

MODELAGEM HIDROLÓGICA VIA SMAP E TOPMODEL NA BACIA DE PEDRO DO RIO - RIO PIABANHA

Rodrigo Costa Gonçalves¹, Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier² & Otto Corrêa Rotunno Filho³.

RESUMO --- O desempenho dos diversos modelos hidrológicos determinísticos do tipo chuva-vazão existentes depende da seleção criteriosa da estrutura do modelo e dos parâmetros adotados na modelagem, respeitada a finalidade e adequada representação dos processos componentes do ciclo hidrológico e das características físicas da bacia em estudo. Este trabalho analisa a estimativa de parâmetros para a sub-bacia de Pedro do Rio, localizada na bacia hidrográfica do rio Piabanha, no município de Petrópolis/RJ, onde se desenvolvem estudos em bacias experimentais com a participação da COPPE/UFRJ. Na modelagem hidrológica, foram utilizados os modelos SMAP e TOPMODEL, alimentados com séries diárias de precipitação, vazão e evapotranspiração. Os modelos foram calibrados e validados, com séries distintas de vazões. Avaliaram-se comparativamente ambos os modelos, incluindo-se a discussão sobre as vantagens e limitações dos usos de cada modelo no estudo de caso. Os resultados indicaram desempenhos bastante satisfatórios, sugerindo que há complementaridade e sinergia no entendimento dos processos físicos da bacia.

ABSTRACT --- The performance of different rainfall-runoff models relies on the rigorous selection of the model structure and of the parameters adopted in the modeling process, given the purpose and consistent representation of the hydrological cycle and of the watershed physical characteristics. This work focuses on the parameter estimation for Pedro do Rio watershed, which is located in the Piabanha river watershed, at Petrópolis/RJ, where research studies are being developed at experimental watersheds in which COPPE/UFRJ participates. Under the hydrological modeling framework, the SMAP and TOPMODEL rainfall-runoff models were used, which were supplied with daily rainfall, stream flows and evapotranspiration data. The models were calibrated and validated, with distinct discharges series. Both models were evaluated and compared, including the discussion of the advantages and constraints on the use of each model in the case study. The results indicated good performance for both models, suggesting that there is some connection and feedback in the understanding of the physical processes at the watershed scale.

Palavras Chave: Modelagem hidrológica, Modelo chuva-vazão, Bacia do rio Piabanha.

¹ Engenheiro de Recursos Hídricos da SONDOTÉCNICA S/A e Mestre em Ciências na Área de Recursos Hídricos pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rua Voluntários da Pátria, 45 – 7º andar, CEP 22270-900, Botafogo, Rio de Janeiro/RJ, Tel. (0xx21) 2102-7153. E-mail rodrigo@sondotecnica.com.br

² Engenheiro do CEPEL (Centro de Pesquisa em Energia Elétrica) e doutorando da Área de Recursos Hídricos pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ – Av. Horácio Macedo, 354- Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Cep 21941-911 E-mail: lnrxavier@hotmail.com

³ Professor da COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, CEP 21945-970, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Tel. (0xx21) 2562-7842. E-mail ottorotunno@oi.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão possuem diversas simplificações em relação ao ciclo hidrológico que buscam representar. Por exemplo, considerar que o solo de uma bacia de aproximadamente 400 quilômetros quadrados seja de comportamento uniforme é obviamente improvável. Essas simplificações de ordem conceitual sugerem que o resultado de um modelo está sujeito à imperfeição e à falha.

No entanto, a modelagem hidrológica continua sendo uma boa alternativa para prover respostas a questões sobre o ciclo da água, sendo também uma ponte poderosa entre a hidrologia e outras ciências que possuem questões relacionadas à água na bacia de estudo, como a ecologia. Para Beven (2001), os modelos são um meio para interpolar e extrapolar os dados medidos no tempo e no espaço, tarefa particularmente difícil para bacias pouco monitoradas. Adicionalmente, podem dar suporte à tomada de decisão em problemas hidrológicos que envolvam, por exemplo, planejamento de recursos hídricos, proteção a inundações e mitigação de contaminações. Por essa razão, faz-se necessário o contínuo desenvolvimento de novos algoritmos, a adaptação de novos conceitos a modelos existentes e a reavaliação e inter-comparação dos sistemas com aplicações a diferentes localidades.

A aplicação de dois modelos do tipo chuva-vazão conceitualmente diferentes permite melhor compreender desde as presumíveis falhas nos dados existentes até a análise de sensibilidade dos processos que influenciam mais a resposta concernente à geração de vazão. As metodologias utilizadas, neste estudo, guardam, em uma perspectiva comparativa, um desafio especial, que é o reconhecimento de potenciais conexões entre dois tipos distintos de abordagens (Sivapalan ,2003), a saber:

- modelos que utilizam parâmetros relacionados à descrição física dos processos que ocorrem em escalas menores, em subdivisões da bacia, chamados modelos de células ou de malha quadrada;
- modelos que empregam parâmetros relacionados aos processos modelados na escala da bacia, adotando o conceito de parâmetro efetivo, considerado representativo para toda a bacia.

Ambas as abordagens, seja de baixo para cima ou da célula para a bacia (*upward* ou *bottom-up*) como de cima para baixo ou da bacia para a célula (*downward* ou *top-down*), são complementares para o melhor entendimento dos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica e para a extensão da aplicabilidade desses tipos de modelo em estudos de regionalização de vazões. Destaca-se que a modelagem tipo chuva-vazão tem recebido especial atenção para ampliar a sua aplicabilidade e servir como subsídio para a gestão de recursos hídricos, como confirmado pela relativamente recente proposta da Associação Internacional de Ciências

Hidrológicas (*International Association of Hydrological Sciences - IAHS*) em dedicar esforços para concentrar estudos e pesquisas na predição de vazões em bacias pouco ou não monitoradas (programa PUB – *prediction on ungaged basins*) na década de 2003 a 2013.

Com esse referencial em perspectiva, explora-se no presente artigo a análise comparativa entre modelo hidrológico concentrado (SMAP) e distribuído (TOPMODEL). Mais ainda, investigam-se os desempenhos, no caso do modelo SMAP, dos procedimentos de otimização de Rosenbrock e de suavização hiperbólica. Essas análises são conduzidas para bacia de Pedro do Rio, sub-bacia do rio Piabanha, conforme descrito na seqüência.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia utilizada como estudo de caso, no presente trabalho, situa-se no distrito de Pedro do Rio, localizado no município de Petrópolis – RJ. A bacia de Pedro do Rio faz parte da bacia do Rio Piabanha, que totaliza 2.050 km². O clima da cidade é tropical de altitude com verões úmidos e invernos secos. A média anual da cidade é de 18°C, típica de uma cidade serrana fluminense. Excepcionalmente, pode ocorrer geada nos meses de junho e julho. A média de julho é 15°C, sendo a média da temperatura máxima nesse mês de 22°C e a da mínima, 10°C. Em janeiro, a média de temperatura é de 21°C, com média da máxima em 27 °C e da mínima em 18°C. A menor temperatura já registrada na cidade foi de -0,6°C no dia 17 de julho de 2000; a máxima já registrada foi de 36°C.

A sub-bacia de estudo foi delimitada segundo o posto fluviométrico de número 58405000 – Pedro do Rio, monitorado pela Agência Nacional de Águas. A série histórica que consta do sistema HIDROWEB lista dados de vazões diárias desde o ano de 1932 até o ano de 2006.

Os postos pluviométricos utilizados foram os que estão situados dentro da sub-bacia de estudo e constam da base de dados HIDROWEB. Os postos utilizados constam da Tabela 1.

