

## 2. METODOLOGIA DO MODELO

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes J.E.G., Braga B.P.F. e Conejo J.G.L., e apresentado no International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling realizado em Mississippi, U.S.A. e publicado pela Water Resources Publications (1982).

O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentadas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura.

Em sua versão diária, tem a seguinte descrição:

É constituído de três reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia da forma:

$$R_{solo}(i+1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - Rec$$

$$R_{sup}(i+1) = R_{sup}(i) + E_s - E_d$$

$$R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + Rec - E_b$$

onde:  $R_{solo}$  = reservatório do solo (zona aerada)

$R_{sup}$  = reservatório da superfície da bacia

$R_{sub}$  = reservatório subterrâneo (zona saturada)

$P$  = chuva

$E_s$  = escoamento superficial

$E_d$  = escoamento direto

$E_r$  = evapotranspiração real

$Rec$  = recarga subterrânea

$E_b$  = escoamento básico

inicialização:  $R_{solo}(1) = Tu_{in} \cdot Str$

$R_{sup}(1) = 0$

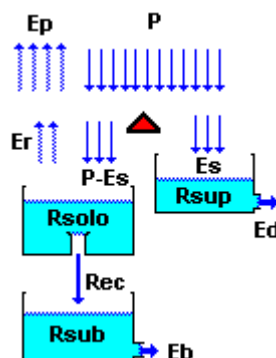
$R_{sub}(1) = E_{bin} / (1-kk) / Ad \cdot 86.4$

onde:  $Tu_{in}$  = teor de umidade inicial (ad.)

$E_{bin}$  = vazão básica inicial (m<sup>3</sup>/s)

$Ad$  = área de drenagem (km<sup>2</sup>)

A figura ilustra a estrutura do modelo em sua versão diária.



É composto de 5 funções de transferência:

A separação do escoamento superficial é baseado no método do SCS ( Soil Conservation Service do U.S.Dept. Agr.).

1- Se  $(P > A_i)$  Então  $S = S_{tr} - R_{solo}$   
 $E_s = (P - A_i)^2 / (P - A_i + S)$   
Caso contrário  $E_s = 0$

2- Se  $((P - E_s) > E_p)$  Então  $E_r = E_p$   
Caso contrário  $E_r = (P - E_s) + (E_p - (P - E_s)) * T_u$

3- Se  $R_{solo} > (Capc * S_{tr})$  Então  $Rec = C_{rec} * T_u * (R_{solo} - (Capc * S_{tr}))$   
Caso contrário  $Rec = 0$

4-  $E_d = R_{sup} * (1 - K_2)$

5-  $E_b = R_{sub} * (1 - K_k)$

sendo  $T_u = R_{solo} / S_{tr}$

São 6 os parâmetros do modelo:

$S_{tr}$  - capacidade de saturação do solo (mm)  
 $K_{2t}$  - constante de recessão do escoamento superficial (dias)  
 $C_{rec}$  - parâmetro de recarga subterrânea (%)  
 $A_i$  - abstração inicial (mm)  
 $Capc$  - capacidade de campo (%)  
 $K_{kt}$  - constante de recessão do escoamento básico (dias)

Foram ajustadas as unidades dos parâmetros:

$K_k = 0,5^{(1/K_{kt})}$  e  $K_2 = 0,5^{(1/K_{2t})}$  onde  $K_{kt}$  e  $K_{2t}$  são expressos em dias em que a vazão cai a metade de seu valor.

$C_{rec}$  e  $Capc$  são multiplicados por 100

O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

Finalmente o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = (E_d + E_b) * A_d / 86.4$$

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva e o total diário médio do período de evaporação potencial (tanque classe A). Para calibração são necessários de 30 a 90 dias de dados de vazão média mensal, incluindo eventos de cheia.

É utilizado um coeficiente de ajuste da chuva média da bacia 'Pcof' que deve ser calculado em função da distribuição espacial dos postos.

### 3. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

#### 3.1. CALIBRAÇÃO DE MODELOS

A calibração de modelos Chuva-Vazão tem sido efetuada de forma manual, através de "tentativa e erro". Este método requer muita experiência do hidrólogo e constitui um processo trabalhoso e subjetivo. Por outro lado, apresenta a vantagem do acompanhamento total do hidrólogo na determinação de cada parâmetro, onde toda sua experiência é passada ao processo.

