

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO DESEMPENHO DE MODELOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS DO SEMI-ÁRIDO CEARENSE

Teresa Luisa Lima de Carvalho¹ & Dirceu Silveira Reis Junior²

RESUMO --- Este artigo investiga a importância dos dados de evapotranspiração potencial (ETP) na modelagem hidrológica. Avaliou-se o desempenho do modelo hidrológico de passo diário, HYMOD, quando alimentado com dados de ETP estimados através de seis diferentes modelos encontrados na literatura, quais sejam, Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Thorntwhaite, Hargreaves, e McGuinness-Bordne modificado por Oudim *et al.* (2005). O estudo procurou entender também quais seriam as perdas de desempenho quando se utilizam estes mesmos modelos de ETP com base em médias de longo período, como aquelas baseadas nas normais climatológicas do INMET. Estas avaliações foram feitas para quatro bacias localizadas no estado do Ceará, com diferentes características climática, representadas pelo índice de aridez. Em duas bacias, as diferenças foram insignificantes. Entretanto, os resultados indicam que a sensibilidade do modelo varia especialmente no Estado, e que em áreas com alto índice de aridez, os modelos mais simples de ETP, baseados na temperatura, apresentam piores resultados quando comparados com os modelos de Penman e Penman-Montieth. Além disso, verificou-se que o desempenho do HYMOD é insensível ao fato dos dados diários de ETP serem estimados com base (1) em dados diários de variáveis meteorológicas, (2) em médias mensais do período analisado, ou (3) nas normais climatológicas.

ABSTRACT --- This paper investigates the importance of potential evapotranspiration (PE) data on hydrologic modelling. The study evaluates the performance of the daily-time-step HYMOD model, when fed by daily PE estimated by six different PE models found in the literature, namely, Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Thorntwhaite, Hargreaves, and McGuinness-Bordn modified by Oudim *et al.* (2005). The paper also investigates whether the use of sophisticated models of PE, such as those aforementioned, should be recommended or simpler estimates of ETP, such as those obtained by monthly Climatological Normals, should be put into use. These evaluations were carried out for four watersheds located in different climatic regions of the State of Ceará, with varying aridity index. The model performance was quite insensitive to PE data in two watersheds. However, results show that the sensitivity varies from place to place. It was shown that PE models based solely on temperature provided weaker results when compared to Penman and Penman-Montieth models. Besides, the papers show that HYMOD is totally insensitive to the temporal scale used to compute meteorological variables.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, modelagem hidrológica, evapotranspiração potencial.

1) Pesquisadora da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. Av. Rui Barbosa, 1246, Aldeota, Fortaleza - CE, 60115-221. e-mail: teresaluisa10@gmail.com.

2) Pesquisador da FUNCEME. dirceu.reis@gmail.com.

1 - INTRODUÇÃO

Do ponto de vista quantitativo, e em termos globais, a evapotranspiração é um dos processos mais importante do ciclo hidrológico, perdendo apenas para a precipitação (Brutsaert, 2005). Em áreas semi-áridas, como a do nordeste brasileiro, a participação relativa da evapotranspiração no ciclo hidrológico é ainda mais marcante (Morton, 1986).

Apesar da reconhecida importância da evapotranspiração no ciclo hidrológico, o desconhecimento que se tem a respeito deste processo ainda é muito grande. Como já observado em artigos (Oudin et al., 2005; Morton, 1982) e livros (Brutsaert, 1982, 2005), a ciência ainda não foi capaz de resolver o problema da medição pontual da evapotranspiração. Não existe um método de medição pontual que seja suficientemente preciso e barato, de modo que possa ser implantado em larga escala numa rede de monitoramento. Com isso, as medições de evapotranspiração ficam restritas a alguns poucos locais onde são realizados experimentos científicos, que são geralmente operados durante um curto espaço de tempo, dificultando a obtenção de séries longas de evapotranspiração nas escalas horária e diária.

A evapotranspiração potencial (ETP), a partir da qual se pode estimar a evapotranspiração real, pode ser estimada indiretamente através de medições de variáveis meteorológicas. Entretanto, mesmo nesses casos, a disponibilidade destas informações é muito limitada, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde os recursos para instalação e manutenção da rede de monitoramento são bastante limitados. A escassez de dados, entretanto, não se limita à questão meteorológica, mas é sentida também em relação a outros dados ambientais diretamente ligados ao processo de evapotranspiração, tais como, tipo e uso do solo e vegetação, para não mencionar a falta de monitoramento contínuo do teor de umidade do solo, tão importante para as áreas de recursos hídricos e agricultura.

No que concerne à modelagem hidrológica, mais especificamente em relação aos modelos do tipo chuva-vazão, o que se tem feito é empregar modelos que estimam a evapotranspiração real com base na ETP, usualmente fornecida como dado de entrada para estes modelos. Vale mencionar o trabalho de Morton (1986), que faz uma análise crítica deste tipo de abordagem, mostrando o distanciamento entre o conhecimento que se tem do papel da vegetação, solo e atmosfera no processo de evapotranspiração, e os simples métodos de estimativa de evapotranspiração real adotados pelos modelos hidrológicos. Entretanto, a grande maioria dos modelos conceituais utilizados em hidrologia, incluindo o empregado neste artigo, faz uso desta abordagem com equacionamentos bastante simplórios para estimar a evapotranspiração real.

Tendo em vista a escassez de informação que permitiria a estimativa da série temporal da ETP média numa bacia hidrográfica, no caso de modelos hidrológicos concentrados, ou mesmo de uma

série de ETP em cada região, sub-bacia ou quadrícula, no caso de um modelo distribuído, os hidrólogos são muitas vezes levados a empregar estimativas bastante grosseiras desta variável.

É bastante comum alimentar modelos do tipo chuva-vazão com estimativas de ETP baseadas em valores médios mensais de longo período, obtidos, por exemplo, das normais climatológicas fornecidas pelo INMET. Este procedimento acaba por desprezar as variações que ocorrem em escalas temporais menores, como as anuais e diárias. A não ser que a ETP seja uma variável extremamente bem comportada, ou seja, com variações diárias e inter-anuais muito pequenas, era de se esperar que a abordagem descrita acima para estimar a ETP causasse problemas sérios na modelagem hidrológica, especialmente em anos extremos, muito secos ou muito chuvosos. Entretanto, há estudos que mostram que isto nem sempre é verdade (por ex., Calder *et al.*, 1983).

De fato, o que se deseja é saber se a perda de informação relacionada com essa prática comum em hidrologia afeta de maneira significativa a modelagem hidrológica de uma dada região. A resposta a esta pergunta não é fácil de ser obtida, e possivelmente dependerá de uma série de fatores, dentre eles, as características climáticas da área de interesse, a maneira pela qual o modelo hidrológico em questão estima a evapotranspiração real, e a qualidade dos dados hidrológicos utilizados para alimentar o modelo, incluindo aí a própria ETP, que mesmo quando estimada com os modelos mais sofisticados, ainda apresenta incertezas relativas a sua representatividade regional.

Este artigo procura avaliar o impacto de se utilizar diferentes modelos de ETP no desempenho de modelos hidrológicos. A ênfase aqui é dada a bacias localizadas no semi-árido cearense, modeladas pelo modelo hidrológico HYMOD, um modelo conceitual, concentrado, e de passo diário. A abordagem utilizada no estudo procura responder a seguinte pergunta: existe ganho em utilizar modelos sofisticados de ETP? A sofisticação neste caso está associada a dois fatores, quais sejam, o número de variáveis meteorológicas empregadas na estimativa da ETP e a escala temporal empregada na estimativa, ou seja, pretende-se avaliar as perdas, em termos de desempenho do modelo hidrológico em simular as vazões no exutório da bacia, ao se empregar uma estimativa de ETP com base nas normais climatológicas, em vez de se estimar a ETP com dados diários medidos em estações meteorológicas.

