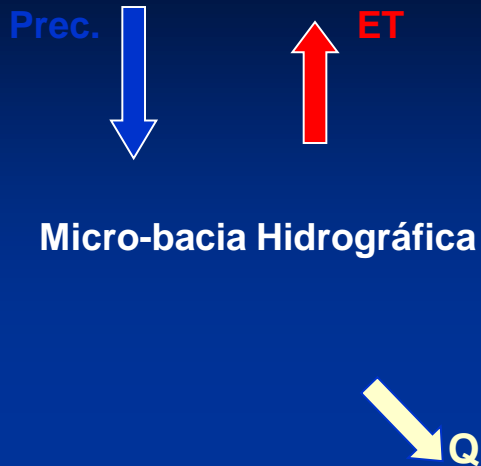


Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

Balanço Hídrico Climatológico Normal e Seqüencial, de Cultura e para Manejo da Irrigação

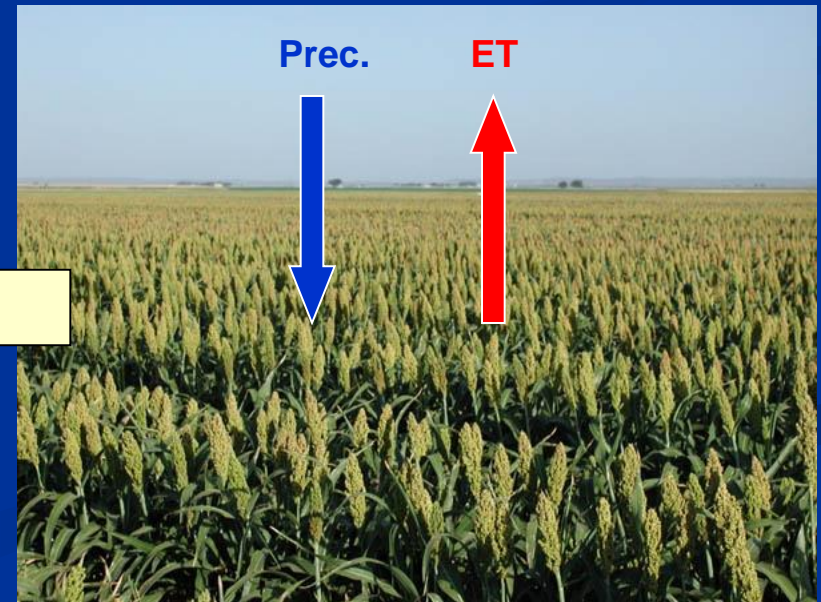
Prof. Paulo Cesar Sentelhas
Prof. Luiz Roberto Angelocci

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.

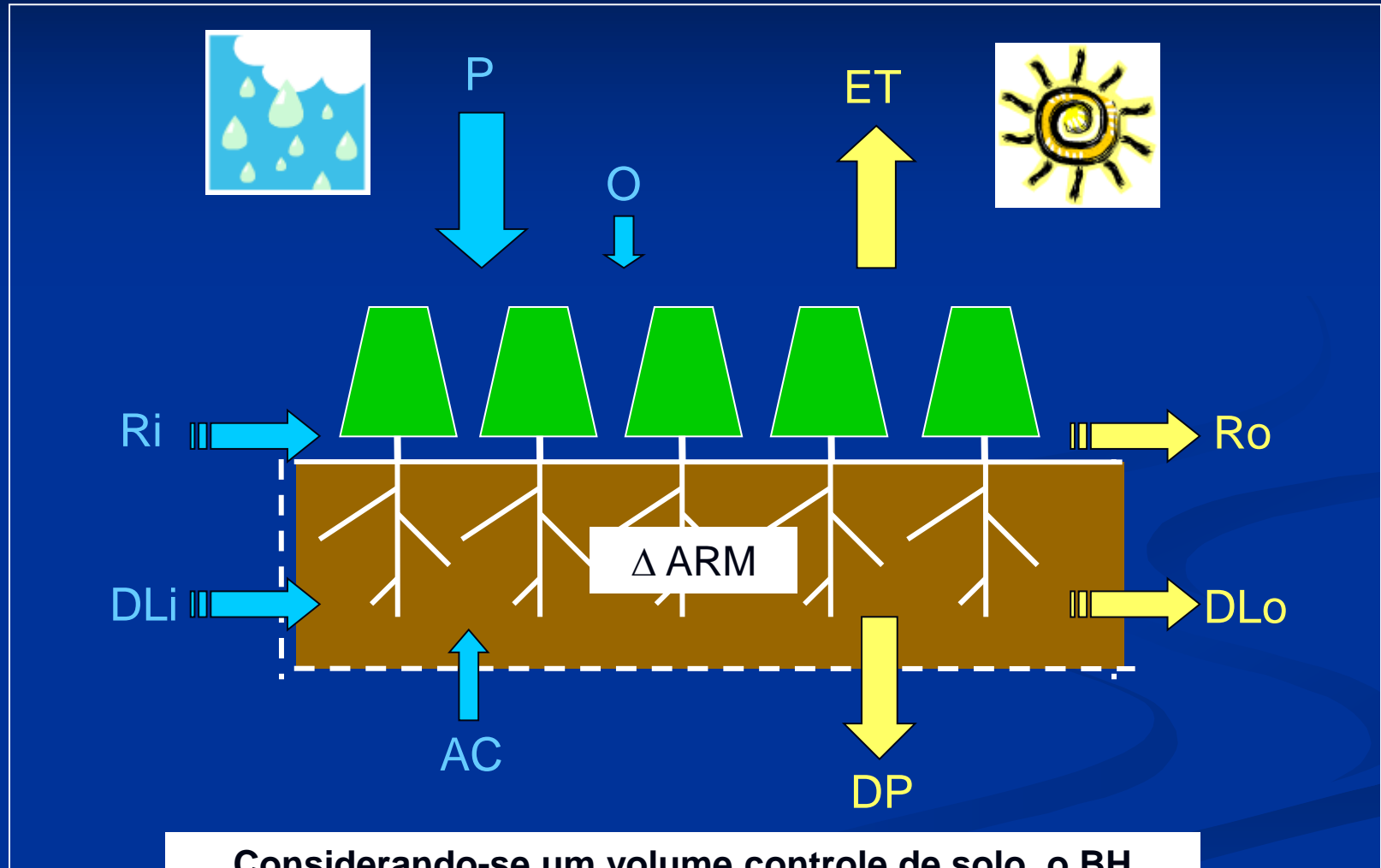


Em uma escala intermediária, representada por uma micro-bacia hidrográfica, o balanço hídrico resulta na vazão de água desse sistema. Para períodos em que a chuva é menor do que a demanda atmosférica por vapor d'água, a vazão (Q) diminui, ao passo em que nos períodos em que a chuva supera a demanda, 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 $R_i \approx R_o$, $DL_i \approx DL_o$, 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 agrônômicos dada a grande interrelação da agricultura com as condições climáticas.



