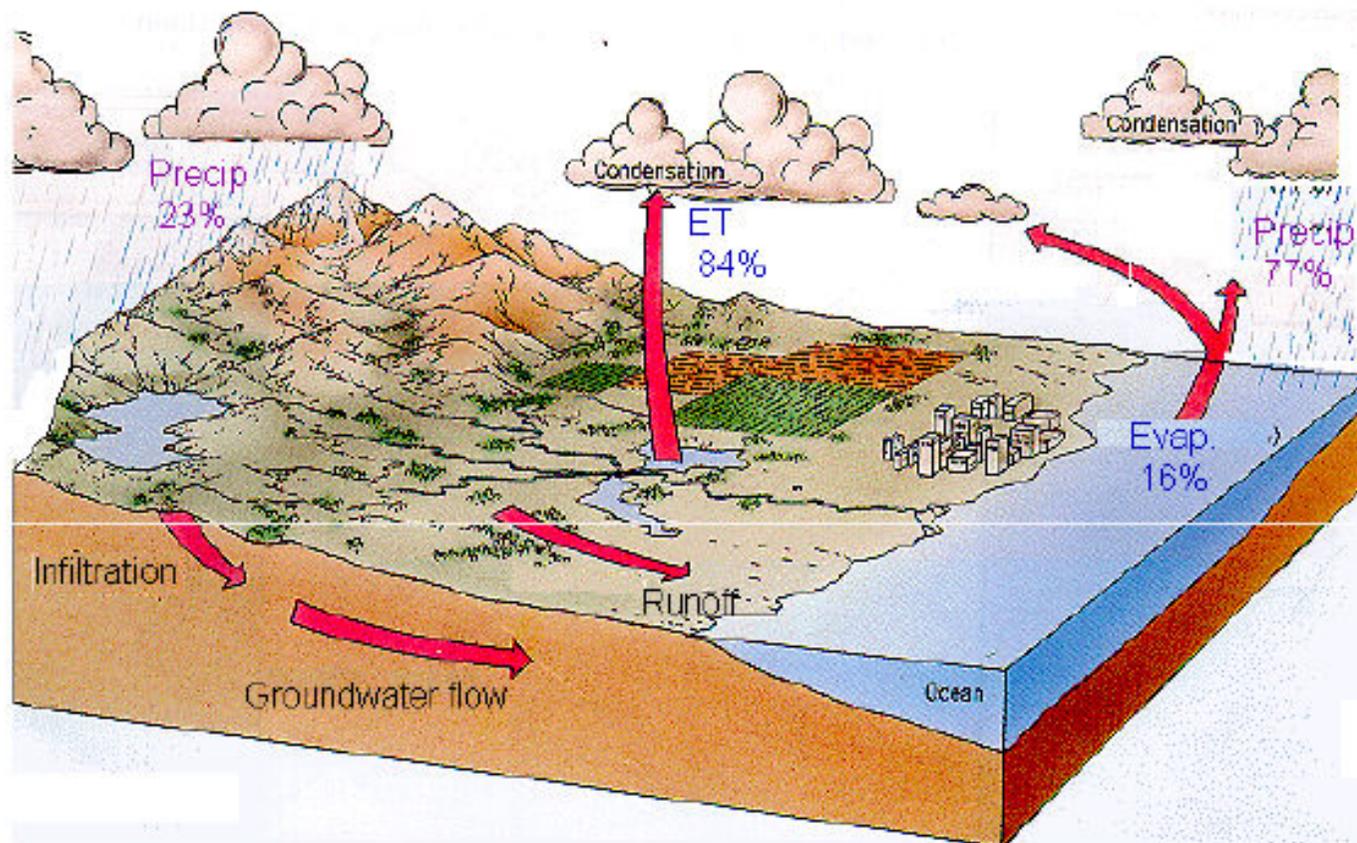
➤ **Disponibilidade Hídrica Regional** → caracterização e comparação climática regional quanto à disponibilidade hídrica média no solo.

➤ **Caracterização de Secas** → os cálculos do BHC são úteis na caracterização de períodos de secas e de seus efeitos na agricultura, com redução da produção.

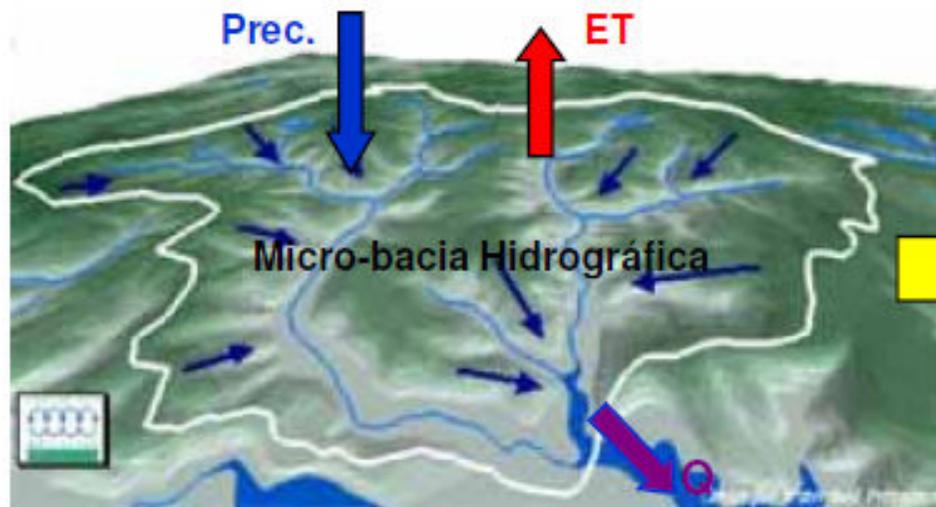
APLICAÇÕES DO BHC

- **Zoneamento Agroclimático** → serve de base pra o estudo climático regional, sendo a região classificada como apta, marginal ou inapta em função das exigências térmicas e hídricas de um determinado cultivo.
- **Determinação das melhores épocas de semeadura** → simulações de semeadura / plantio em várias épocas indicam qual delas é menos sujeita a restrições hídricas para a cultura em questão.

Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

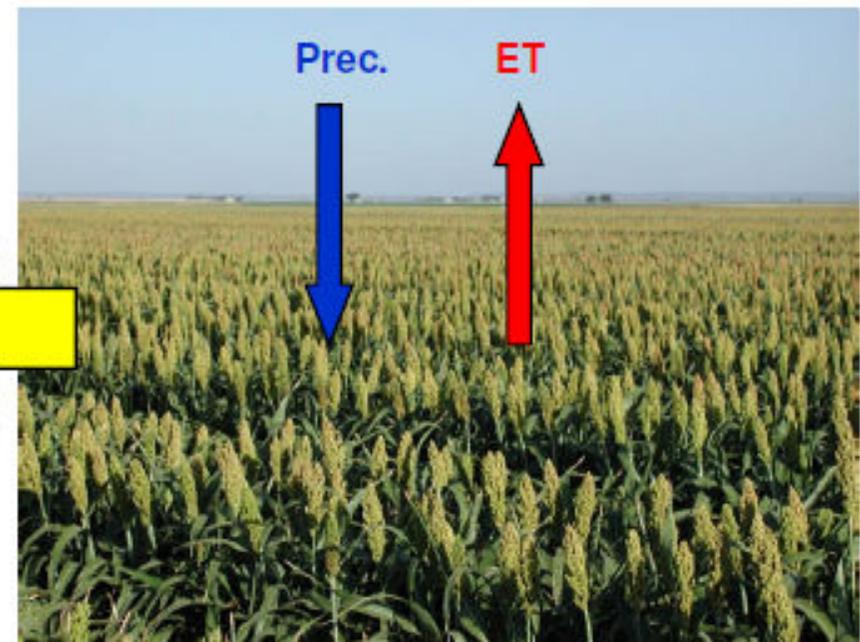


O balanço hídrico nada mais é do que o computo das entradas e saídas de água de um sistema. Várias escalas espaciais podem ser consideradas para se contabilizar o balanço hídrico. Na escala macro, o “balanço hídrico” é o próprio “ciclo hidrológico”, cuja resultado nos fornecerá a água disponível no sistema (no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos), ou seja na biosfera.

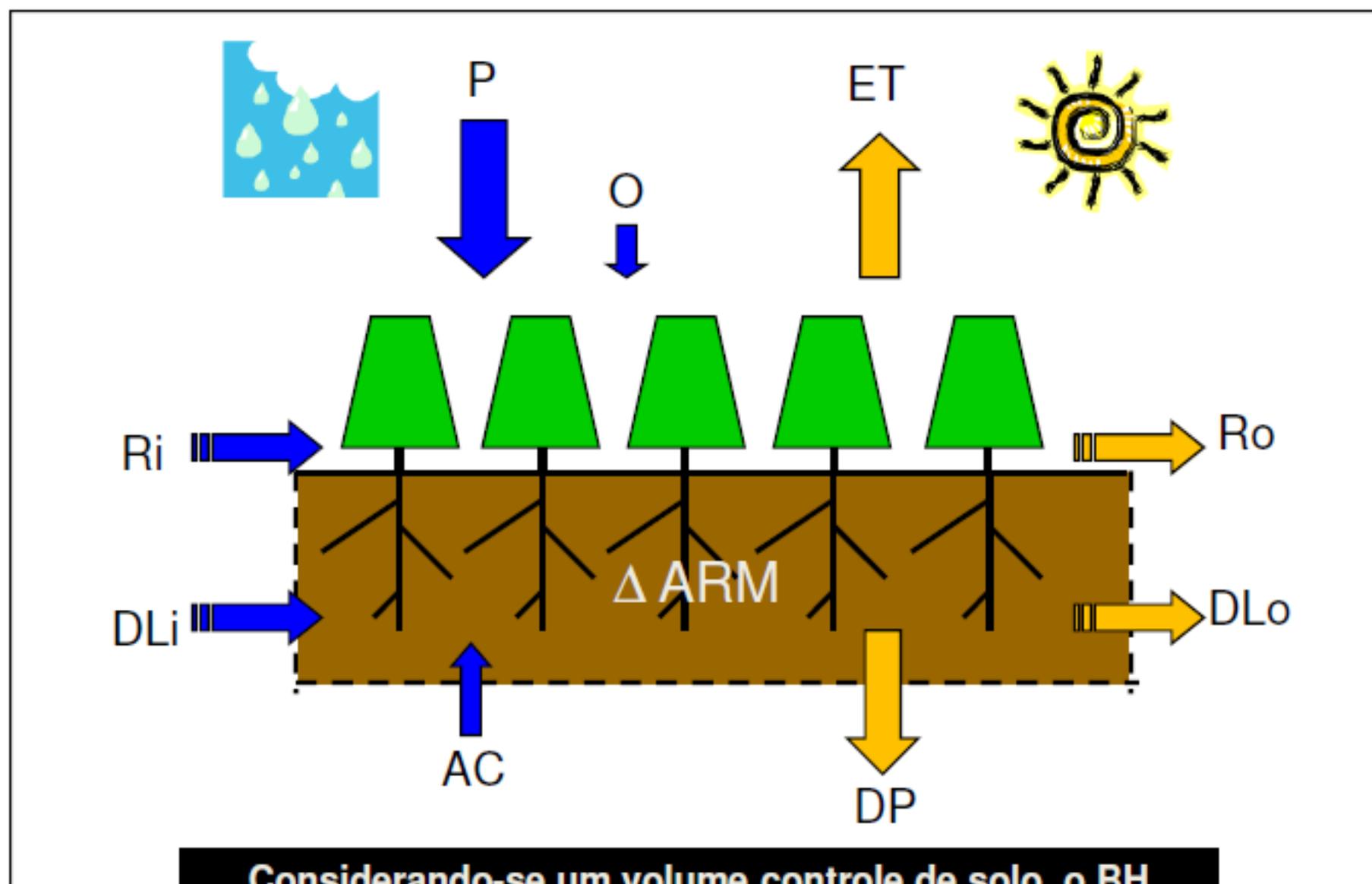


Em uma escala intermediária, representada por uma micro-bacia hidrográfica, o balanço hídrico resulta na vazão de água desse sistema. Para períodos em que a chuva é menor do que a demanda atmosférica por vapor d'água, a vazão (Q) diminui, ao passo em que nos períodos em que a chuva supera a demanda, Q aumenta.

