

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PIRANHAS-AÇU UTILIZANDO O MODHISA JUNTAMENTE COM O BALANÇO HÍDRICO DOS PRINCIPAIS AÇUDES DA REDE FLUVIAL

Eulina Maria de Moura¹; Antonio Marozzi Righetto²; João Abner Guimarães Júnior³; Arthur Mattos⁴

RESUMO- A Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu é uma bacia Federal de 43.681,5 Km², localizada no Semi-Árido nordestino. O trecho compreendido entre o açude Coremas-Mãe D`água (PB) e o açude Armando Ribeiro Gonçalves (RN) possui diversos sistemas adutores, projetos de irrigação, e abastece várias cidades ribeirinhas. Esse trabalho tem como objetivo a modelagem hidrológica da bacia que incluirá a disposição dos principais açudes das bacias de contribuição do rio, e o balanço hídrico mensal destes. O modelo chuva-vazão aplicado nas sub-bacias foi o MODHISA- Modelo Hidrológico para o Semi-Árido, que é um modelo concentrado e de fácil aplicação. A simulação da transformação da precipitação média ocorrida nas sub-bacias em deflúvios afluentes ao rio Piranhas-Açu gerou 50 anos de dados sintéticos de vazão afluente aos principais açudes e gerou 50 anos de dados de vazão sintética em pontos relevantes do rio Piranhas-Açu e de seus afluentes, possibilitando a construção das curvas de permanência das vazões ao longo do trecho estudado. Concluiu-se também que o MODHISA apresentou boa adequação às características hidrológicas das sub-bacias contribuintes do rio Piranhas-Açu e seus afluentes; tornando-se uma ferramenta de fácil aplicação e de bons resultados.

ABSTRACT- Piranhas-Açu basin is a Federal watershed with a drainage area of 43.681,5 km², sited at Brazilian northeast semi arid. The river's reach between Coremas-Mãe D`água Dam and Armando Ribeiro Gonçalves Dam has many irrigation projects, and supply many riverside cities. Due the importance of this stream and the necessity of an adequate management, this work aims for a hydrological modeling of this basin, including the arrangement of main dams in tributaries, and storage reservoir water balance. The rainfall-discharge model's applied in each sub-basins it was selected the model MODHISA- Hydrological Model of Semi Arid, that is a concentrated model with easy application. The simulation produced 50 years of inflows into the reservoirs, and produced 50 years of synthetic discharge data in relevant points on the river and on its affluents; so it was constructed the permanence curves. This work concluded that the MODHISA Model is suitable to reproduce the hydrologic characteristics of Piranhas-Açu sub-basins, and showing good results.

PALAVRAS-CHAVES: MODHISA, balanço hídrico, Rio Piranhas-Açu

¹ Mestre em Engenharia Sanitária, LARHISA/UFRN. eulinamm@yahoo.com.br

² Professor Doutor do LARHISA/UFRN, righetto@ct.ufrn.br

³ Professor Doutor do LARHISA/UFRN, abner@ct.ufrn.br

⁴ Professor Doutor do LARHISA/UFRN, armattos@ct.ufrn.br

1 - INTRODUÇÃO

A simulação é considerada a técnica mais flexível utilizada em recursos hídricos, sendo essa uma das suas principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática. Ainda como vantagens das técnicas de simulação, está a possibilidade de ser aplicável a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição (AZEVEDO *et al*, 1997).

Apesar de não ser otimizante, a simulação proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas, podendo-se avaliá-lo com maior precisão e prever a sua resposta quando algumas variáveis são modificadas (MAUAD *et al*, 2003).

Nesse sentido, a simulação do processo de transformação chuva-vazão, para a geração de informações a cerca de potencialidade e disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas, é uma ferramenta importante para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente em pontos específicos da rede fluvial onde existem açudes, pontos de captação e outros de interesse.

A disponibilidade atual de poucas séries históricas de longa duração de deflúvios naturais tem motivado o emprego generalizado desses modelos para a geração de séries de dados sintéticos das vazões afluentes dos principais rios e açudes (RIGHETTO *et al*, 2002).

Em bacias hidrográficas do Nordeste, muitos modelos chuva-vazão já foram utilizados, entre eles, o MODHAC- Modelo Hidrológico Auto Calibrável, um modelo determinístico desenvolvido por Lana & Schwarzbach (1989) para a reconstituição de deflúvios em todas as bacias hidrográficas do estado do Ceará, quando da realização do atual Plano Estadual de Recursos Hídricos.

O Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SCIENTEC, 1998) também aplicou o MODHAC para a geração de séries temporais de deflúvios naturais nas sub-bacias que formam a Bacia Hidrográfica do rio Piranhas-Açu: Bacia do rio do Peixe, do rio Piancó, do Alto Piranhas, do Médio Piranhas, do Rio Espinharas e do Rio Seridó.

O MODHAC é um modelo matemático de simulação da fase terrestre do ciclo hidrológico, com calibração automática dos seus parâmetros, a partir do conhecimento das variáveis motoras deste processo: chuva e evapotranspiração potencial.

Silans¹ *et al* (2000) descreveram o AÇUMOD, um modelo hidrológico distribuído, especificamente voltado para a região semi-árida, que efetua o balanço hídrico diário dos açudes implantados na rede de drenagem da bacia hidrográfica, e aplicaram-no na Bacia do Rio do Peixe, sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu no Estado da Paraíba.

Outras aplicações bem sucedidas do AÇUMOD em bacias semi-áridas nordestinas foram na bacia do rio Taperoá-PB (PAIVA *et al*, 1999) e na bacia do rio Espiranhas- PB/RN (NASCIMENTO JÚNIOR, 2004), além da bacia do rio Gramame-PB (SILANS² *et al*, 2000), sendo esta uma bacia litorânea.

Righetto *et al* (2002) apresentaram o MODHISA (Modelo Hidrológico para o Semi-Árido), um modelo hidrológico simples, determinístico, concentrado e de equacionamento explícito, usado na transformação chuva-vazão mensal, aplicável a pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas do semi-árido nordestino que contém grande número de açudes. A eficiência desse modelo foi verificada ao aplicá-lo na geração de dados de vazões afluentes ao açude Cruzeta/RN visando simular a operação desse açude; e, mais tarde, por Righetto *et al* (2003), onde foi feita uma simulação operacional preliminar do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, no sentido de se verificar a magnitude da sinergia hídrica.

Constatada a adequação desse modelo a bacias do semi-árido nordestino, no presente estudo o MODHISA será aplicado nas sub-bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, que é uma bacia Federal de 43.681,5 Km², localizada no Semi-Árido nordestino, com 60% da sua área no Estado da Paraíba e 40% no Estado do Rio Grande do Norte.

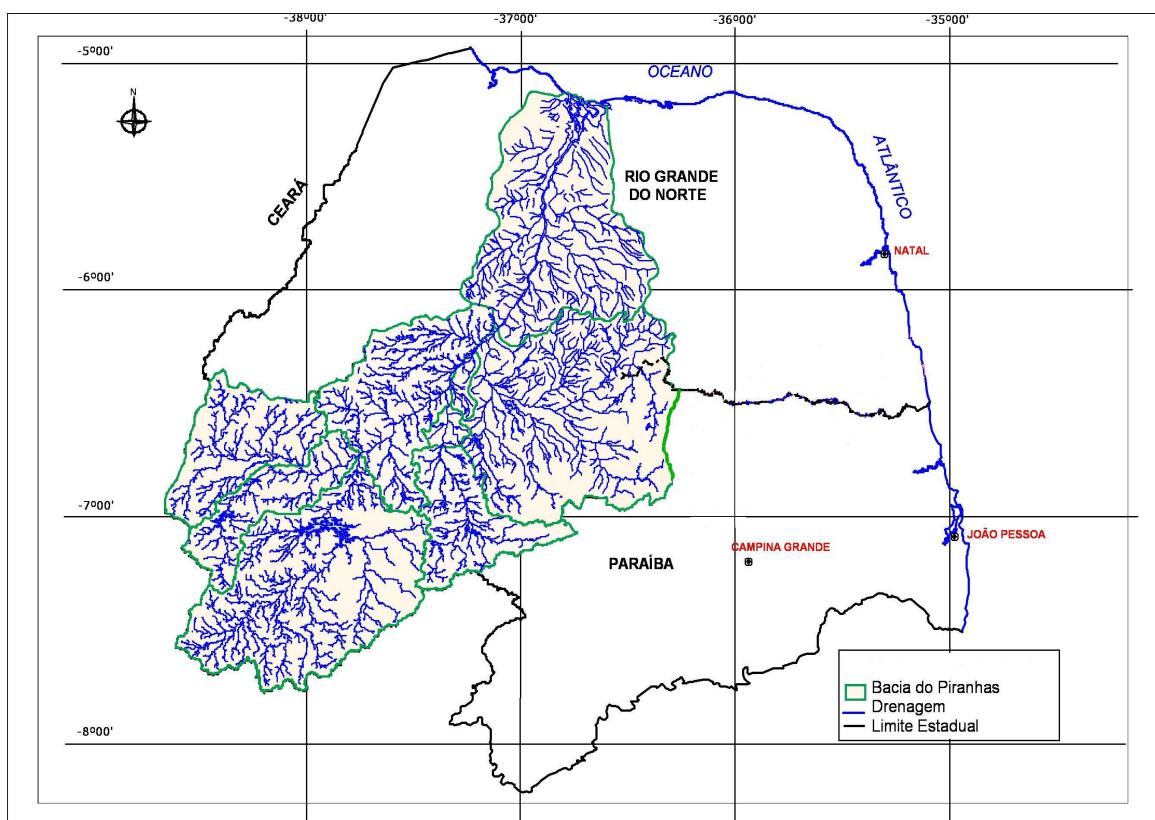
Almeja-se, neste trabalho, contribuir no que concerne à conservação e ao uso racional dos recursos hídricos desses dois Estado, especificamente na Bacia do Rio Piranhas-Açu. Primeiramente, foi construído um diagrama unifilar da rede fluvial da bacia, levando em conta a disposição dos açudes mais relevantes. E, diante disso, realizada a modelagem hidrológica, utilizando o modelo concentrado chuva-vazão (o MODHISA), que foi calibrado, para gerar deflúvios naturais nas sub-bacias de contribuição do rio Piranhas-Açu, no trecho estudado.

