

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MODELO DISTRIBUÍDO PARA A BACIA DO RIO PIANCÓ - PB

Eduardo E. de Figueiredo ¹ Paulo Lima Lopes ² Vajapeyam S. Srinivasan ¹

Resumo: A maioria dos modelos hidrológicos de simulação necessitam uma calibração dos parâmetros. Uma vez que os parâmetros do modelo estejam calibrados, realiza-se então a validação dos mesmos. Um exemplo típico da validação consiste na divisão dos dados de vazão em duas séries, em que uma é utilizada para a calibração dos parâmetros e outra para a validação dos parâmetros calibrados através da simulação da série não utilizada na calibração. Neste trabalho, um modelo distribuído, NAVMO, foi calibrado para a bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB, e validado através de quatro procedimentos distintos: um baseado na divisão da série em duas partes, outro baseado no uso de parâmetros médios usados para simular uma série longa, outro com base nas condições de chuvas nos dois anos antecedentes e, finalmente, outro com base em diferentes divisões da bacia hidrográfica. A utilização dos parâmetros calibrados para a simulação da vazão nos quatro casos mostrou resultados bastante semelhantes, reforçando a robustez do modelo e sua capacidade de simular a vazão com bons resultados.

Abstract: The majority of hydrological models require calibration of their parameters. Once the parameters of a model are calibrated, a validation process becomes necessary. A typical example of validation is the splitting of sample data in two time series, of which one is used for the parameter calibration and the other for the parameter validation through the simulation of the series not used in the calibration. In this study, a distributed hydrological model, NAVMO, was calibrated for the Piancó River basin, located in Paraíba state, and was validated through four different procedures: one based on the split sample, a second based upon the use of averaged parameters to simulate the whole series, the third based upon the 2-year antecedent rainfall conditions, and, finally, the fourth one based on changing the discretization scheme of the catchment. The results obtained were similar with the use of the calibrated parameters for simulating the flow in all cases, suggesting the robustness of the model and its ability to simulate the runoff well.

Palavras Chave: Modelo Hidrológico, Parâmetros, Calibração e Validação.

¹ Prof. Ajuento (eefigu@rechid.ufpb.br), Prof. Titular (srinivas@rechid.ufpb.br), DEC/CCT/UFPB, Caixa Postal 505, CEP 58109-970, Campina Grande, PB

² Mestre, Eng. Civil, UFAL-AL

INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos tem sido, de um modo geral, desenvolvidos com a finalidade de prever ou simular o escoamento. Para tanto, necessita-se que o modelo represente bem as diversas interações e vários processos na bacia hidrográfica através de uma boa simulação do hidrograma gerado pelos eventos de precipitação. Naturalmente, todos os modelos não possuem a capacidade de levar em consideração essas interações explicitamente, como por exemplo os modelos do tipo caixa preta (O'Connel, 1991; Figueiredo, 1998). Contudo, independentemente da natureza do modelo e da sua estrutura, se faz necessário, a priori, que os parâmetros envolvidos sejam devidamente calibrados. Isso implica na obtenção de melhores estimativas dos parâmetros, que, quando aplicados para a previsão, fornecem bons resultados.

Pode-se dizer, no entanto, que um modelo nunca poderia ser, de fato, considerado validado uma vez que a previsão pressupõe as ocorrências futuras que não são conhecidas. Para suprir essa deficiência, os modelos são, em geral, calibrados para um período de tempo e validados para outro, porém dentro da série histórica que já é conhecida. Outros procedimentos como de Klemes (1986) e Sorooshian and Gupta (1995) também podem ser usados para a validação dependendo do objetivo a alcançar tais como o uso do modelo, com parâmetros calibrados para uma área, e utilizados para a simulação de outra área hidrologicamente homogênea. Isso implicaria na transposição dos parâmetros do modelo que não pode ser feita livremente sem que o mesmo seja devidamente validado em todos os seus aspectos, como por exemplo na simulação de alterações do uso do solo, onde se tenta verificar a capacidade do modelo em simular as novas condições físicas da bacia. Questões tanto filosóficas quanto práticas, ligadas aos modos de calibração e validação de modelos hidrológicos, são frequentemente levantadas na literatura (Refsgaard and Storm, 1996).

No presente trabalho, um modelo distribuído, NAVMO, foi calibrado para a bacia do Rio Piancó, localizada na região semi-árida do Estado da Paraíba, e validado através de quatro procedimentos diferentes. São apresentados a seguir os procedimentos utilizados, resultados obtidos e as conclusões sobre a adequação do modelo para as condições semi-áridas do Nordeste.

A ÁREA DO ESTUDO

A bacia do Rio Piancó foi selecionada para a aplicação do modelo por situar-se em uma região de grande importância agro-pecuária para o Estado da Paraíba, no Alto Sertão. A mesma é uma sub-bacia do Rio Piranhas, e um modelo eficiente de simulação do escoamento permitiria uma melhor quantificação e avaliação de seus recursos hídricos. Sua importância torna-se ainda maior pelo fato de que esta bacia, localizada à montante da estação fluviométrica Piancó, drena para o complexo de mananciais Coremas - Mãe D'água, com múltiplos usos. O relevo da bacia apresenta-se mais acentuado nas encostas formadoras, com altitudes até 1000 m, contudo a altitude média

da bacia é da ordem de 400 m. As declividades, observadas no perfil do leito do rio, mostraram uma magnitude de 25 m/km nas partes altas da bacia, 1,24 m/km na parte mais baixa e uma declividade de 2,8 m/km na parte média da bacia. A Caatinga é a vegetação predominante na bacia, sendo que em algumas partes há ocorrência de vegetação mais densa. Os solos da região são embasados por rochas do complexo cristalino brasileiro. Na região próxima a cidade de Piancó há ocorrência de solo bruno não cálcico, enquanto em outros locais surgem manchas de solo podzólico vermelho - amarelo eutrófico (Brasil, 1972). Em geral, a permeabilidade é baixa. O clima é semi-árido, característico da região da bacia, com temperaturas médias anuais superiores a 25 C, com chuva média anual da ordem de 850 mm e evaporação potencial média da ordem de 2000 mm (Jaccon, 1982).

A bacia tem área de 4550 km² e tem na seção de referência em Piancó as coordenadas 7°12' de latitude e 37°56' de longitude. A Figura 1 mostra a bacia hidrográfica do alto Piranhas, onde se localiza a bacia hidrográfica do Rio Piancó.