Na escala local, no caso de uma cultura, o balanço hídrico tem por objetivo estabelecer a variação de armazenamento e, conseqüentemente, a disponibilidade de água no solo. Conhecendo-se qual a umidade do solo ou quanto de água este armazena é possível se determinar se a cultura está sofrendo deficiência hídrica, a qual está intimamente ligada aos níveis de rendimento dessa lavoura.



Componentes do balanço hídrico para condições naturais



Considerando-se um volume controle de solo, o BH apresenta os seguintes componentes, descritos a seguir.

➡ Entradas

P = chuva

O = orvalho

Ri = escoamento superficial

DLi = escoamento sub-superficial

AC = ascensão capilar

➡ Saídas

ET = evapotranspiração

Ro = escoamento superficial

DLo = escoamento sub-superficial

DP = drenagem profunda

Equacionando-se as entradas (+) e as saídas (-) de água do sistema, tem-se a variação de armazenamento de água no solo

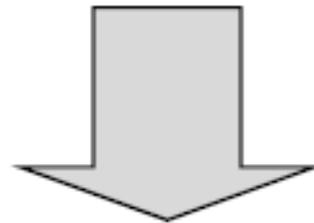
$$\Delta ARM = P + O + Ri + DLi + AC - ET - Ro - DLo - DP$$

A chuva representa a principal entrada de água em um sistema, ao passo que a contribuição do orvalho só assume papel importante em regiões muito áridas, sendo assim desprezível. As entradas de água pela ascensão capilar também são muito pequenas e somente ocorrem em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Mesmo assim, a contribuição dessa variável é pequena, sendo também desprezível. Já os fluxos horizontais de água (Ri, Ro, DLi e DLo), para áreas homogêneas, se compensam, portanto, anulando-se. A ET é a principal saída de água do sistema, especialmente nos períodos secos, ao passo que DP constitui-se em outra via de saída de água do volume controle de solo nos períodos excessivamente chuvosos.

Sendo assim, pode-se considerar que $R_i \approx R_o$, $D_{Li} \approx D_{Lo}$, O e AC desprezíveis, o que resulta na seguinte equação geral do balanço hídrico:

$$\Delta ARM = P - ET - DP$$

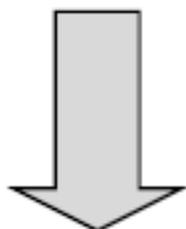
Por meio dessa equação, pode-se determinar a variação da disponibilidade de água no solo. Caso se conheça a capacidade de água disponível (CAD) desse solo, pode-se determinar também a quantidade de água armazenada por ele.



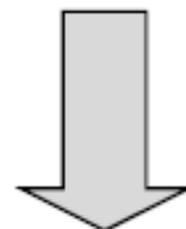
Uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo é por meio do método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), denominado de Balanço Hídrico Climatológico, no qual a partir dos dados de P , de ETP e da CAD , chega-se aos valores de disponibilidade de água no solo (Armazenamento = ARM), de alteração do armazenamento de água do solo ($ALT = \Delta ARM$), de evapotranspiração real (ETR), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico ($EXC = DP$).

Balanço Hídrico Climatológico

O Balanço Hídrico Climatológico foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de se caracterizar o clima de uma região, de modo a ser empregado na classificação climática desenvolvida por Thornthwaite na década de 40. Posteriormente, esse método começou a ser empregado para fins agronômicos dada a grande interrelação da agricultura com as condições climáticas.



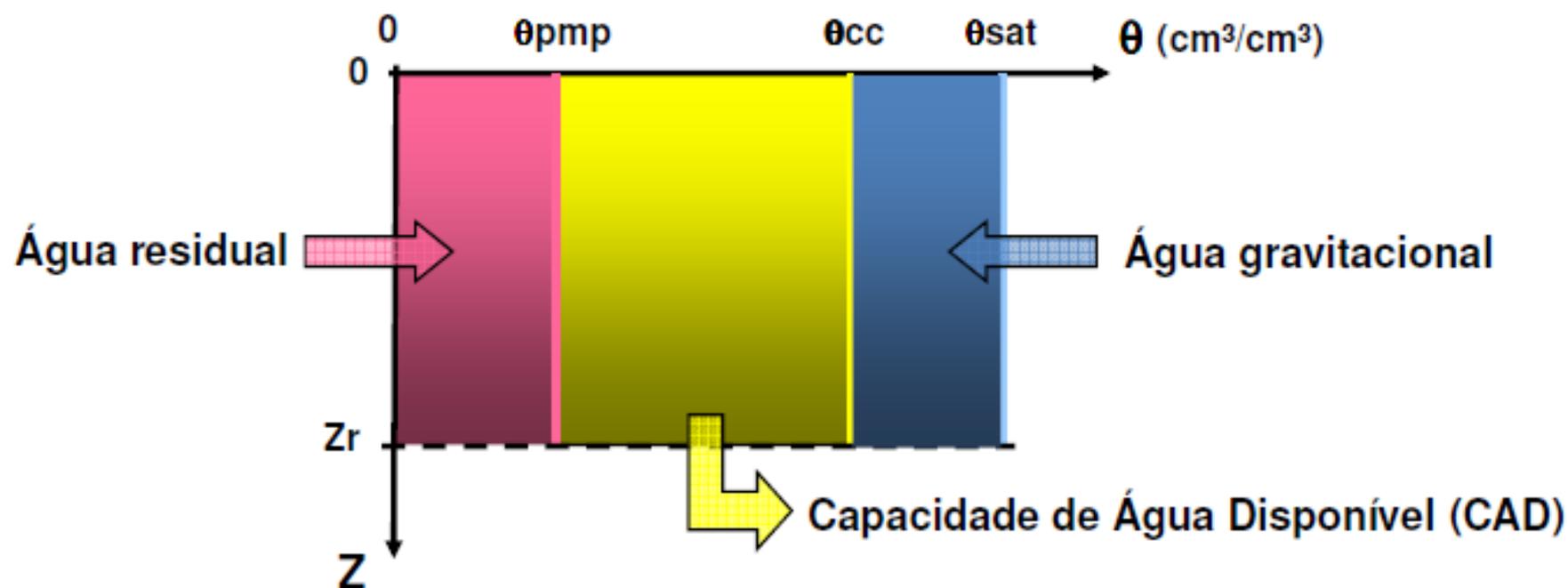
O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) elaborado com dados médios de P e ETP de uma região é denominado de **BHC Normal**. Esse tipo de BH é um indicador climatológico da disponibilidade hídrica na região, por meio da variação sazonal das condições do BH ao longo de um ano médio (cíclico), ou seja, dos períodos com deficiências e excedentes hídricos. Essas informações são de cunho climático e, portanto, auxiliam no **PLANEJAMENTO AGRÍCOLA**.



O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) elaborado com dados de P e ETP de um período ou de uma seqüência de períodos (meses, semanas, dias) de um ano específico para uma certa região é denominado de **BHC Seqüencial**. Esse tipo de BH nos fornece a caracterização e variação sazonal das condições do BH (deficiências e excedentes) ao longo do período em questão. Essas informações são de grande importância para as **TOMADAS DE DECISÃO**.

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Para se elaborar o BHC, seja ele o Normal ou o Seqüencial, há a necessidade de se conhecer a capacidade de água disponível no solo (CAD). A CAD representa o máximo de água disponível que determinado tipo de solo pode reter em função de suas características físico-hídricas, ou seja, umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), massa específica do solo (d_g) e da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r), onde se concentram cerca de 80% das raízes. Veja a representação esquemática abaixo e a seguir as diferentes formas de se determinar a CAD.



Determinação da CAD para elaboração do BHC

⇒ A partir das características físico-hídricas do solo

$$CAD = [(CC\% - PMP\%)/100] * dg * Zr$$

CC% = umidade da capacidade de campo, em %

PMP% = umidade do ponto de murcha, em %

dg = massa específica do solo

Zr = profundidade específica do sistema radicular, em mm

⇒ A partir das características gerais do solo (Doorenbos e Kassam, 1994)

$$CAD = CAD_{média} * Zr$$

CAD_{média} = capacidade de água disponível média, em mm de água / cm de profundidade de solo

Zr = profundidade específica do sistema radicular, em cm

CAD_{média} p/ solos argilosos = 2,0 mm/cm

CAD_{média} p/ solos de text. Média = 1,4 mm/cm

CAD_{média} p/ solos arenosos = 0,6 mm/cm

Valores médios da profundidade efetiva dos sistemas radiculares (Zr) das principais culturas do Estado de São Paulo. Adaptado de Alfonsi et al. (1990)



Cultura	Zr (cm)
Hortaliças	10 a 20
Arroz, batata, feijão	20 a 30
Trigo	30 a 40
Milho e soja	40 a 50
Amendoim	50 a 60
Cana, citrus, cafeeiro	70 a 100
Espécies florestais	150 a 250

⇒ A partir das características gerais da cultura – critério prático

$$CAD = CAD_{média} * Zr$$

$$CAD_{média} = 1,3 \text{ mm/cm}$$

$$Zr = \text{Tabela acima}$$

OBS: Para fins climatológicos, ou seja, para determinação do BHC apenas para caracterização da disponibilidade hídrica regional, é muito comum a adoção de valores de CAD variando de 75 a 125 mm.