Tabela 1 – Estações pluviométricas utilizadas

Código	Nome do posto	Localização (Latitude e Longitude)	
2243009	PETRÓPOLIS	-22:30:42	-43:10:15
2243010	ITAMARATI - SE	-22:29:7	-43:08:57
2243011	RIO DA CIDADE	-22:26:17	-43:10:13
2243012	PEDRO DO RIO	-22:19:57	-43:08:10

3. METODOLOGIA

3.1. Dados fisiográficos da sub-bacia

Tendo sido definida a seção exutória da sub-bacia, sua área foi delimitada segundo modelo digital do terreno, de resolução 20 x 20 metros, gerado automaticamente por intermédio do código computacional ARCGIS, segundo metodologia “Topo to Raster”, método especificamente definido para a criação de modelos de elevação hidrológicamente aceitáveis. Esse procedimento é baseado no programa ANUDEM, como explicado por Hutchinson (1993). A base de referência para a modelagem do terreno foram cartas do IBGE com curvas de nível digitalizadas, de escala 1:2000. Uma imagem do satélite CBERS, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), montada com as bandas 1, 2 e 3 e abrangendo a delimitação da sub-bacia de estudo está mostrada na Figura 1.

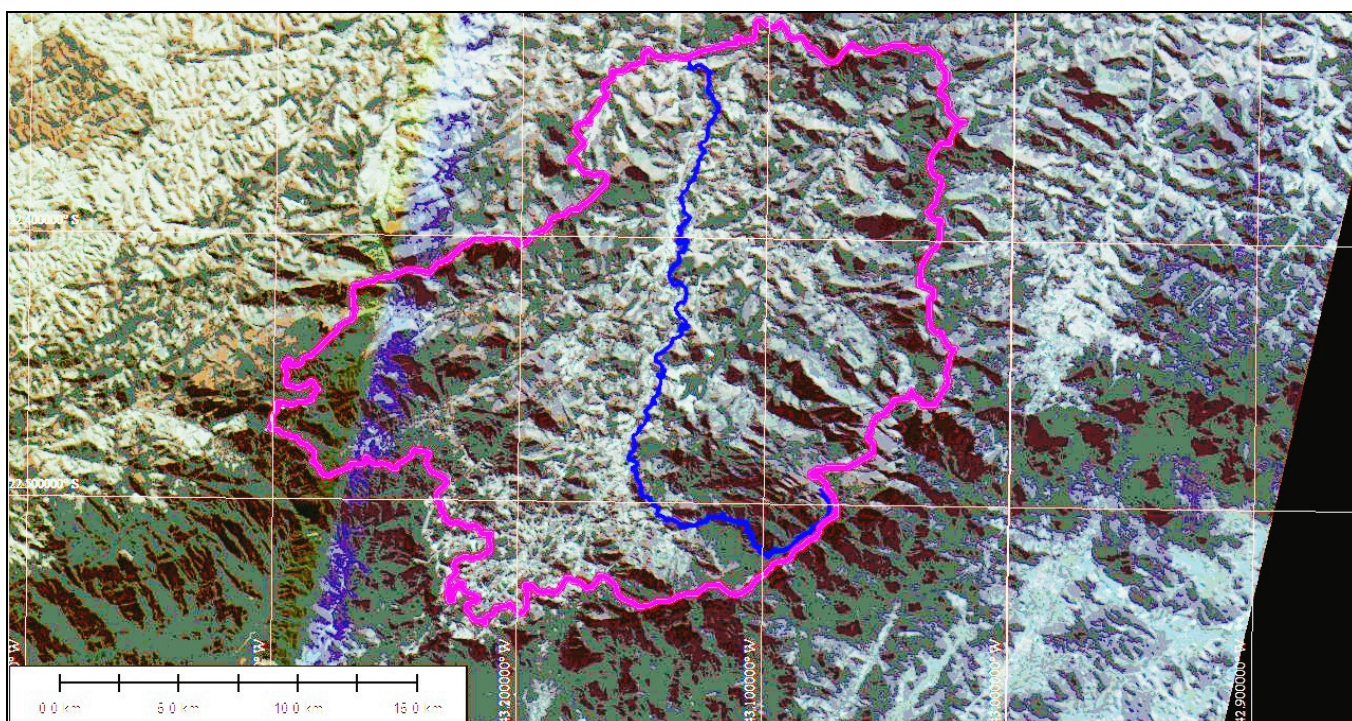


Figura 1 – Imagem de satélite da sub-bacia de estudo

Com a geração do modelo digital do terreno (MDT), mostrado na Figura 2, foi possível delimitar a bacia de estudo, além de gerar mapas com a rede de drenagem. A partir do estudo da rede de drenagem da sub-bacia de Pedro do Rio, traçou-se o talvegue mais longo, obtendo-se o perfil desse talvegue (Figura 3) por intermédio do MDT.

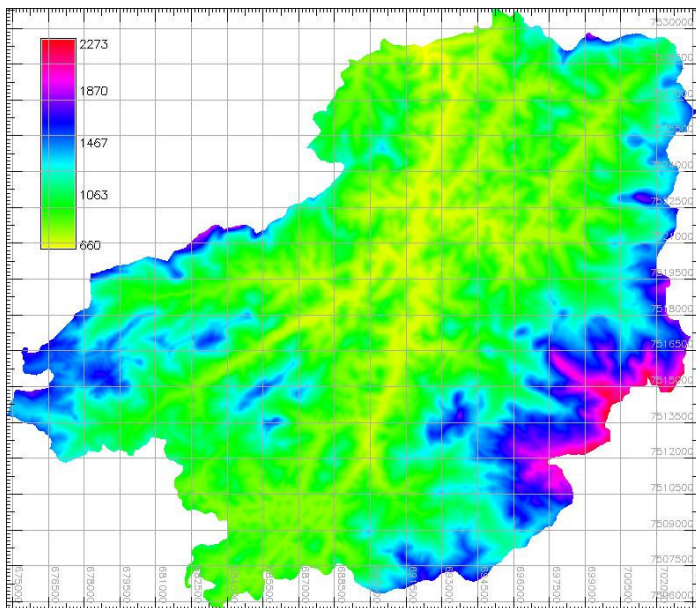


Figura 2 – Modelo digital do terreno gerado

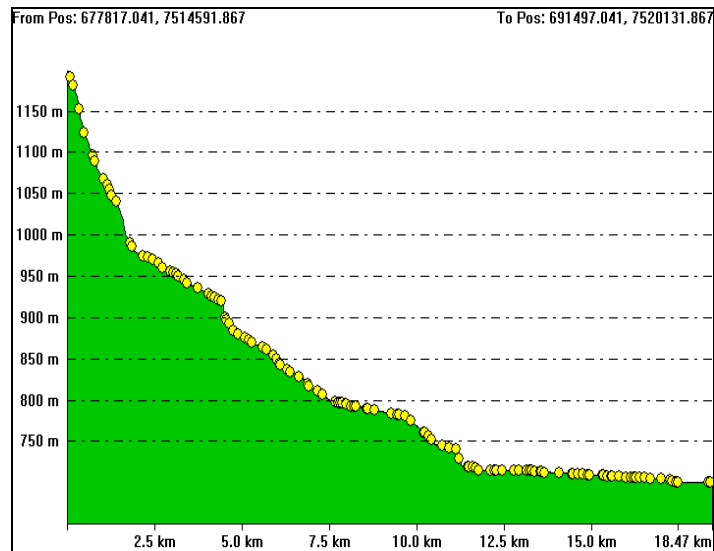


Figura 3 – Perfil do maior talvegue

Para o cálculo do tempo de concentração, foi utilizado o método de Kirpich, como mostrado na equação (1):

$$t_c = 0,39 \cdot \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385} \quad (1)$$

onde

t_c - tempo de concentração em horas;

L - comprimento do talvegue, em quilômetros;

S - declividade média do talvegue, em metro/metro.

A declividade média foi calculada levando-se em conta a média das declividades, ponderada pelo tamanho dos trechos. O tempo de concentração calculado, por sua vez, foi de aproximadamente 8 horas. Como os dados disponíveis no posto fluviométrico são diários, conclui-se que os dados disponíveis podem não ser representativos no estudo de cheias da região. Mesmo com essa incerteza da representatividade dos dados fluviométricos, procedeu-se com o estudo, pois além de serem os únicos dados disponíveis atualmente para a região, representam a realidade da maioria dos postos fluviométricos do Brasil, em que são apenas realizadas leituras de régua em frequência diária.