Recentemente, têm se utilizado de métodos matemáticos de otimização para calibração automática desses modelos, de forma a facilitar o trabalho e diminuir a subjetividade do processo manual. Infelizmente as facilidades fornecidas por esses métodos, em geral, acarretam a falta de acompanhamento do hidrólogo na calibração passo a passo dos parâmetros, impedindo o desenvolvimento da sua sensibilidade, e com isso, diminuindo a confiabilidade dos resultados.

Procurou-se neste trabalho, aproveitar as vantagens dos dois métodos, de forma a permitir boa calibração e colocar os modelos ao alcance de hidrólogos menos experientes.

#### 3.2. METODOS DE BUSCA DIRETA

Os métodos de busca direta consistem em, a partir de um valor inicial dos parâmetros, minimizar a função objetivo provendo-se variação dos parâmetros através de algoritmos matemáticos que resultam numa eficiência computacional.

As principais críticas aos métodos de busca direta recaem sobre a subjetividade da escolha da função objetivo e ao fato desses métodos poderem convergir a um mínimo local da função objetivo sem conseguir atingir o mínimo global.

Neste trabalho foi utilizado o algoritmo de Rosenbrock-Hill (Kuester e Mize, 1973).

#### 3.3 TECNICA DE PESQUISA GLOBAL

A técnica de pesquisa global consiste em rodar o modelo para toda a faixa viável dos parâmetros, atribuindo a estes valores discretos. Seleciona-se então o mínimo valor da função objetivo e em torno dos parâmetros correspondentes novamente se roda o modelo com valores discretos agora mais próximos do mínimo encontrado. Repete-se este procedimento até que não haja mais variação significativa do valor da função objetivo.

Este procedimento equivale a proceder um "zoom" em torno do mínimo valor da função objetivo iterativamente. Dessa forma, dependendo da discretização dos parâmetros, os mínimos locais serão desprezados.

Este procedimento é computacionalmente pouco eficiente se comparado aos métodos de busca direta, porém é muito mais seguro quanto a se atingir o mínimo global. Ainda com a utilização de microcomputadores o tempo de processamento é aceitável.

Esta técnica permite também que se visualize as superfícies da função objetivo, propiciando uma análise de sensibilidade dos parâmetros que será indispensável na escolha final destes.

A equação utilizada para estabelecer a discretização dos parâmetros é a seguinte:

$$Pr(i) = Pr^* \cdot 2^{((i-4)/(2+lp))}$$

onde:  $Pr(i)$  = vetor de parâmetros a serem testados  
 $Pr^*$  = parâmetro ótimo do loop anterior  
 $i$  = índice de discretização do parâmetro (de 1 a 7)  
 $lp$  = numero do loop (nível de "zoom") (de 1 a n)

### 3.4. PARAMETROS DE CALIBRAÇÃO

Dos 6 parâmetros do modelo SMAP foram utilizados apenas 3 na calibração automática. As faixas de variação desses parâmetros obtida na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras, foi a seguinte:

|     |        |        |
|-----|--------|--------|
| 100 | < Str  | < 2000 |
| 0.2 | < K2t  | < 10   |
| 0   | < Crec | < 20   |

O parâmetro "Kkt" (constante de recessão do escoamento básico) não apresentou sensibilidade à varias funções objetivo utilizadas e deve ser ajustado manualmente após ter-se atingido um ajuste razoável dos 3 parâmetros. Este ajuste deve ser feito observando-se no hidrograma os trechos de recessão. Apresenta-se a seguir tabela que associa a constante de recessão ao tempo em dias em que a vazão básica cai a metade de seu valor (não considerando recarga nesse período).

|       |          |              |         |
|-------|----------|--------------|---------|
| K2t = | 0,2 dia  | (.06 )       |         |
|       | 1 dia    | (.5000)      |         |
|       | 2 dias   | (.7070)      |         |
|       | 3 dias   | (.7937)      |         |
|       | 4 dias   | (.8409)      |         |
|       | 5 dias   | (.8706)      |         |
| Kkt = | 30 dias  | muito rápido | (.9772) |
|       | 60 dias  | rápido       | (.9885) |
|       | 90 dias  | médio        | (.9923) |
|       | 120 dias | lento        | (. )    |
|       | 180 dias | muito lento  | (.9962) |