Exemplos de determinação da CAD

Exemplo 1:

CC = 32%, PMP = 20%, $d_g = 1,3$ e $Z_r = 50$ cm

$$CAD = (32 - 20)/100 * 1,3 * 500 = 78 \text{ mm}$$

 Solo Argiloso

Solo Arenoso 

Exemplo 2:

CC = 25%, PMP = 17%, $d_g = 1,2$ e $Z_r = 50$ cm

$$CAD = (25 - 17)/100 * 1,2 * 500 = 48 \text{ mm}$$

Exemplo 3:

Solo textura média \Rightarrow $CAD_{m\u00e9dia} = 1,4$ mm/cm
e $Z_r = 50$ cm

$$CAD = 1,4 * 50 = 70 \text{ mm}$$

 Solo de textura média

Crit\u00e9rio pr\u00e1tico 

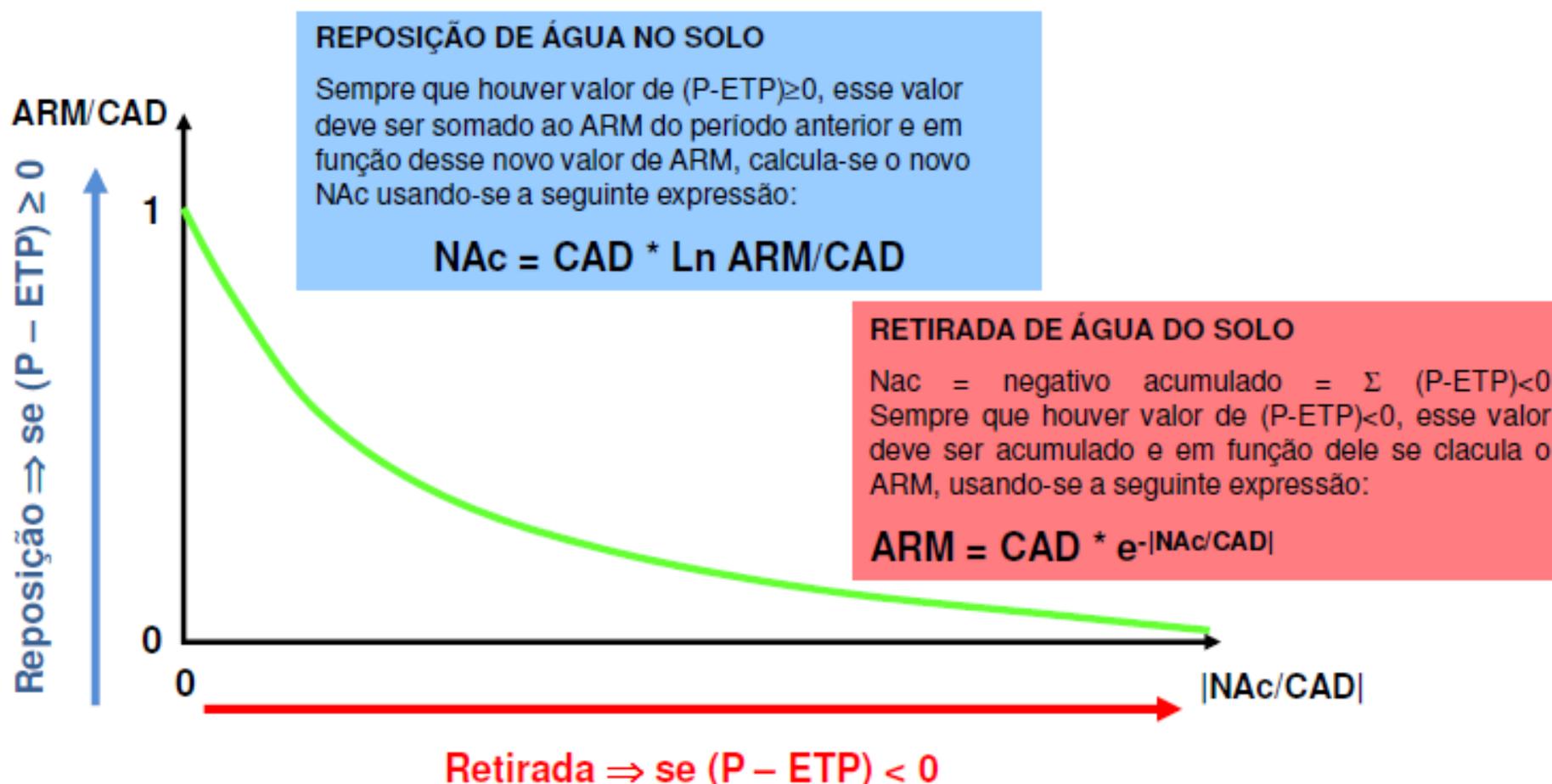
Exemplo 4:

Crit\u00e9rio pr\u00e1tico \Rightarrow $CAD_{m\u00e9dia} = 1,3$ mm/cm e
 $Z_r = 50$ cm

$$CAD = 1,3 * 50 = 65 \text{ mm}$$

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Antes de iniciarmos o BHC propriamente dito, há a necessidade de se entender como o método proposto por T&M (1955) considera a retirada e a reposição de água do solo. Os autores adotaram uma função exponencial para a retirada de água do solo (ver esquema abaixo), ao passo que a reposição é direta, simplesmente somando-se ao armazenamento de água do solo o saldo positivo do balanço entre P e ETP [(P - ETP)+].



Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Conhecendo-se P, ETP, a CAD e como se dá a retirada e reposição de água no solo, pode-se agora iniciar a elaboração do BHC propriamente dita. Porém, antes iremos fazer algumas simulações para que o processo fique bem claro. Para tais simulações iremos considerar intervalos de tempo de 5 dias, numa seqüência de 6 períodos, e uma CAD = 100mm. Além disso, é necessário se definir algumas outras variáveis:

$$N_{Ac} = \sum (P-ETP)_{>0}$$

$$ARM = CAD e^{-|N_{Ac}/CAD|}$$

$$N_{Ac} = CAD \ln (ARM/CAD)$$

$$ALT = ARM_i - ARM_{i-1}$$

$$\text{Se } (P-ETP) \geq 0 \Rightarrow ETR = ETP$$

$$\text{Se } (P-ETP) < 0 \Rightarrow ETR = P + |ALT|$$

$$DEF = ETP - ETR$$

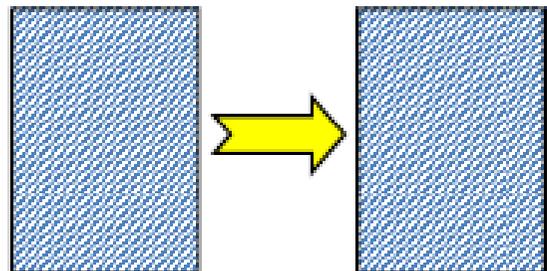
$$\text{Se } ARM < CAD \Rightarrow EXC = 0$$

$$\text{Se } ARM = CAD \Rightarrow EXC = (P-ETP) - ALT$$

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Simulação 1

$P = 50 \text{ mm}$ ↓ ↑ $ETP = 25 \text{ mm}$



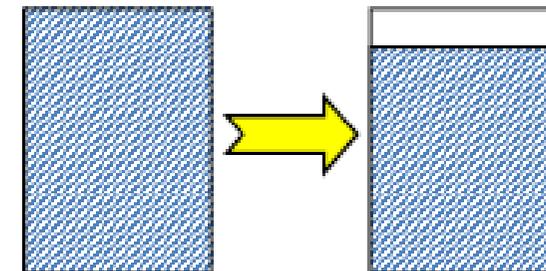
$ARM_i = 100$ $ARM_f = 100$

$(P-ETP) = +25 \text{ mm}$
 $ARM_f = 100 + 25 = 100$
 $NAC = 0$
 $ALT = 100 - 100 = 0$
 $ETR = ETP = 25 \text{ mm}$
 $DEF = 0$
 $EXC = 50 - 0 = 50 \text{ mm}$

Obs: veja que
ARM não pode
ultrapassar a
CAD

Simulação 2

$P = 10 \text{ mm}$ ↓ ↑ $ETP = 25 \text{ mm}$



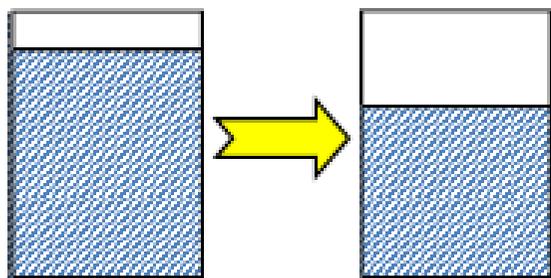
$ARM_i = 100$ $ARM_f = 86$

$(P-ETP) = -15 \text{ mm}$
 $NAC = -15$
 $ARM_f = 100 * e^{-15/100} = 86$
 $ALT = 86 - 100 = -14$
 $ETR = 10 + |-14| = 24 \text{ mm}$
 $DEF = 25 - 24 = 1 \text{ mm}$
 $EXC = 0$

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Simulação 3

$P = 0 \text{ mm}$   $ETP = 25 \text{ mm}$



$ARMi = 86$

$ARMf = 67$

$$(P-ETP) = -25 \text{ mm}$$

$$NAC = -15 + (-25) = -40$$

$$ARMf = 100 * e^{-40/100} = 67$$

$$ALT = 67 - 86 = -19$$

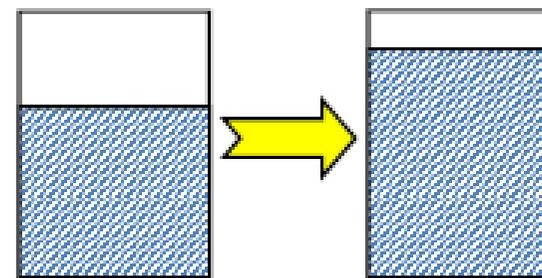
$$ETR = 0 + |-19| = 19 \text{ mm}$$

$$DEF = 25 - 19 = 6 \text{ mm}$$

$$EXC = 0$$

Simulação 4

$P = 40 \text{ mm}$   $ETP = 25 \text{ mm}$



$ARMi = 67$

$ARMf = 82$

$$(P-ETP) = +15 \text{ mm}$$

$$ARMf = 67 + 15 = 82$$

$$NAC = 100 \text{ Ln } 82/100 = -20$$

$$ALT = 82 - 67 = +15$$

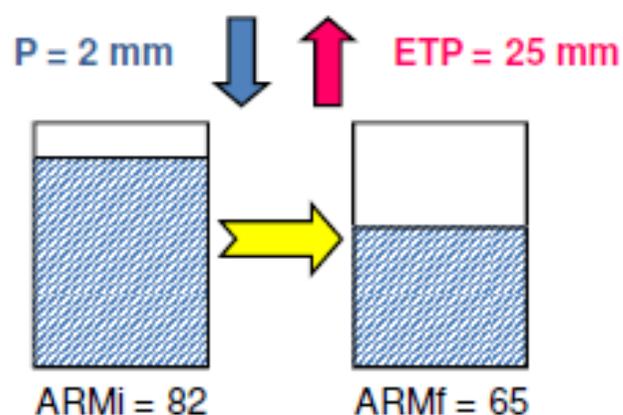
$$ETR = ETP = 25 \text{ mm}$$

$$DEF = 0$$

$$EXC = 15 - 15 = 0$$

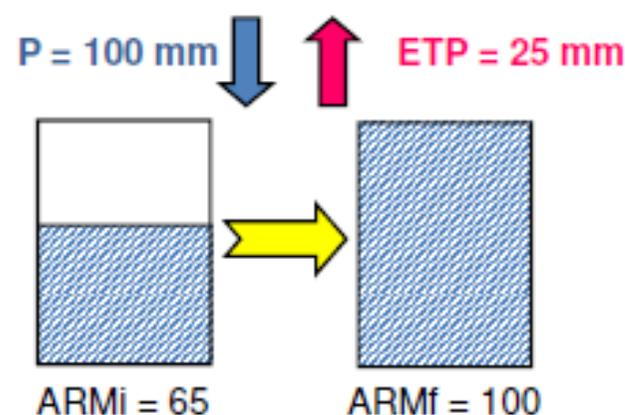
Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Simulação 5



$$\begin{aligned} (P-ETP) &= -23 \text{ mm} \\ NAc &= -20 + (-23) = -43 \\ ARM_f &= 100 * e^{-43/100} = 65 \\ ALT &= 65 - 82 = -17 \\ ETR &= 2 + |-17| = 19 \text{ mm} \\ DEF &= 25 - 19 = 6 \text{ mm} \\ EXC &= 0 \end{aligned}$$

Simulação 6



$$\begin{aligned} (P-ETP) &= +75 \text{ mm} \\ ARM_f &= 65 + 75 = 100 \\ NAc &= 100 \text{ Ln } 100/100 = 0 \\ ALT &= 100 - 65 = +35 \\ ETR &= ETP = 25 \text{ mm} \\ DEF &= 0 \\ EXC &= 75 - 35 = 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

Obs: veja que
ARM não pode
ultrapassar a
CAD

Roteiro para a Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

OBS: O roteiro a seguir é apresentado para a elaboração de um Balanço Hídrico Climatológico *Normal*, ou seja, para um ano cíclico. Porém, com exceção para o modo de inicialização do BH, esse mesmo roteiro servirá para a elaboração do balanço hídrico *Seqüencial* e também o de *Cultura* (quando usaremos ETc ao invés de ETP e estimaremos ETr ao invés de ETR).