O MODELO NAVMO

O modelo NAVMO foi desenvolvido no Instituto de Recursos Hídricos da Universidade de Bundeswehr, Munique, Alemanha (Kleeberg et al., 1989). As primeiras aplicações no Brasil foram apresentadas por Figueiredo et al. (1991; 1993). Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada em Lima (1994).

O modelo é diário, conceitual e distribuído e considera o sistema da bacia através de uma divisão da mesma em sub-bacias de produção e trechos de acompanhamento do fluxo. A precipitação é transformada no escoamento total em cada sub-bacia. A vazão total é a soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, os quais são controlados por dois sistemas de reservatórios: um superficial e outro sub-superficial. O escoamento subterrâneo é controlado por uma função de transformação do excesso de água proveniente do reservatório sub-superficial. O método da curva número (CN) do Serviço de Conservação do Solo - SCS (McCuen, 1982) é usado para avaliar o armazenamento de água nos reservatórios do sistema, o qual é associado às condições do solo e do seu uso, sendo apropriado, portanto, para uma avaliação das alterações ocorridas na bacia. A Figura 2 mostra a estrutura e os processos considerados no modelo. Vários métodos alternativos de cálculo são possíveis de serem utilizados pelo modelo, para o cálculo da precipitação média nas sub-bacias, para o acompanhamento do escoamento na calha do rio, e para uma investigação da qualidade dos resultados obtidos. As metodologias do modelo de transformação do escoamento não serão apresentadas aqui, mas podem ser encontradas em Figueiredo et al (1991) e em Srinivasan et al (1996). É possível também considerar a influência de reservatórios presentes na bacia.

O modelo NAVMO tem treze (13) parâmetros que estão associados aos processos de transformação da precipitação no escoamento total na saída da sub-bacia. São eles: ALFA (fator usado no cálculo do escoamento direto), EET (fator usado no cálculo da evaporação real), BETA (fator usado no cálculo do escoamento sub-superficial), MET1 e MAX1 (tempo para atingir o pico e tempo de base do escoamento direto), MET2 e

MAX2 (tempo para atingir o pico e tempo de base do escoamento sub-superficial), K (usado para o cálculo do escoamento subterrâneo), EKM, EKL e EKR (fatores usados no cálculo da velocidade de fluxo no leito principal e nos planos de inundação do trecho de rio), QBSP (vazão de base inicial) e BFD (deficit de umidade inicial do solo). Os treze parâmetros acima descritos podem ser calibrados manual ou automaticamente. O modelo ainda requer um valor da curva número (CN) para cada sub-bacia, que deve ser definido de acordo com o grupo de solos e usos na sub-bacia.

CALIBRAÇÃO DO MODELO

Dados de Entrada do Modelo

Inicialmente, foi feito um levantamento geral de dados climatológicos disponíveis sobre a bacia do Alto Piranhas, limitada pela Estação fluviométrica de Sítio Vassouras, para uma avaliação geral dos mesmos. Com o levantamento prévio, a partir dos inventários e mapas, foram selecionados dados básicos constando no banco de dados da SUDENE, de vários postos pluviométricos e fluviométricos. Dos postos na região, foram selecionados 16 postos (Piancó, Itaporanga, Ibiara, Bom Jesus, Princesa Isabel, Nova Olinda, Conceição, Bonito de Santa Fé, São Boa Ventura, Garrotes, Jurú, Fátima, Manaíra, Serra Grande e Quixaba) com pelo menos 20 anos de dados diários, correspondendo ao período 1963 a 1985. A escolha deste período deve-se ao fato de que a bacia não apresentava interferência significativa à montante da estação de Piancó. Os dados de vazões médias diárias do posto de Piancó, que foram utilizados, também referem-se ao período de 1963 a 1985. Os dados de evaporação utilizados são da estação de São Gonçalo.

Utilizando mapas na escala 1:100.000, foi feita a sub-divisão da bacia do Rio Piancó. Inicialmente a bacia foi subdividida em 26 sub-bacias, com áreas variando entre 28,91 km² e 529,8 km², e 11 trechos de propagação do fluxo. A figura 3 mostra as sub-unidades da bacia em estudo. Todos os dados não disponíveis sobre a calha do Rio Piancó foram admitidos com base nas informações cartográficas. Com base em informações da literatura (Chow, 1975), também foram admitidos os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler ($1/n$), para o leito e para os planos de inundação do rio principal. Para a determinação das áreas, comprimento de trechos de rios, das cotas de montante e jusante, declividade média das sub-bacias e as coordenadas de seus centróides, foram utilizados os dados disponíveis nos mapas topográficos de escala 1:100.000. As tabelas 1 e 2 mostram todos os dados referentes aos trechos de rios e sub-bacias consideradas na aplicação do modelo. Os valores de CN foram determinados considerando-se o grupo hidrológico de solo A, alta permeabilidade (Lopes, 1994), por ponderação em relação a área dos vários usos do solo para cada sub-bacia. Muitos valores CN, no entanto, foram admitidos ou mesmo calibrados por não se conseguir uma associação direta com aqueles indicados na literatura, sendo o caso típico da Caatinga.

Calibração dos Parâmetros

Neste trabalho foi usado o método da tentativa e erro para a calibração dos parâmetros do modelo. Numa primeira etapa foram identificados aqueles parâmetros que não afetaram significativamente os resultados quando sujeitos às alterações substanciais e, portanto, foram fixados. Foram eles: MET2, MAX1, MAX2, KG, EKM, EKR, EKL, BETA, BFD e QBSP. O critério de calibração por tentativa e erro apresenta a vantagem do acompanhamento pelo hidrólogo de cada passo da calibração, enquanto uma calibração automática apresenta a vantagem do ganho de tempo e eliminação da subjetividade no processo. Nesta fase da calibração, o melhor ajuste foi baseado no critério da semelhança dos hidrogramas observados e calculados. No entanto, outros critérios quantitativos podem também ser utilizados, tais como a comparação entre os volumes anuais e as vazões máximas observadas e calculadas pelo modelo, porém nesta fase da calibração os mesmos não foram utilizados. A Figura 4 mostra a comparação entre os hidrogramas calculados e os observados para dois anos típicos (1979 e 1983).