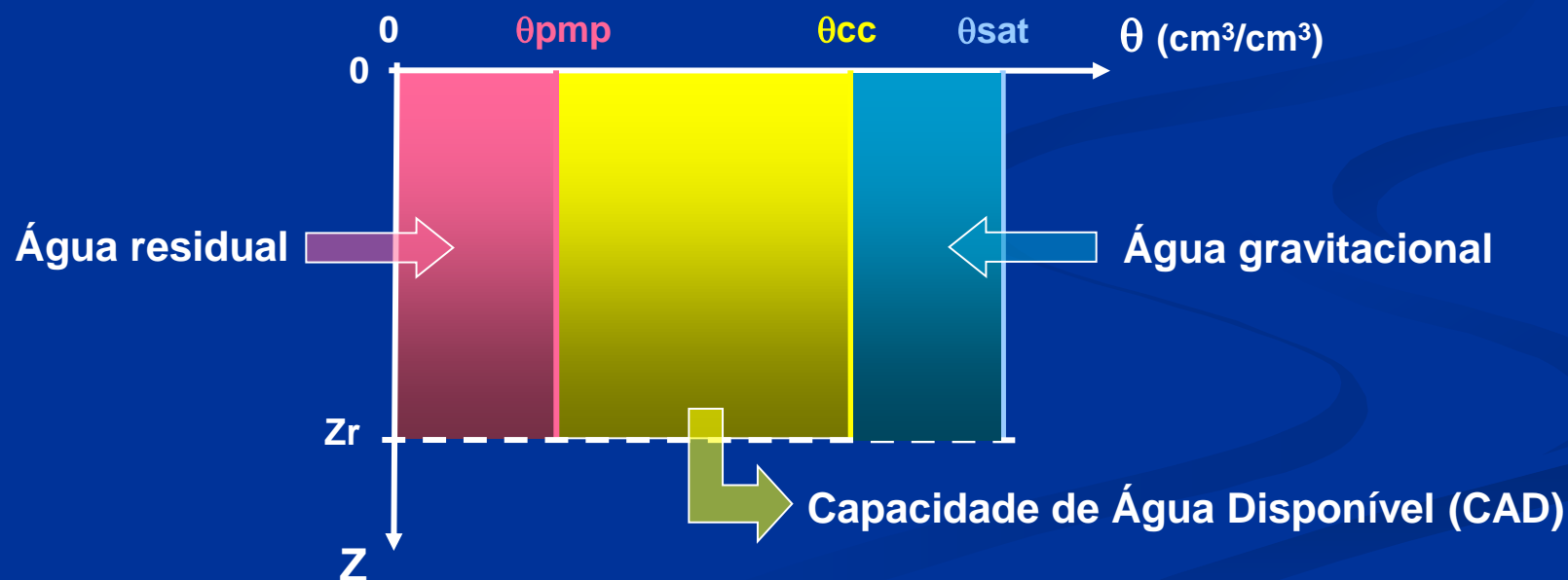
O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) elaborado com dados médios de P e ETP de uma região é denominado de **BHC Normal**. Esse tipo de BH é um indicador climatológico da disponibilidade hídrica na região, por meio da variação sazonal das condições do BH ao longo de um ano médio (cíclico), ou seja, dos 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%, dg = 1,3 e Zr = 50 cm

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



Solo Argiloso

Solo Arenoso

**Exemplo 2:**

CC = 25%, PMP = 17%, dg = 1,2 e Zr = 50 cm

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

Exemplo 3:

Solo textura média \Rightarrow CADmédia = 1,4 mm/cm
e Zr = 50 cm

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



Solo de textura média

Critério prático

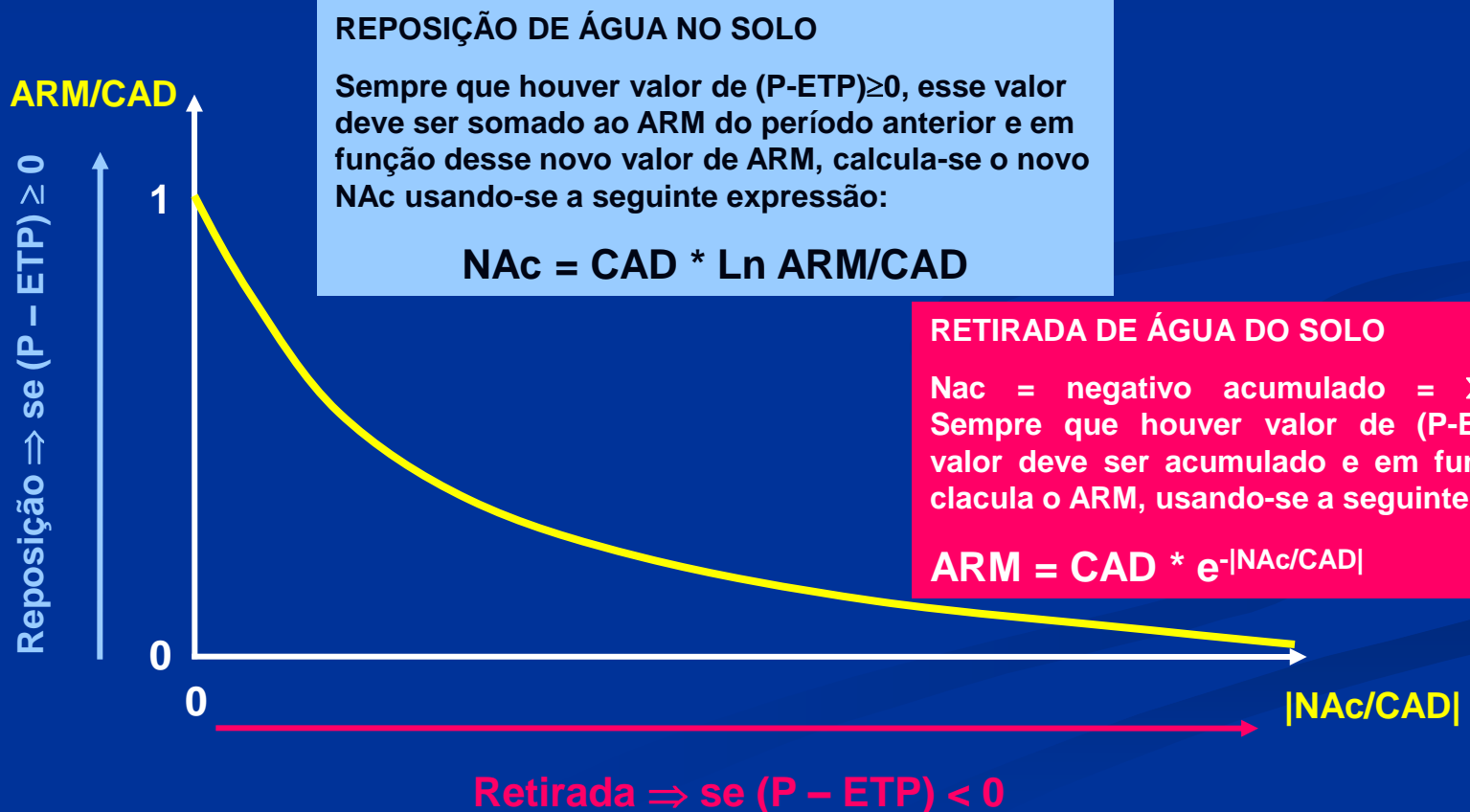
**Exemplo 4:**

Critério prático \Rightarrow CADmédia = 1,3 mm/cm e
Zr = 50 cm

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

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:

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

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

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

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

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

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

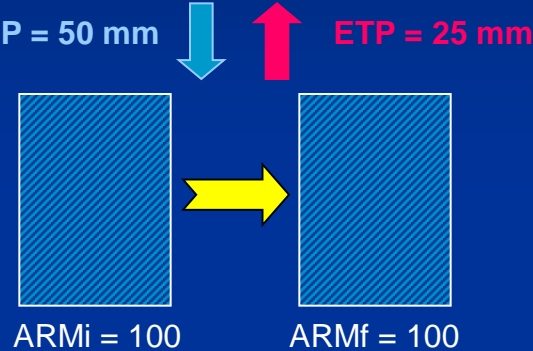
$$DEF = ETP - ETR$$

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

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

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

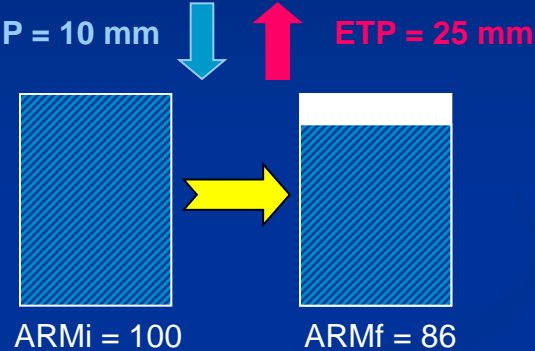
Simulação 1



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

Obs: veja que
ARM não pode
ultrapassar a
CAD

Simulação 2

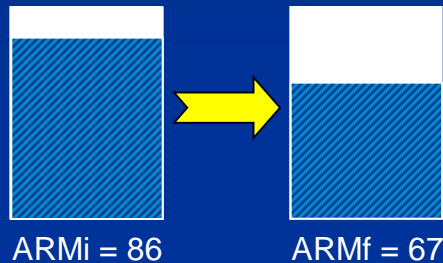


$(P-ETP) = -15 \text{ mm}$
 $N_{Ac} = -15$
 $ARM_f = 100 * e^{-15/100} = 86$
 $ALT = 86 - 100 = -14$
 $ETR = 10 + |-14| = 24 \text{ mm}$
 $DEF = 25 - 24 = 1 \text{ mm}$
 $EXC = 0$

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Simulação 3

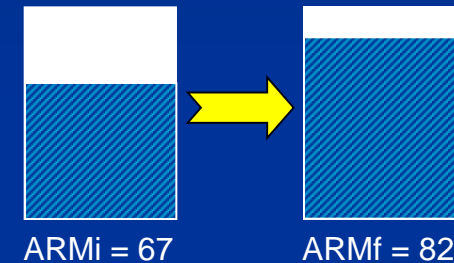
$P = 0 \text{ mm}$   $ETP = 25 \text{ mm}$



$$\begin{aligned}(P-ETP) &= -25 \text{ mm} \\ NAc &= -15 + (-25) = -40 \\ ARMf &= 100 * e^{-40/100} = 67 \\ ALT &= 67 - 86 = -19 \\ ETR &= 0 + |-19| = 19 \text{ mm} \\ DEF &= 25 - 19 = 6 \text{ mm} \\ EXC &= 0\end{aligned}$$

Simulação 4

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

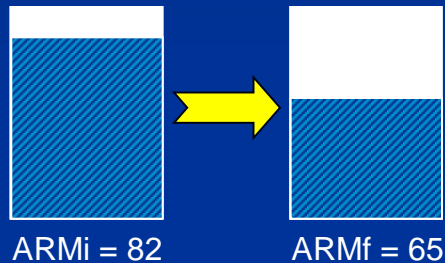


$$\begin{aligned}(P-ETP) &= +15 \text{ mm} \\ ARMf &= 67 + 15 = 82 \\ NAc &= 100 \text{ Ln } 82/100 = -20 \\ ALT &= 82 - 67 = +15 \\ ETR &= ETP = 25 \text{ mm} \\ DEF &= 0 \\ EXC &= 15 - 15 = 0\end{aligned}$$

Elaboração do Balanço Hídrico Climatológico

Simulação 5

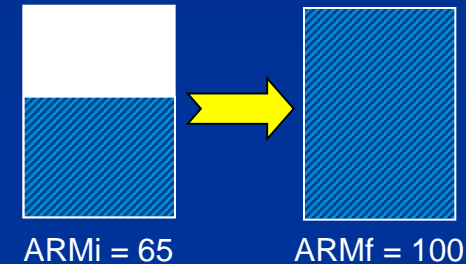
$P = 2 \text{ mm}$   $ETP = 25 \text{ mm}$