- 1) Estimativa da ETP – deve-se estimar a ETP com o método mais adequado para a região, em função dos dados meteorológicos disponíveis
- 2) Obtenção de dados de chuva (P) – esses dados devem ser obtidos junto a publicações que forneçam as normais climatológicas da região
- 3) Calcular (P-ETP), mantendo-se os sinais positivos (+) e negativos (-)

OBS: a partir daqui deve-se preencher as colunas a seguir (NAc e ARM) simultaneamente, iniciando-se com o primeiro mês com valor de (P-ETP) < 0, após uma seqüência de valores positivos de (P-ETP), ou seja no início da estação seca. Porém, o valor de ARM a ser determinado para se iniciar o BHC Normal, será o do último mês (período) da estação úmida [com (P-ETP) ≥ 0]. A determinação do ARM no último período da estação úmida deverá seguir as seguintes condições:

A – se $\Sigma(P-ETP)$ anual $\geq 0 \Rightarrow$ ARM = CAD no último período da estação úmida

B – se $\Sigma(P-ETP)$ anual < 0, mas $\Sigma(P-ETP)^+ \geq CAD \Rightarrow$ Idem a A

C – se $\Sigma(P-ETP)$ anual < 0 e $\Sigma(P-ETP)^+ < CAD$

\Rightarrow NAc = $CAD \cdot \text{Ln} \left[\frac{(\Sigma(P-ETP)^+ / CAD)}{(1 - e^{\Sigma(P-ETP)^- / CAD})} \right]$ no último período da estação úmida

4) Determinação do NAc e do ARM

⇒ Se $(P-ETP) < 0$ ⇒ Calcula-se o NAc, ou seja os valores de $(P-ETP)$ negativos, e posteriormente se calcula o valor do ARM ($ARM = CAD e^{-|NAc/CAD|}$)

⇒ Se $(P-ETP) \geq 0$ ⇒ Calcula-se primeiro o ARM [$ARM = ARM \text{ anterior} + (P-ETP)$] e posteriormente calcula-se o NAc [$NAc = CAD \ln (ARM/CAD)$]. Nesse caso o NAc deve ser determinado no caso de haver um próximo período com $(P-ETP) < 0$

5) Cálculo da Alteração (ALT = Δ ARM)

$ALT = ARM - ARM \text{ anterior}$ ($ALT > 0$ ⇒ reposição; $ALT < 0$ ⇒ retirada de água do solo)

6) Determinação da ETR (Evapotranspiração Real)

Se $(P-ETP) < 0$ ⇒ $ETR = P + |ALT|$

Se $(P-ETP) \geq 0$ ⇒ $ETR = ETP$

7) Determinação da DEF (Deficiência hídrica = o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar)

$DEF = ETP - ETR$

8) Determinação do EXC (Excedente hídrico, que corresponde à água que não pode ser retida e drena em profundidade = água gravitacional)

Se $ARM < CAD$ ⇒ $EXC = 0$

Se $ARM = CAD$ ⇒ $EXC = (P-ETP) - ALT$

Exemplo do Balanço Hídrico Climatológico Normal

Local: Posse, GO (Lat. 14°06'S)

Período: 1961-1990

CAD = 100mm

Mês	ETP	P	(P-ETP)	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Jan	116	271	+155	0	100	0	116	0	155
Fev	97	215	+118	0	100	0	97	0	118
Mar	104	230	+126	0	100	0	104	0	126
Abr	88	119	+31	0	100	0	88	0	31
Mai	78	20	-58	-58	56	-44	64	14	0
Jun	63	9	-54	-112	33	-23	32	31	0
Jul	62	5	-57	-169	18	-15	20	42	0
Ago	90	12	-78	-247	8	-10	22	68	0
Set	94	30	-64	-311	4	-4	34	60	0
Out	109	123	+14	-171	18	+14	109	0	0
Nov	106	223	+117	0	100	+82	106	0	35
Dez	106	280	+174	0	100	0	106	0	174
Ano	1113	1537	+424			0	898	215	639

 Mês em que se iniciou o BHC Normal (Usando critério A da inicialização)

Aferição do BHC Normal

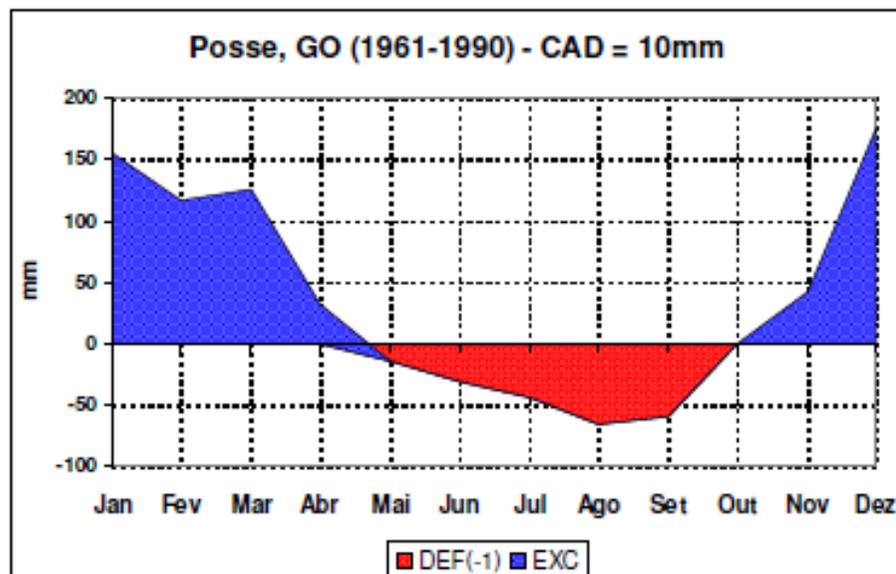
$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma(P-ETP) \Rightarrow 1537 = 1113 + 424 \checkmark$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \Rightarrow 1537 = 898 + 639 \checkmark$$

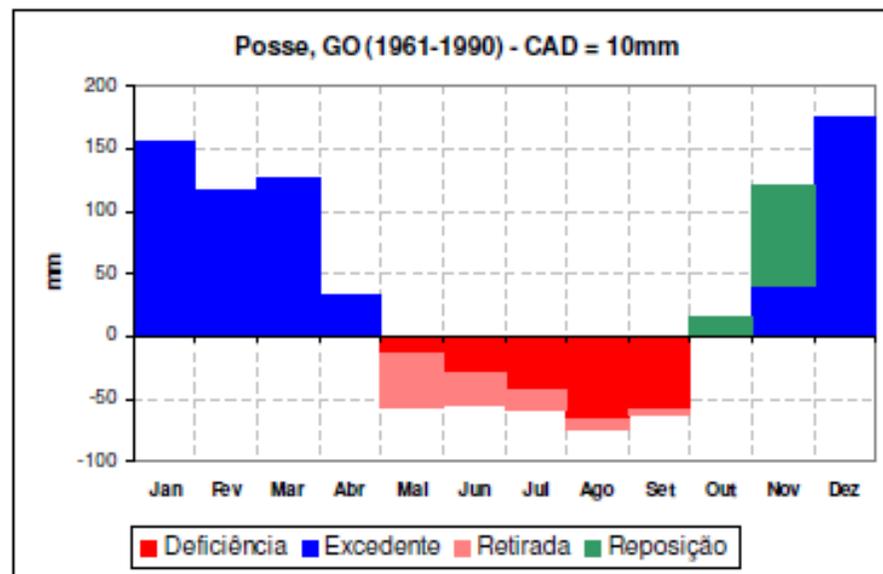
$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF \Rightarrow 1113 = 898 + 215 \checkmark$$

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \checkmark$$

Representação gráfica do BHC Normal



Simplificada (EXC e -DEF)



Completa (EXC, DEF, ALT)

Exemplo do Balanço Hídrico Climatológico Normal

Local: Petrolina, PE (Lat. 14°06'S)

Período: 1961-1990

CAD = 100mm

Mês	ETP	P	(P-ETP)	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Jan	153	72	-81	-1250	0	0	72	81	0
Fev	139	90	-49	-1299	0	0	90	49	0
Mar	143	148	+5	-300	5	+5	143	0	0
Abr	121	82	-39	-339	3	-2	84	37	0
Mai	116	29	-87	-426	1	-2	31	85	0
Jun	97	10	-87	-513	1	0	10	87	0
Jul	103	13	-90	-603	0	-1	14	89	0
Ago	106	4	-102	-705	0	0	4	102	0
Set	127	6	-121	-826	0	0	6	121	0
Out	167	21	-146	-972	0	0	21	146	0
Nov	174	50	-124	-1096	0	0	50	124	0
Dez	157	84	-73	-1169	0	0	84	73	0
Ano	1603	609	-994			0	609	994	0

 Mês em que se iniciou o BHC Normal (Usando critério C da inicialização)