O encadeamento dos deflúvios juntamente com o balanço hídrico dos açudes da rede fluvial permitiu avaliar a capacidade hídrica das bacias dos principais afluentes do rio Piranhas-Açu. Como também permitiu determinar a disponibilidade hídrica por trechos do rio, através da elaboração das curvas de permanência das vazões em seções relevantes, que serão instrumentos para a avaliação das retiradas de água suportadas pelo rio.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, totalmente inserida no semi-árido nordestino, localiza-se entre as latitudes $-5^{\circ}25'17''$ e $-7^{\circ}52'14''$ e entre as longitudes $-36^{\circ}8'4.6''$ e $-38^{\circ}47'32.6''$ (Figura 01). Possui área total de drenagem de $43.681,5\text{ Km}^2$, sendo 26.183 Km^2 no Estado da Paraíba, correspondendo a 60% da área, e $17.498,50\text{ Km}^2$ no Estado do Rio Grande do Norte, correspondendo a 40% da área. Contempla 147 municípios, sendo 45 municípios no Estado do Rio Grande do Norte e 102 no Estado da Paraíba, e conta com uma população total de 1.363.802 habitantes, tendo 914.343 habitantes (67%) no Estado da Paraíba e 449.459 habitantes (33%) no Rio Grande do Norte (BRAGA *et al*, 2004).



Fonte: AAGISA- Agencia de Águas, Irrigação e Saneamento da Paraíba

Figura 01- Localização da Bacia do Rio Piranhas-Açu.

O rio Piranhas nasce no município de Bonito de Santa Fé (PB), localizado nos divisores de água que correspondem aos limites geográficos dos Estados da Paraíba e do Ceará.

No Estado da Paraíba, ele forma um sistema hidrográfico constituído pelos seus alto e médio cursos e pelas sub-bacias dos rios do Peixe, Piancó, Espinharas e Seridó, seus principais afluentes.

O Rio Piranhas entra no Rio Grande do Norte pelo município de Jardim de Piranhas, passando a receber as águas do rio Espinharas e do rio Seridó (rios Federais, cujas nascentes se localizam no Estado da Paraíba). Ele cruza a região central do Estado do RN, desaguando no seu litoral norte, na foz localizada em Macau.

Nessa bacia estão localizados os reservatórios considerados estratégicos para o desenvolvimento sócio-econômico dos dois Estados: o açude Coremas-Mãe D'Água, construído no Rio Piancó-PB, no município de Coremas; e o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, no município de Assu-RN, construído no Rio Piranhas-Açu. O trecho compreendido entre esses dois reservatórios é o alvo desse estudo.