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

Simulação 6

$P = 100 \text{ mm}$   $ETP = 25 \text{ mm}$



$(P-ETP) = +75 \text{ mm}$
 $ARM_f = 65 + 75 = 100$
 $NAC = 100 \ln 100/100 = 0$
 $ALT = 100 - 65 = +35$
 $ETR = ETP = 25 \text{ mm}$
 $DEF = 0$
 $EXC = 75 - 35 = 40 \text{ mm}$

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 $\Sigma(P-ETP)_{\text{anual}} \geq 0 \Rightarrow \text{ARM} = \text{CAD}$ no último período da estação úmida

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

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

$\Rightarrow \text{NAC} = \text{CAD} \cdot \text{Ln} [(\Sigma(P-ETP)^+ / \text{CAD}) / (1 - e^{\Sigma(P-ETP)^- / \text{CAD}})]$ 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 ($ALT = \Delta ARM$)

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

6) Determinação da ETR (Evapotranspiração Real)

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

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

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 $ARM < CAD \Rightarrow EXC = 0$

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

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

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

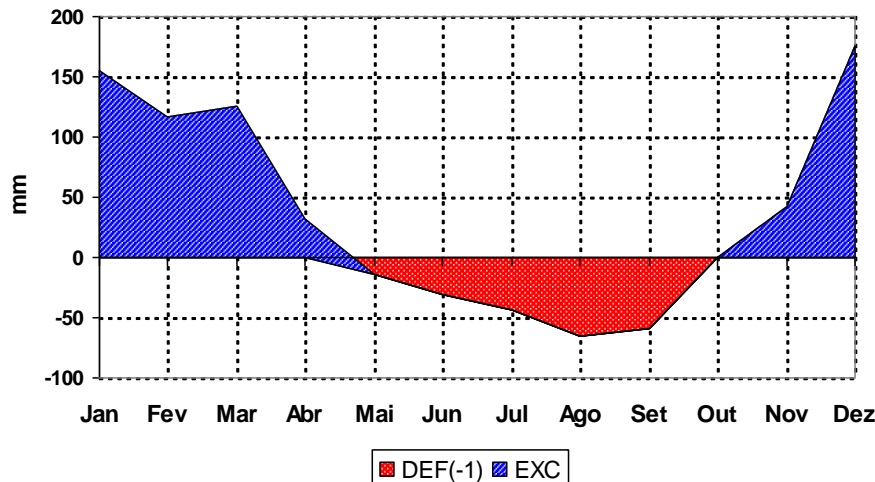
$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \Rightarrow 1537 = 898 + 639 \boxtimes$$

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

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \boxtimes$$

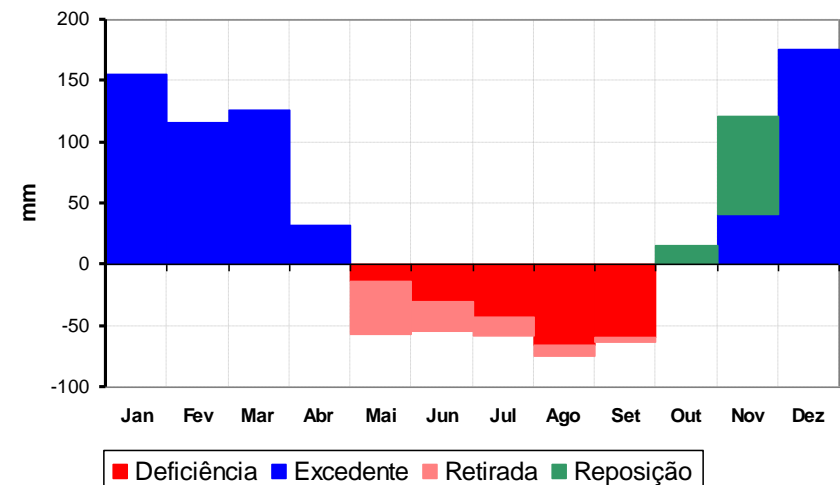
Representação gráfica do BHC Normal

Posse, GO (1961-1990) - CAD = 10mm



Simplificada (EXC e -DEF)

Posse, GO (1961-1990) - CAD = 10mm



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

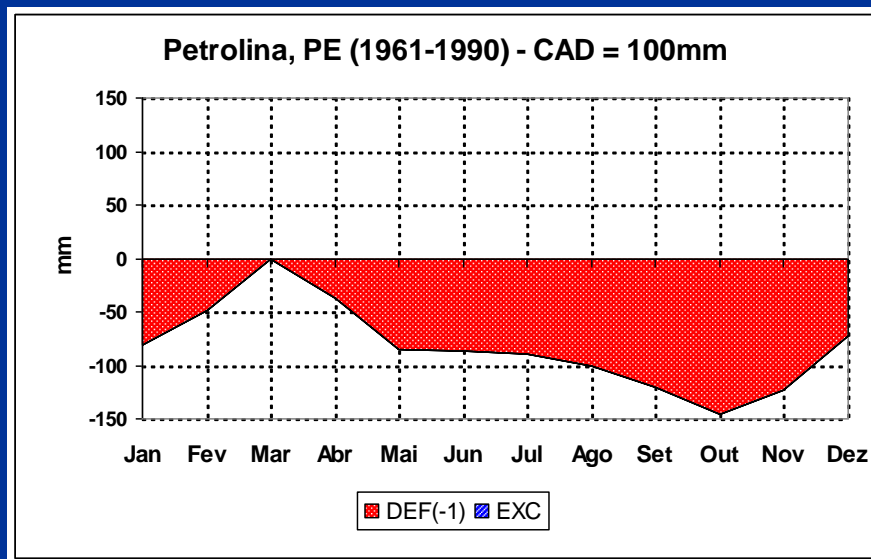
$$\sum P = \sum ETP + \sum (P-ETP) \Rightarrow 609 = 1603 + -994 \boxtimes$$

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXC \Rightarrow 609 = 609 + 0 \boxtimes$$