Aferição do BHC Normal

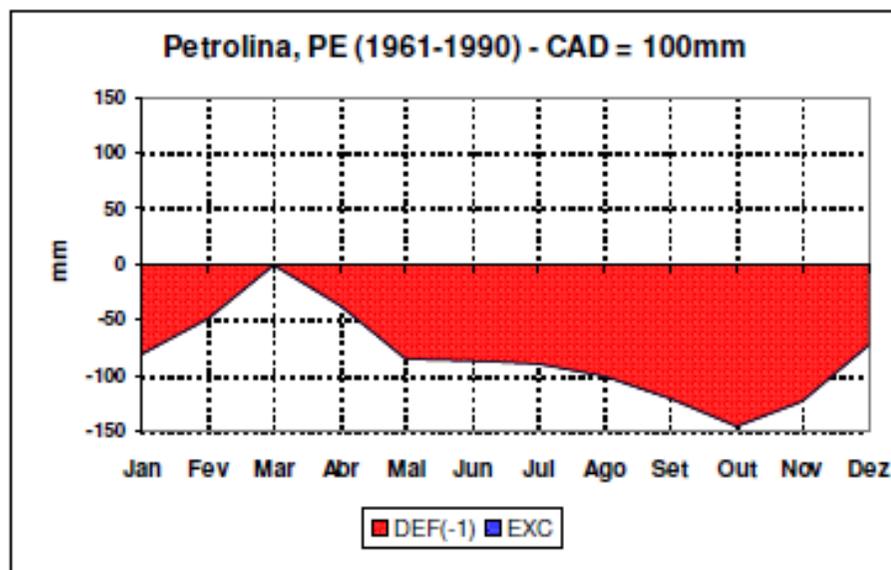
$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma(P-ETP) \Rightarrow 609 = 1603 + -994 \checkmark$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \Rightarrow 609 = 609 + 0 \checkmark$$

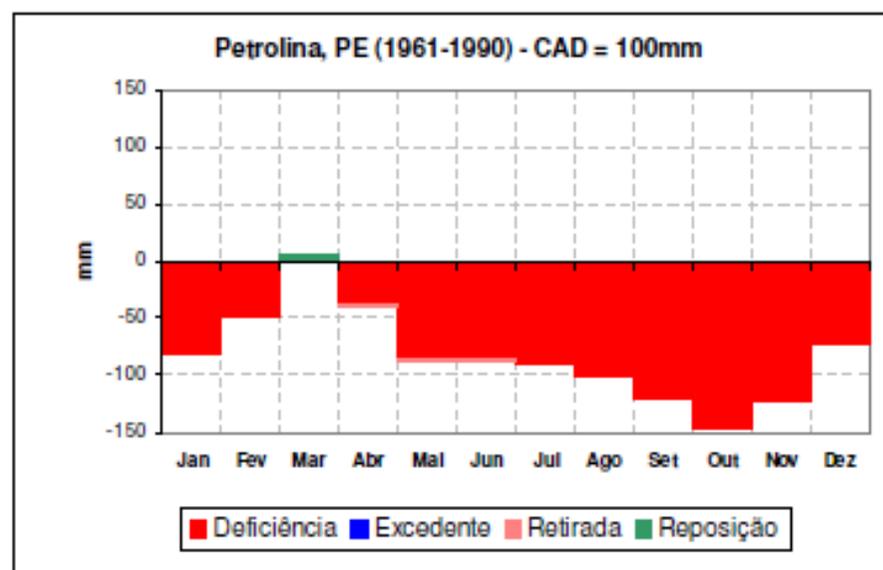
$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF \Rightarrow 1603 = 609 + 994 \checkmark$$

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \checkmark$$

Representação gráfica do BHC Normal



Simplificada (EXC e -DEF)



Completa (EXC, DEF, ALT)

Exemplo do Balanço Hídrico Climatológico Normal

Local: Garanhuns, PE (Lat. 8°33'S)

Período: 1961-1990

CAD = 100mm

Mês	ETP	P	(P-ETP)	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Jan	96	45	-51	-261	7	-5	50	46	0
Fev	80	58	-22	-283	6	-1	59	21	0
Mar	94	100	+6	-212	12	+6	94	0	0
Abr	75	115	+40	-65	52	+40	75	0	0
Mai	76	104	+28	-22	80	+28	76	0	0
Jun	63	122	+59	0	100	+20	63	0	39
Jul	60	133	+73	0	100	0	60	0	73
Ago	63	74	+11	0	100	0	63	0	11
Set	60	47	-13	-13	88	-12	59	1	0
Out	83	33	-50	-63	53	-35	68	15	0
Nov	89	18	-71	-134	26	-27	45	44	0
Dez	98	22	-76	-210	12	-14	36	62	0
Ano	937	871	-66			0	748	189	123

 Mês em que se iniciou o BHC Normal (Usando critério B da inicialização)

Aferição do BHC Normal

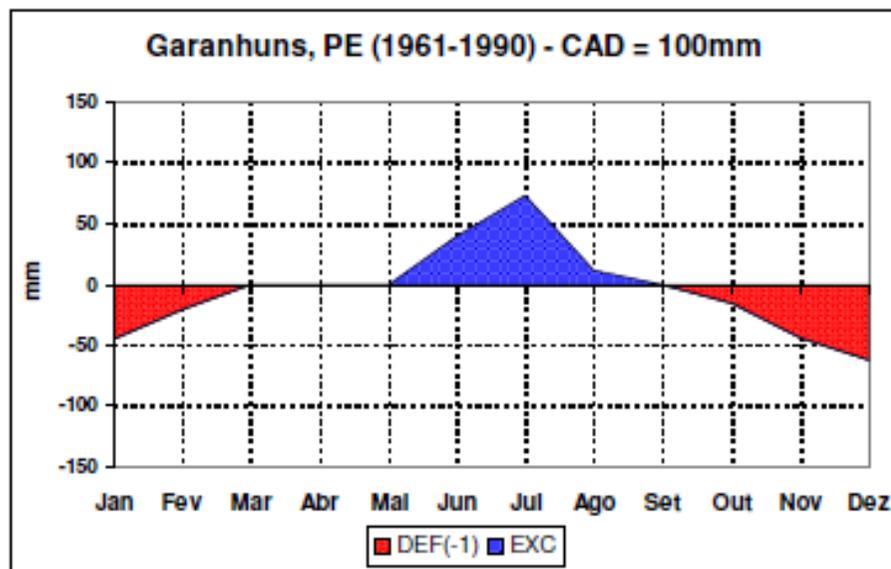
$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma(P-ETP) \Rightarrow 871 = 937 + -66 \checkmark$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \Rightarrow 871 = 748 + 123 \checkmark$$

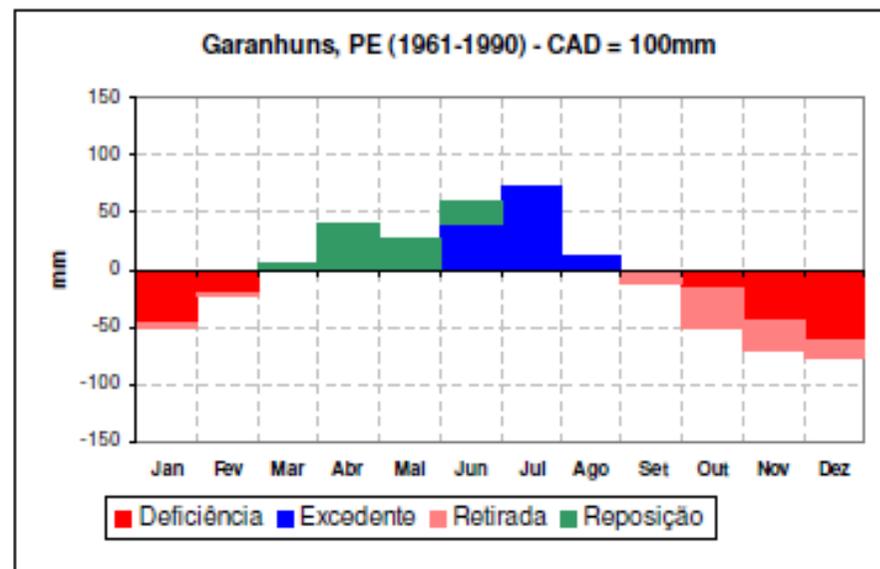
$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF \Rightarrow 937 = 748 + 189 \checkmark$$

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \checkmark$$

Representação gráfica do BHC Normal



Simplificada (EXC e -DEF)



Completa (EXC, DEF, ALT)

Exemplo do Balanço Hídrico Climatológico Normal

Local: Passo Fundo, RS (Lat. 28°15'S) Período: 1961-1990 CAD = 100mm

Mês	ETP	P	(P-ETP)	NAc	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Jan	105	143	+38	0	100	0	105	0	38
Fev	92	148	+56	0	100	0	92	0	56
Mar	90	121	+31	0	100	0	90	0	31
Abr	64	118	+54	0	100	0	64	0	54
Mai	44	131	+87	0	100	0	44	0	87
Jun	35	129	+94	0	100	0	35	0	94
Jul	36	153	+117	0	100	0	36	0	117
Ago	43	166	+123	0	100	0	43	0	123
Set	47	207	+160	0	100	0	47	0	160
Out	68	167	+99	0	100	0	68	0	99
Nov	82	141	+59	0	100	0	82	0	59
Dez	100	162	+62	0	100	0	100	0	62
Ano	806	1786	+980			0	806	0	980

Neste caso o BHC Normal pode ser iniciado em qualquer mês com ARM = CAD, pois não há negativo acumulado

Aferição do BHC Normal

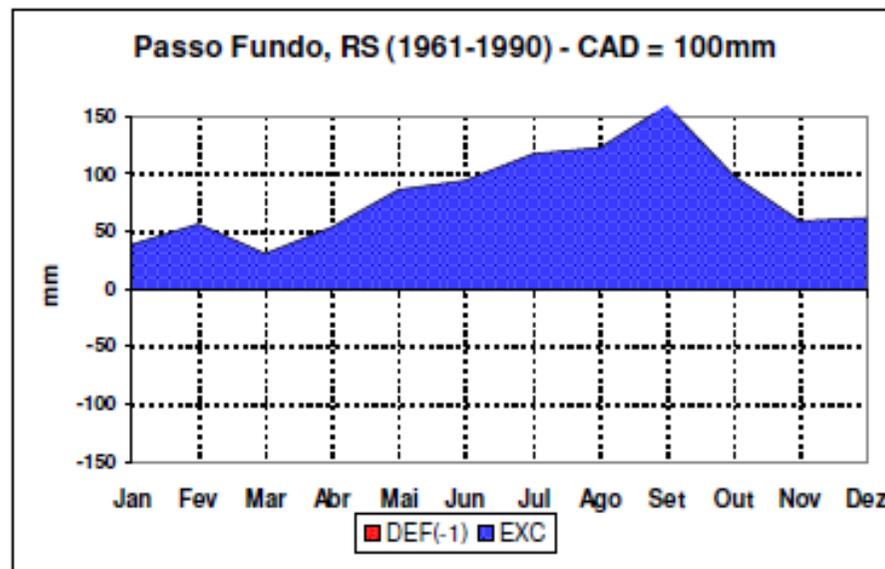
$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma(P-ETP) \Rightarrow 1786 = 806 + 980 \checkmark$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \Rightarrow 1786 = 806 + 980 \checkmark$$