O artigo inicia com uma breve descrição de estudos similares encontrados na literatura, procurando discutir as particularidades de cada caso, que diferem entre si por uma série de motivos, dentre os principais, pode-se citar: os modelos hidrológicos com suas diferentes maneiras de se estimar a evapotranspiração real com base na ETP, as características climáticas das regiões estudadas, e, principalmente, as abordagens empregadas para avaliar a sensibilidade dos modelos hidrológicos às diferentes maneiras de se estimar a ETP. O artigo continua com uma descrição dos diversos modelos de ETP empregados neste estudo, seguida da descrição do modelo hidrológico HYMOD e das bacias hidrográficas selecionadas e dos respectivos dados utilizados. Em seguida,

são apresentadas as discussões dos resultados encontrados, encerrando, finalmente, com as principais conclusões obtidas até o momento com este trabalho que ainda se encontra em andamento, tendo em vista que o objetivo é analisar um número suficientemente grande de estações de modo que se tenha uma idéia mais clara da situação.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos tentaram avaliar como erros nos dados de ETP são propagados, através do modelo hidrológico, na estimativa das vazões no exutório da bacia, conforme discutido na sequência. Estas avaliações nem sempre são simples devido à própria natureza dos modelos hidrológicos conceituais, que apesar de tentarem representar os processos hidrológicos de forma matemática, as funções empregadas nestes modelos, e seus respectivos parâmetros, nem sempre possuem significado físico. Portanto, a estimativa da evapotranspiração real, obtida pelo modelo, nem sempre representa de forma adequada a evapotranspiração real que de fato acontece na bacia. Esta situação muitas vezes acontece não apenas pela deficiência na conformação da estrutura do modelo propriamente dita, embora este seja um fator muito importante, mas também pela estimativa dos parâmetros do modelo, geralmente realizada com base num estudo de calibração, que na quase totalidade das situações utiliza apenas as vazões observadas para ajustar o modelo. Desta forma, erros nos dados de ETP podem ser “corrigidos” pelo modelo de forma a obter uma série de vazões que seja próxima da série de vazões observadas. O quanto isso é benéfico ou prejudicial à modelagem hidrológica vai depender um pouco do uso que se faz dos resultados obtidos pelo modelo. A literatura apresenta algumas discussões relativas aos resultados de modelos conceituais, enfatizando que nem sempre estes modelos geram os resultados corretos pelos motivos corretos. O assunto foge do escopo deste trabalho, embora esta questão esteja relacionada com a sensibilidade dos modelos hidrológicos conceituais aos dados entrada. Os leitores interessados neste assunto devem procurar Kirchner (2006) e Klemes (1986), que apresentam discussões profundas e didáticas acerca desta questão.

Os artigos que procuram avaliar a questão da sensibilidade dos modelos hidrológicos aos dados de ETP podem ser divididos em dois grupos, como observado por Andréassian *et al.* (2004): (I) onde os parâmetros do modelo hidrológico são estimados para cada conjunto de dados de ETP disponível (cada modelo de ETP), sendo a avaliação da sensibilidade do modelo a estas diferentes séries de ETP realizada com base num período de verificação; (II) onde os parâmetros do modelo hidrológico em questão são estimados com base nos dados de ETP de melhor qualidade que se tem em mãos, ou em outras palavras, obtidos através de uma equação de ETP que se acredita ser a melhor estimativa disponível da realidade, para só então avaliar a sensibilidade do modelo a

diferentes estimativas de ETP num período de validação, seja através da inclusão de um ruído nos dados originais de ETP, seja com o uso de estimativas baseadas em diferentes modelos de ETP.

A lógica por trás dos estudos do grupo (II) consiste em estimar os parâmetros do modelo hidrológico com os melhores dados de ETP que se tem em mãos, de modo que os parâmetros ajustados seriam aqueles que tornariam o modelo o mais fidedigno possível dos processos que ocorrem na natureza. Nesta abordagem, a influência do processo de calibração na análise de sensibilidade do modelo aos dados de ETP é minorizada. Os trabalhos do grupo (I), por outro lado, possuem uma visão mais pragmática da análise de sensibilidade, no sentido de se preocupar apenas com os resultados finais de geração de vazões, e menos com os aspectos científicos de entendimento e avaliação da modelagem dos processos hidrológicos. Estes estudos focam exclusivamente na avaliação de diferentes modelos de ETP. Neste caso, para cada um destes modelos, executa-se a calibração do modelo hidrológico, e verifica-se o desempenho do mesmo num período de verificação. Neste caso, a separação entre as influências da calibração e do modelo de ETP na análise de sensibilidade é mais difícil. O que se obtém ao final do estudo é um indício de qual seria o modelo de ETP mais apropriado para um determinado modelo hidrológico. Como o processo de calibração, de alguma forma, ajusta o modelo aos dados de vazão, mesmo se os dados de entrada apresentarem erros significativos, é difícil separar os dois fatores na análise de sensibilidade.

Alguns autores defendem a idéia de que estas análises de sensibilidade devem ser feitas seguindo a metodologia do grupo (I), pois se leva em consideração a capacidade do modelo em se adaptar aos erros de entrada, embora o conceito de adaptação, neste caso, seja passível de críticas daqueles que encaram a modelagem não apenas para se obter números parecidos com a realidade, mas sim para obter números parecidos com a realidade pelos motivos corretos (Kirchner, 2006). Outros defendem a idéia de que os dados disponíveis de vazão nem sempre são suficientes para estimar de forma adequada todos os parâmetros de um modelo hidrológico, ou seja, haveria diversos vetores de parâmetros que poderiam proporcionar desempenhos similares num estudo de calibração, de forma que é impreterível que a calibração seja realizada com uma série de ETP que seja a mais próxima possível da realidade, caso contrário, o modelo poderá gerar vazões similares às observadas, porém pelos motivos errados. Isto faz com que, no futuro, caso o modelo tenha que gerar vazões com base em forçantes hidrológicas (chuva e ETP) com características diferentes daquelas empregadas no processo de calibração, os resultados podem ser muito distantes da realidade.

O estudo realizado por Parmele (1972), embora não se enquadre nos grupos (I) e (II), merece destaque por ser um dos primeiros a realizar um estudo clássico de análise de sensibilidade aos dados de entrada de três modelos hidrológicos conceituais, incluindo duas versões do modelo

Stanford. Os experimentos foram realizados com base numa série sintética, obtida pelo próprio modelo utilizado na análise. Diferentes erros foram incluídos à série de ETP “real”, e os resultados, em termos de vazão média anual, foram comparados com aquele obtido com a série original de ETP. Verificou-se que as vazões simuladas apresentaram uma forte sensibilidade aos dados de ETP. Este estudo, obviamente, está intimamente ligado ao modelo em si, e não como o mesmo se comporta no caso de ser alimentado com erros nos dados de entrada. Paturel et al. (1995) fizeram um estudo semelhante com o modelo GR2M, embora tenham também avaliado o papel da calibração na “correção” dos erros nos dados de entrada.

Com um enfoque diferente daquele empregado por Parmele (1972), Calder *et al.* (1983) empregaram um modelo de umidade do solo e observações adquiridas com sonda de Nêutrons na Grã-Bretanha para avaliar a sensibilidade do modelo aos dados de ETP. Embora nem todas as análises tenham utilizado algum processo de ajuste de parâmetros, pode-se enquadrar este trabalho como do tipo (I). As conclusões foram de que equações de ETP mais sofisticadas, como as de Penman e Priestley-Taylor, não levaram o modelo empregado a apresentar resultados melhores do que aqueles obtidos quando se utilizaram valores médios de longo período para a ETP. Esta conclusão é válida até para o ano mais seco do período analisado. Entretanto, o clima da região não apresenta variações temporais significativas, o que não permite extrapolar os resultados para regiões semi-áridas tropicais.

Recentemente, Fowler (2002) comparou o desempenho de um modelo de umidade do solo quando alimentado com diferentes séries de ETP, sendo o caso base a ETP diária baseada na expressão de Priestley-Taylor. Os resultados obtidos para apenas um local, junto à costa, mostraram que as diferenças eram relativamente pequenas, embora nos anos mais secos tenha sido necessário realizar uma correção da ETP (baseada na climatologia) para os dias de chuva. A conclusão deste estudo foi de que não havia ganhos significativos com o uso de modelos de ETP mais sofisticados.