No início observou-se que seria gasto muito tempo no processo de calibração se todo o período (20 anos) fosse considerado. Além disto, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Foi adotado, então, o procedimento de se calibrar os parâmetros do modelo ano a ano, considerando-se o período de ocorrência do escoamento, que normalmente ocorre entre Janeiro e Junho. Com o procedimento da calibração ano a ano, começaram a surgir os resultados positivos. A partir dos parâmetros obtidos com este procedimento, foram calculados os valores médios dos parâmetros. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para o período 1964 a 1983. Os anos de 1966, 1969, 1970 e 1976 não puderam ser calibrados com sucesso devido a baixa qualidade dos dados. Os resultados do ajuste, obtidos durante a calibração em termos do erro percentual da estimativa de volumes e vazões máximas anuais são indicados na Tabela 4. Foram utilizados os primeiros 15 anos de dados para a calibração do modelo. Apesar disto, os últimos 5 anos (1979-1983) foram também calibrados, ano a ano, para uma comparação posterior com os parâmetros globais para os 15 anos. Por esta razão, as Tabelas 3 e 4 apresentam os valores como se todo o período tivesse sido usado para a calibração.

Validação dos Parâmetros Calibrados

O processo de validação consistiu de quatro métodos distintos. O primeiro foi a utilização dos parâmetros médios dos primeiros 15 anos da série (1964 a 1978), mostrados na Tabela 3, para simular o escoamento dos 5 últimos anos (1979 a 1983). Nesta etapa, os escoamentos foram simulados para todo o período de 5 anos. A Tabela 4 mostra o erro percentual da estimativa dos volumes e vazões máximas anuais (Validação 1).

O segundo método de validação foi feito de modo global, ou seja, simulou-se os 20 anos (1964 a 1983) utilizando-se os parâmetros médios de todos os anos que puderam ser calibrados (Tabela 3). A Tabela 4 mostra os resultados das simulações na forma do erro percentual da estimativa do volume anual e vazão máxima.

O terceiro método foi uma tentativa de se considerar os efeitos da grande variabilidade pluviométrica inter anual da região, com anos secos, úmidos e normais. Para se encontrar os conjuntos de parâmetros para simular esses anos considerados secos, úmidos ou normais, foi estabelecido um índice pluviométrico (I) a partir de dados de três anos consecutivos, cada ano com um peso distinto sendo a soma dos pesos igual a unidade. Incluindo o ano corrente, nos três anos consecutivos, foram atribuídos os pesos de 0,2 para o ano corrente, de 0,5 para o ano imediatamente anterior e de 0,3 para o segundo ano antecedente. Dividindo a soma ponderada das precipitações dos três anos pela chuva média do período de dados chegou-se a um índice I. Com este procedimento, três faixas foram determinadas: faixa A, com índice $I < 0,9$, para os anos secos (1980, 1981, 1982, 1983), faixa B para os anos normais, $0,9 < I < 1,1$ (1967, 1973, 1977, 1978, 1979) e a faixa C, para os anos úmidos, com índice $I > 1,1$ (1964, 1965, 1968, 1971, 1972, 1974, 1975). Uma vez identificadas as faixas e os anos que nela se enquadraram, a simulação do escoamento foi feita para cada ano da faixa, utilizando-se os parâmetros médios desses anos. Sendo assim, os parâmetros médios dos valores da calibração dos anos 1980 a 1983, por exemplo, foram usados para simular cada um desses anos individualmente. A Tabela 4 mostra os resultados das simulações na forma do erro da estimativa dos volumes e vazões máximas anuais.

A quarta etapa de simulação consistiu de uma verificação da sensibilidade do modelo ao processo de sub-divisão da bacia. A sub-divisão considerada para a calibração dos parâmetros foi de 26 sub-bacias. Duas outras alternativas foram testadas: uma com 15 sub-bacias e uma outra com 28 sub-bacias. Para a simulação nestas condições, foram utilizados os parâmetros já calibrados para cada um dos anos individualmente. Nove anos foram escolhidos arbitrariamente para a simulação: 1964, 1973, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1982 e 1983. A Tabela 5 mostra uma comparação entre as vazões máximas e os volumes anuais dos escoamentos calculados e observados para as três sub-divisões consideradas.

Os resultados obtidos com os quatro métodos de validação são mostrados nas Figuras 5 a 8 em termos dos hidrogramas simulados e observados.

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Estrutura do Modelo

De acordo com os resultados obtidos, tanto na fase de calibração quanto na de validação do modelo (Tabelas 3 a 5), a estrutura do modelo NAVMO pode ser considerada bastante satisfatória por apresentar bons resultados tanto na distribuição da

vazão quanto nos valores extremos, quando comparados com os valores observados. Para a região estudada o modelo NAVMO provou ser bastante eficiente.

Possuindo dois componentes básicos (simulação da bacia e simulação do rio ou canal), o modelo NAVMO, que admite a variação das condições nas suas sub-bacias, se torna um modelo mais flexível visto que apenas dentro de cada segmento é admitida a homogeneidade espacial da precipitação, da infiltração e do escoamento superficial. Esta divisão permite ainda separar as áreas segundo não somente o critério de distribuição espacial da precipitação, mas também das características físicas como cobertura vegetal, declividade, tipo do solo etc. Sendo um modelo diário, que usa o método da curva número (CN) para avaliar o armazenamento de água nas diversas zonas da bacia, permite uma avaliação direta da ligação entre o tipo de solo, cobertura vegetal e a umidade na zona superficial da bacia. A experiência demonstra que uma boa compreensão desta ligação é fundamental para a modelagem hidrológica.

Sensibilidade dos parâmetros do modelo

Conforme a tabela 3 (Parâmetros calibrados), os anos 1966, 1969, 1970 e 1976 não foram calibrados devido ou a falta ou a qualidade dos dados. Analisando os parâmetros calibrados por tipo de ano (secos, úmidos ou normais), observa-se um comportamento bastante coerente com a situação física correspondente. O parâmetro ALFA (do reservatório superficial) em geral, apresenta maior influência no escoamento superficial do que o parâmetro da evaporação (EET) nos anos úmidos. Nos anos secos, ocorre o inverso, ou seja, EET é mais influente do que ALFA. O parâmetro BETA (do reservatório sub-superficial) não apresentou grande influência nos escoamentos calculados, o que era de esperar devido aos solos da bacia serem rasos e de baixa permeabilidade. O parâmetro QBSP foi adotado igual a zero devido a calibração e simulação terem sido feitas no final de um longo período de estiagem, sem nenhuma contribuição do escoamento de base que de fato é muito pequeno nas regiões semi-áridas. Também para confirmar a pouca influência do escoamento de base no escoamento total, o parâmetro KG, usado para o cálculo do escoamento subterrâneo, não apresentou grandes influências na maioria dos anos devido a pouca permeabilidade do solo da bacia estudada. O parâmetro que define o deficit de umidade inicial (BFD) foi fixado em 95%, pelas mesmas razões anteriores, ou seja que o solo estaria quase seco no início do período chuvoso. Contudo, verificou-se que uma mudança deste valor para 85% implicaria numa variação significativa nas vazões. Dos parâmetros do hidrograma, apenas MET1 (tempo para atingir o pico do hidrograma superficial) foi calibrado. Os resultados mostram que o tempo de concentração da bacia é da ordem de 12 horas, ou seja, MET1 ficou entre 0,4 e 0,5 (dias) o que é próximo da realidade da bacia. Os demais parâmetros para o ajuste dos hidrogramas (MAX1, MET2 e MAX2) foram fixados pois não apresentaram grandes influências na geração do escoamento, devido, provavelmente, as características físicas e morfológicas da bacia (solo raso e baixa permeabilidade), razões essas que também se aplicam ao caso do parâmetro KG. Contudo, o parâmetro EKM (da velocidade do escoamento no leito principal do rio)