3.1.1. Cobertura do Solo

Para conhecimento da cobertura do solo, tentou-se levantar maior número de informações da região, mesmo que qualitativamente. A prefeitura de Petrópolis disponibiliza, em meio digital,

mapas pedológicos e de cobertura do solo. Esses mapas foram analisados de modo que se pudessem justificar e compreender os escoamentos predominantes na bacia.

Adicionalmente, foi utilizado um mapeamento obtido junto a CPRM, publicado em MOREIRA *et al.* (2007), onde foram atribuídos valores de curva número (CN), metodologia do órgão público norte-americano *Soil Conservation Service*, explicado em USDA (1986). O mapeamento das curvas números encontra-se na Figura 4, enquanto a descrição dessas curvas encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Curvas-número e áreas correspondentes (fonte: CPRM)

CN	Descrição	Porcentagem da área	CN	Descrição	Porcentagem da área
98,00	Afloramento de Rocha	14,34%	76,00	Mata	1,88%
89,10	Solo Exposto	0,07%	74,80	Mata	19,77%
88,65	Solo Exposto	0,14%	74,20	Mata	3,00%
88,00	Pastagem	0,62%	73,30	Mata	2,53%
86,60	Pastagem	2,30%	72,60	Pastagem	9,56%
85,90	Pastagem	0,04%	68,80	Mata	0,10%
82,80	Solo Exposto	0,19%	66,00	Mata	5,99%
78,90	Pastagem	0,01%	64,00	Mata	39,44%

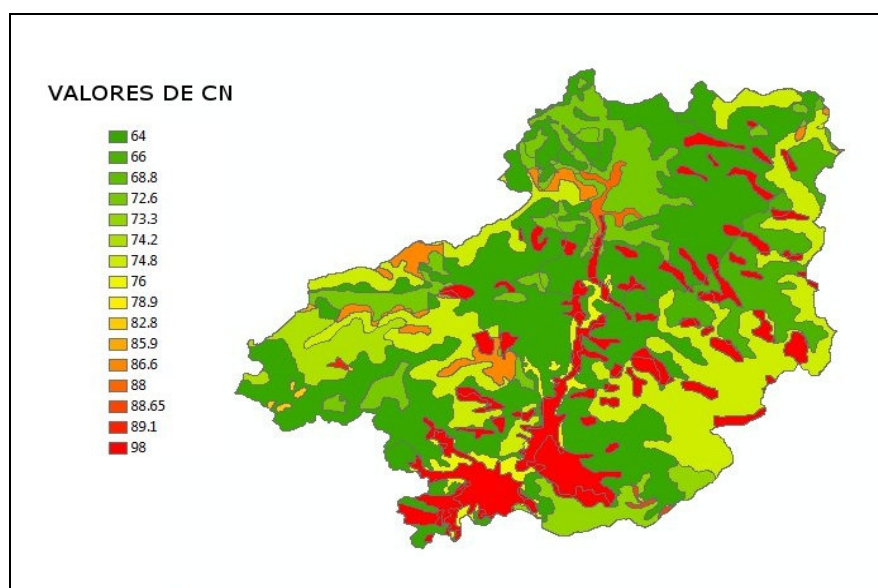


Figura 4 – Mapa de curvas-número (CN) – sub-bacia Pedro do Rio (fonte: CPRM)

Verificou-se que a maior parte é de floresta tropical de altitude, aparecendo cobertura urbana pontual e também significativo afloramento rochoso no pico dos divisores de bacias. O valor de curva número ponderado pela área encontrado foi de 73,49.

3.2. Preparação dos dados Pluviométricos

Após a preparação de dados dos postos, fez-se a média da precipitação pelo método de

Thiessen. Os postos e suas respectivas áreas de influência pelo método de Thiessen estão mostrados na Figura 5.

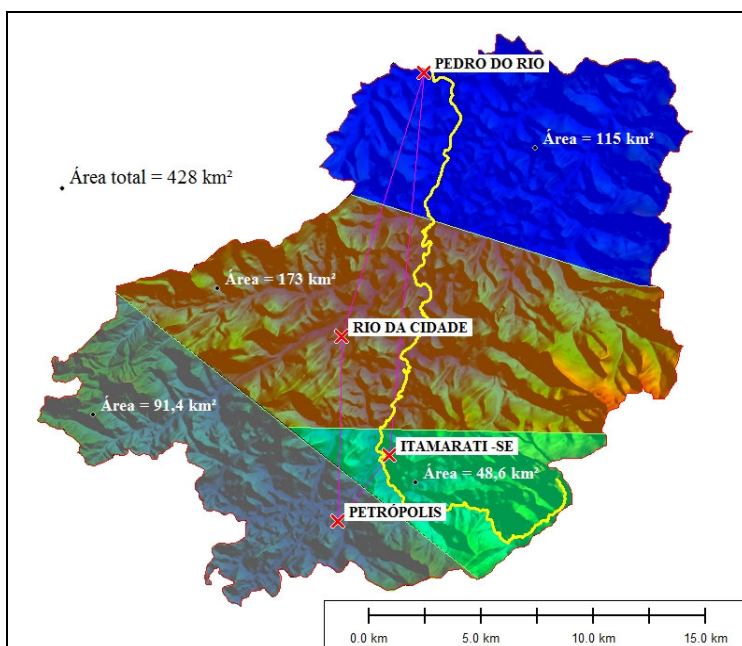


Figura 5 – Áreas de influência dos postos pluviométricos – método de Thiessen

Para a verificação da homogeneidade dos dados, foi feita a análise de dupla-massa, desenvolvida originalmente pelo U.S. Geological Survey, e adotada amplamente no Brasil, sendo válido para séries mensais ou anuais. Esse método compara os valores acumulados anuais ou sazonais da estação a ser avaliada com os valores da estação de referência, que é usualmente a média de precipitação nos diversos postos vizinhos. Testou-se a validade dos dados do posto de maior influência no estudo de caso, a estação de Rio da Cidade (posto número 02243011 da ANA). A curva obtida quase não apresenta mudança na declividade, o que significa inexistência de anormalidades nas séries históricas.

3.3. Geração dos dados de evapotranspiração – Método BHS

O método do balanço hídrico sazonal (BHS) foi desenvolvido por Dias e Kan (1999) para estimar a evapotranspiração de uma bacia hidrográfica que atendesse, por princípio, a conservação de massa. O BHS é válido, em princípio, para bacias hidrográficas de pequeno e médio porte, onde as características físicas, geomorfológicas e de cobertura vegetal sejam relativamente homogêneas. Além disso, a bacia hidrográfica não deverá apresentar falha geológica que permita a fuga de água para o lençol subterrâneo. Caso contrário, as estimativas de evapotranspiração através desse método não serão realistas, ficando superestimadas. Adicionalmente, destaca-se que o método é válido para horizontes de tempo inferiores a 1 ano e em escala não inferior a mensal.

O comportamento da vazão no período de recessão e o armazenamento da água no solo são

essencialmente influenciados pelas características do solo. O ponto fundamental do método BHS está em realizar estimativas da quantidade de água armazenada na bacia através da vazão em períodos de recessão bem definidos entre 15 e 160 dias. Segundo Dias e Kan (1999), para esse período, o erro associado ao desconhecimento do armazenamento na forma de umidade do solo é minimizado, ao passo que as mudanças no armazenamento de água subterrânea são estimadas por intermédio de um reservatório subterrâneo linear, onde a constante de tempo é obtida pela análise da recessão do hidrograma.

O trabalho de Dias e Kan (1999) afirma que as estimativas de sazonalidade da evapotranspiração produzidas pelo método do balanço hídrico sazonal são compatíveis, através da seleção de períodos de balanço hídrico suficientemente curtos, com os cálculos da radiação líquida mensal, da evapotranspiração potencial pelos métodos de Penman e Priestley-Taylor, da diferença entre precipitação e vazão e do déficit de vapor de água.