2.2 - Metodologia

Para a presente pesquisa, o trecho compreendido entre os reservatórios Coremas Mãoe-D'água e Armando Ribeiro Gonçalves foi dividido em sub-trechos, a fim de facilitar a sua modelagem e o processo de análise da disponibilidade hídrica. Os sub-trechos considerados foram:

Trecho 1: *Do Lago do Reservatório Coremas-Mãe D'Água até a jusante da confluência dos rios Piancó e Piranhas;*

Trecho 2: *Da confluência dos rios Piancó e Piranhas até a divisa dos Estados PB/RN;*

Trecho 3: *Da divisa PB/RN até o Lago do Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.*

2.2.1. O Modelo Chuva-Vazão MODHISA

O MODHISA é um modelo de transformação chuva-vazão aplicado pelo consórcio CNEC-SOGREAH (1973) na reconstituição de deflúvios afluentes que subsidiaram os estudos do aproveitamento hidro-agrícola dos açudes públicos Itans, Cruzeta, Sabugi e Pau dos Ferros (RN).

A adequação desse modelo foi verificada pela equipe de pesquisadores do LARHISA-Laboratório de Recursos Hídricos da UFRN, ao aplicá-lo na geração de dados de vazões afluentes ao açude Cruzeta/RN visando simular a operação desse açude (RIGHETTO et al, 2002); e por RIGHETTO et al (2003), onde foi feita uma simulação operacional preliminar do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.

O MODHISA pode ser classificado como um modelo matemático determinístico, do tipo conceitual, já que os processos são simulados por funções; concentrado, pois o influxo à bacia é

representado por precipitações médias e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço, de modo que as funções de entrada e saída dependem somente do tempo; e explícito, característico do seu equacionamento.

Ele é fundamentado no balanço hídrico da superfície do solo, tendo como dados principais as séries de precipitações mensais sobre a bacia hidrográfica; e a capacidade de armazenamento de água na bacia, desprezando-se o escoamento básico (RIGHETTO *et al*, 2003). É aplicável à pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas do semi-árido nordestino que contém grande número de açudes.

A escala temporal utilizada é a mensal, tendo em vista a influência do estado da bacia no mês antecedente na geração dos deflúvios.

O algoritmo do MODHISA foi adaptado a uma planilha do Microsoft Excel; e para cada mês de índice j , o MODHISA segue o organograma de cálculo da Figura 02:

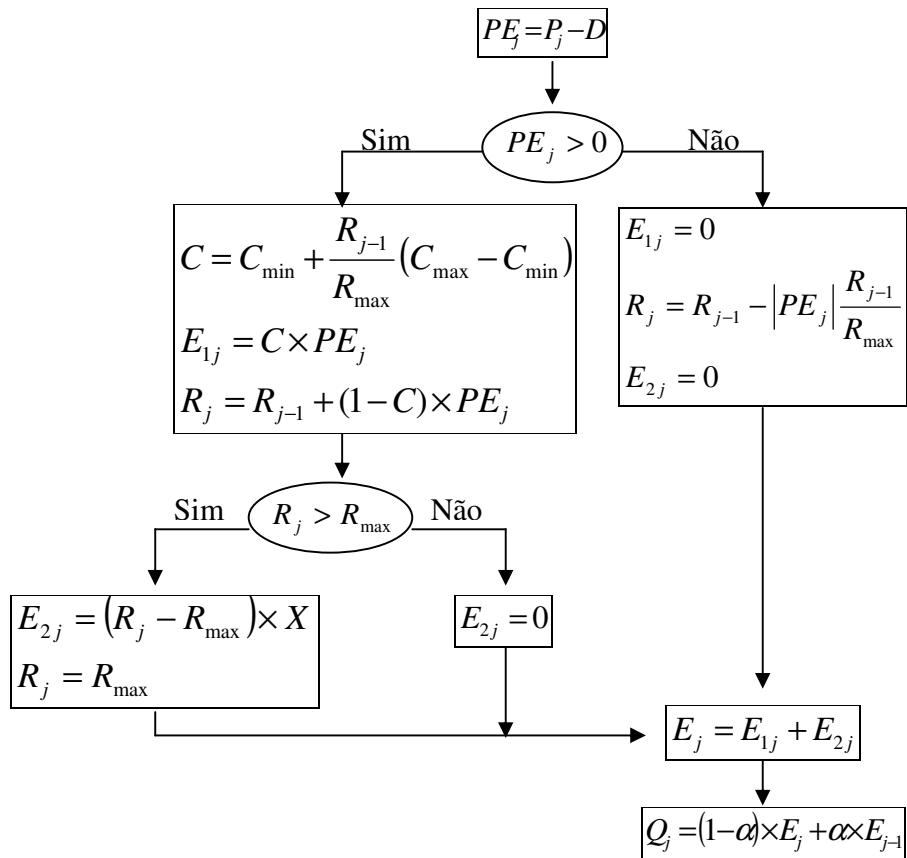


Figura 02– Organograma de Cálculo do MODHISA

Onde:

| | |
|-----------|---|
| PE_j | : precipitação efetiva no mês j (mm) |
| P_j | : precipitação mensal media na bacia (mm) |
| D | : detenção superficial (mm) |
| C_{min} | : coeficiente de deflúvio mínimo |
| C_{Max} | : coeficiente de deflúvio Máximo |
| R_{j-1} | : volume retido no mês anterior (mm) |
| R_{Max} | : lâmina máxima de retenção (mm) |
| E_{1j} | : lâmina escoada no mês j (mm) |
| E_{2j} | : escoamento adicional (mm) |
| X | : coeficiente de escoamento |
| α | : coeficiente de depleção |

A seqüência de cálculo do modelo, para cada mês (j), é definida a partir de uma condição inicial: se a precipitação média na bacia (P_j) é maior que a detenção superficial de água pluvial (D) pelas depressões naturais do solo e pelos açudes da mesma, assim como as perdas por evapotranspiração; então a chuva eficaz (PE_j) na bacia é positiva; logo, existe escoamento superficial (E_{1j}). Caso contrário, não há escoamento.

Para calcular o escoamento superficial (E_{1j}) encontra-se o coeficiente de deflúvio C . Ele é proporcional ao estado da retenção de água na bacia no inicio do mês, cujo valor corresponde ao volume retido no mês anterior (R_{j-1}); e é baseado nos parâmetros C_{Max} e C_{min} que são os limites, máximo e mínimo, desse coeficiente em função do estado de saturação da bacia.

Quando não há escoamento, a retenção R_j diminui devido à evapotranspiração, que é considerada no modelo como proporcional à própria retenção e ao déficit de escoamento.

A variável R_j , quando há escoamento e aumento progressivo do seu nível, permite representar o enchimento dos açudes no começo da estação chuvosa.

Se a retenção R_j é máxima (quando os açudes estão cheios), produz-se o escoamento adicional E_{2j} , que representa, por exemplo, a lâmina vertida. Esta, deve ser multiplicada por um coeficiente de escoamento X (parâmetro que mede a eficiência do transporte d'água pelo sistema fluvial, quando $R_j > R_{max}$) para uma melhor estimativa desse escoamento suplementar.

O escoamento total $E_j = E_{1j} + E_{2j}$ é então distribuído para o mês em curso e possivelmente para o mês seguinte ou para além deste, em função do coeficiente de depleção α .

Finalmente, o deflúvio produzido na bacia (Q_j) a partir da precipitação mensal média (P_j) dos postos pluviométricos é calculado como sendo a soma dos escoamentos totais da bacia no mês anterior (que foi propagado para o mês seguinte) e no mês atual.

A calibração do MODHISA, que corresponde ao ajuste dos parâmetros C_{min} , C_{max} , D , X , α e R_{max} , dá-se através da comparação entre a série sintética gerada e os deflúvios naturais observados no mesmo período de tempo.

Para essa calibração é empregada a ferramenta Solver do Microsoft Excel, envolvendo a minimização de uma função-objetivo definida pela soma dos quadrados da diferença entre as vazões observadas e as calculadas pelo MODHISA, tomando-se os parâmetros do modelo como as variáveis de decisão do processo de otimização:

$$F.O = \min \sum [Q_{ij}(\text{sim}) - Q_{ij}(\text{obs})]^2 \quad (1)$$

Ao utilizar o SOLVER do Excel na função objetivo, deve-se adicionar as seguintes restrições aos parâmetros do modelo:

$$D > 0; R_{max} > 0; C_{min} > 0; C_{max} > C_{min}; X > 0; \alpha > 0; \sum Q_{ij}(\text{sim}) = \sum Q_{ij}(\text{obs})$$

Para que o solver forneça soluções satisfatórias pode-se impor valores limites para os parâmetros, através de novas restrições, ou até fixar valores para C_{min} e C_{Max} , por exemplo. Isso foi feito em todas as sub-bacias em que ele foi usado, com êxito nos resultados da calibração, demonstrando o caráter regional de alguns parâmetros.