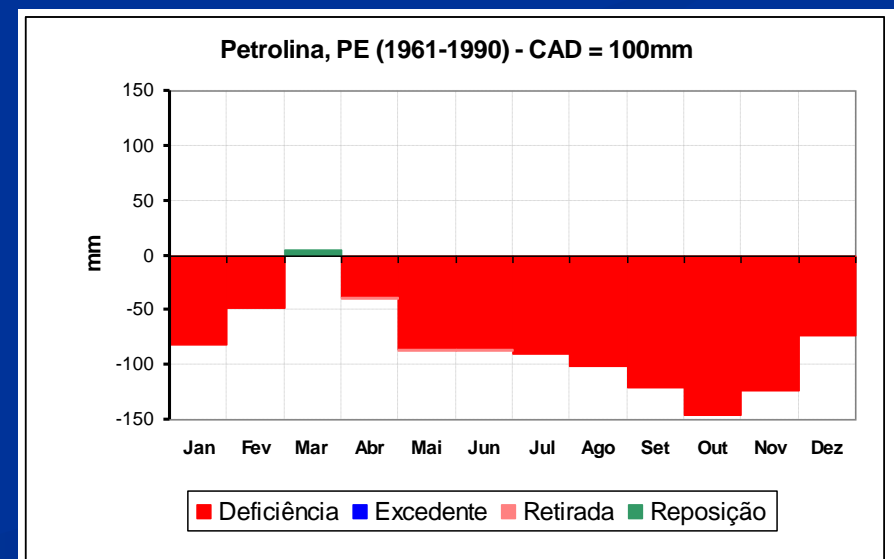
$$\sum ETP = \sum ETR + \sum DEF \Rightarrow 1603 = 609 + 994 \boxtimes$$

$$\sum ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \boxtimes$$

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

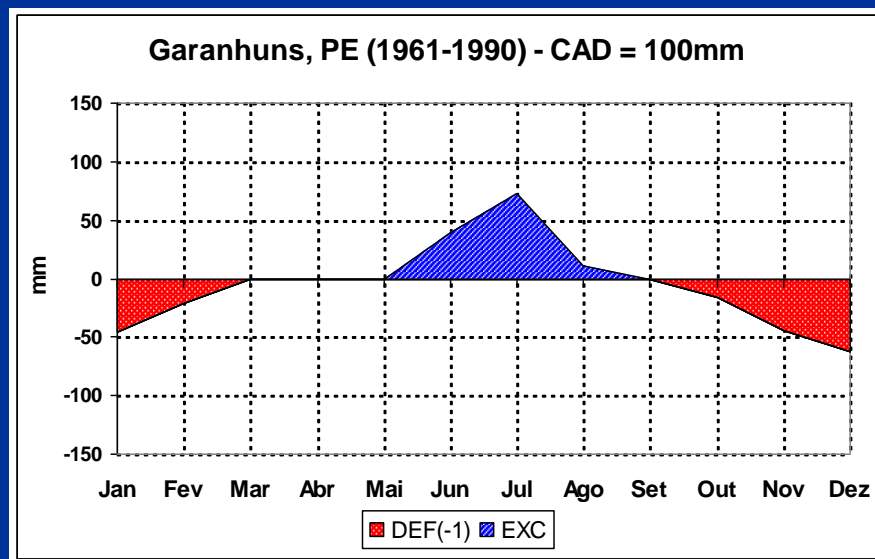
$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma (P-ETP) \Rightarrow 871 = 937 + -66 \boxtimes$$

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

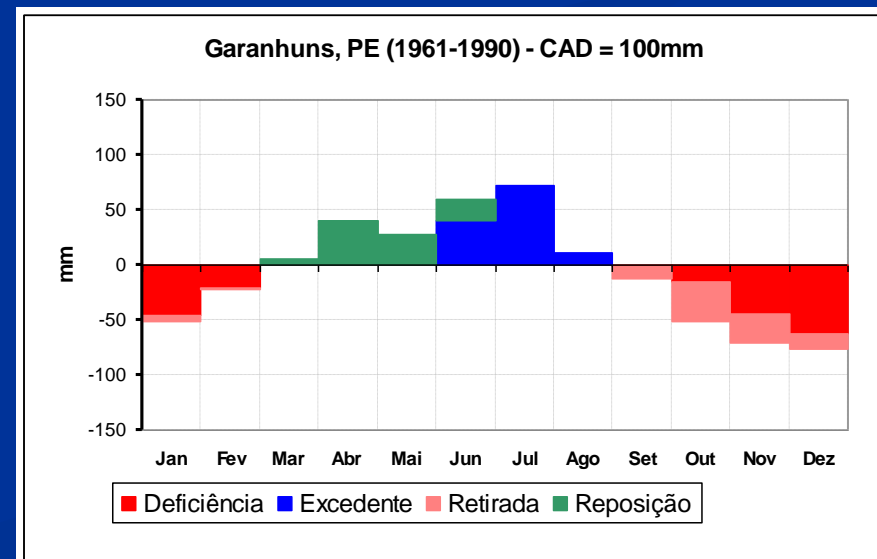
$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF \Rightarrow 937 = 748 + 189 \boxtimes$$

$$\Sigma ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \boxtimes$$

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

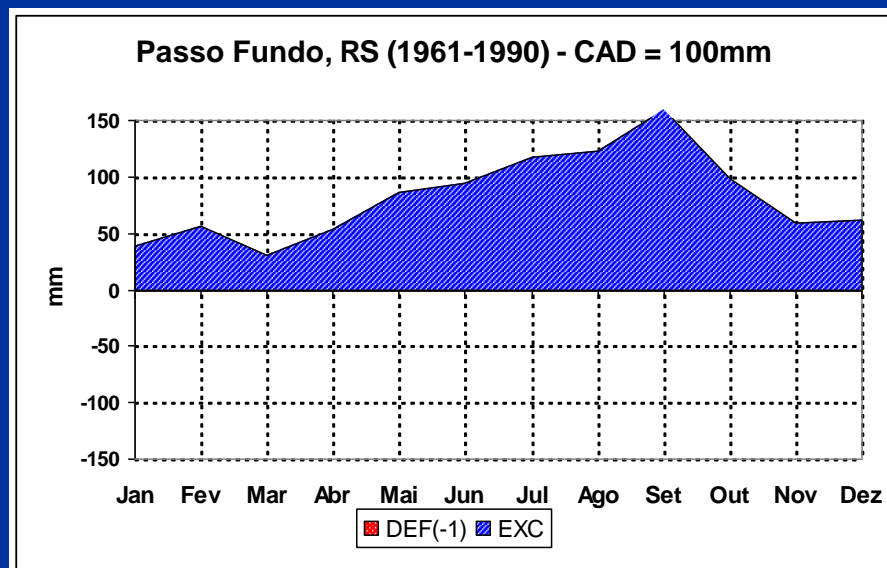
$$\sum P = \sum ETP + \sum (P-ETP) \Rightarrow 1786 = 806 + 980 \quad \boxtimes$$

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXC \Rightarrow 1786 = 806 + 980 \quad \boxtimes$$