Vázquez & Feyen (2003), por sua vez, procuraram avaliar os efeitos de três diferentes métodos de estimativa da ETP na calibração e desempenho de um modelo hidrológico distribuído e de base física, o MIKE SHE. Eles empregaram uma análise do Tipo (I), e o desempenho do modelo baseou-se não apenas em vazões, mas também em níveis piezométricos. Os resultados mostraram uma dependência do desempenho do modelo aos métodos de ETP, e verificaram também que os valores calibrados dos parâmetros do modelo, especialmente aqueles que fazem parte do cálculo da evapotranspiração real, são sensíveis aos dados de ETP utilizados na calibração.

Andréassian *et al.* (2004) avaliaram a sensibilidade de dois modelos chuva-vazão, o GR4J, um modelo conceitual de 4 parâmetros, e uma versão modificada do modelo TOPMODEL, com 8 parâmetros. A ETP, baseada em Penman, foi estimada de diferentes formas, desde a utilização de dados de uma única estação, até o emprego de um modelo regional estatístico que empregava dados

de uma vasta região. Resultados baseados em 62 bacias hidrográficas e dados de 42 estações climatológicas mostraram que ambos os modelos são muito pouco sensíveis aos dados de entrada de ETP (análise Tipo (I)). Os parâmetros calibrados do GR4J foram bastante diferentes dependendo da série de ETP empregada, mostrando que o processo de calibração pode “consertar” os erros nos dados de ETP. Mais recentemente, Oudin *et al.* (2005ab), em artigos publicados conjuntamente, realizaram um vasto experimento tratando desta questão, englobando 306 bacias hidrográficas. Os resultados mostraram que as diferenças, em termos de desempenho do modelo hidrológico, quando alimentados por diferentes modelos de ETP (e diferentes escalas temporais) são pequenas, e os autores levantam questões acerca dos possíveis motivos para este comportamento, de forma a fomentar a discussão na comunidade científica, já que as explicações até então levantadas não explicam de forma satisfatória esta questão.

3 – MODELOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Em termos práticos, a escolha do modelo de ETP estará sempre condicionada à disponibilidade dos dados meteorológicos exigidos na sua formulação. Quando esses dados não são um impeditivo, geralmente os modelos mais completos, como o de Penman ou Penman-Montieth, serão preferidos, por possuírem uma base física mais robusta e apresentarem boa correlação com dados medidos em lisímetros (Allen *et al.*, 1998).

Apesar da popularidade destes dois modelos, vale notar as dificuldades da aplicação dessas duas abordagens no que concerne à questão da condição potencial. A ETP, um conceito criado por Thornthwaite (1948), refere-se à taxa de evaporação média que aconteceria em uma área relativamente grande, totalmente coberta de maneira uniforme por vegetação, e com água em abundância, de modo que a energia disponível seja o único fator limitante (Brutsaert, 1982).

Portanto, aqueles que precisam estimar a ETP em uma dada região devem ter em mente que, apesar de empregarem modelos sofisticados como o de Penman e Penman-Montieth, as variáveis utilizadas para realizar a estimativa nem sempre são medidas na condição potencial. Este problema está diretamente ligado à relação de complementaridade, sugerida por Bouchet (1963), entre a ETP e a evapotranspiração real. Esta relação foi analisada, e verificada, em vários trabalhos (Brutsaert e Stricker, 1979; Parlange e Katul, 1992; Brutsaert e Parlange, 1998; Hobbins *et al.*, 2004; Kahler e Brutsaert, 2006). A idéia por trás desta relação de complementaridade está no fato de que a energia não utilizada na evapotranspiração, devido há falta de umidade disponível (condição não-potencial), se transforma em outras formas de energia, sendo que a maior parte se transforma em calor sensível afetando a temperatura do ar. Portanto, em condições não-potenciais, os níveis de temperatura e umidade do ar são diferentes daqueles que seriam observados caso a condição fosse potencial.

A estimativa da ETP em condições não potenciais não é algo trivial. Vários autores (Brutsaert e Stricker, 1979; por exemplo) sugerem, como aproximação, o uso da equação de Priestley-Taylor, baseada no conceito de evaporação de equilíbrio em condições de advecção mínima, ou seja, com pouco ou nenhum transporte de ar seco para a região de interesse. Apesar de depender também da umidade e da temperatura, este modelo de ETP é bastante robusto, dependendo basicamente da radiação (Kahler e Brutsaert, 2006). Por este motivo, o modelo de Priestley-Taylor é também considerado neste trabalho.

Como a disponibilidade de dados meteorológicos é geralmente um fator limitante na estimativa da ETP pelos modelos apresentados acima, já que dificilmente se tem séries diárias e coincidentes de todas as variáveis meteorológicas necessárias, muitas vezes é preciso optar por modelos mais simples, que sejam condizentes com os dados disponíveis.

Levando em consideração esses aspectos foram selecionados mais três modelos de ETP, além dos três já mencionados acima, quais sejam, Thornthwaite, Hargreaves e Oudin, que dependem quase exclusivamente da temperatura, uma vez que as demais variáveis são funções apenas da latitude. Os dois primeiros são largamente utilizados em estudos de evaporação, enquanto o último é uma proposta recente na literatura (Oudin *et al.*, 2005). A Tabela 1 apresenta as formulações dos seis modelos de ETP empregados neste estudo.

Tabela 1: Modelos de Evapotranspiração Potencial

Penman (Pen)	$E = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_s - e_a) f_u}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}$	onde $f_u = 2,6(1 + 0,536u)$
Penman-Monthieth (PMT)	$E = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_s - e_a) \frac{1500}{r_a}}{\lambda \rho [\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})]}$	onde $r_a = 200/u$
Priestley-Taylor (Pri)	$E = \frac{1,26 \Delta R_n}{\lambda \rho (\Delta + \gamma)}$	
Thornthwaite (Ttw)	$E = \frac{4N}{3} \left(\frac{10T_m}{I} \right)^k$	onde $k = 0,49 + 1,8(I/100) - 0,77(I/100)^2 + 0,67(I/100)^3$ e $I = \sum_{j=1}^{12} (T_{mj}/5)^{1,51}$
Hargreaves (Har)	$E = 0,0023 \frac{R_a}{\lambda \rho} (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} (T + 17,8)$	
Oudin (Oud)	$E = \frac{R_a}{\lambda \rho} \frac{(T + 5)}{100}$	

Onde: E é a evapotranspiração potencial [mm/dia], Δ é a declividade da curva de pressão do vapor [kPa/°C], R_n é o fluxo de radiação líquida [MJ/m²/dia], R_a é o fluxo de radiação extraterrestre [MJ/m²/dia], e_s é a pressão média de saturação do vapor [kPa], e_a é a pressão real de vapor [kPa], u é a velocidade do vento a 2m da superfície [m/s], r_s é a resistência superficial da grama de 12cm [=69s/m], r_a é a resistência aerodinâmica [s/m], T , T_{max} e T_{min} são as temperaturas média, máxima e mínima diárias [°C], Tm é a temperatura média mensal, N é o fotoperíodo [h], γ é a constante psicrométrica [kPa/°C], λ é o calor latente de vaporização [=2,45MJ/kg] e ρ é a densidade da água [=1000kg/(mm x m²)].

4 – O MODELO HIDROLÓGICO HYMOD

O modelo HYMOD foi escolhido para este estudo porque ele vem sendo empregado em estudos de previsão de vazões no Estado do Ceará, e poderá ser utilizado no futuro para extensão e preenchimento de falhas de séries fluviométricas.

A versão analisada aqui é baseada em Moore (1985). A idéia por trás do modelo é de que a bacia hidrográfica consiste de um conjunto de pontos discretos, sem interações entre os mesmos, sendo que cada ponto possui uma capacidade de armazenamento de água, que quando excedida, gera escoamento. Uma ilustração dessa representação pode ser vista na Figura 2.