2.2.2. Delimitação das Sub-Bacias para Aplicação do MODHISA

Conforme visto, o MODHISA não leva em consideração a variação espacial dos parâmetros físicos da bacia nem da precipitação, pois se trata de um modelo concentrado. Logo, sua aplicação neste trabalho foi feita em diversas sub-bacias delimitadas dentro da área de drenagem das sub-bacias que compõem a bacia do Rio Piranhas- Açu. Essa divisão das sub-bacias foi realizada com base nas estações fluviométricas existentes, e na disposição dos açudes com capacidade de acumulação superior a 10 milhões de m³.

Esses açudes foram considerados como o exutório de cada sub-bacia, e como estes, na maior parte do tempo, não liberam volumes de água para jusante, ou seja, a água fica acumulada no reservatório e dele é retirada para atender às demandas, foi considerado que só há contribuição de uma bacia de um açude para outra quando o açude estiver vertendo. Logo, são bacias “fechadas”.

Já as bacias “livres”, ou seja, aquelas em que o deflúvio produzido pela bacia não é barrado por um açude, têm como exutório os postos fluviométricos ou a confluência de rios em pontos relevantes quando aí não existe posto de medição.

Foram delimitadas sub-bacias para a aplicação do MODHISA em todas as bacias de captação cuja água é drenada para os afluentes do rio Piranhas-Açu ou diretamente para este, desde o açude Coremas Mãe-D’ água até Armando Ribeiro Gonçalves.

Bem, sabe-se que existe um grande número de pequenos açudes em toda a bacia do rio Piranhas, porém, a retenção de água nestes está incorporada na variável D (detenção superficial) do modelo, e só quando seu valor é ultrapassado inicia-se o escoamento superficial na bacia. Portanto, somente na bacia hidrográfica dos grandes açudes, aqueles com múltiplos usos (abastecimento humano e animal, irrigação, piscicultura...) o MODHISA foi aplicado e calibrado isoladamente, a fim de se determinar a vazão afluente.

A Figura 03 mostra as bacias dos açudes considerados na simulação (as bacias fechadas); como também, as bacias “livres”, cujos rios principais são os afluentes mais significantes para o escoamento superficial na bacia. Nota-se que as bacias “livres” só receberão água das bacias fechadas quando os açudes destas atingirem sua capacidade máxima.