apresentou-se relativamente mais sensível até um certo valor. A partir deste valor qualquer alteração no mesmo não apresentava nenhuma variação significativa no escoamento gerado. Os outros parâmetros da velocidade nos planos laterais (EKR e EKL) não foram muito sensíveis e por isso foram fixados. Em virtude de se ter admitido as grandezas referentes a seção dos rios, com base nas informações cartográficas, não se pode, em princípio, afirmar sobre a maior ou menor influência sobre o escoamento.

Validação dos Parâmetros

A princípio pode-se verificar que a resposta do modelo através da simulação do escoamento superficial da bacia em estudo, foi bastante satisfatório e portanto o modelo simula bem os processos hidrológicos da bacia. No entanto, em alguns anos, não foi possível uma calibração aceitável e para esses anos alguns comentários são relevantes. Para os anos 1966, 1969, 1970, e 1976 não foi possível a calibração devido a qualidade dos dados, e assim sendo, não contribuíram na composição da média dos parâmetros usados para simulação. Para o ano de 1966 é possível notar que houve algum erro nas vazões observadas. A afirmação está fundamentada no fato de que, naquele ano, não se tem registro de construção de algum reservatório capaz de amortecer a vazão máxima, para um valor em torno de $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, em um ano com a precipitação anual de 564,9mm, concentrada no período chuvoso. Comparando com o ano de 1982, por exemplo, em que houve uma precipitação de 449,7mm, os escoamentos foram bem maiores dos que os verificados no ano de 1966. No ano de 1969 não havia registro completo de vazões no período utilizado para calibração (período chuvoso), mas pode-se verificar que, para o período do ano em que havia registro de vazão foi possível sua calibração naquele período. Para o ano de 1970, numa tentativa de calibração, observou-se que os parâmetros mais sensíveis (ALFA e EET) distanciaram-se bastante da média encontrada. Para o ano de 1976, apesar da dispersão dos valores encontrados (numa tentativa de calibração dos parâmetros) com relação a média, foi possível verificar a eficiência das equações de transformação das lâminas efetivas do escoamento em hidrogramas de vazão, através de uma boa tendência do hidrograma calculado em acompanhar o hidrograma observado. Este fato, também foi observado em outros anos.

Em relação com a validade do processo, foi verificado que nos anos de 1981 e 1982 não houve uma simulação satisfatória possivelmente pelo fato de que os anos utilizados para calibração tiveram regimes hidrológicos bastante diferentes dos anos utilizados para a simulação. Na fase da calibração apesar das precipitações dos anos utilizados serem bastante variadas, na fase da simulação as precipitações dos anos 1981 e 1982 foram muito abaixo da média dos anos calibrados. Para o ano de 1981, aconteceu algo semelhante ao ano de 1976. No ano de 1982, verificou-se também apenas uma boa tendência do hidrograma simulado. Comparando os hidrogramas calculado e observado (Figuras 5 a 8) nota-se a boa tendência que o escoamento calculado tem em acompanhar o contorno ou a forma do hidrograma observado.

Nas outras duas etapas de validação, com a média dos valores dos parâmetros de 1964 a 1978 e com os parâmetros médios fixados pelas faixas para os anos secos úmidos e normais, não houve grande mudança nas observações que foram feitas no primeiro processo de validação. No entanto, o terceiro método da validação (usando parâmetros conforme a condição de chuvas nos anos antecedentes) parece ser a mais viável para a região semi-árida, pela separação dos tipos de ano, podendo, com isso, levar em conta os efeitos da variação nos parâmetros devido aos efeitos remanescentes dos anos anteriores.

Em relação aos efeitos da divisão da bacia em sub-bacias, de acordo com os resultados obtidos pode-se observar que a resposta do modelo à variação do número de sub-bacias não é significativa, o que mostra que uma sub-divisão menor levaria também a resultados confiáveis e o modelo parece ser robusto em relação ao número de sub-bacias adotadas.

CONCLUSÕES

O modelo NAVMO apresenta uma estrutura adequada tanto para simulação dos processos hidrológicos superficiais, quanto para incorporar os efeitos do movimento subterrâneo nos escoamentos gerados na bacia. A estrutura também permite o acompanhamento do fluxo nas calhas do rio para obter o hidrograma do escoamento total na estação fluviométrica ou na desembocadura da bacia. Através dos resultados deste estudo pode-se concluir que o modelo simula os processos de escoamento muito bem, considerando o fato de que a diferença entre as vazões calculadas e observadas, em termos percentuais, é pequena. A aplicação do modelo NAVMO para a bacia do rio Piancó, na avaliação do escoamento superficial, permite concluir que o modelo apresenta resultados razoáveis, e portanto corresponde a uma boa representação do regime hidrológico da bacia, tanto no aspecto da distribuição espacial, quanto no aspecto da distribuição temporal. Este fato permite a utilização do modelo NAVMO, em outras bacias com características semelhantes a estudada neste trabalho. O conceito da Curva Número, utilizado pelo modelo, permite considerar a heterogeneidade do complexo solo-vegetação. Sugere-se contudo, um estudo mais detalhado em pequenas bacias do semi-árido com complexo solo-vegetação homogêneas, e calibrar o valor de CN como mais um parâmetro do modelo. Este procedimento permitiria encontrar os valores CN adequados à essa região e para cada tipo do complexo solo-vegetação. O modelo NAVMO também é capaz de simular os efeitos de armazenamento nos açudes e reservatórios. Este aspecto não foi simulado no presente estudo. Futuros trabalhos neste sentido seriam de grande valia para a avaliação do desempenho do modelo quando aplicado em bacias com vários reservatórios.