Os parâmetros "Ai" e "Capc" podem ser obtidos através de características da cobertura vegetal e do tipo de solo, respectivamente

|        |        |                |
|--------|--------|----------------|
| Ai =   | 2,5 mm | Campo          |
|        | 3,7 mm | Mata           |
|        | 5,0 mm | Floresta densa |
| Capc = | 30 %   | Arenoso        |
|        | 40 %   | Misto          |
|        | 50 %   | Argiloso       |

### 3.5. INICIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTADO

A inicialização correta das variáveis de estado do modelo (Rsolo e Rsub), efetuada pelas variáveis Tuin e Ebin, mostrou-se fundamental para o bom desempenho da calibração automática. Uma má inicialização, mesmo com parâmetros corretos, causa distorções na função objetivo.

Recomenda-se iniciar o período de calibração em sequências de dias secos, pois dessa forma, a umidade do solo e a vazão básica estarão com valores baixos.

O ajuste da inicialização das variáveis de estado deve então ser feito manualmente com as seguintes recomendações:

Tuin –(Rsolo): Verificar se o valor atribuído está dentro da faixa de variação apresentada na simulação de todo o período (vêr valores na listagem de saída no item resumo). Caso contrario, ressimule alterando seu valor. Observe também a aderência do hidrograma no instante inicial.

Ebin –(Rsub): Pode ser atribuída a vazão básica inicial igual a vazão mínima do período e verificar no hidrograma se existem tendências crescentes ou decrescentes da vazão básica ao longo do período.

Este programa efetua automaticamente a estimativa das variáveis de estado baseado nos dados de chuva e vazão observadas, mas esta estimativa precisa ser sempre revista durante a calibração.

### 3.6. FUNÇÃO OBJETIVO

Após testar várias funções objetivo em regiões de diferentes regimes hidrológicos optou-se por utilizar a soma dos desvios quadráticos:

$$f.o. = \sum_{i=1}^n (QO_i - QCi)^2$$

onde: QO<sub>i</sub> = vazão observada  
QCi = vazão calculada

Lembre-se que a função objetivo nem sempre representa a calibração ideal, mas constitui auxílio para viabilizar processos matemáticos de otimização de parâmetros. Será sempre necessário analisar cuidadosamente o hidrograma para concluir a calibração.

Outra forma é verificar ou ajustar a função objetivo aos produtos pretendidos com a série gerada, como, por exemplo, as diferenças acumuladas ou curvas de permanência.

#### 4. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO

Esta técnica foi testada em várias bacias variando desde rios intermitentes do Nordeste brasileiro, a bacias litorâneas de alta precipitação.

Em todas as calibrações realizadas utilizando-se apenas o método de Rosenbrock, havia grande dependência entre os parâmetros obtidos e os valores iniciais dos parâmetros. Novas simulações com valores iniciais diferentes produziam parâmetros diferentes.

Utilizando-se a técnica de Pesquisa Global, na qual não é necessário atribuir valores iniciais aos parâmetros, obtêm-se resultados certamente próximos ao mínimo global da função objetivo.

Na maioria dos casos foi necessário efetuar ajustes manuais na inicialização das variáveis de estado, a medida que a calibração evoluía. O parâmetro "Kkt" sempre foi ajustado manualmente.

A técnica de Pesquisa Global permite visualizar as superfícies da função objetivo. Como trabalhamos com 3 parâmetros temos 4 dimensões. Essa visualização é dada por 3 matrizes que representam cortes das superfícies fixando-se 1 dos parâmetros em cada matriz. Essas matrizes representam uma "fotografia" da sensibilidade dos parâmetros.

Calibrando-se uma bacia em períodos diferentes nota-se que os parâmetros obtidos automaticamente são sensivelmente diferentes, mas olhando-se a "fotografia" dada pelas matrizes verifica-se coerência entre os resultados. A escolha final dos parâmetros deve então recair em valores que satisfaçam os dois períodos, desprezando-se nuances da função objetivo que os diferenciariam caso fosse adotado um procedimento totalmente automático.