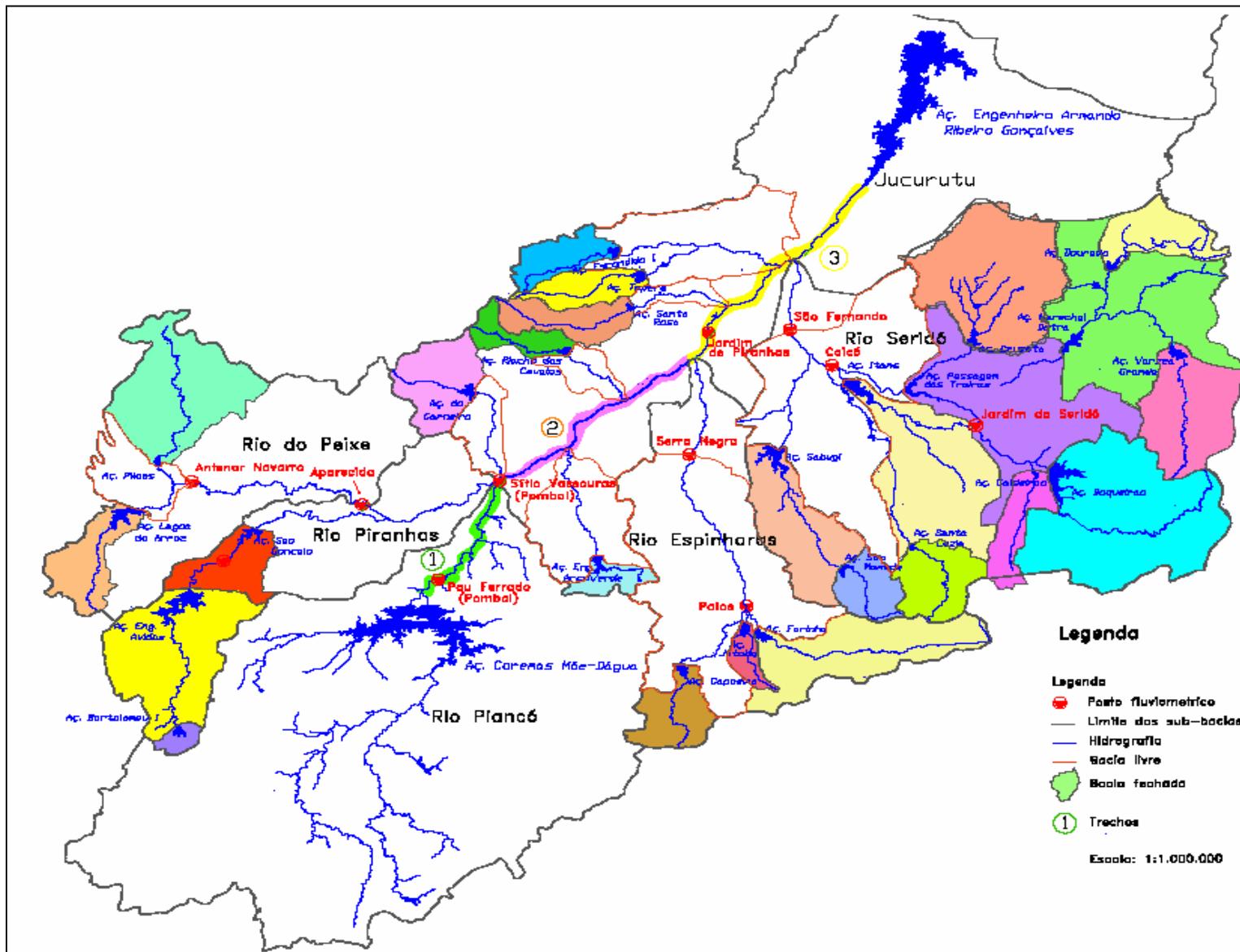


Figura 03- Bacias livres e fechadas consideradas na simulação

2.2.3. Aplicação e Calibração do MODHISA nas Sub-Bacias

Esse modelo foi aplicado com a finalidade de se obter um modelo hidrológico que caracterize bem a região da bacia do rio Piranhas-Açu, capaz de gerar deflúvios afluentes aos principais açudes da bacia, como também nos exutórios das sub-bacias contribuintes do rio, nesse trecho estudado. Além disso, esse modelo permite a reconstituição de deflúvios naturais para um longo período, no qual o conhecimento restringe-se à precipitação.

O MODHISA foi aplicado nas sub-bacias mostradas na Figura 04. Para tanto, foram levantadas as séries históricas de precipitação dos postos, no período de 1994 a 2004, e calculada a precipitação média mensal para cada sub-bacia de acordo com a etapa anterior. Foram utilizados dados de cerca de 90 postos, inseridos nos limites das sub-bacias. Logo, os postos da bacia do Baixo- Açu e de grande parte da bacia do Piancó, a montante de Coremas Mãe-D'água, não foram utilizados.

Esse dados de precipitação média constituem os dados de entrada da planilha do MOHISA, a qual é a mesma para todas as sub-bacias.

No entanto, o processo de calibração do modelo nas bacias fechadas (bacias dos açudes) não poderia ser baseado na série de deflúvios naturais (como o das bacias livres cujo exutório é um posto fluviométrico), já que na maioria dos açudes não há dados de vazão afluente.

Para a calibração do modelo nessas bacias, partiu-se da seguinte hipótese:

Dada a equação da continuidade:

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde: I é a vazão afluente (Inflow); O é a vazão efluente (Outflow) e $\frac{\Delta S}{\Delta t}$: variação do volume

armazenado no tempo.

E sabendo-se que os açudes não liberam água para jusante, a menos que estejam sangrando; na fase de calibração foi considerado um período em que a vazão de saída (Outflow) é zero. Logo, a vazão de entrada, ou seja, a vazão gerada pelo MODHISA (Inflow), deve ser igual à variação positiva do volume armazenado no reservatório.

Dessa forma, foram levantadas as séries dos volumes mensais dos 25 açudes que formam as sub-bacias fechadas, com o auxílio de informações do DNOCS (RN), SERHID (RN) e AESA (PB).

Para a calibração foi considerada apenas a variação positiva do volume, durante o mesmo intervalo de tempo dos dados de precipitação; já que a variação negativa representa perdas de água do sistema. A variação positiva é fruto da entrada de água no açude e isso se dá através da contribuição de toda a bacia como consequência da precipitação.

Já as sub-bacias cujos exutórios contém estações fluviométricas tiveram seus parâmetros ajustados com base na comparação entre a vazão simulada e a observada nos postos.