REFERÊNCIAS

- BRASIL (1972). Levantamento Exploratório: Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. M. A./CONTAP. USAID/BRASIL. Rio de Janeiro.
- FIGUEIREDO, E.E. (1998). Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-Arid Region of Brazil. PhD Thesis. Univ. de Newcastle upon Tyne, England.
- FIGUEIREDO, E.E., Overland, H. e Kleeber, H.B. (1991). O Modelo NAVMO de Simulação do Escoamento Superficial. IX Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 337-346, Rio de Janeiro.
- FIGUEIREDO, E.E., Srinivasan, V.S., Barros, M.G. (1993). Análise do Problema de Enchimento do Açude Público Sumé através do modelo NAVMO. X Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 226-235, Gramado.
- JACCON, G. (1982). As Precipitações Anuais da Região Paraibana. Homogeneização e Análise Regional. Recife, SUDENE-DRN, 97 p.
- KLEMES, V. (1986). Operational Testing of Hydrological Simulation Models. Hydrological Sciences Journal, 31, 1, 13-24.
- KLEEBERG, H.B., Overland, H. e Paus, G.B. (1989). NAVMO, Version 1.1, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr, München.
- LOPES, P. L. (1994). Avaliação do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Piancó Utilizando o Modelo NAVMO. Tese de Mestrado, Dept. Eng. Civil, CCT/UFPb, Campina Grande, Pb.
- McCUEEN, R.H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods, Univ. of Maryland, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- O'CONNELL, P.E (1991). Introduction: A Historical Perspective. In: D.S. Bowles and P.E. O'Connell (editores) Advances in the Modelling of Hydrologic Systems. Kluwer Academic Pub., 3-30.
- REFSGAARD, J.C. and Storm, B. (1996). Construction, Calibration and Validation of Hydrological Models. In: M.B.Abbott and J.C.Refsgaard (editores). Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers, London.
- SOROOSHIAN, S. and Gupta, V.K. (1995). Model Calibration. In: V.P.Singh (editor). Computer Model of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado, United States.
- SRINIVASAN, V.S., Lopes, P.L. e Figueiredo, E.E. (1996). Avaliação do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Piancó Utilizando um Modelo Distribuído. III Simpósio de Rec. Hídricos do Nordeste, pp 431-437, Salvador.

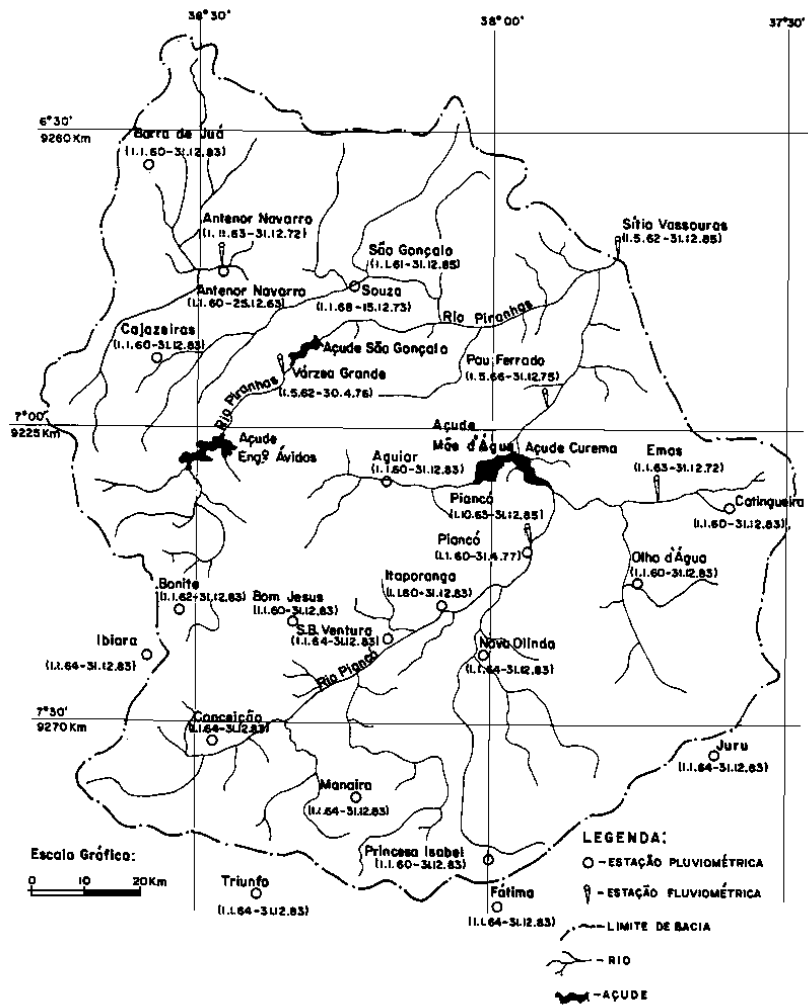
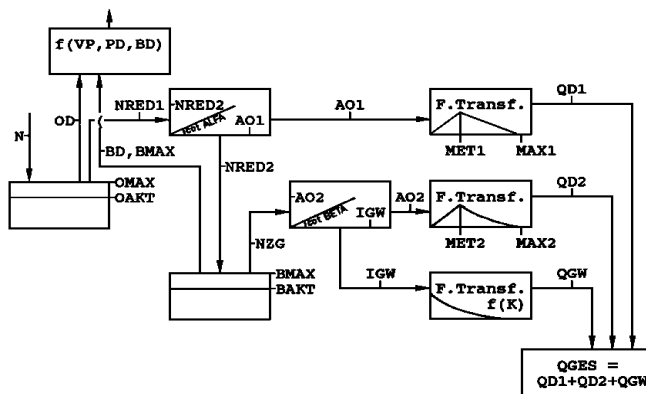