A média das matrizes permite encontrar um mínimo que atenda aos dois períodos. Normalmente próximo a este mínimo existe uma região onde a função objetivo varia pouco.

A mesma solução pode ser empregada de forma regional, calibrando-se varias bacias vizinhas e regionalizando-se os resultados. Isto aumenta a confiança em encontrar parâmetros adequados, ao invés de utilizar apenas um período e uma única bacia.

A aplicação da técnica de pesquisa global para calibração de modelos chuva-vazão foi efetuada em casos reais de aplicações em engenharia. Nestes casos enfrentam-se problemas de falhas nos dados, distribuição deficiente dos postos de chuva, etc. Isto mostra o aspecto pratico deste trabalho.

A técnica de pesquisa global mostrou-se adequada, principalmente porque a análise de sensibilidade dos parâmetros está implícita no método. Além disso as facilidades computacionais disponíveis atualmente auxiliam muito a aplicação desta técnica.

## 5. VERSÃO MENSAL

Em intervalo de tempo mensal temos uma soma de eventos de chuva. O reservatório superficial é suprimido pois o amortecimento desse reservatório ocorre em intervalos menores que o mês. O conceito de capacidade de campo utilizado no reservatório do solo também é suprimido.

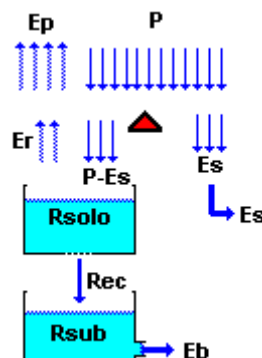
O modelo SMAP, em sua versão mensal, é constituído de dois reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês da forma:

$$R_{\text{solo}}(i+1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec}$$

$$R_{\text{sub}}(i+1) = R_{\text{sub}}(i) + \text{Rec} - E_b$$

inicialização:  $R_{\text{solo}}(1) = T_{\text{uin}} \cdot \text{Str}$   
 $R_{\text{sub}}(1) = E_{\text{bin}} / (1 - K_k) / \text{Ad} \cdot 2630$

A figura ilustra a estrutura da versão mensal.



É composto de 4 funções de transferência:

$$E_s = f_1 \cdot P \quad \text{onde: } f_1 = T_u \wedge P_{es}$$

$$E_r = f_2 \cdot E_p \quad f_2 = T_u$$

$$\text{Rec} = f_3 \cdot R_{\text{solo}} \quad f_3 = C_{\text{rec}} \cdot T_u \wedge 4$$

$$E_b = f_4 \cdot R_{\text{sub}} \quad f_4 = 1 - K_k$$

sendo:  $T_u = R_{\text{solo}} / \text{Str}$

São 4 os parâmetros do modelo:

Str - capacidade de saturação do solo (mm)  
 Pes - parâmetro de escoamento superficial (ad.)  
 Crec - coeficiente de recarga (ad.)  
 Kk - constante de recessão ( $\text{mes}^{-1}$ )

Foram ajustadas as unidades dos parâmetros:

$K_k = (.5) \wedge (1/K_{kt})$  onde  $K_{kt}$  é expresso em meses em que a vazão básica cai a metade de seu valor.

Crec e  $T_u$  são multiplicados por 100

O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

O modelo contém ainda uma rotina de atualização previa do teor de umidade que a cada intervalo de tempo acrescenta uma parcela de chuva do mês, de forma a utilizar o teor de umidade médio do mês em questão. Essa rotina melhora sensivelmente os resultados, principalmente em regiões de grande variabilidade no regime pluviométrico.

Finalmente o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = (E_s + E_b) \cdot A_d / 2630$$

Os dados de entrada são a série mensal de chuva e as médias mensais multianuais de evaporação potencial (tanque classe A). Para calibração são necessários de 2 a 9 anos de dados de vazão média mensal.

Existem dois coeficientes de ajuste da chuva média da bacia 'Pcof' e ajuste da evaporação média da bacia 'Ecof' que devem ser calculados em função da distribuição espacial dos postos.