No item 4.1, está mostrada a série de evapotranspiração calculada por esse método para a sub-bacia de Pedro do Rio.

3.4. SMAP

3.4.1. Estrutura do Modelo

O modelo SMAP possui dois conjuntos de equações matemáticas para descrever os conceitos físicos do ciclo hidrológico, um para simulações em base diária e outro para simulações em base mensal. No presente trabalho, foi empregada a versão diária do modelo.

Em unidade de tempo diária, realiza o balanço da umidade do solo baseado em 3 (três) reservatórios que representam a superfície e as zonas não-saturada e saturada do solo da bacia, conforme o esquema da Figura 6.

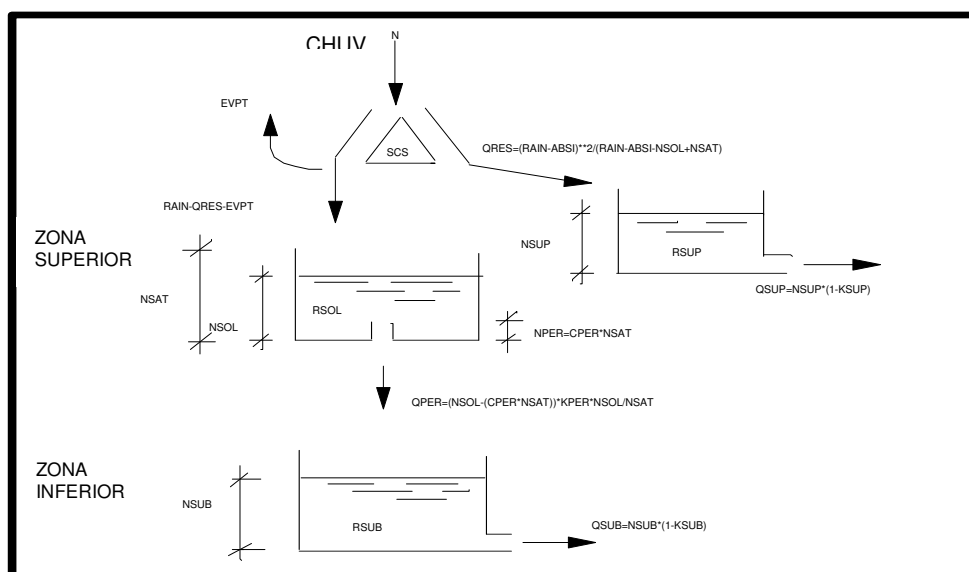


Figura 6- Esquema do modelo SMAP - Fonte: Rotunno Filho (1989)

O conjunto de parâmetros do modelo para simulações a nível diário foi composto pelas grandezas KSUP, KSUB, KPER, ABSI, CPER, NSAT.

Para inicializar a operação do modelo, é usual considerar nulo o nível inicial do reservatório superficial (NSUP). Para a inicialização dos níveis dos reservatórios do solo (NSOL) e subterrâneo (NSUB), foi feita uma modelagem inicial para o ano de 1997, utilizando os parâmetros estimados por análise dos dados, como explicado no item 3.4.2. O valor de NSUB calculado e conseqüentemente adotado foi de 256 milímetros, enquanto o de NSOL foi de 34 milímetros. As grandezas vazão básica inicial (SUBI) e umidade do solo inicial (SOLI) foram quantificadas *a priori*, e, portanto, não ficaram sujeitas ao processo de calibração automática.

3.4.2. Estimativa inicial dos Parâmetros

Para a fase de calibração do modelo, é necessária a estimativa inicial dos parâmetros, estabelecendo-se um ponto de partida do espaço do conjunto de parâmetros de forma que aproxime, tanto quanto possível, as séries de vazões observadas e geradas pelo modelo. Em termos matemáticos, indicaria o processo de minimização de uma função objetivo. No presente trabalho, foi adotada a função de mínimos quadrados no procedimento de otimização empregado. Foram avaliados os desempenhos dos métodos de otimização de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) e de suavização hiperbólica (Xavier, 2002).

A estimativa dos parâmetros, neste trabalho, foi feita de acordo com os dados disponíveis, de modo que a estimativa de cada um tenha significado físico. A escolha adequada dos parâmetros iniciais é de fundamental importância à calibração do modelo, visto que os algoritmos de calibração, quando não bem inicializados, podem conduzir a mínimos locais que não correspondem à melhor solução da função objetivo.

Com relação aos parâmetros mais sensíveis do modelo, Rotunno Filho (1989) identificou KSUP e KSUB, que correspondem aos coeficientes de recessão dos reservatórios superficial e subterrâneo, respectivamente, como essenciais ao modelo, uma vez que seus efeitos não podem ser substituídos ou compensados pelos demais.

Em uma posição intermediária, em termos de importância para os resultados do modelo, encontra-se o parâmetro ABSI, que está ligado à retenção de água na superfície do solo. Já para os parâmetros CPER e KPER, há a indicação de que esses parâmetros são os que mais facilmente podem ser substituídos ou mantidos constantes, sem maiores problemas para o resultado final da modelagem, ou seja, são parâmetros redundantes e talvez desnecessários ao modelo, adotando-se a média entre os limites superior e inferior, entre 0 e 1.

A variável ABSI, que reflete a retenção de água na superfície do solo, incluindo a parcela da

precipitação ocorrida antes do escoamento inicial, foi estimada de acordo com a metodologia exposta em USDA(1986). Esse órgão desenvolveu, a partir de pesquisa em muitas pequenas bacias experimentais, uma relação empírica entre a abstração inicial (ABSI) e a retenção potencial máxima (S), uma medida da habilidade da bacia abstrair e reter precipitação. Essa relação está mostrada na equação (2). O valor calculado foi igual a 18,33 mm, utilizando-se o valor de curva número (CN) de 73,49 já mostrado neste texto.

$$Ia = 0,2.S \quad (2)$$

$$S = \frac{25400 - 254.CN}{CN} \quad (3)$$

Por outro lado, os parâmetros KSUB e KSUP, constantes de recessão dos escoamentos subterrâneo e superficial, respectivamente, puderam ser estimados com base nos estudos realizados para a aplicação do método de balanço hídrico sazonal – BHS. Através da análise das recessões do hidrograma para o cálculo da constante de tempo da recessão T na bacia estudada, obtiveram-se os valores das constantes K dos gráficos Q(t) x Q(t+Δt). Para a estimativa de KSUB inicial, o valor de K foi tomado como o coeficiente angular da reta envoltória de 99% dos pontos, enquanto, para a estimativa de KSUP inicial, o valor de K foi tomado como o coeficiente angular da reta envoltória de 1% dos pontos. Na Figura 7, estão ilustradas a obtenção dos parâmetros KSUB e KSUP, que tiveram seus valores calculados de 0,992 e 0,566, respectivamente.

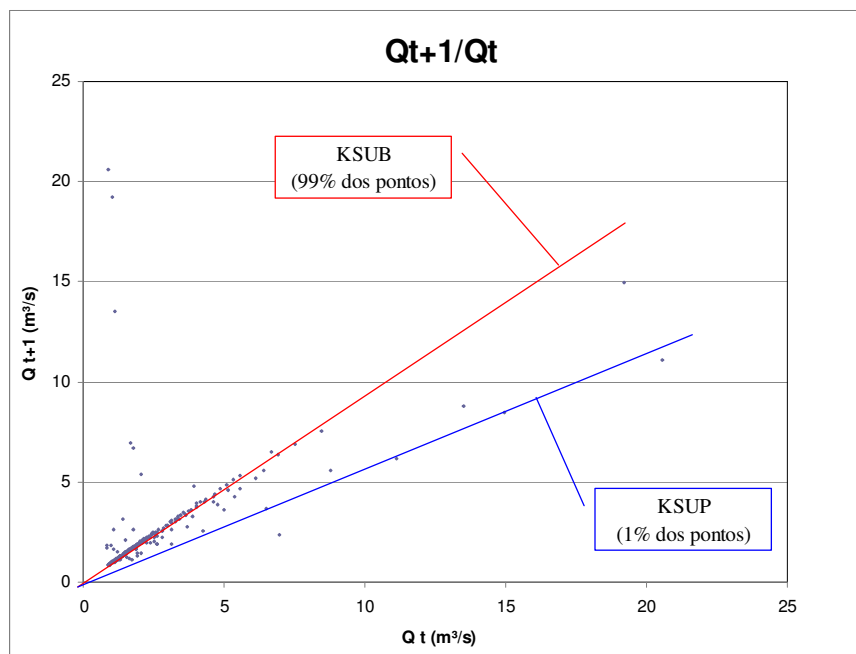


Figura 7 - Estimativa de KSUP e KSUB através da análise das recessões.