Figura 1 - Bacia Hidrográfica do Alto Piranhas



ALFA	... Parâmetro do Reservatório Superficial
AO1	... Precipitação efetiva para o Escoamento Superficial
AO2	... Lâmina d'água Efetiva para o Escoamento Sub-superficial
BAKT	... Umidade Atual do Reservatório do Solo
BD	... Deficit de Umidade do Reservatório do Solo
BETA	... Parâmetro do Reservatório Sub-superficial
BMAX	... Capacidade máxima de Armazenamento do Solo
IGW	... Lâmina d'água Efetiva para o Escoamento Subterrâneo
K	... Parâmetro do Reservatório Subterrâneo
MAX1	... Tempo de Base do Escoamento Direto
MAX2	... Tempo de Base do Escoamento Sub-superficial
MET1	... Tempo para Atingir o Pico do Escoamento Superficial
MET2	... Tempo para Atingir o Pico do Escoamento Sub-superficial
N	... Precipitação diária
NRED1	... Transbordo do Reservatório Superficial
NRED2	... Parte do Transbordo de Água que vai Suprir o Solo
NZG	... Transbordo do Reservatório Sub-superficial
OAKT	... Umidade Atual do Reservatório Superficial
OD	... Deficit de Umidade do Reservatório Superficial
OMAX	... Capacidade máxima de Armazenamento da Superfície
QD1	... Escoamento Direto
QD2	... Escoamento Sub-superficial
QGES	... Descarga total
QGW	... Escoamento Subterrâneo
VA	... Evaporação Atual
VP	... Evaporação Potencial

Figura 2 - Esquema dos Processos Precipitação - Evaporação - Vazão

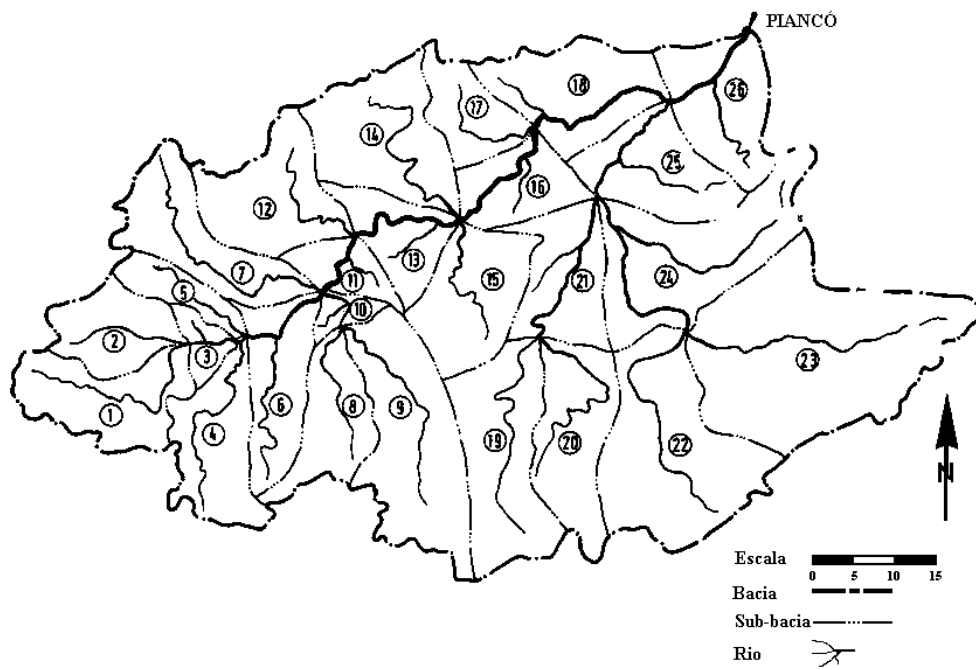


Figura 3 - Sub-Divisão da Bacia do Rio Piancó

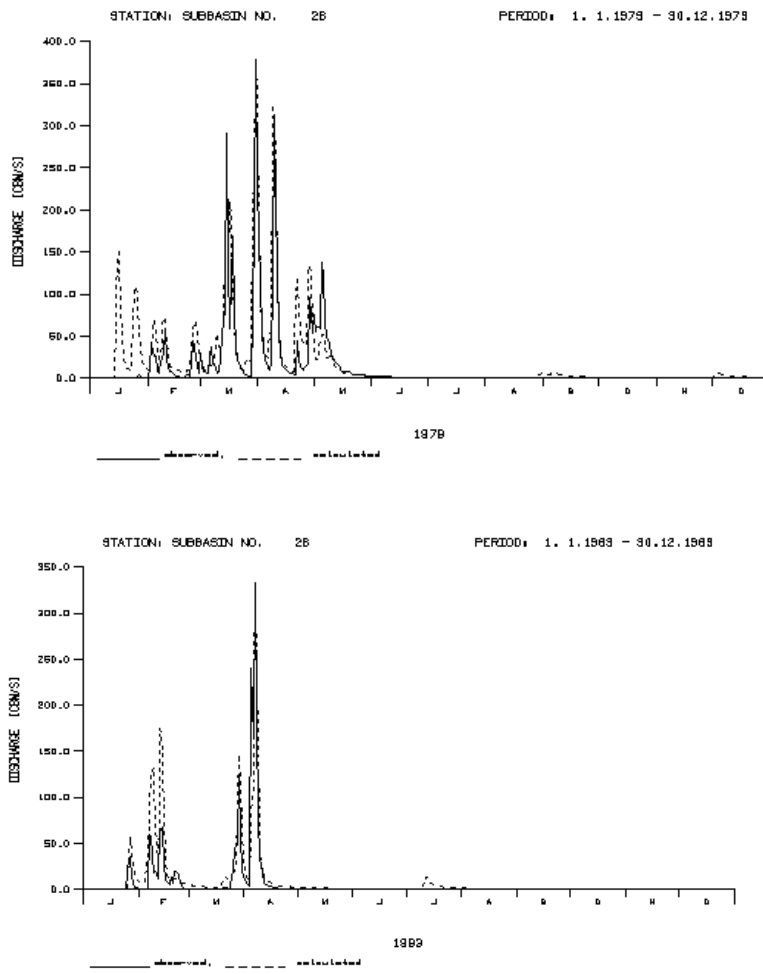


Figura 4 - Hidrogramas Calculado (----) e Observado (—) obtidos com a Calibração dos Parâmetros dos anos 1979 e 1983

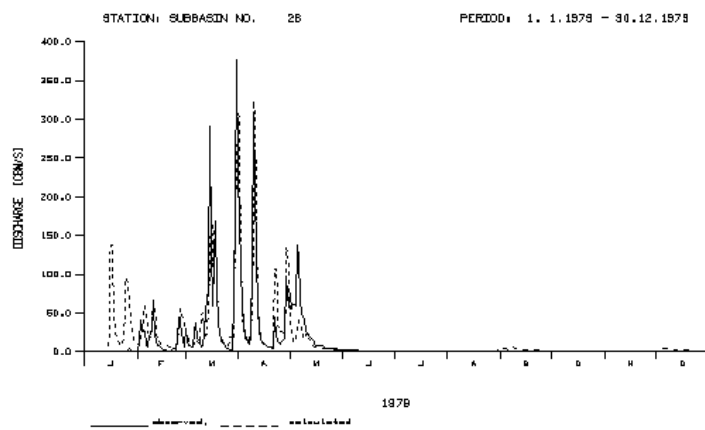


Figura 5 - Hidrogramas Calculado (----) e Observado (—) obtidos com a Validação 1 dos Parâmetros (ano de 1979)