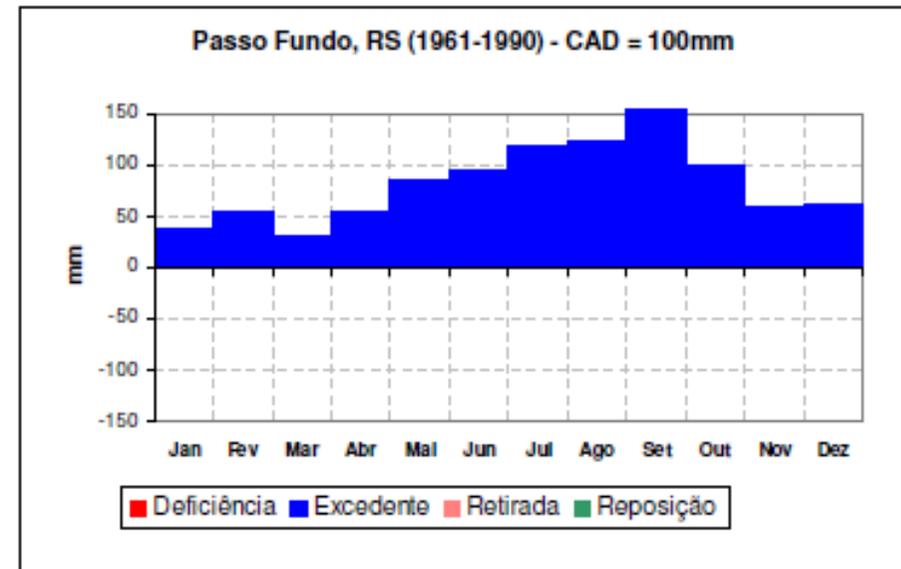
$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF \Rightarrow 806 = 806 + 0 \checkmark$$

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \checkmark$$

Representação gráfica do BHC Normal



Simplificada (EXC e -DEF)

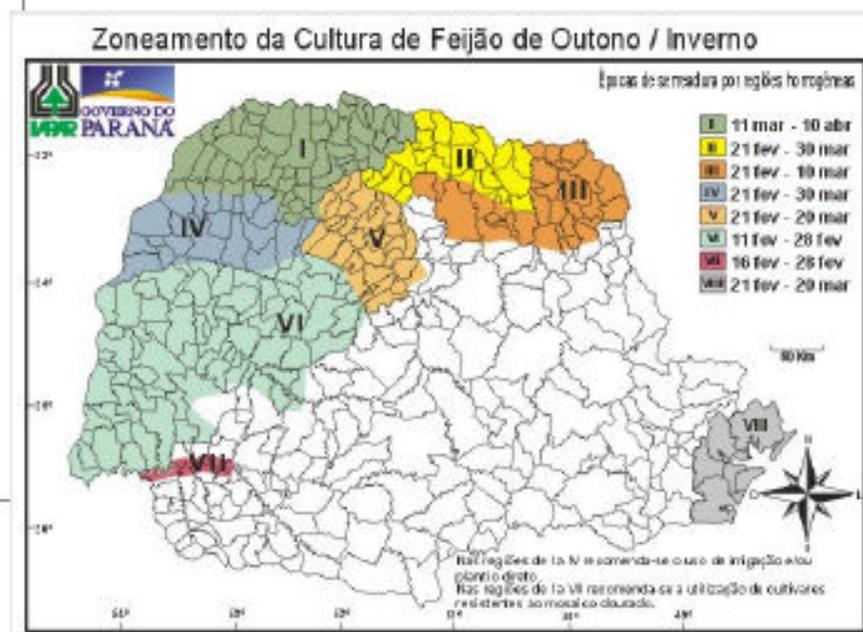
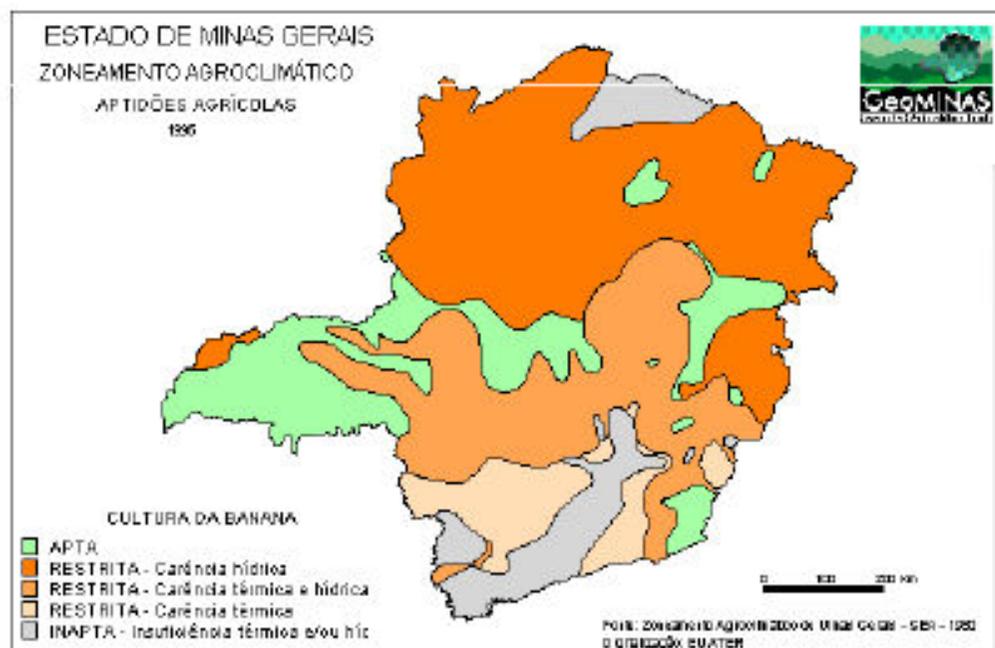


Completa (EXC, DEF, ALT)

Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico Normal

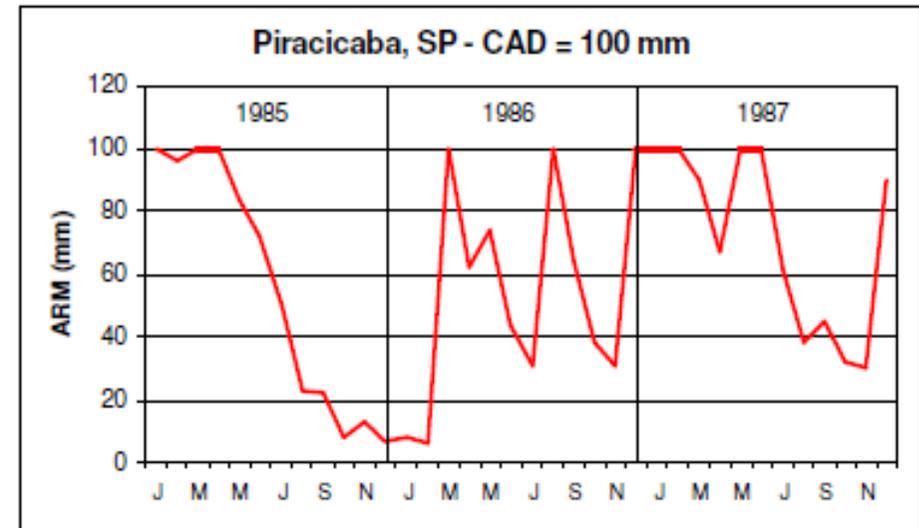
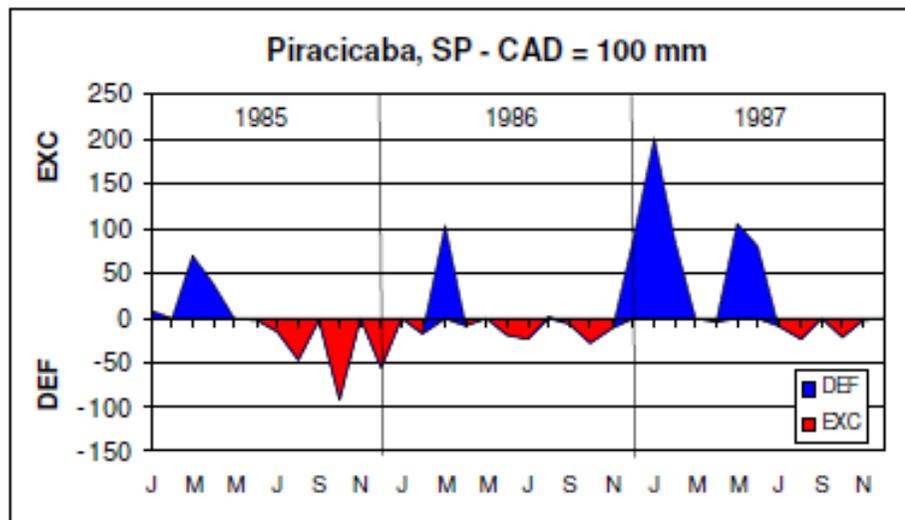
A caracterização regional da disponibilidade hídrica do solo possibilita:

- A comparação dos climas de diferentes localidades
- A caracterização dos períodos secos/úmidos
- O planejamento agrícola (áreas aptas, época mais favorável de semeadura, sistema de cultivo, etc), baseado no zoneamento agroclimático



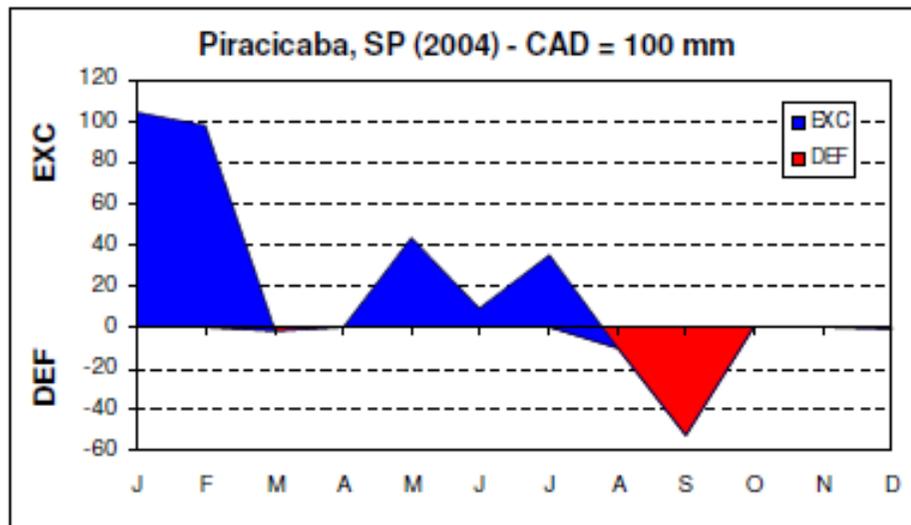
Balanço Hídrico Climatológico Seqüencial

O balanço hídrico climatológico seqüencial emprega o mesmo método do BHC Normal. A primeira diferença entre ambos é que no seqüencial utiliza-se dados de um período ou de uma seqüência de períodos específicos, ou seja, o BHC seqüencial de 2004, por exemplo, ou ainda dos anos de 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 e 2005. Esse tipo de BHC permite se conhecer o que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica do solo, deficiência e excedente hídricos em períodos específicos e, com isso, identificar a variabilidade dessas variáveis. A segunda diferença é na inicialização do BHC seqüencial. Neste, por não ser um ano cíclico (normal), deve-se iniciar o balanço somente quando houver uma seqüência de períodos com $(P-ETP) > 0$ que seja suficiente para garantir $ARM = CAD$. Assim, se deseja-se determinar o BHC seqüencial a partir de janeiro de 2005, é conveniente se iniciar os cálculos em algum momento de 2004. Os exemplos a seguir ilustram essas situações.