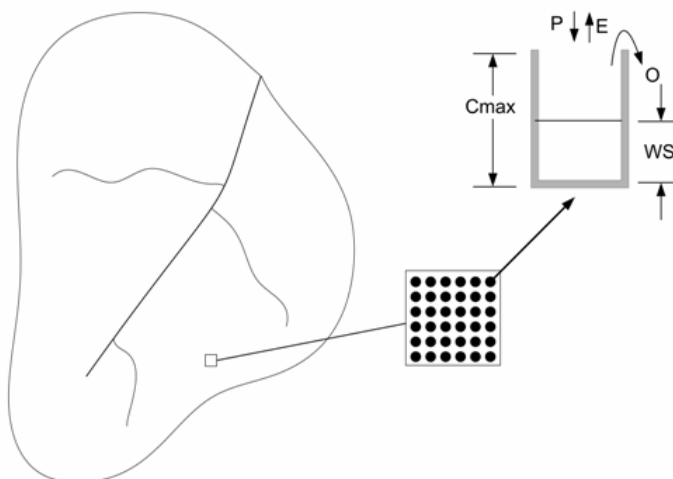


Figura 2 – Representação da bacia no modelo HYMOD (Barros et al., 2007).

A função de distribuição das capacidades dos diferentes pontos da bacia é definida pela expressão $F(C) = 1 - (1 - C/C_{max})^B$, em que F representa probabilidade acumulada da capacidade de água armazenada em um dado ponto, C_{max} é a maior capacidade de armazenamento dentro da bacia e B é o grau de variabilidade na capacidade de armazenamento. Parte da água precipitada é armazenada na bacia, enquanto que o restante vai para o escoamento. A Figura 3 mostra a representação do modelo HYMOD.

A fração que excede C_{max} não infiltra e segue diretamente para três tanques denominados de “tanques de fluxo rápido”, onde a transferência entre os mesmos é ditada por uma constante RQ. A outra parcela da precipitação que excede a capacidade dos pontos, onde a capacidade é menor que C_{max} , segue parte para os “tanques de fluxo rápido” e o restante para outro tanque, denominado

“tanque de fluxo lento”, segundo um fator α . A vazão total gerada é a soma das vazões do terceiro tanque da série de tanques de fluxo rápido e do tanque de fluxo lento. O processo de evaporação é tratado de maneira extremamente simples. Se a quantidade de água armazenada é maior que a ETP, então a evaporação real é igual à ETP, caso contrário, toda a água disponível evapora, independente da relação entre o volume armazenado e a capacidade de armazenamento.

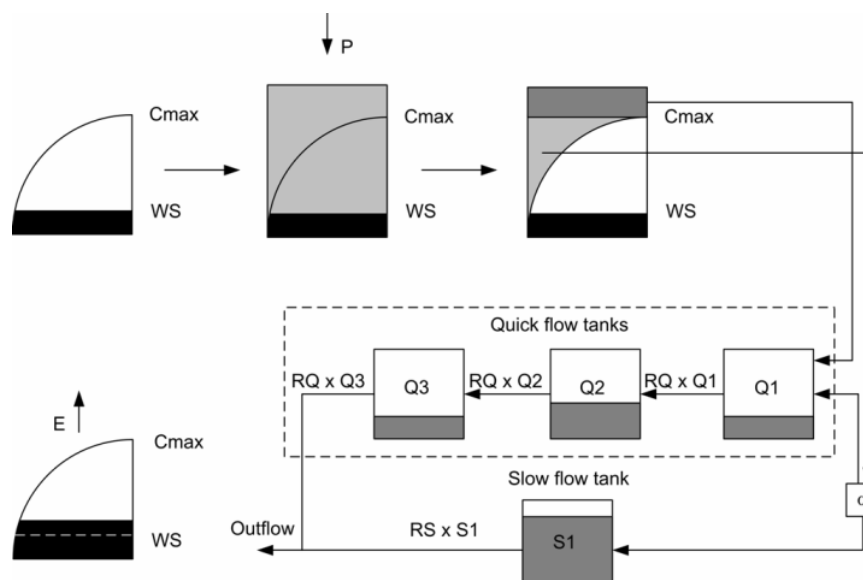


Figura 3 – Representação do modelo HYMOD (Barros *et al.*, 2007).

O presente modelo possui cinco parâmetros: 1. A capacidade máxima de armazenamento da bacia (C_{max}); 2. O grau de variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo (B); 3. O fator de distribuição do fluxo entre as duas séries de reservatórios (α); 4. O tempo de residência dos reservatórios lineares rápidos (RQ); 5. O tempo de residência do reservatório linear lento (RS).

5 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

5.1 – Dados utilizados

A seleção das bacias hidrográficas, e respectivos períodos de análise, foram baseados na disponibilidade de dados fluviométricos, não influenciados por reservatórios, e na disponibilidade de dados diários das variáveis meteorológicas utilizadas na estimativa da ETP, quais sejam, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, insolação, e velocidade do vento, provenientes das estações climatológicas do INMET.

Tendo em vista o número reduzido de estações climatológicas no Estado do Ceará, apenas 16, sendo 12 com dados de normais climatológicas, e o período relativamente reduzido de dados sem falhas, foi possível selecionar apenas quatro bacias hidrográficas, sendo duas com 12 anos

ininterruptos de dados, e duas com 6 anos. As bacias hidrográficas selecionadas, as 16 estações climatológicas do INMET, e as 3 estações climatológicas empregadas no estudo estão apresentadas na Figura 1.

A Tabela 2 apresenta as características destas bacias, incluindo a precipitação média anual no período analisado, a ETP com base na equação de Penman, e o índice de aridez. Pode-se notar que as quatro bacias selecionadas localizam-se em áreas distintas do ponto de vista climático. A bacia B1, localizada mais ao norte do Estado, próxima ao litoral, possui índice de aridez (UNEP, 1992) próximo à unidade, enquanto a bacia B2, não muito distante, mas um pouco mais ao sul, e portanto, mais distante do mar, possui um índice de aridez de 0,65. Já as outras duas bacias, B3 e B4, localizadas quase que totalmente no sertão central, possuem índice de aridez igual a 0,36. Desta forma, apesar do número reduzido de bacias neste estudo, as mesmas cobrem, de certa forma, diferentes níveis de aridez encontrados no estado.