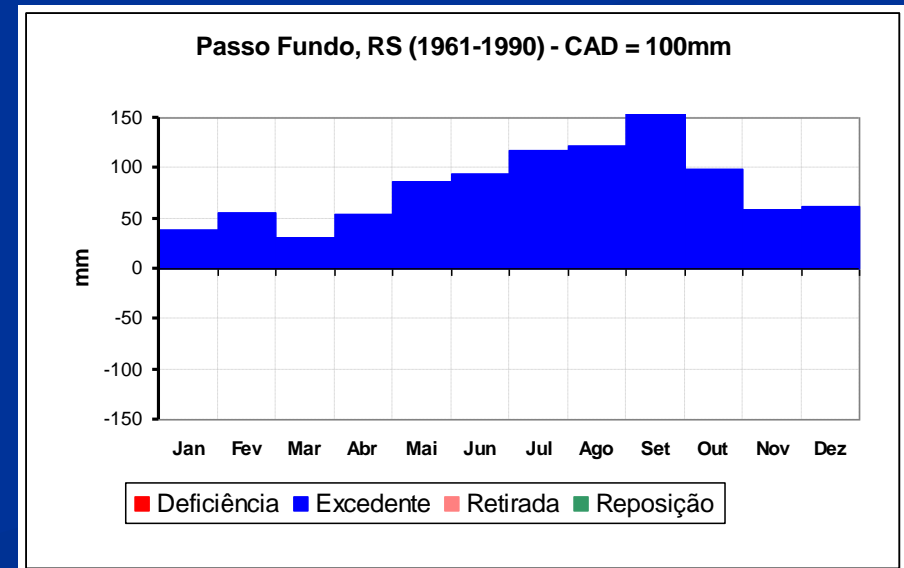
$$\sum ETP = \sum ETR + \sum DEF \Rightarrow 806 = 806 + 0 \quad \boxtimes$$

$$\sum ALT = 0 \Rightarrow 0 = 0 \quad \boxtimes$$

Representação gráfica do BHC Normal

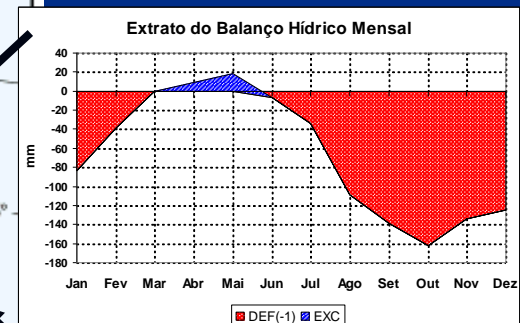
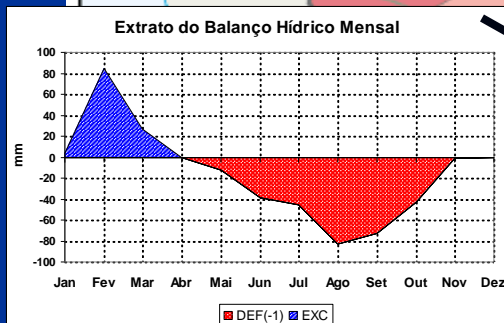
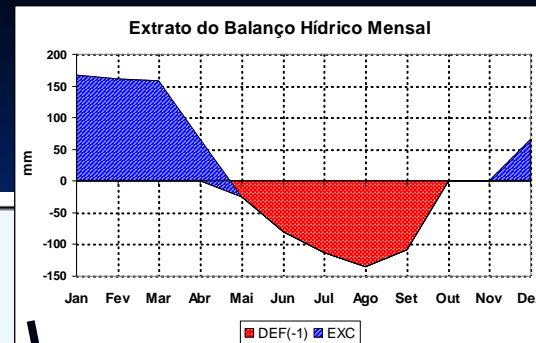
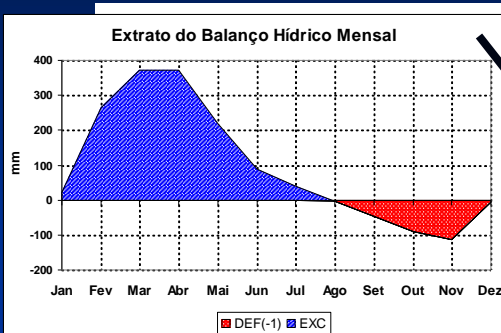


Simplificada (EXC e -DEF)

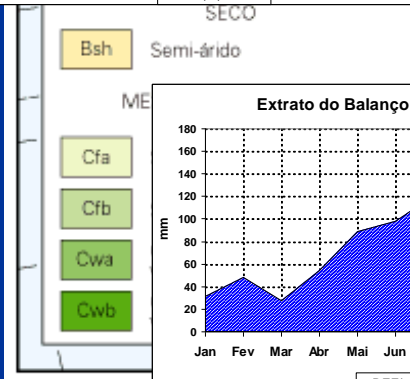
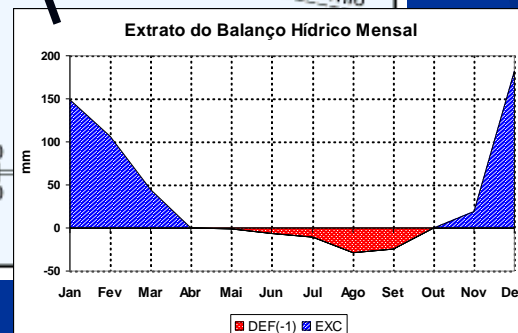
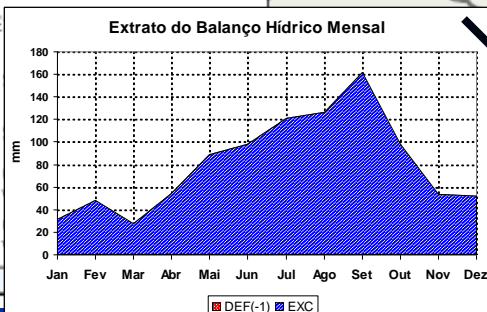


Completa (EXC, DEF, ALT)

Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico Normal



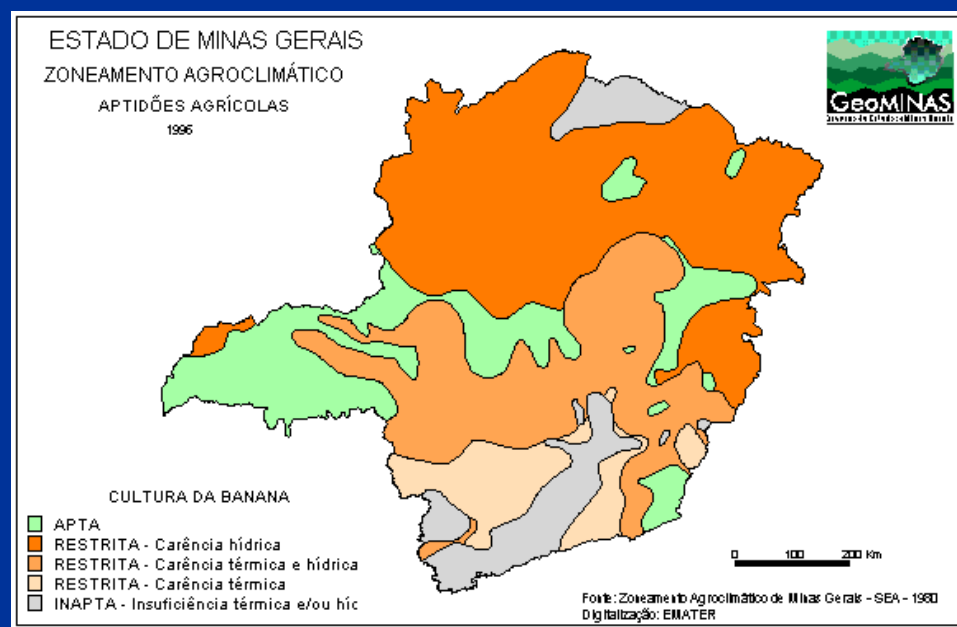
Caracterização regional da disponibilidade hídrica



Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico Normal

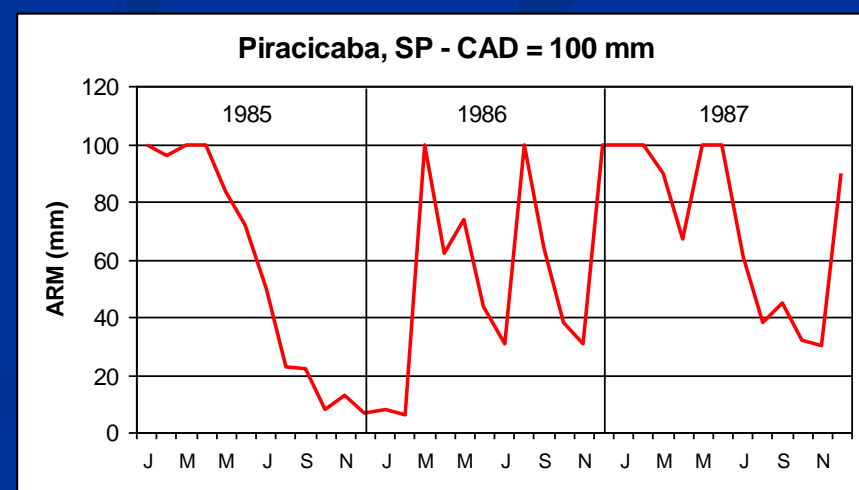
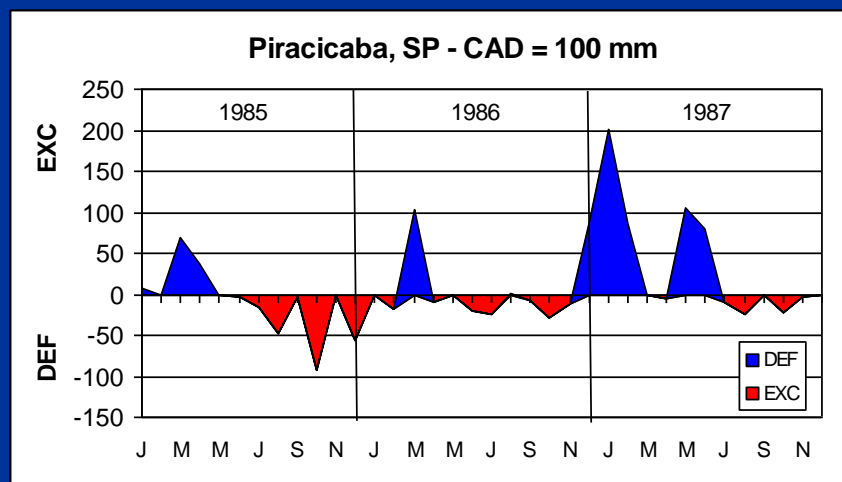
A caracterização regional da disponibilidade hídrica do solo possibilita:

- ⌚ **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

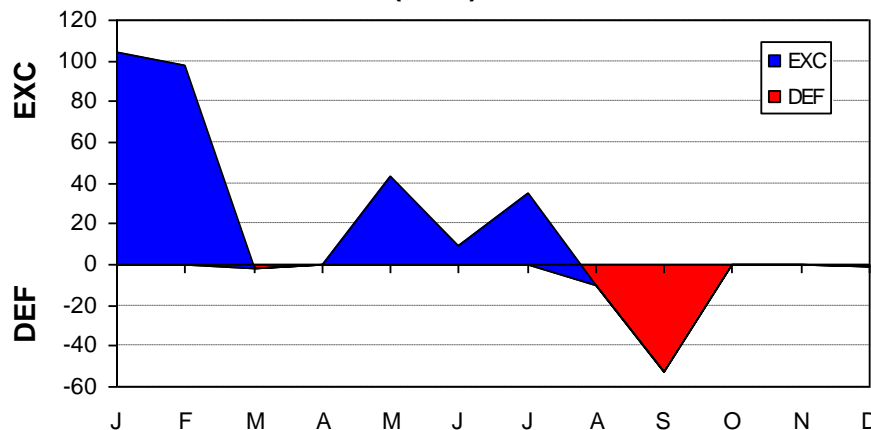
O balanço hídrico climatológico seqüencial emprega o mesmo método do BHC Normal. A primeira diferença entre ambos é que no seqüencial utiliza-se dados de um período ou de uma seqüência de períodos específicos, ou seja, o BHC seqüencial de 2004, por exemplo, ou ainda dos anos de 2000, 2001, 2002, 2003, 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 Sequencial