3.4.3. Calibração e Validação

Durante a análise das séries históricas de vazão e de precipitação em todas as estações do estudo, verificou-se que os postos pluviométricos e o posto fluviométrico têm períodos comuns

disponíveis até o ano de 2005. Assim, optou-se pela modelagem para o período mais recente comum entre os postos. Foi adotado o período entre 1998 até 2004, sendo que, entre 1998 a 2001, o registro de dados foi destinado para calibração, enquanto, entre 2002 e 2004, as informações foram empregadas para validação dos parâmetros. Nesse sentido, os períodos escolhidos estão em concordância com as indicações do estudo realizado por Canedo (1979), quando procura avaliar o tamanho ideal da amostra na fase de calibração. Nesse estudo, o autor conclui que um período de 3 anos já se revela aceitável, enquanto que um período de 5 anos poderia ser considerado, em termos práticos, como ideal.

Para o modelo SMAP, conforme mencionado anteriormente, foram utilizados dois métodos de calibração: o método de busca direta descrita por Rosenbrock (1960) e o método de suavização hiperbólica (SMAP versão suavizada), exposta em sua forma mais recente por Xavier, Rotunno e Canedo (2005). Esse modelo tem sido utilizado recentemente na previsão de vazões do sistema elétrico nacional, além de aplicações importantes como em DiBello (2005), que testa a representatividade da umidade do solo no modelo SMAP com calibração suavizada.

3.5. TOPMODEL

3.5.1. Estrutura do Modelo

O modelo Topmodel (Beven *et al.*, 1995) tem se destacado na comunidade hidrológica por combinar parcimônia, com poucos parâmetros, com base física. As curvas de transmissividade do solo, utilizadas em sua formulação, foram propostas a partir de estudos de campo, e o fluxo de água subterrânea é modelado através da equação de Darcy. A Figura 8 mostra, de forma esquemática, os processos representados no modelo Topmodel.

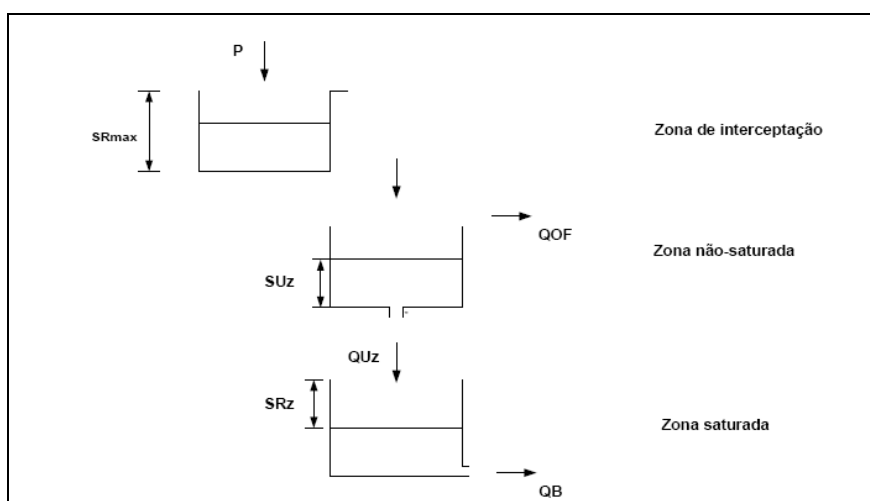


Figura 8 - Representação esquemática dos processos no modelo Topmodel.

Uma importante contribuição desse modelo foi a proposição e a incorporação no processo de modelagem hidrológica do conceito de áreas dinâmicas de contribuição. Essa incorporação faz-se

possível pela análise do índice topográfico, espacialmente distribuído. No modelo Topmodel, a bacia é representada através de uma função de distribuição do índice topográfico, obtido a partir de suas características topográficas. A bacia é representada como composta por um número definido de sub-bacias homogêneas, correspondente ao número de classes de índice topográfico adotado. A condição de saturação do solo em cada uma dessas sub-bacias é verificada em função de suas condições iniciais e dos dados de entrada; através do período considerado na modelagem, pode-se acompanhar a evolução do percentual de áreas saturadas na bacia hidrográfica. Um aspecto importante do modelo é a consideração explícita da topografia como participante do processo de formação do escoamento superficial através do índice topográfico.

Os parâmetros adotados na versão do modelo utilizado estão apresentados na Tabela 3. Destaca-se que o modelo digital do terreno foi usado para a geração do mapa de índice topográfico.

Tabela 3 – Parâmetros do TOPMODEL

Parâmetro	Descrição	Unidade
m	Decaimento da transmissividade no perfil do solo ou da curva de recessão.	m
lnT0	Logaritmo natural da transmissividade efetiva do solo saturado	m ² h ⁻¹
SRMAX	Armazenamento do perfil do solo, disponível para transpiração	m
SR0	Déficit inicial no reservatório de zona de raízes.	m
ChVel	Velocidade do escoamento em canal	m h ⁻¹

3.5.2. Estimativa inicial dos Parâmetros

Os intervalos válidos dos parâmetros foram determinados com suporte em Beven (1997), e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de parâmetros do Topmodel usados recomendados por Beven (1997)

m [m]	ln T0 [m ² h ⁻¹]	ChVel [m h ⁻¹]	SRMAX [m]	SR0 [m]
0,003 – 0,10	-10 – 10	300 – 2000	0 – 0,25	0 – SRMAX

3.5.3. Calibração e Validação

O modelo TOPMODEL não possui um método explícito de calibração. O manual do programa justifica essa ausência de algoritmos, dizendo que não haveria um conjunto ótimo de parâmetros. Também explicita que o usuário deve testar a sensibilidade do modelo, segundo estimativa física de seus parâmetros.

A versão do modelo disponibilizada na internet pelo *Hydrology and Fluid Dynamics Group*, do curso de *Environment Sciences* da Universidade de Lancaster - Inglaterra possui um módulo de análise de sensibilidade pelo método de Monte Carlo, onde uma grande quantidade de simulações é feita utilizando-se amostras aleatórias de parâmetros.

Neste trabalho, utilizou-se, como calibração, esse tipo de análise, com mil simulações, achando-se assim o conjunto de parâmetros que minimizaram a mesma função objetivo utilizada na calibragem do modelo SMAP, ou seja, a função de mínimos quadrados.

3.6. Índices de Eficiência e Comparação das Simulações

Para que seja possível comparar quantitativamente uma série de vazões geradas com uma série de vazões observadas, é necessário o uso de índices de avaliação de ajuste. Esses índices, quando incluídos como métricas dentro dos modelos hidrológicos, são chamados de funções objetivo, servindo para identificar o conjunto de parâmetros potencialmente ótimos em um processo de calibração. Os índices, mostrados na Tabela 5 e descritos abaixo, foram usados para a comparação das simulações dos modelos hidrológicos utilizados, permitindo a avaliação de qual a melhor série de vazões gerada, segundo diversos critérios.