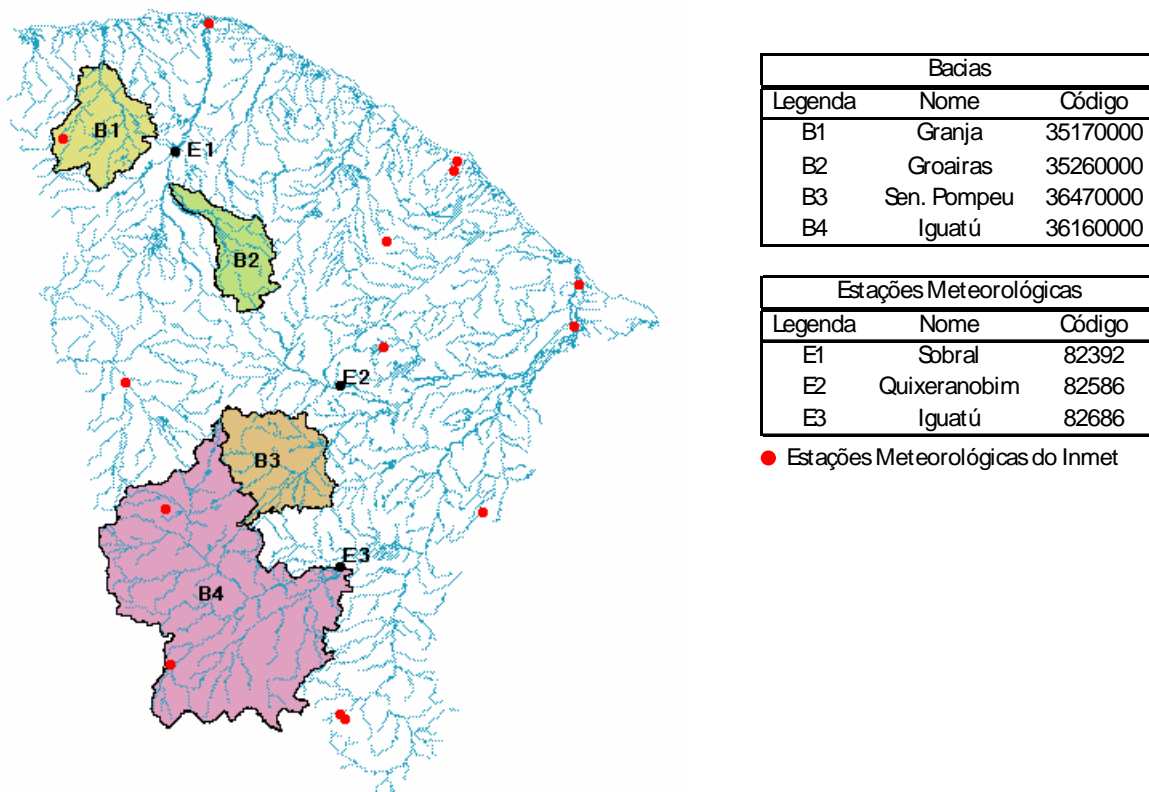


Figura 4 – Localização das bacias hidrográficas e estações meteorológicas.

Tabela 2 – Caracterização das bacias hidrográficas (ETP calculada pelo método de Penman)

Bacias	Área (km ²)	P (mm/ano)	ETP (mm/ano)	P/ETP	Periodo1	Periodo2	Est. Meteorológicas
B1 Granja	3979.8	1447.8	1458.3	0.99	1976-1978	1973-1975	E1 Sobral
B2 Groaíras	2817.1	945.4	1458.3	0.65	1976-1979	1973-1976	E1 Sobral
B3 Sen.Pompeu	4838.3	626.4	1736.2	0.36	1948-1953	1942-1947	E2 Quixeramobim
B4 Iguatú	20608.9	565.9	1591.1	0.36	1954-1959	1940-1945	E3 Iguatú

5.2 – Resultados e discussões

Esta seção começa com uma análise das diferenças encontradas entre as estimativas de ETP obtidas com os diferentes modelos apresentados na Tabela 1, assim como das diferenças entre os valores diários de ETP com base em dados diários de variáveis meteorológicas e aqueles baseados em dados das normais climatológicas.

A seção continua com a análise de sensibilidade do desempenho do modelo aos diferentes dados de ETP. Esta análise baseia-se nos resultados de validação obtidos para as quatro bacias hidrográficas apresentadas na Tabela 2, com dois períodos cada, totalizando oito períodos de validação. Duas abordagens foram empregadas na análise, identificadas como Tipos (I) e (II) na Seção 2. A análise Tipo (I) baseia-se em resultados de validação obtidos com parâmetros calibrados com dados do respectivo modelo de ETP. Na análise Tipo (II), os resultados de validação são baseados em rodadas do modelo que utilizam os parâmetros calibrados com o modelo de Penman para ETP.

5.2.1 – As estimativas de ETP

As estimativas de evapotranspiração diferem entre si principalmente com relação à variabilidade diária, verificando-se que os modelos mais complexos, Penman e Penman-Monteith, e até mesmo o de Priestley-Taylor, apresentam uma variabilidade diária bastante expressiva, enquanto os outros três modelos (Thornthwaite, Hargreaves e Oudin), baseados principalmente na temperatura, tendem a refletir apenas a sazonalidade intra-anual, com taxas de ETP mais elevadas no período de primavera-verão. Embora não tenha sido mostrado, os modelos baseados na temperatura tendem a superestimar a ETP em dias de chuva, onde a radiação não é tão intensa e a umidade do ar é mais alta, ambas variáveis que não são utilizadas nestes modelos.

A figura 5 apresenta valores diários de ETP para um dado ano na bacia B4, fazendo uma comparação do modelo de Penman com os demais modelos. O comportamento é o mesmo para as outras bacias. O que se observa (figura 5a) é que a ETP estimada pelo modelo da FAO/Penman-Monteith é sensivelmente maior que a de Penman entre os meses de setembro e dezembro. Nestes meses, a temperatura e, principalmente, o déficit de umidade são mais elevados. No caso do Estado

do Ceará, onde existem duas estações bem marcadas, uma úmida que vai de janeiro a junho, e uma seca no restante do ano, essa diferença observada entre Penman e Penman-Monteith nos meses de setembro-dezembro não devem ter qualquer consequência na hidrologia, visto que ao fim do período seco o solo já não contém mais umidade nenhuma e as vazões dos rios são nulas.

Existem diferenças significativas, a nível diário, das estimativas de ETP entre os diferentes modelos selecionados. Em tese, é de se esperar que estas diferenças sejam percebidas no desempenho do modelo hidrológico.

Como a Figura 5 apresenta valores diários de ETP num dos anos analisados, não é possível avaliar o grau de variação de ano para ano. Essa variação, que não é desprezível, pode ser observada na Figura 6, que mostra, além dos valores diários estimados ao longo do período estudado (pontos), a variação da ETP média (linha contínua) do período analisado e a ETP com base nas normais climatológicas, ambas baseadas na equação de Penman. Fica claro que a ETP estimada com base na climatologia, em que cada dia dentro de um mês tem o mesmo valor, é uma aproximação muito simplória da realidade.