### 5.1. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO

Dos 4 parâmetros do modelo SMAP foram utilizados apenas 3 na calibração automática. As faixas de variação dos parâmetros obtidas na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras, foi a seguinte:

$$\begin{aligned} 400 < \text{sat} < 5000 \\ 0.1 < \text{pes} < 10 \\ 0 < \text{crec} < 70 \end{aligned}$$

A constante de recessão ("Kkt") não apresentou sensibilidade à várias funções objetivo utilizadas e deve ser ajustada manualmente após ter-se atingido um ajuste razoável dos 3 parâmetros. Este ajuste deve ser feito observando-se o hidrograma, verificando os trechos de recessão. Apresenta-se a seguir tabela que associa a constante de recessão ao tempo em meses em que a vazão básica cai a metade de seu valor (não considerando recarga nesse período).

|       |         |                |         |
|-------|---------|----------------|---------|
| Kkt = | 1 mês   | - muito rápido | (.5000) |
|       | 2 meses | - rápido       | (.7071) |
|       | 3 meses | - médio        | (.7937) |
|       | 4 meses | - lento        | (.8409) |
|       | 6 meses | - muito lento  | (.8909) |

### 5.2. INICIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTADO

Recomenda-se escolher o ano hidrológico da região em estudo e dessa forma, iniciar a calibração pelo mês mais seco, pois nesse período a umidade do solo e a vazão básica estão em seus valores mínimos.

### 5.3. FUNÇÃO OBJETIVO

São utilizadas na versão mensal duas funções:

para rios perenes a soma dos desvios relativos quadráticos.

$$f.o. = \sum_{i=1}^n ((QO_i - QC_i)/QO_i)^2$$

onde: QO<sub>i</sub> = vazão observada  
QC<sub>i</sub> = vazão calculada

para rios intermitentes a soma dos desvios absolutos quadráticos

$$f.o. = \sum_{i=1}^n (QO_i - QC_i)^2$$



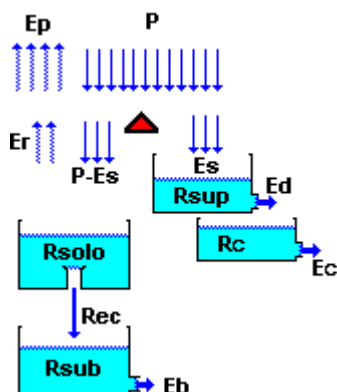
Além do valor da função objetivo, devem ser observados dois outros indicadores da calibração:

O armazenamento do período (balanço) deve ser próximo de zero. Isto indica que não está se retendo ou liberando água dos reservatórios do solo de forma tendenciosa. A variação dos reservatórios deve ser cíclica acompanhando a sazonalidade da região.

A recarga e o escoamento básico devem ser aproximadamente iguais. Diferença entre recarga e escoamento básico indicam problemas com os parâmetros "Crec" (coeficiente de recarga) e "Kkt" (constante de recessão do escoamento básico).

## 6. VERSÃO HORÁRIA

Na versão horária foi acrescido um reservatório para representar o amortecimento dos canais de drenagem que passa a ser sensível nesse intervalo.



## 7. BIBLIOGRAFIA

LOPES J.E.G., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L. (1982), SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, ed. V.P.Singh, Water Resources Publications.

LOPES J.E.G., PORTO R.L.L. (1991), Técnica de Pesquisa Global de Parâmetros para a Calibração de Modelos Chuva-Vazão, ABRH, IX Simpósio Bras. de Rec. Hídricos.

CANEDO P.M. (1989), Hidrologia Superficial, Engenharia Hidrológica, ABRH/ed. UFRJ.

TUCCI C.E.M. (1987), Modelos Determinísticos, Modelos Para Gerenciamento de Recursos Hídricos, ABRH/ed. Nobel.

KUESTER J.L., MIZE J.H. (1973), Optimization Techniques with Fortran. Mc Graw-Hill Book Company.

ROSENBROCK H.H. (1960), An Automatic Method for Finding The Greast or Least Value of a Function, Computer Journal, vol 3,pg 175-184.

SOROOSHIAN S., GUPTA V.K. (1983), Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models: The Question of Parameter Observability and Uniqueness. Water Resources Research, vol 19,n 1, pg 260-268.