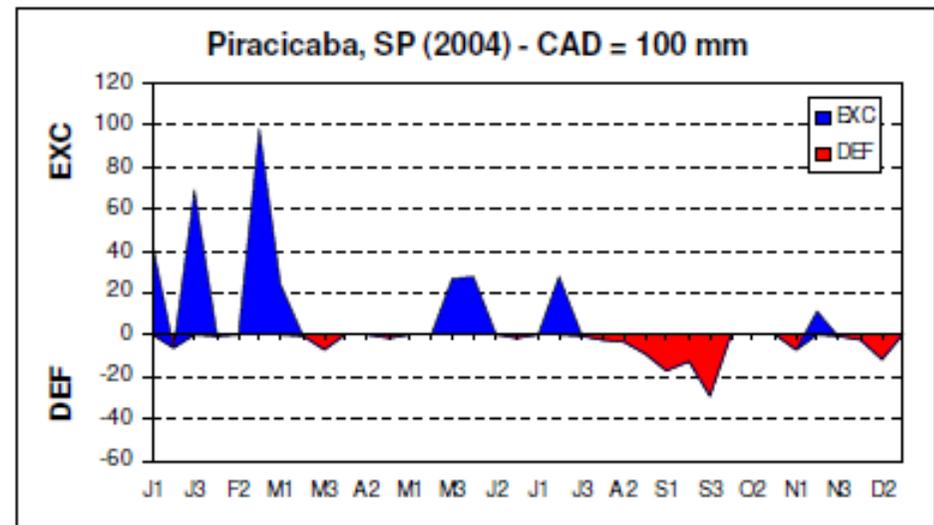


Balanço Hídrico Climatológico Seqüencial

O balanço hídrico climatológico pode ser elaborado em qualquer escala de tempo. Normalmente, utiliza-se a escala mensal para o BHC Normal. Para o BHC Seqüencial é mais freqüente o uso de escalas menores como a decendial (10 dias) ou qüinqüidial (5 dias). No exemplo do slide anterior foi apresentado o BHC seqüencial de Piracicaba para os anos de 1985, 1986 e 1987, na escala mensal. Nele observamos a variabilidade que o BHC pode apresentar, resultado da variabilidade das condições meteorológicas. Esse BH, no entanto, não apresenta tantos detalhes quanto se fosse elaborado com dados decendiais ou mesmo qüinqüidiais. Portanto, quanto menor a escala de tempo, maior o nível de detalhamento do BH. A seguir apresentamos o BHC seqüencial de 2004 nas escalas mensal e decendial.



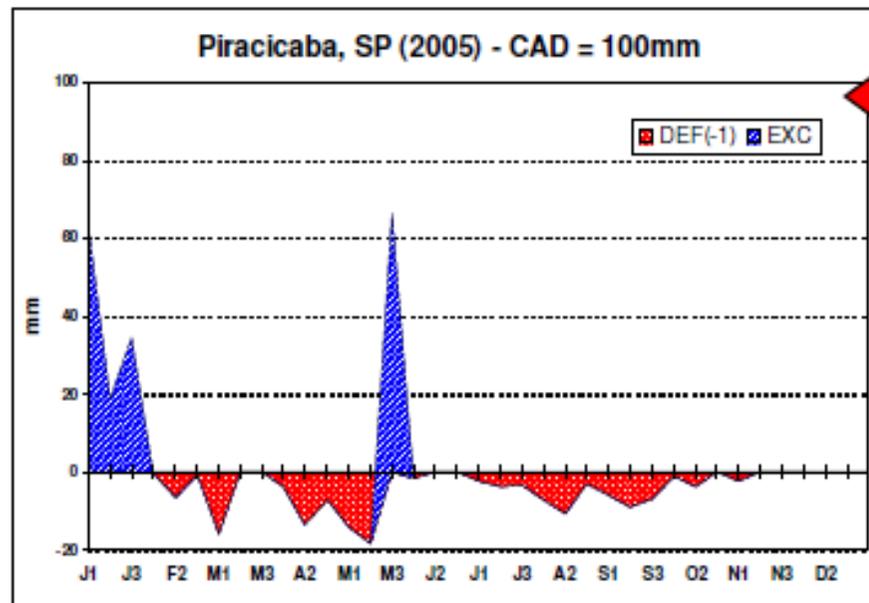
BHC Seqüencial Mensal



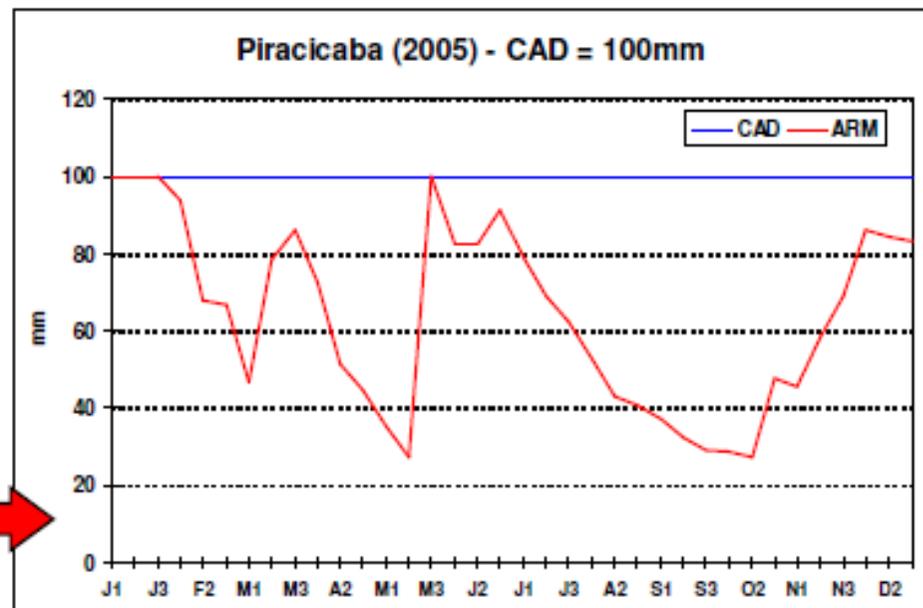
BHC Seqüencial Decendial

Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico Seqüencial

Além de possibilitar o acompanhamento do que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica ao longo de vários anos, o BHC seqüencial possibilita que se faça o acompanhamento em tempo real das condições de deficiência hídrica e excedente hídrico, como mostra a figura da esquerda, e o acompanhamento do armazenamento de água no solo, como mostra a figura da direita. Essas informações possibilitam as tomadas de decisão, com relação a algumas práticas agrícolas, entre elas o preparo e manejo do solo ($0,4 < ARM/CAD < 0,9$), a semeadura ($ARM/CAD > 0,8$) e a colheita ($EXC = 0$ e $ARM/CAD < 0,9$).



Extrato do Balanço Hídrico



Armazenamento de água no solo

Balanço Hídrico de Cultura

O balanço hídrico climatológico elaborado até então considerava a ETP para posteriormente estimar ETR. No caso do BH de cultura, leva-se em consideração a ETc (também simbolizada por ETm) tendo-se então (P-ETc), que servirá para a estimativa de ETr (também simbolizada por ETa), assim como para a estimativa da deficiência hídrica (ETc – ETr) e do excedente hídrico. O BH de cultura será empregado também para se determinar a deficiência hídrica relativa da cultura ($1 - ETr/ETc$), a qual tem relação direta com a quebra de rendimento das lavouras ($1 - Yr/Yp$). O BH de cultura é normalmente empregado de forma seqüencial e utiliza o método de T&M (1955), ou seja do BHC para a estimativa de ARM, ALT, ETr, DEF e EXC.

$ETr/ETc = 0 \Rightarrow (1 - ETr/ETc) = 1 \Rightarrow$ Deficiência hídrica máxima $\Rightarrow (1 - Yr/Yp)$ ALTA

$ETr/ETc = 1 \Rightarrow (1 - ETr/ETc) = 0 \Rightarrow$ Sem deficiência hídrica $\Rightarrow (1 - Yr/Yp) = 0$



Local: Ituverava, SP (Lat. 20°16'S) Ano: 1985 CAD = 130 mm

Cultura: Café (var. Catuaí, com 5 anos, Espaçamento 3,5 x 1,0 m

Mês	ETP	Kc	ETc	P	P-ETc	NAc	ARM	ALT	ETr	ETr/ETc	Mês
	mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
JAN	134	0,80	107	474	+367	0	130	0	107	1	JAN
FEV	105	0,81	85	141	+56	0	130	0	85	1	FEV
MAR	101	0,82	83	306	+223	0	130	0	83	1	MAR
ABR	93	0,64	60	30	-30	-30	103	-27	57	0,95	ABR
MAI	75	0,64	48	17	-31	-61	81	-22	39	0,81	MAI
JUN	49	0,64	31	0	-31	-92	64	-17	17	0,55	JUN
JUL	54	0,64	34	0	-34	-126	49	-15	15	0,44	JUL
AGO	77	0,64	49	29	-20	-146	42	-7	36	0,73	AGO
SET	87	0,65	57	17	-40	-186	31	-11	28	0,49	SET
OUT	104	0,86	89	66	-23	-209	26	-5	71	0,80	OUT
NOV	114	0,87	99	244	+145	0	130	+104	99	1	NOV
DEZ	120	0,88	106	210	+104	0	130	0	106	1	DEZ

Considerando-se que a seca somente é benéfica ao cafeeiro durante os meses de julho e agosto, este ano foi desfavorável à cultura, com deficiências hídricas antes (Abril, Maio, Junho) e depois (Setembro e Outubro) o repouso vegetativo, o que repercutiu nos níveis de rendimento da lavoura.