Tabela 5 - Funções de comparação entre séries de vazão

Critério	Equação
Soma de erros absolutos	$Z = \sum_{i=1}^{NQ} q_o(i) - q_s(i) $
Soma dos quadrados dos resíduos	$Z = \sum_{i=1}^{NQ} [q_o(i) - q_s(i)]^2$
Eficiência	$Z = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NQ} [q_o(i) - q_s(i)]^2}{\sum_{i=1}^{NQ} [q_o(i) - q_o(média)]^2}$
Erro percentual nos picos	$Z = 100 \cdot \left \frac{q_s(pico) - q_o(pico)}{q_o(pico)} \right $
Erro da raiz média quadrática ponderada pelo pico	$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \cdot \left(\frac{q_o(i) + q_o(média)}{2 \cdot q_o(média)} \right) \right] \right\}^{1/2}$

Notas: Z = função objetivo; NQ = número de ordenadas calculadas; $q_o(t)$ = vazões observadas; $q_s(t)$ = vazões calculadas, com um conjunto de parâmetros do modelo; $q_o(pico)$ = pico observado; $q_o(média)$ = média de vazões; and $q_s(pico)$ = pico de vazões calculadas.

Além de efetuar os testes supracitados, é de grande utilidade a elaboração de gráficos que permitam visualizar o ajuste do modelo. Os gráficos utilizados neste estudo foram a sobreposição de dados de vazão, dispersão dos erros e gráfico dos resíduos ao longo do tempo. Esses gráficos são de grande auxílio na identificação de tendência das respostas do modelo em consequência dos parâmetros selecionados, e da percepção de como os erros são distribuídos ao longo do tempo de

simulação. Neste artigo somente serão mostrados os gráficos de vazão observas e geradas sobrepostos, e somente para o período de validação do modelo.

4. RESULTADOS

4.1. Geração de série de Evapotranspiração

A Figura 9 mostra os valores de evapotranspiração resultantes da aplicação do método do balanço hídrico sazonal para o período de 1998 até 2004.

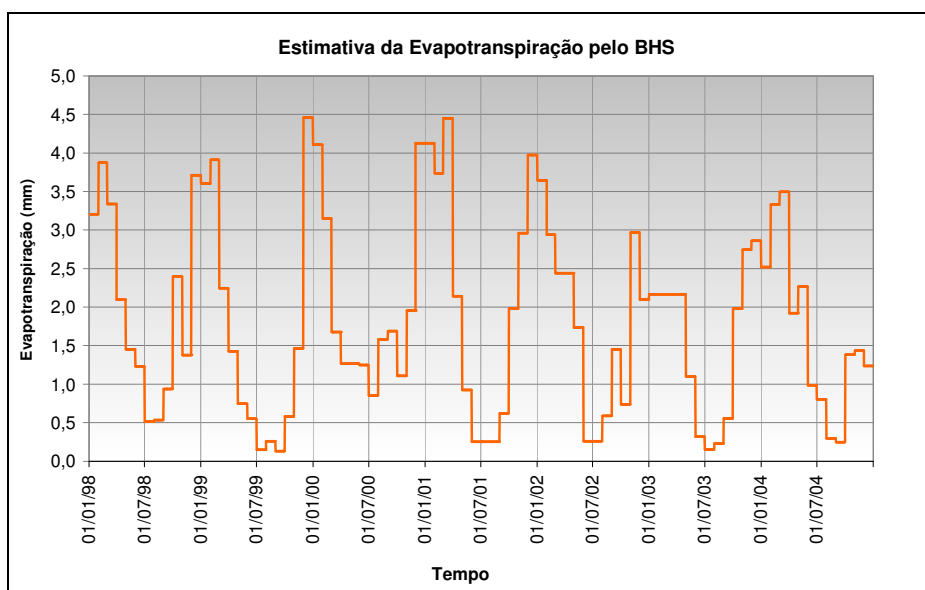


Figura 9 – Resultado do cálculo da evapotranspiração

Uma análise crítica mais apurada sobre o desempenho do método BHS pode ser realizada através da verificação do balanço de massa acumulado realizado pelo modelo. Para tal, a Figura 10 apresenta a comparação entre os valores acumulados da evapotranspiração calculada pelo BHS e os totais acumulados da diferença diária entre precipitação e vazão, em mm/dia, para o posto de Pedro do Rio.

Para esse posto, os resultados foram razoáveis, uma vez que se verifica pequeno distanciamento entre as curvas, com leve tendência de superestimativa da evapotranspiração. Contudo, os resultados podem ser considerados aceitáveis dentro da margem de erros admitida na modelagem hidrológica a que os dados se destinam, como explicado por Andreassian (2004).

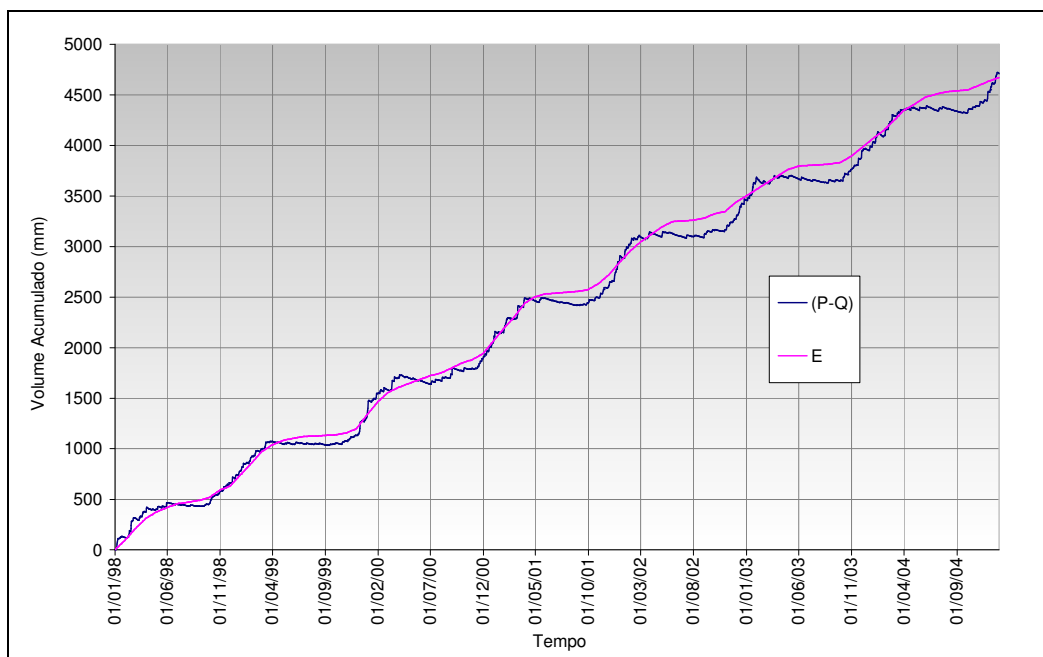


Figura 10 – Evapotranspiração BHS acumulada comparada a [P-Q] acumulada

4.2. Resultados da modelagem

Neste item, são apresentados os resultados para as diferentes simulações realizadas com o SMAP e com o Topmodel.

Na Tabela 6, têm-se os parâmetros iniciais e calibrados via Rosenbrock, enquanto, na Figura 11, pode-se visualizar a simulação realizada para o período de validação. Analogamente, na Tabela 6, encontram-se os parâmetros iniciais e calibrados via suavização hiperbólica, podendo-se avaliar graficamente os resultados na Figura 12. Por outro lado, na Tabela 7 e na Figura 13, estão os resultados para as simulações com o Topmodel. Finalmente, na Tabela 8, são apresentados os resultados de ambos os modelos para uma análise comparativa.