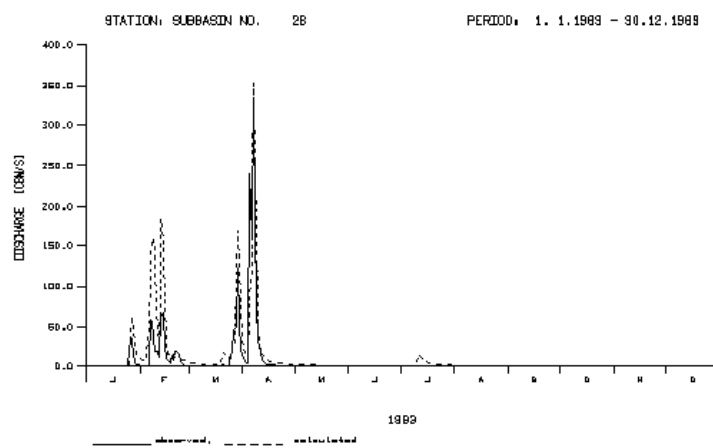


Figura 6 - Hidrogramas Calculado (----) e Observado (—) obtidos com a

Validação 2 dos Parâmetros (anos de 1983)

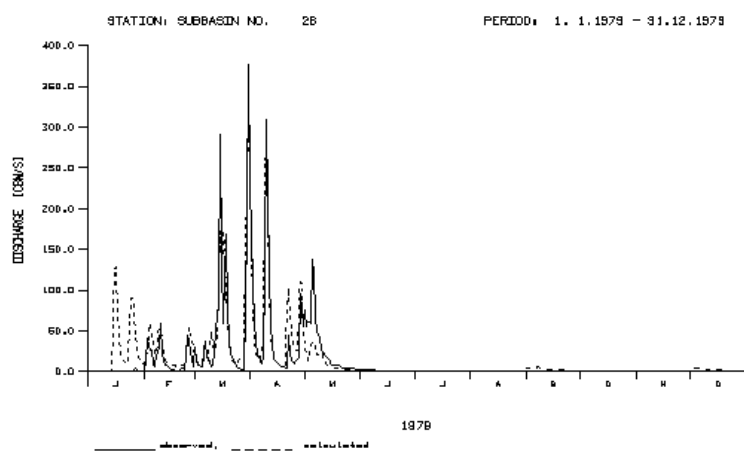


Figura 7 - Hidrogramas Calculado (----) e Observado (—) obtidos com a Validação 3 dos Parâmetros (ano de 1979)

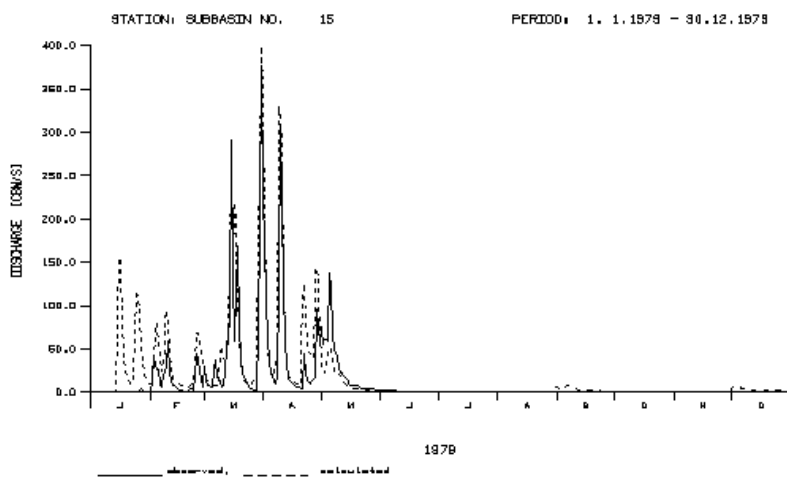


Figura 8 - Hidrogramas Calculado (----) e Observado (—) obtidos com a Validação 4 dos Parâmetros (ano 1979, bacia com 15 divisões)

Tabela 1 - Dados sobre os Sub-Trechos de Rio

Sub-Trecho	GEF	HM	BM	BL	BR	BNR	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR
3	0,22	2,50	50,00	50,00	50,00	2,00	50,00	50,00	25,00	5,00	5,00
6	0,18	3,00	50,00	50,00	50,00	2,00	50,00	50,00	28,00	5,00	5,00
10	0,40	2,50	50,00	50,00	50,00	2,00	50,00	50,00	25,00	5,00	5,00
11	0,10	4,00	180,00	180,00	180,00	4,00	75,00	75,00	30,00	5,00	5,00
13	0,23	4,00	200,00	200,00	200,00	4,00	100,00	100,00	35,00	5,00	5,00
16	0,05	4,50	250,00	250,00	250,00	5,00	100,00	100,00	40,00	5,00	5,00
18	0,05	5,00	300,00	300,00	300,00	5,00	100,00	100,00	40,00	5,00	5,00
21	0,54	2,50	150,00	150,00	150,00	4,00	100,00	100,00	35,00	5,00	5,00
24	0,42	3,00	150,00	150,00	150,00	4,00	100,00	100,00	35,00	5,00	5,00
25	0,06	3,00	300,00	300,00	300,00	5,00	100,00	100,00	40,00	5,00	5,00
26	0,21	3,00	300,00	300,00	300,00	5,00	100,00	100,00	40,00	5,00	5,50