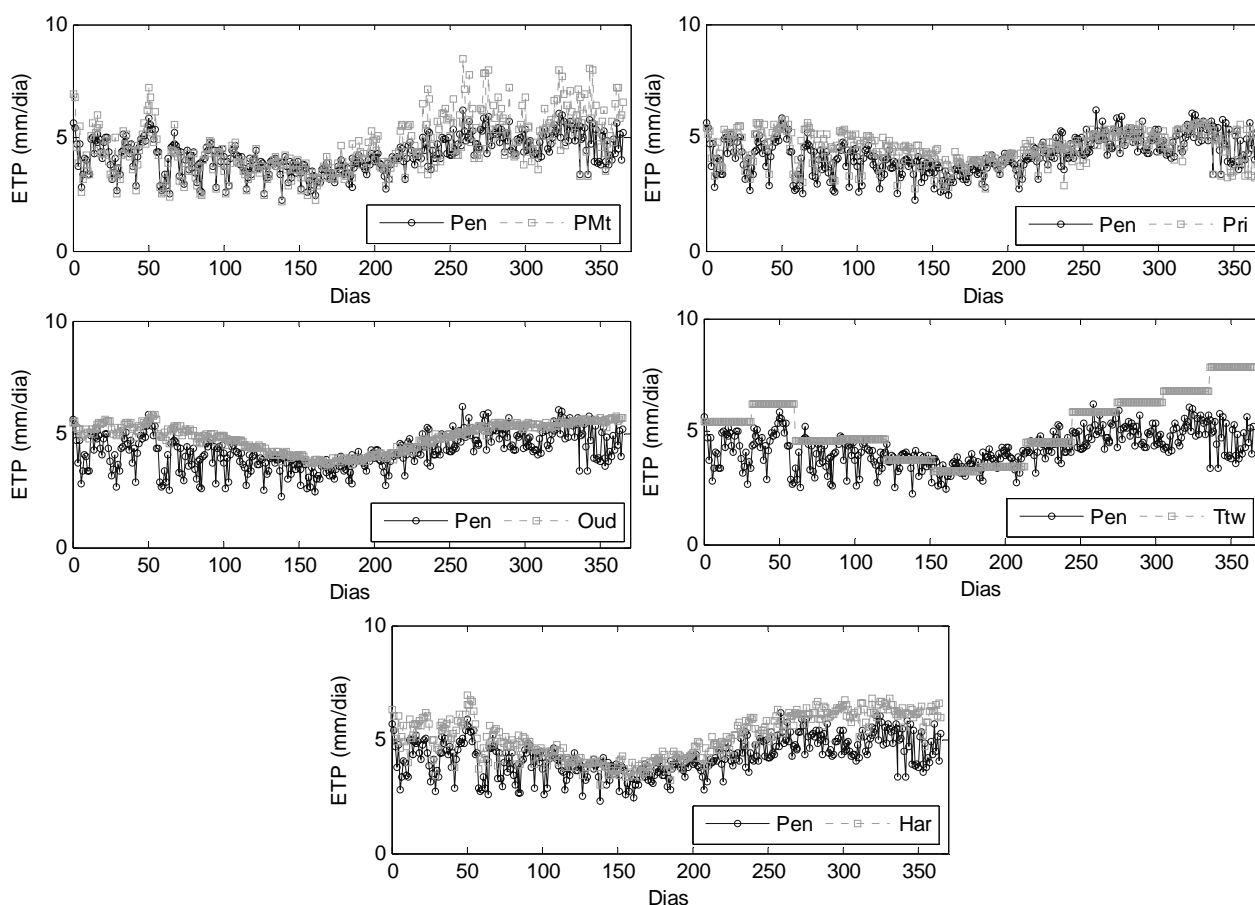


Figura 5 – Comparação entre a ETP estimada pelo modelo de Penman (Pen) e as estimadas pelos modelos Penman-Monteith (PMt), PriestlyTaylor (Pri), Thornthwaite (Ttw), Hargreaves (Har) e Oudin (Oud).

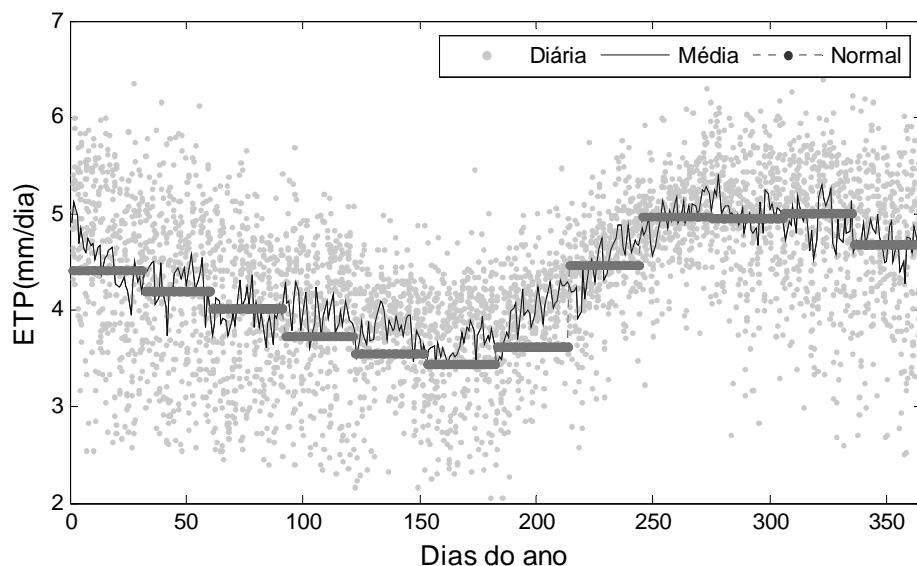


Figura 6 – ETP (Penman) diária na bacia B4 com base em valores diários de variáveis meteorológicas, na média do período analisado, e nas normais climatológicas.

5.2.2 – Eficiência do modelo hidrológico para diferentes modelos de ETP

A figura 7 apresenta o desempenho do modelo HYMOD, representado pela eficiência de Nash-Sutcliff nos períodos de validação, para as quatro bacias hidrográficas estudadas (dois períodos cada) e para cada modelo de ETP estimado a nível diário.

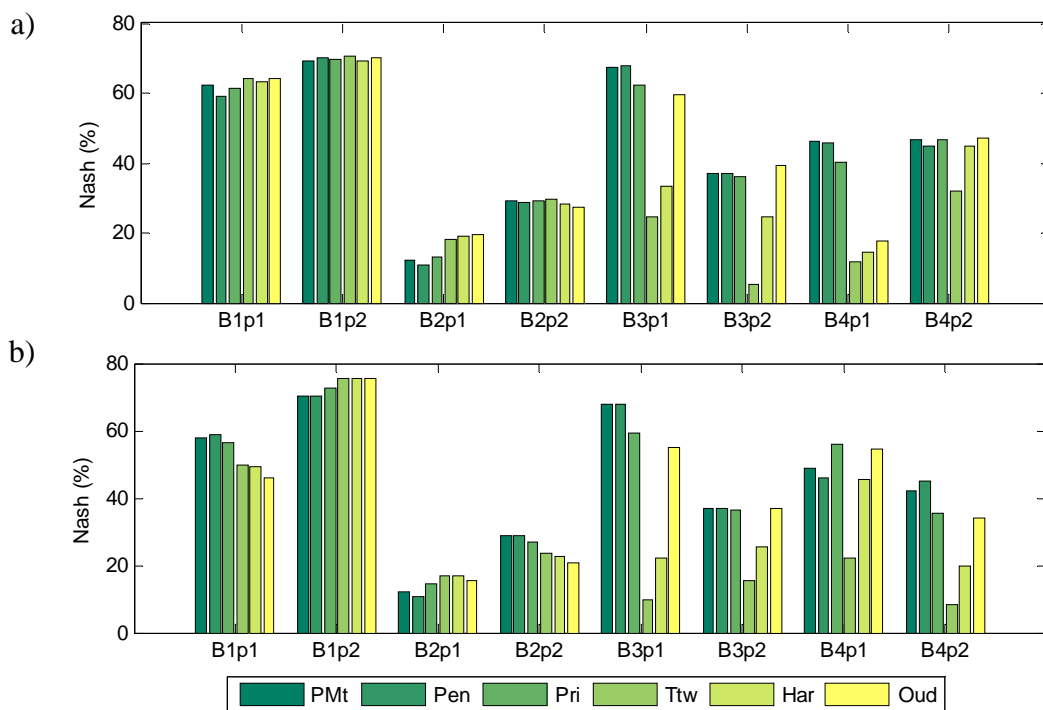


Figura 7 – Eficiência dos oito períodos de verificação (2 para cada bacia): a) análise Tipo (I); b) análise Tipo (II).

A Figura 7(a) ilustra os resultados da análise Tipo(I), quando o HYMOD é calibrado para cada modelo de ETP, enquanto a Figura 7(b) mostra os resultados da análise Tipo(II), quando a calibração de cada bacia é realizada com base no método de Penman.

Pode-se verificar claramente que a sensibilidade do modelo HYMOD aos dados de ETP varia de local para local. As bacias B1 e B2, com índices de aridez ($IA = P/ETP$) relativamente altos [indica baixa aridez (UNEP, 1992)], apresentam diferenças de desempenho pequenas entre os modelos de ETP, e isto vale para ambas as análises (Tipos I e II). Já nas bacias localizadas mais ao sul do Estado (B3 e B4), onde o índice de aridez é mais baixo (clima mais árido), as diferenças são mais significativas. Verifica-se que quando o HYMOD é alimentado com dados de ETP baseados apenas na temperatura, como Throntwhaite, Hargreaves e Oudin, seu desempenho é inferior. Isto mostra que em regiões mais áridas é importante incorporar dados de umidade do ar, e que a utilização de modelos mais simples de ETP pode gerar erros importantes na modelagem, questão já levantada por Brutsaert (1965) num estudo de evapotranspiração na República do Congo. De todo modo, mesmo nestas bacias mais áridas, o modelo de ETP proposto por Oudin *et al.* (2005) apresentou resultados similares aos de Priestley-Taylor, com exceção do primeiro período (p1) da bacia B4.