Local: Ituverava, SP (Lat. 20°16'S) Ano: 1985 CAD = 78 mm

Cultura: Milho Safrinha (var. precoce) Semeadura: 01/03

Mês	ETP	Kc	ETc	P	P-ETc	NAc	ARM	ALT	ETr	ETr/ETc
	mm		mm	mm	mm	Mm	mm	mm	mm	
Jan 1	42	1	42	127	+85					
Jan 2	41	1	41	158	+117	0	78			
Jan 3	44	1	44	189	+145	0	78	0	44	
Fev 1	39	1	39	60	+21	0	78	0	39	
Fev 2	38	1	38	41	+3	0	78	0	38	
Fev 3	29	1	29	40	+11	0	78	0	29	
Mar 1	36	0,3	11	133	+122	0	78	0	11	1
Mar 2	34	0,4	14	102	+88	0	78	0	14	1
Mar 3	34	0,5	17	71	+54	0	78	0	17	1
Abr 1	30	0,6	18	25	+7	0	78	0	18	1
Abr 2	28	0,7	20	14	-6	-6	72	-6	20	1
Abr 3	26	0,9	23	17	-6	-12	67	-5	22	0,95
Mai 1	24	1,0	24	7	-17	-29	54	-13	20	0,83
Mai 2	22	1,2	26	2	-24	-53	40	-14	16	0,61
Mai 3	23	1,2	28	8	-20	-73	31	-9	17	0,61
Jun 1	19	1,0	19	0	-19	-92	24	-7	7	0,37
Jun 2	17	0,9	15	0	-15	-107	20	-4	4	0,27
Jun 3	17	0,8	14	0	-14	-121	17	-3	3	0,21
Jul 1	18	0,5	9	0	-9	-130	15	-2	2	0,22



$$ETr/ETc \text{ média} = 0,70 \Rightarrow (1 - ETr/ETc) = 0,30 \Rightarrow (1 - Yr/Yp) >> 0$$

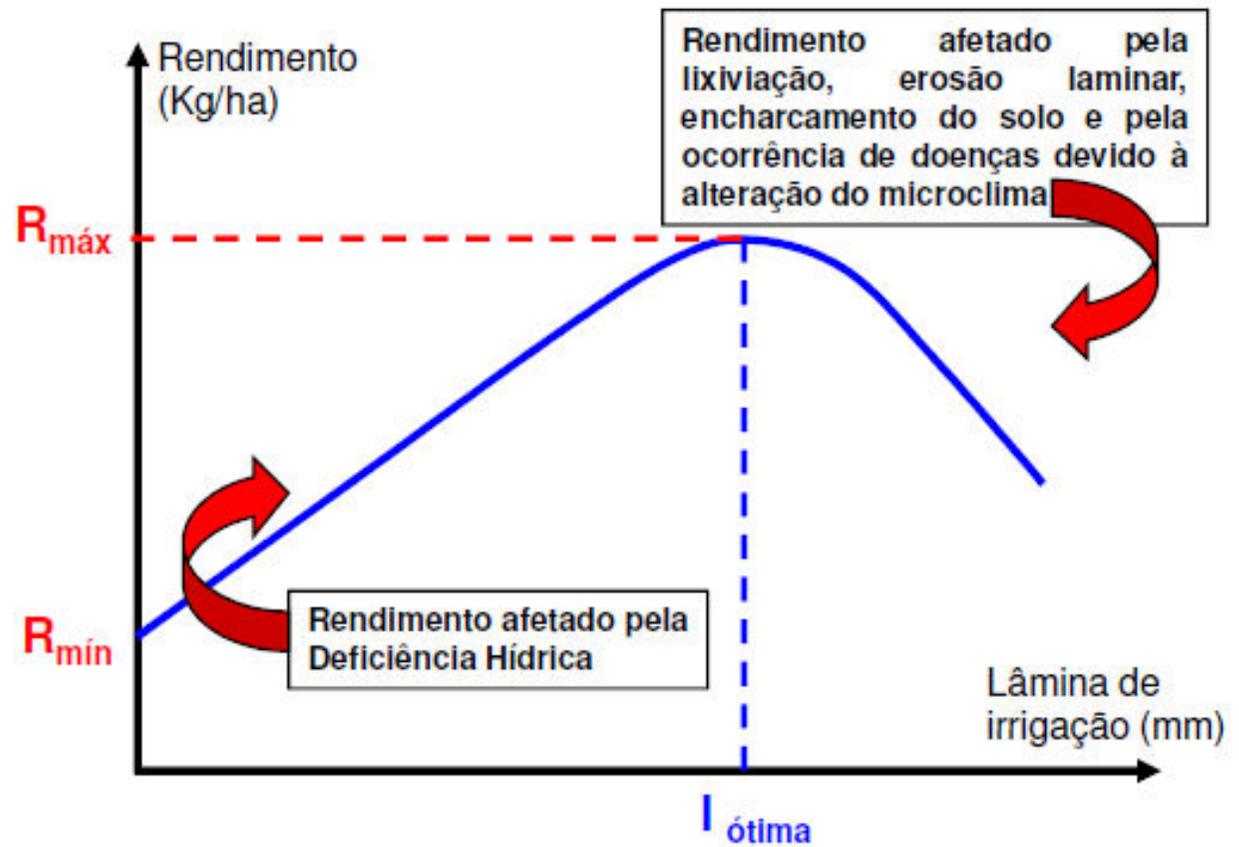
Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

A irrigação é uma prática agrícola cujo objetivo é atender as necessidades hídricas das culturas, evitando, assim, que estas sofram deficiências hídricas e, conseqüentemente, apresentem reduções em seus rendimentos.



Desse modo, tanto as irrigações deficientes como as irrigações excessivas são prejudiciais, reduzindo o rendimento das lavouras. O ideal é se aplicar a lâmina ótima, o que depende basicamente do monitoramento do balanço hídrico

Função de Produção



↳ O BH nos informa quando e com quanto irrigar

Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

O BH para controle da irrigação é uma adaptação do BHC seqüencial, no qual trabalha-se somente no intervalo de umidade do solo em que a cultura consiga extrair água na mesma taxa que ela necessita. Isso se dá entre a umidade da capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade crítica (θ_{crit}), a partir da qual se inicia o processo da deficiência hídrica. A esse intervalo entre a θ_{cc} e a θ_{crit} denomina-se Água Facilmente Disponível (AFD). Portanto, a AFD é uma fração da CAD. Essa fração é determinada fração de água disponível (p), a qual é fornecida por tabelas, em função do tipo de cultura e da demanda hídrica máxima da cultura.

Antes de se iniciar o controle da irrigação pelo BH, é preciso se conhecer:

Fenologia da Cultura: A necessidade hídrica de uma cultura varia de acordo com suas fases fenológicas, que estão relacionadas aos valores de K_c . Culturas perenes muitas vezes necessitam de um período de repouso vegetativo durante o ano, normalmente no inverno. Obviamente, nesse período as irrigações não são necessárias. Já as culturas anuais não necessitam ser irrigadas na fase de maturação.

Demanda Hídrica da Cultura: Além das fases fenológicas, a demanda hídrica de uma cultura varia de acordo com as condições meteorológicas, principalmente o saldo de radiação e a demanda atmosférica. A evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) pode ser estimada em função de ETP: $E_{Tc} = K_c * E_{TP}$.

Características físico-hídricas do solo: Essas informações são importantes para se determinar a CAD e a AFD.

$$CAD = [(CC\% - PMP\%)/100] * d_g * Z$$

$$AFD = CAD * p$$

Diferença entre Irrigar e Molhar: irrigar implica em conhecer as necessidades hídricas das culturas, as características do solo e, assim, fornecer água em quantidade adequada no momento certo

Roteiro para a Elaboração do Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

1) Determinar a CAD – ver slides 8 a 11

2) Determinar o valor da AFD – $AFD = CAD * p$ (valores de p são fornecidos na tabela abaixo)

Culturas	Grupo	ETc (mm/d)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cebola, Pimentão, Batata	1	0,50	0,43	0,35	0,30	0,25	0,23	0,20	0,20	0,18
Tomate, Repolho,Uva, Ervilha	2	0,68	0,58	0,48	0,40	0,35	0,33	0,28	0,25	0,23
Girassol, Trigo, Feijão, Citros, Amendoim	3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,43	0,38	0,35	0,30
Algodão, Cana, Milho, Sorgo, Soja	4	0,88	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,43	0,40

Roteiro para a Elaboração do Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

3) Determinação de ET_c – de acordo com os procedimentos já discutidos na aula de evapotranspiração

4) Determinação da chuva (P) – valores obtidos de postos meteorológicos próximos à região de interesse ou medida no local

5) Determinação da AFD inicial (AFD_i) – será igual ao valor da AFD final do período anterior (AFD_f)

6) Determinação da AFD final (AFD_f) – será igual ao valor da AFD_i mais o balanço entre a chuva (P) a irrigação (I) e a ET_c :

$$AFD_f = AFD_i + (P + I - ET_c)$$

7) Determinação da lâmina de irrigação a ser aplicada (I) – I será aplicada no início do período, baseando-se no valor de AFD_f do período anterior, sempre que este estiver próximo ou igual a zero, ou seja, próximo do limite crítico a partir do qual a deficiência hídrica começa a se manifestar. I será variável e igual a:

$$I = AFD - AFD_f \text{ (do período anterior)}$$

Exemplo de Aplicação do Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

Cultura: Trigo

Local: Campinas, SP

Semeadura: 11/05

CAD = 38 mm

$p = 0,5$

AFD = 19 mm

Obs: apesar de no último período haver a indicação de necessidade de irrigação, esta não deve ser realizada pois a cultura se encontra em fase de maturação

Período	ETP (mm)	Kc	ETc (mm)	P (mm)	I+P-ETc (mm)	AFDi (mm)	AFDf (mm)	I (mm)
11-15/5	10	0,3	3	26,1	+23,1	19,0	19,0	0
16-20/5	10	0,3	3	19,4	+16,4	19,0	19,0	0
21-25/5	10	0,4	4	29,3	+25,3	19,0	19,0	0
26-30/5	9	0,4	4	20,9	+16,9	19,0	19,0	0
31-04/6	6	0,6	4	22,2	+18,2	19,0	19,0	0
05-09/6	8	0,6	5	1,0	-4,0	19,0	15,0	0
10-14/6	8	0,7	6	8,2	+2,2	15,0	17,2	0
15-19/6	7	0,7	5	2,0	-3,0	17,2	14,2	0
20-24/6	9	0,8	7	1,0	-6,0	14,2	8,2	0
25-29/6	9	0,8	7	1,4	-5,6	8,2	2,6	0
30-04/7	9	1,1	10	0	+6,4	2,6	9,0	16,4
05-09/7	9	1,1	10	0	-10,0	9,0	0	0
10-14/7	6	1,2	7	0	+12,0	0	12,0	19,0
15-19/7	7	1,2	8	0	-8,0	12,0	4,0	0
20-24/7	9	1,2	11	0	+4,0	4,0	8,0	15,0
25-29/7	7	1,2	8	0	-8,0	8,0	0	0
30-03/8	8	1,1	9	12,1	+22,1	0,0	19,0	19,0
04-08/8	10	1,1	11	0	-11,0	19,0	8,0	0
09-13/8	10	0,8	8	0	-8,0	8,0	0,0	0
14-18/8	11	0,8	9	0	+10,0	0	10,0	19,0
19-21/8	13	0,7	9	0	-9,0	10,0	1,0	0
24-28/8	14	0,7	10	0	+8,0	1,0	9,0	18,0
29-02/8	14	0,6	8	0	-8,0	9,0	1,0	0
03-09/8	12	0,6	7	5	+16,0	1,0	17,0	18,0*

Teste rápido #9

- 1) Faça uma comparação entre os balanços hídricos discutidos nesta aula (BHC Normal, BHC Seqüencial, BH de Cultura e BH para controle da irrigação), incluindo também na resposta as aplicações de cada um deles.
- 2) Explique como o método de BHC de T&M (1955) considera a retirada e a reposição de água no solo.
- 3) Defina deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC). Do que essas variáveis do balanço hídrico dependem?
- 4) O que se deve conhecer para se elaborar um projeto de irrigação, no contexto do controle da irrigação? Qual a diferença entre irrigar e molhar?
- 5) Considerando-se o exercício de BH de cultura feito em sala de aula, determine qual seria a quebra de rendimento médio do milho safrinha no ano de 1985, no exemplo apresentado no slide 34.