Tabela 2 - Características Gerais das Sub-bacias

Sub-bacia	Área (km ²)	X (km)	Y (km)	G (%)	CN	L1 (km)	L2 (km)	Cotas			
								Montante		Jusante	
1	171,00	545,00	9156,00	0,70	52,70	33,80		650		400	
2	127,50	543,50	9165,00	1,35	54,10	17,60		638		400	
3	42,60	555,00	9163,20	2,44	59,60	4,60	9,10	488	400	377	380
4	174,40	555,00	9164,00	1,02	52,80	32,00		700		374	
5	76,30	550,00	9171,00	1,71	54,10	15,40		637		374	
6	150,90	564,00	9162,00	1,75	55,20	23,90	14,90	775	377	356	350
7	185,90	555,00	9176,00	1,00	52,70	37,20		737		350	
8	128,90	571,50	9153,30	1,08	50,30	20,70		600		377	
9	273,90	580,00	9151,50	0,93	50,00	35,00		700		377	
10	28,90	570,50	9163,00	1,30	55,20	4,50	6,80	420	377	360	350
11	71,20	571,50	9173,50	0,56	59,60	10,70	11,20	400	350	340	
12	181,20	565,20	9180,00	1,27	50,00	24,40		650		340	
13	110,20	579,00	9177,50	0,48	59,60	10,30	17,40	350	340	300	300
14	207,10	576,50	9188,50	0,87	58,80	34,60		600		300	
15	186,50	586,50	9171,00	0,99	58,80	24,10		538		300	
16	112,60	592,00	9184,50	0,73	59,60	9,20	18,40	357	300	290	290
17	98,90	586,50	9191,50	1,34	57,40	19,40		550		290	
18	178,60	599,00	9196,00	1,08	57,40	10,60	21,00	400	290	285	280
19	225,00	591,00	9154,00	1,64	57,50	34,80		1000		430	
20	184,80	599,00	9154,00	1,06	58,80	30,20		750		430	
21	158,70	598,50	9172,00	1,71	59,60	9,30	25,90	450	430	290	290
22	324,60	610,00	9153,50	1,03	57,40	34,10		750		400	
23	529,80	626,50	9165,00	0,95	57,00	39,10		770		400	
24	281,60	611,00	9164,00	0,31	57,00	33,80	26,00	400	400	295	290
25	166,40	608,00	9187,50	0,43	57,40	16,20	17,00	350	290	280	280
26	172,50	615,00	9195,50	0,56	57,40	17,90	14,10	360	280	260	250

Tabela 3 - Parâmetros Calibrados

ANO	MET1	MET2	MAX1	MAX2	KG	EET	EKM	EKL	EKR	ALFA	BETA	BFD	QBSP
1964	0,4	1	2	7	250	3,8	60	60	60	0,44	0,1	95	0
1965	0,4	1	2	7	250	7,5	60	60	60	0,2	0,1	95	0
1966													
1967	0,4	1	2	7	250	5,3	60	60	60	0,44	0,1	95	0
1968	0,5	1	2	7	250	6,2	60	60	60	0,36	0,1	95	0
1969													
1970											0		
1971	0,4	1	2	7	250	6,8	60	60	60	0,28	0,1	95	0
1972	0,5	1	2	7	250	6,6	60	60	60	0,37	0,1	95	0
1973	0,4	1	2	7	250	4	60	60	60	0,41	0,1	95	0
1974	0,5	1	2	7	250	2,5	60	60	60	0,48	0,1	95	0
1975	0,5	1	2	7	250	4,6	60	60	60	0,35	0,1	95	0
1976													
1977	0,5	1	2	7	250	2,5	60	60	60	0,46	0,1	95	0
1978	0,4	1	2	7	250	3,5	60	60	60	0,29	0,1	95	0
1979	0,4	1	2	7	250	3,5	60	60	60	0,4	0,1	95	0
1980	0,5	1	2	7	250	6,8	60	60	60	0,42	0,1	95	0
1981	0,5	1	2	7	250	7,5	60	60	60	0,16	0,1	95	0
1982	0,4	1	2	7	250	6,6	60	60	60	0,24	0,1	95	0
1983	0,4	1	2	7	250	6,7	60	60	60	0,34	0,1	95	0

Tabela 4 - Erro Percentual da Estimativa *

Ano	Volumes				Vazões Máximas			
	Calibra- ção	Valida- ção 1	Valida- ção 2	Valida- ção 3	Calibra- ção	Valida- ção 1	Valida- ção 2	Valida- ção 3
1964	-105,2		-35,0	-34,1	0,1		36,8	29,9
1965	-46,6		-161,9	-160,4	-81,3		-274,7	-416,9
1966								
1967	1,7		13,9	-30,9	-0,6		19,2	-20,2
1968	-79,3		-94,4	-88,0	6,4		18,6	5,0
1969								
1970								
1971	-4,8		-31,3	-29,4	-6,1		-34,5	-43,5
1972	-227,8		-231,0	-226,9	-87,5		-45,4	-80,1
1973	-67,2		-34,3	-77,5	-3,6		17,1	-7,8
1974	-38,1		38,0	38,8	-4,8		51,9	38,7
1975	-63,4		-56,2	-53,7	-0,4		20,5	5,6
1976								
1977	-140,8		-22,1	-60,8	0,7		50,5	37,5
1978	-60,1		-66,6	-107,6	-0,9		-11,1	-39,0
1979	-53,5	-25,4	-16,7	-46,7	-0,5	15,8	22,1	3,0
1980	-33,6	-29,4	-20,6	1,7	1,0	36,7	40,8	53,2
1981	31,0	-56,9	-46,1	-14,2	14,9	-113,7	-100,0	-59,1
1982	-147,4	-313,5	-286,6	-210,7	-0,3	-91,5	-75,6	-26,1
1983	-62,0	-92,3	-77,4	-39,1	0,1	-15,0	-6,3	17,1

(*) Erro da Estimativa = 100 (Observado - Simulado)/Observado

Tabela 5 - Vazões Máximas e Volumes Simulados com Diferentes Sub-divisões da Bacia

ANO	SUB-BACIAS	VAZÕES MÁXIMAS (m³/s)	VOLUME x 10⁻⁶ m³
1964	15	708.6	1083.0
	26	672.5	1025.0
	28	645.6	993.4
1973	15	539.0	772.0
	26	554.5	762.0
	28	543.7	754.0
1975	15	346.0	706.0
	26	344.0	694.0
	28	340.5	692.7
1977	15	652.0	1069.0
	26	601.0	1083.0
	28	599.8	1099.0
1978	15	116.7	293.3
	26	110.9	275.0
	28	111.6	275.8
1979	15	399.6	692.7
	26	378.8	618.4
	28	389.4	625.8
1980	15	806.6	459.0
	26	792.0	452.9
	28	773.0	452.0
1982	15	71.5	83.5
	26	62.7	87.6
	28	61.8	90.3
1983	15	339.1	289.0
	26	332.0	283.6
	28	305.0	286.1