Portanto, não sendo possível a utilização dos modelos de Penman, Penman-Montieth, o modelo de Priestley-Taylor, que não depende nem da velocidade do vento, nem da umidade relativa do ar, deveria ser utilizado. Entretanto, nos casos onde apenas a temperatura do ar está disponível, os resultados indicam que o modelo proposto por Oudin *et al.* (2005) é um forte candidato para estimar a ETP, especialmente em regiões mais áridas.

A Figura 8 fornece, através de um gráfico Boxplot, um resumo da comparação de desempenho do modelo HYMOD quando alimentado com os seis modelos de ETP. Como no caso da Figura 7, a parte de cima está relacionada com a análise Tipo (I), enquanto a parte de baixo com a análise Tipo (II). Pode-se observar claramente um desempenho melhor, e praticamente similar, dos modelos Penman-Montieth, Penman, e Priestley-Taylor, este último com um rendimento um pouco abaixo do primeiro. Os modelos baseados apenas na temperatura apresentaram desempenho pior, embora o modelo de ETP proposto por Oudin tenha tido desempenho próximo ao modelo de Priestley-Taylor.

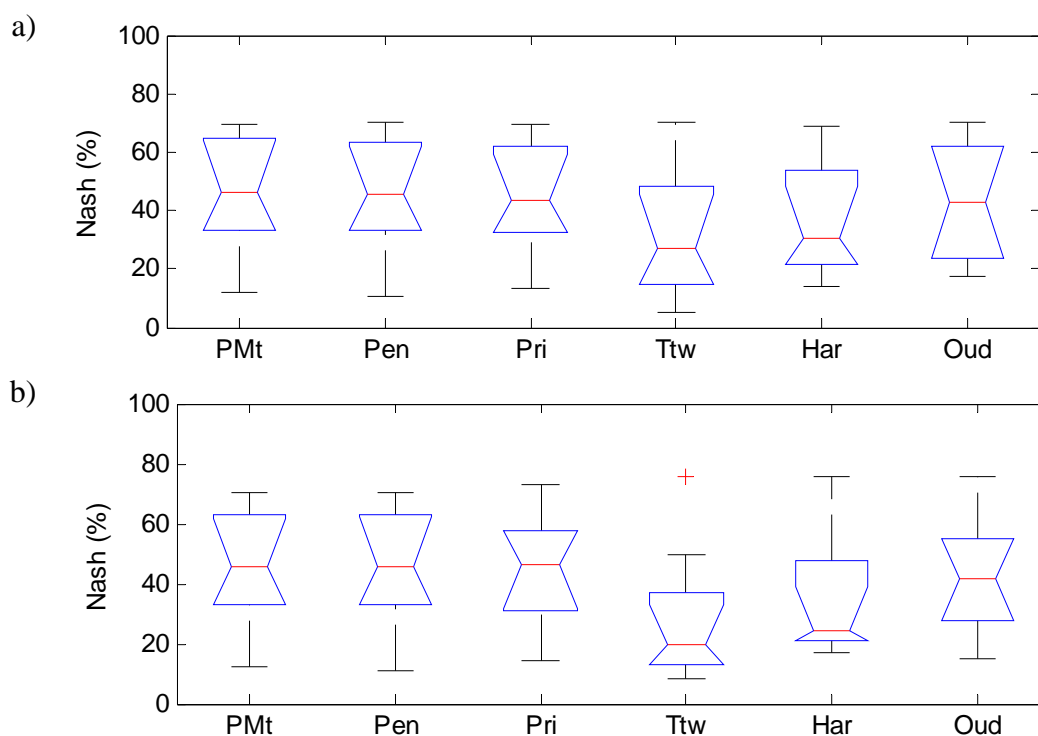


Figura 8 – Boxplot da eficiência na verificação (Nash): a) análise Tipo (I); b) análise Tipo (II).

5.2.3 – Efeito da escala temporal da estimativa de ETP

Até aqui as comparações foram realizadas com base em dados diários de variáveis meteorológicas. Entretanto, uma pergunta importante de ser respondida é se o desempenho do modelo é substancialmente prejudicado caso o mesmo seja alimentado com dados de ETP baseados em médias de longo período das variáveis meteorológicas, como por exemplo, com base nas Normais Climatológicas fornecidas pelo INMET.

Para facilitar a interpretação da sensibilidade do modelo HYMOD à escala temporal das variáveis meteorológicas empregadas para estimar dados diários de ETP, os resultados apresentados adiante se limitam àqueles obtidos com o modelo de ETP proposto por Penman (1948).

As Figuras 8(a) e 8(b) apresentam os resultados do desempenho do modelo HYMOD quando alimentado com dados diários de ETP (Penman) baseados em (1) valores diários (PenD) das variáveis meteorológicas, (2) numa média mensal dos anos analisados (PenM), e (3) nas normais climatológicas (PenN) fornecidas pelo INMET, para as análises Tipo (I) e Tipo (II), respectivamente. Observa-se claramente que não há praticamente diferença entre os valores de Nash-Sutcliffe para os períodos de validação. Estes resultados corroboram estudos anteriores (Oudin, 2005), mas não deixam de ser surpreendentes, e certamente levantam uma série de questionamentos em relação à maneira pela qual modelos conceituais do tipo chuva-vazão estimam a evapotranspiração real de uma bacia. A Figura 6, que apresenta uma comparação entre valores diários de ETP baseados em dados diários de variáveis meteorológicas e valores de ETP baseados

nas normais climatológicas, mostra claramente que há diferenças importantes entre as duas séries, de modo que é desconcertante, do ponto de vista da modelagem hidrológica, verificar que o modelo HYMOD, pelo menos para estes casos, seja praticamente insensível a estas diferenças.

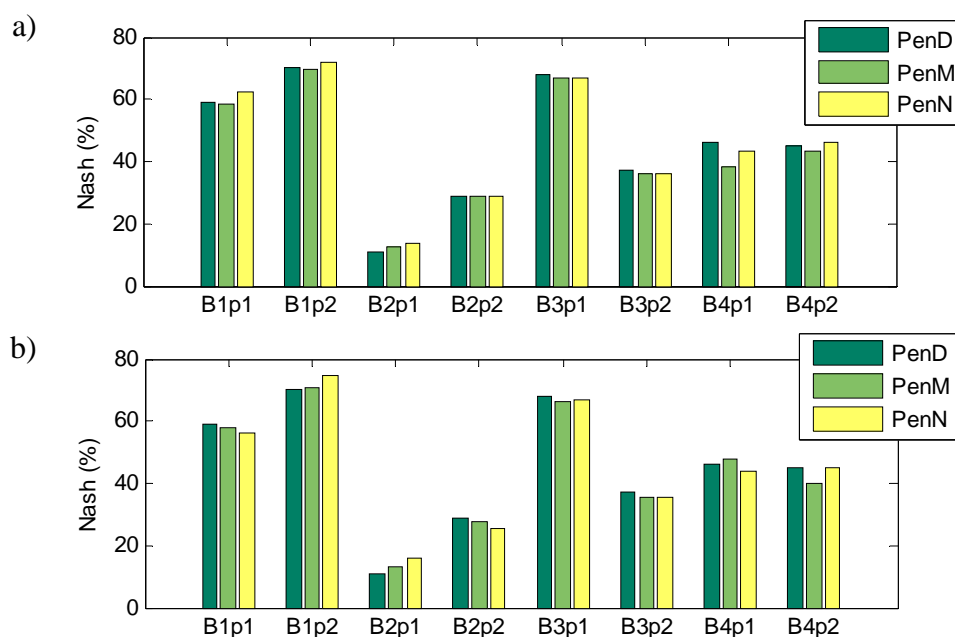


Figura 9 – Eficiência dos oito períodos de verificação utilizando o modelo de evapotranspiração de Penman diário (PenD), médio mensal (PenM) e normal (PenN): a) avaliação tipo I; b) avaliação tipo II.