4.2.1. SMAP

4.2.1.1. Calibração por método direto (Rosenbrock)

Tabela 6 – Parâmetros no início e no fim da calibração

	Entrada - Estimados	Saída - Calibrados
KSUP	0,566	0,5652
KSUB	0,9924	0,9911
KPER	0,5	0,5576
ABSI	18,33	0
CPER	0,5	0,6623
NSAT	300	663,9916

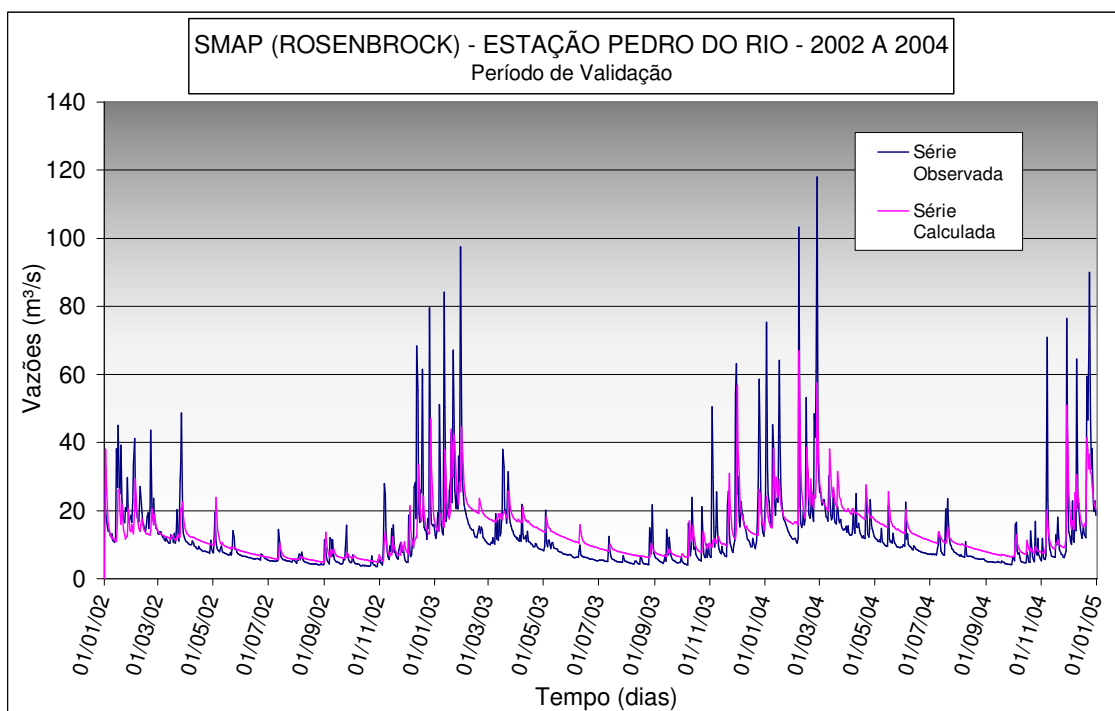


Figura 11 – Resultados da modelagem – SMAP – Rosenbrock

4.2.1.2. Calibração por método indireto (SMAP Suavizado)

Tabela 7 – Parâmetros no início e no fim da calibração

	Entrada - Estimados	Saída - Calibrados
KSUP	0,5660	0,3587
KSUB	0,9924	0,9893
KPER	0,5000	0,1994
ABSI	18,3300	0,0000
CPER	0,5000	0,5050
NSAT	300,0000	447,6927

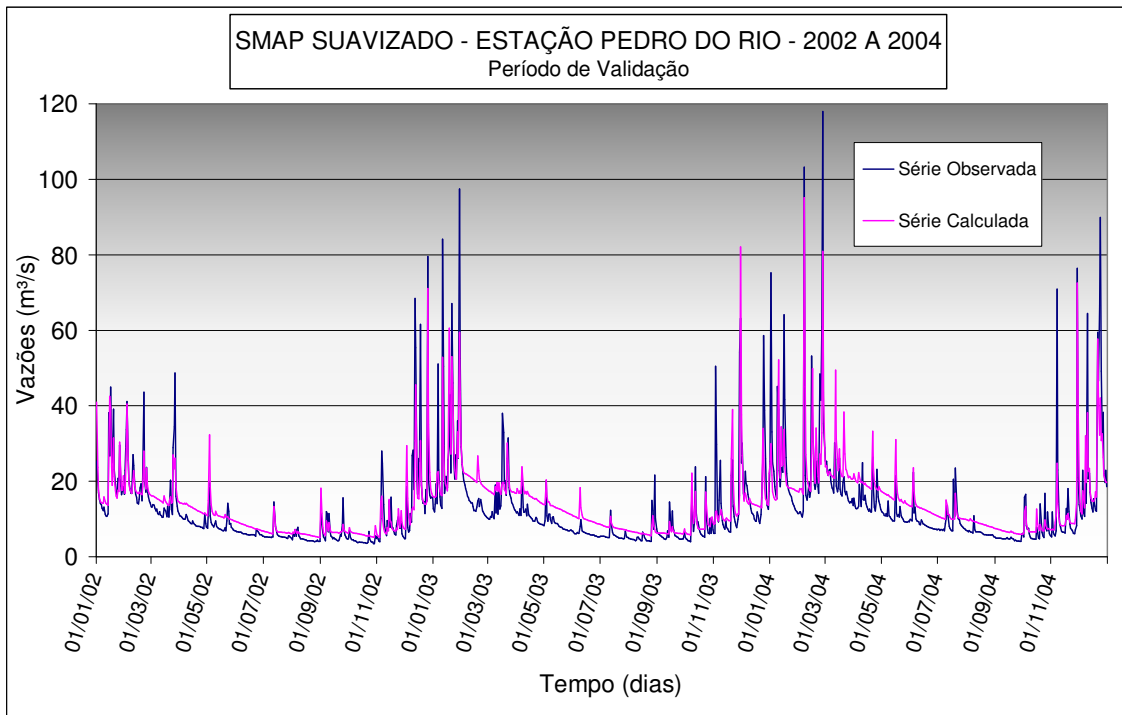


Figura 12 – Resultados da modelagem - SMAP Suavizado - Período de Validação

4.2.2. Parâmetros TOPMODEL

Tabela 8 – Parâmetros ao fim da calibração

m [m]	ln T0 [m ² h ⁻¹]	SRMAX [m]	SR0 [m]	ChVel [m h ⁻¹]
0,006	-2,938	0,094	0	1075

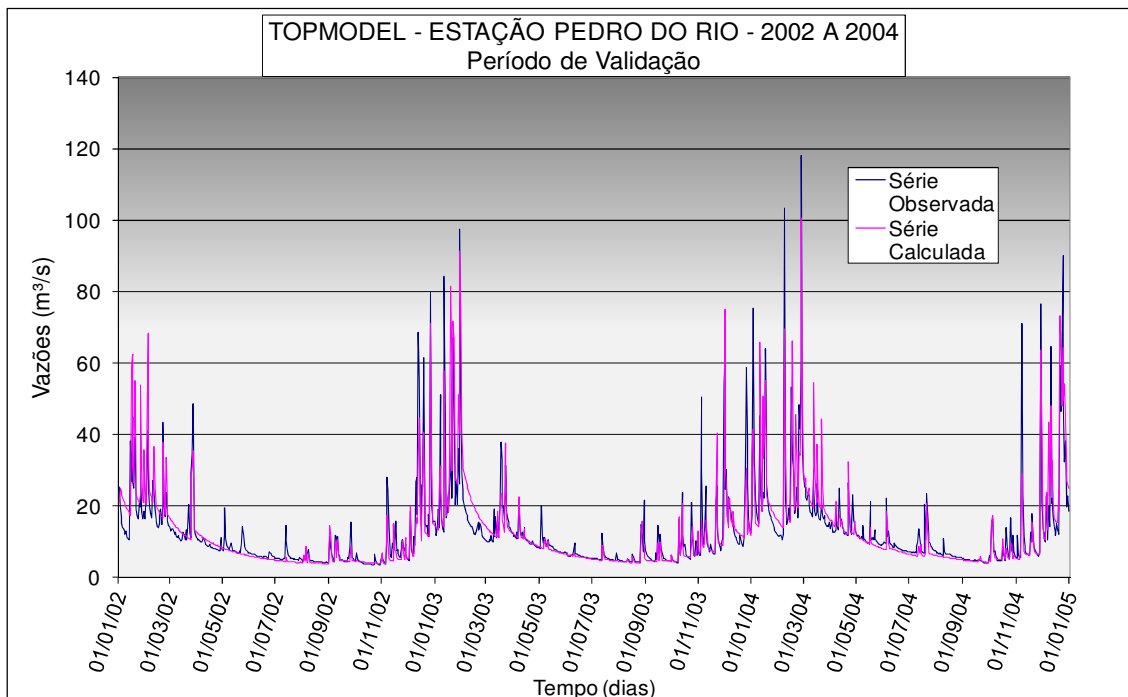


Figura 13 – Resultados da modelagem – Topmodel - Período de Validação

4.2.3. Inter-comparação entre as simulações

Conforme mencionado, a inter-comparação das séries de vazões geradas no período de validação está mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Inter-comparação das modelagens – Período de validação – 2002 a 2004