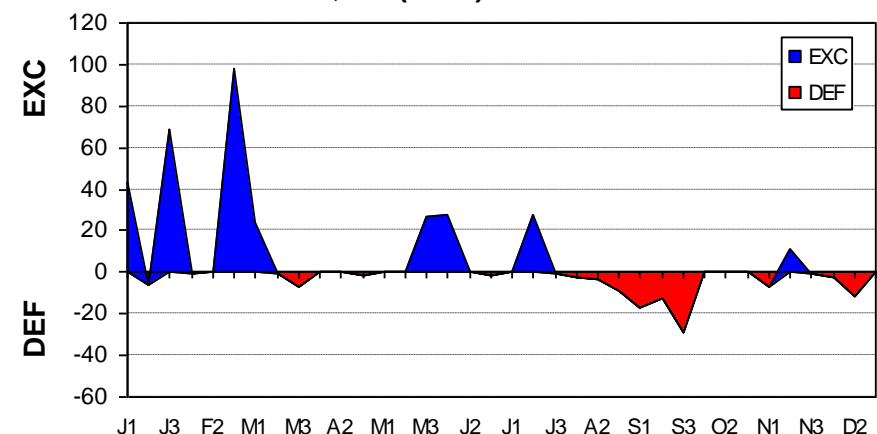
O balanço hídrico climatológico pode ser elaborado em qualquer escala de tempo. Normalmente, utiliza-se a escala mensal para o BHC Normal. Para o BHC Sequencial é mais freqüente o uso de escalas menores como a decendial (10 dias) ou qüinqüidial (5 dias). No exemplo do slide anterior foi apresentado o BHC sequencial 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 sequencial de 2004 nas escalas mensal e decendial.

Piracicaba, SP (2004) - CAD = 100 mm



BHC Sequencial Mensal

Piracicaba, SP (2004) - CAD = 100 mm

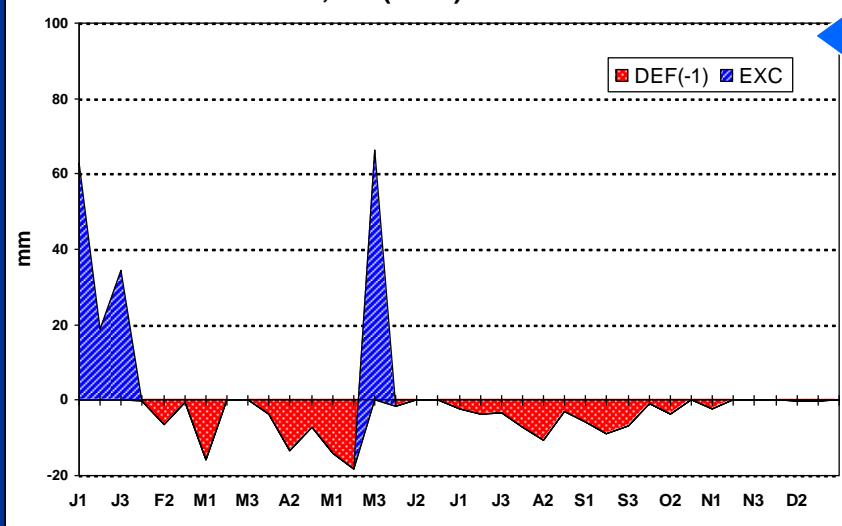


BHC Sequencial Decendial

Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico Sequencial

Além de possibilitar o acompanhamento do que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica ao longo de vários anos, o BHC sequencial 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 ($0,4 < \text{ARM}/\text{CAD} < 0,9$), a semeadura ($\text{ARM}/\text{CAD} > 0,8$) e a colheita ($\text{EXC} = 0$ e $\text{ARM}/\text{CAD} < 0,9$).

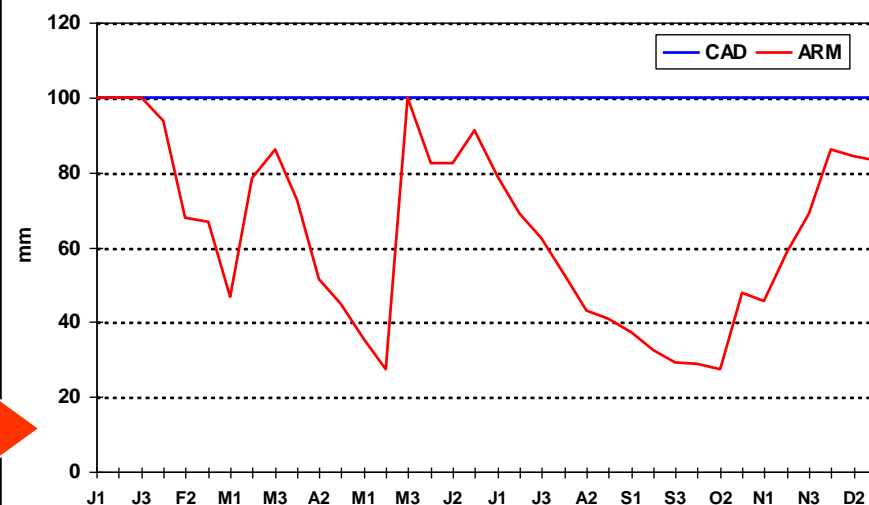
Piracicaba, SP (2005) - CAD = 100mm



Armazenamento de água no solo

Extrato do Balanço Hídrico

Piracicaba (2005) - CAD = 100mm



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 ET_c (também simbolizada por ET_m) tendo-se então $(P - ET_c)$, que servirá para a estimativa de ET_r (também simbolizada por ET_a), assim como para a estimativa da deficiência hídrica ($ET_c - ET_r$) e do excedente hídrico. O BH de cultura será empregado também para se determinar a deficiência hídrica relativa da cultura $(1 - ET_r/ET_c)$, a qual tem relação direta com a quebra de rendimento das lavouras $(1 - Y_r/Y_p)$. 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, ET_r , DEF e EXC.

$ET_r/ET_c = 0 \Rightarrow (1 - ET_r/ET_c) = 1 \Rightarrow$ Deficiência hídrica máxima $\Rightarrow (1 - Y_r/Y_p)$ ALTA

$ET_r/ET_c = 1 \Rightarrow (1 - ET_r/ET_c) = 0 \Rightarrow$ Sem deficiência hídrica $\Rightarrow (1 - Y_r/Y_p) \approx 0$

Sem
Deficiência
Hídrica



Com
Deficiência
Hídrica

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.

Função de Produção

Desse modo, tanto as irrigações deficientes como a 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



➡ 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 (ET_c) pode ser estimada em função de ETP: $ET_c = K_c * ETP$.

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

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

$$AFD = CAD * p$$

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.