6 – CONCLUSÕES

Este artigo investiga a sensibilidade do desempenho do modelo hidrológico HYMOD aos dados de ETP. Seis modelos de ETP (Penman, Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Thortwhaite, HArgreaves, Oudin) foram empregados num estudo de análise de sensibilidade em quatro bacias hidrográficas localizadas no Estado do Ceará, com dois períodos de dados cada, totalizando oito períodos de validação. As bacias hidrográficas estudadas estão localizadas em diferentes regiões do estado, com diferentes características climáticas, representadas pelo índice de aridez. Além da análise em relação a diferentes modelos de ETP, o artigo também avalia as diferenças em termos de desempenho do modelo quando alimentado com estimativas diárias de ETP baseadas em (1) dados diários de variáveis meteorológicas, (2) em médias mensais calculados com base no período de dados utilizados no estudo, e (3) nas normais climatológicas fornecidas pelo INMET.

Os resultados mostraram que para bacias localizadas mais ao norte do Estado, onde os índices de aridez não são tão baixos (clima não tão árido), as diferenças, em termos de eficiência em representar as vazões observadas no período de validação, foram apenas marginais. Entretanto, diferenças significativas foram encontradas nas bacias localizadas mais ao sul do Estado, em áreas onde o índice de aridez é baixo (clima mais árido). Nestes casos, os valores de Nash-Sutcliff do modelo HYMOD foram consideravelmente menores quando alimentados com dados de ETP

obtidos de modelos baseados apenas na temperatura, como Thornwhaite, Hargreaves e Oudin. Estas diferenças se dão pela incapacidade destes modelos em considerar o poder evaporante do ar. Durante dias de chuva, quando a atmosfera se encontra mais úmida, e a radiação líquida disponível é menor, estes modelos tendem a superestimar a ETP. De todo modo, dentre os modelos mais simples de ETP, o proposto por Oudin (2005) foi o que apresentou os melhores resultados, similares àqueles obtidos pelo modelo Priestley-Taylor. Como era de se esperar, os melhores resultados foram obtidos com os modelos Penman e Penman-Montieth, embora, como já mencionado anteriormente, as diferenças foram apenas marginais em duas das quatro bacias analisadas.

Além disso, verificou-se que o modelo HYMOD é insensível às perdas de informação em relação à ETP quando se alimenta o mesmo com dados de ETP baseados nas normais climatológicas. Estes resultados, baseados no modelo Penman para ETP, foram observados nas quatro bacias estudadas, e em todos os períodos analisados. Este resultado, embora corrobore estudos anteriores (Oudin, 2005; Calder et al, 1983), é bastante surpreendente levando-se em consideração as diferenças evidentes entre a ETP diária baseada em dados diários de variáveis meteorológicas e a ETP baseada nas normais climatológicas. Estes resultados indicam uma necessidade de se discutir mais a fundo a maneira pela qual modelos conceituais do tipo chuva-vazão empregam os dados de ETP para estimar a evapotranspiração real na bacia de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto “Uso de Previsão de Cheias com Base em Modelos Atmosférico-Hidrológicos na Operação Otimizada de Curto Prazo de Reservatórios”, Edital UNIVERSAL, e à FINEP pelo financiamento do projeto REPENTE, Chamada Pública 14/2006, cujos recursos foram parcialmente empregados neste estudo.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D., SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, 300 pp.
- ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C. (2004). “*Impact of Imperfect Evapotranspiration Knowledge on the Efficiency and Parameters of Watershed Models*”. Journal of Hydrology, 286, pp 19-35.
- BARROS, F.V.F.; MARTINS, E.S.P.R.; NASCIMENTO, L.S.V.; REIS, D.S. JR. (2007). “*Calibração de Modelos Hidrológicos Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo*”. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo – SP.

- BOUCHET, R.J. (1963). “*Evapotranspiration Reelle, Evapotranspiration Potentielle, et Production Agricole*”. *Ann. Agron.*, 14, pp. 743-824.
- BRUTSAERT, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press, New York, 645 p.
- BRUTSAERT, W. (2006). “*Indications of Increasing Land Surface Evaporation During the Second Half of the 20th Century*”. *Geophysical Research Letters*, 33, L20403, doi: 10.1029/2006GL027532.
- BRUTSAERT, W.(1965).“*Evaluation of Some Practical Methods of Estimating Evapotranspiration in Arid Climates at Low Latitudes*”. *Water Resources Research*, 1(2), pp 187-191.
- BRUTSAERT, W.; PARLANGE, M.B. (1998). *Hydrologic Cycle Explains the Evaporation Paradox*. *Nature*, 396, 30.
- BRUTSAERT, W.; STRICKER, H. (1979). “*An Advective-aridity Approach to Estimate Actual Regional Evaporation*”. *Water Resources Research*, 15, pp 443-450.
- CALDER, I.R.; HARDING, R.J.; ROSIER, P.T.W. (1983). “*An Objective Assessment of Soil-Moisture Deficit Models*”. *Journal of Hydrology*, 60, pp 329-355.
- FOWLER, A. (2002). “*Assessment of the Validity of Using Mean Potential Evaporation in Computations of the Long-term Soil Water Balance*”. *Journal of Hydrology*, 256, pp 248-263.
- HOBBINS, M.T.; RAMIREZ, J.A.; BROWN, T.C. (2001). “*The Complementary Relationship in Estimation of Regional Evapotranspiration: An Enhanced Advective-aridity Model*”. *Water Resources Research*, 37(5), pp 1389-1403.
- KAHLER, D.M.; BRUTSAERT, W. (2006). “*Complementary Relationship Between Daily Evaporation in the Environment and Pan Evaporation*”. *Water Resources Research*, 42, W05413, doi: 10.1029/2005WR004541.
- KIRCHNER, J.W. (2006). “*Getting the Right Answers for the Right Reasons: Linking Measurements, Analyses, and Models to Advance the Science of Hydrology*”. *Water Resources Research*, 42, W03s04, doi:10.1029/2005WR004362.
- KLEMES, V. (1986). “*Dilettantism in Hydrology: Transition or Destiny?*”. *Water Resources Research*, 22(9), pp 177S-188S.
- LOUDIN, L.; MICHEL, C.; ANCTIL, F (2005a). “*Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall-runoff Model? Part1 – Can Rainfall-runoff Models Effectively Handle Detailed Potential Evapotranspiration Inputs?*”. *Journal of Hydrology*, 303, pp 275-289.
- LOUDIN, L.; HERVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F.; LOUMAGNE, C. (2005b). “*Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall-runoff Model? Part2 – Towards a Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall-runoff Modelling*”. *Journal of Hydrology*, 303, pp 290-306.

- PARLANGE, M.B.; KATUL, G.G. (1992). “*An Advective-aridity Evaporation Model*”. Water Resources Research, 28(1), pp 127-132.
- PARMELE, L.H. (1972). “*Errors in Output of Hydrologic Models Due to Errors in Input Potential Evapotranspiration*”. Water Resources Research, 8 (2), pp 348-359.
- PATUREL, J.E.; SERVAT, E.; VASSILIADIS, A. (1995). “*Sensitivity of Conceptual Rainfall-runoff Algorithms to Errors in Input Data – Case of the GR2M Model*”. Journal of Hydrology, 168, pp 111-125.
- PENMAN, H.L. (1948). “*Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass*”. In Proceedings of the Royal Society of London, 193, pp. 120-145.
- PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. (1972). “*On the Assessment of Surface Heat Fluxes and Evaporation Using Large-scale Parameters*”. Monthly Weather Review, 100, pp. 81-92.
- THORNTHWAITE, C.W. (1948). “*An Approach Toward a Rational Classification of Climate*”. Geographical Review, 38, pp. 55-94.
- UNEP (1992). *World Atlas of Desertification*. Hodder Arnold Publication; 2 edition, 182pp.
- VÁZQUEZ, R.F.; FEYEN, J. (2003). “*Effect of Potential Evapotranspiration Estimates on Effective Parameters and Performance of the MIKE SHE-code Applied to a Medium-size Catchment*”. Journal of Hydrology, 270, pp 309-327.
- XIAOYING L; ERDA, L. (2005). “*Performance of the Priestley-Taylor Equation in the Semiarid of North China*”. Agricultural Water Management, 71, pp 1-17.