	Soma de erros absolutos	Soma dos quadrados dos resíduos	Eficiência	Erro percentual nos picos			RMS ponderada pelo pico	Diferença no volume gerado - obs.
				Média	Máxima Superest.	Máxima Subest.		
SMAP - ROSENBROCK	-848,12	81.916,13	0,460	6,58%	74,57%	-78,56%	14,19	5,92%
SMAP - SUAVIZADO	-1.488,34	46.606,47	0,693	19,60%	128,74%	-69,94%	9,96	3,08%
TOPMODEL	29,32	41.800,31	0,725	2,05%	176,98%	-71,59%	8,96	-0,21%

Conclui-se, com os resultados acima, que os parâmetros encontrados na calibração, quando utilizados nas modelagens do período de validação, confirmaram as respostas dos modelos obtidas previamente na fase de calibração. Portanto, confirmam-se a adequada representação do comportamento hidrológico da bacia de Pedro do Rio pelos índices expostos, resguardadas as estruturas individuais dos modelos, além do método de obtenção dos parâmetros.

Pela análise dos resultados, a melhor simulação hidrológica, no período de validação, para a área de estudo, foi apresentada também pelo modelo TOPMODEL, quanto à aderência da série de vazões geradas em relação às observadas. Esse modelo, em princípio, teria um desempenho bem satisfatório para estimativa de volumes a serem gerados a partir de séries de chuvas, visto que alcançou uma diferença de volume gerado em relação ao observado de apenas -0,21% para esse período de 3 anos de validação. Também seria, em princípio, o modelo mais apropriado para prever vazões representativas e quaisquer efeitos de alterações antrópicas ou climáticas na bacia de estudo.

No entanto, observou-se que o erro na previsão das vazões de pico é menor na modelagem com o SMAP calibrado pelo método suavizado. O SMAP calibrado pelo método Rosenbrock apresentou sempre uma tendência de subestimar as vazões de pico. Portanto, a modelagem com calibração pelo método suavizado apresentou-se mais adequada para casos em que o objetivo do uso do modelo hidrológico seja a geração de séries para análise de eventos máximos (cheias). Para efeito de comparação entre os métodos de calibração do SMAP, o SMAP suavizado apresentou um valor da soma dos quadrados dos erros 43% menor do que o calibrado pelo método Rosenbrock.

O SMAP calibrado pelo método Rosenbrock, por sua vez, apresentou o desempenho mais pobre entre todas as simulações feitas. No entanto, suas maiores superestimativas apresentaram menor magnitude do que os outros modelos. Considera-se pouco importante essa vantagem obtida, visto que o indicador raiz média quadrática ponderada pelo pico ainda assim é muito maior do que as demais modelagens, notando-se que valores baixos desse indicador indicam melhor ajuste. Os

resultados obtidos com a calibração pelo método Rosenbrock mostraram que há necessidade de refinamento desse método automático para a análise de bacias como a estudada.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desafio principal deste trabalho consistiu em realizar uma modelagem hidrológica em uma bacia de média proporção, com problemas de defasagem das medições quanto à velocidade dos processos hidrológicos, aplicando modelos operacionalmente viáveis e comparando as saídas entre eles, de modo que se analisasse qual melhor representa o ciclo hidrológico da bacia. Reitera-se que a metodologia adotada teve como base de dados apenas o modelo digital do terreno e os dados diários de vazão e precipitação.

Elaborou-se uma metodologia condizente com o objetivo de comparação dos modelos hidrológicos e fundamentados em uma criteriosa caracterização hidrológica da região. A metodologia traçada, que se baseou na determinação das condições iniciais para a calibração dos modelos enfocando o comportamento hidrológico real da bacia, mostrou-se suficientemente adequada. Os resultados favoráveis se refletiram nos índices de comparação, apresentando um desempenho aceitável das modelagens, mesmo com todas as limitações citadas.

Os resultados apresentados por este trabalho demonstram a importância da aplicação de mais de um tipo de modelagem hidrológica conceitual em bacias com poucas medições, para que se verifique qual enfoque melhor representa o ciclo hidrológico da bacia. Nesse aspecto, verificou-se que na bacia de estudo, a estrutura de representação do ciclo hidrológico representado pelo modelo TOPMODEL assemelha-se à condição real da bacia estudada. Esta estrutura considera os aspectos topográficos, configuração exponencial da umidade do solo e demais aspectos da estrutura do solo, o que causou melhores valores dos índices de ajuste obtidos às saídas desse modelo. No entanto, para a bacia de Pedro do Rio, recomenda-se que, no âmbito do projeto da bacia experimental serrana, sejam instalados aparelhos que efetuem medições com frequência inferior à diária, dado que o tempo de escoamento superficial à seção de medição seja significativamente menor, o que certamente influenciou nos erros obtidos em períodos de cheia pelas modelagens hidrológicas efetuadas. Após a coleta e processamento dos novos dados de chuva e vazão em frequência temporal adequada, recomenda-se como continuação desta linha de pesquisa um novo teste de validação dos parâmetros obtidos neste trabalho utilizando-se as novas medições. Os modelos hidrológicos deverão então ser modificados em sua estrutura para comportarem simulações em passos de tempo inferior à escala diária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreassian V., Perrin C., Michel C. (2004). “*Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models*”. Journal of Hydrology 286, pp. 19–35
- Beven, K. J. (1997). “*TOPMODEL: a critique*”, Hydrological Processes, 11(9), pp. 1069-1086
- Beven, K. J. (2001). “*Rainfall-runoff modeling: The primer*”. John Wiley & Sons, 2001. New York: 360p.
- Canedo, P.M. (1979), “*The reliability of conceptual catchment model calibration*”, Tese de Ph. D. Thesis, University of Lancaster, U.K.
- Di Bello, R. C. (2005). *Análise do comportamento da umidade do solo no modelo chuva-vazão SMAP II – versão com suavização hiperbólica. Estudo de Caso: Região de Barreiras na bacia do rio Grande – BA*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R. J., Brasil.
- Dias, N.L., Kan, A. (1999). “*A hydrometeorological model for basin-wide seasonal evapotranspiration*”. Water Resources Research, v. 35 (11), pp. 3409-3418.
- Hutchinson, M. F. (1996). “*A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models*”. In Proceedings, Terceira Conferência Internacional de Integração de SIG e modelagem Ambiental. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.
- Moreira, D. M., Araújo, M. N. , Almeida, I.S, Rotunno Filho, O. C. (2007)., “*Apoio cartográfico a estudos hidrológicos utilizando ferramentas de geoprocessamento*”, XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, SP, Brasil.
- Rosenbrock, H.H., 1960, “*An automatic method for finding the greatest or least value of a function*”, Computer. Journal, v. 3, pp. 175-184.
- Rotunno Filho, O. C. (1989). “*Comparação de dois métodos de otimização em modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão*”, Tese de mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- Sivapalan, M. (2003). “*Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection?*”, Hydrological Processes, 17, pp. 1037-1041.
- USACE (2000). *HEC-HMS hydrologic modeling system user’s manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- USDA United States Department of Agriculture (1986). “*Urban Hydrology for Small Watersheds - TR-55*”, 164p.
- Xavier, A.E., Rotunno Filho, O.C., Canedo, P.M. (2005). “*A new deterministic approach in calibration of rainfall-runoff models: The hyperbolic smoothing method*”, trabalho submetido à Water Resources Research.