2.2.4 - *Balanço hídrico nos açudes*

Para que seja feita a simulação mensal do deflúvio afluente ao trecho do rio Piranhas- Açu estudado, a precipitação ocorrida em um mês j , sobre cada bacia fechada, deve ser transformada em vazão afluente ao açude; e neste, deve ser feito o balanço hídrico para determinar a vazão liberada, ou não, para a bacia de jusante, a qual pode ser fechada ou livre (ver Figura 04). O encadeamento desse processo permite tanto a análise da capacidade hídrica das sub-bacias, como a geração de uma série sintética de deflúvios afluentes ao rio Piranhas-Açu.

No cálculo do balanço hídrico nos açudes, a equação utilizada contou com os seguintes termos:

$$V_j = V_{j-1} + V_{\text{entrada}} + V_{\text{prec.}} - V_{\text{evap.}} - V_{\text{demanda}} \quad (3)$$

Onde:

V_j → é o volume armazenado no mês j

V_{j-1} → é o volume armazenado no mês anterior

V_{entrada} → é o volume de entrada na bacia simulado pelo MODHISA

$V_{\text{prec.}}$ → é o volume precipitado sob a área do espelho d'água

$V_{\text{evap.}}$ → é o volume evaporado no açude

V_{demanda} → é o volume retirado para atender as demandas

Primeiramente, foram levantadas as fichas técnicas de todos os açudes, e ajustadas funções cota-área e cota-volume pelo Método da Regressão Linear de 1^a Ordem. Com essas funções, foram calculadas as áreas correspondentes aos volumes mensais dos açudes. E assim, calculado o volume precipitado sob a área do espelho d'água.

Para o cálculo do volume evaporado, foram utilizados os dados dos seguintes tanques classe A: São Gonçalo, para os açudes localizados nas bacias do Rio do Peixe, Alto Piranhas e Médio Piranhas; Serra Negra do Norte, para os açudes da bacia do Rio Espinharas; e Cruzeta, para os açudes da bacia do Rio Seridó.

Assim, o volume evaporado foi calculado pelo produto entre o dados de evaporação, e a área do espelho d'água do açude, em cada mês j .

O volume retirado do açude para atender as demandas foi estimado, já que não há informações disponíveis; a não ser a demanda para abastecimento da zona urbana, naqueles açudes responsáveis pelo atendimento das cidades. Porém, sabe-se que a irrigação demanda um volume muito superior, e este não é monitorado.

Então, para estimar a demanda de água do açude, foram gerados volumes sintéticos para um período onde são conhecidos os volumes reais mensais do açude, e feita a comparação.

2.2.4 Simulação

A simulação do processo de transformação chuva-vazão em toda a bacia do Piranhas-Açu engloba o encadeamento desse processo nas sub-bacias que a formam.

Estando o MODHISA calibrado para todas as sub-bacias (fechadas e livres), foi feita, inicialmente, a validação do modelo, interligando os deflúvios gerados por ele, com os resultados dos balanços dos açudes, respeitando a seqüência do diagrama unifilar mostrado, ou seja, a disposição dos açudes na rede fluvial. Utilizou-se para isso, a série de 10 anos de dados de precipitação dos postos pluviométricos (de 1994 a 2004); e o volume inicial dos açudes de janeiro de 1994.

Quando o volume V_j gerado no açude era maior que o seu volume máximo, então:

$$V_{vert} = V_j - V_{max} \quad (4)$$

onde:

V_{vert} → é o volume vertido; V_j → é o volume gerado pelo balanço; V_{max} → é o volume máximo do açude

Havendo vertimento, esse volume era transformado em vazão, e esta era somada à vazão gerada pelo MODHISA na bacia a jusante do açude.

Porém, para se obter resultados mais consistentes do ponto de vista prático, é necessário simular uma série de, pelo menos, 50 anos de dados, a fim de se construir curvas de permanência em pontos relevantes do rio, bem como as curvas de garantia dos açudes, avaliando assim, o real aporte hídrico da bacia no trecho estudado.

Portanto, foi acrescentado ao modelo integrado das sub-bacias mais 40 anos de dados da seguinte forma: a partir da série de 10 anos de precipitação dos postos, gerou-se 40 anos de dados sintéticos de chuva usando o Modelo Auto- Regressivo de 1ª Ordem de Thomas-Fiering, em cada sub-bacia.

Os modelos auto-regressivos tentam gerar um valor para a precipitação, para um determinado mês j no ano i , a partir dos valores dessa variável em meses anteriores.

Foram utilizados números aleatórios iguais para os postos de uma mesma sub-bacia; e desprezou-se os primeiros 10 anos gerados, considerados para o aquecimento do modelo.

A simulação final contou, portanto, com 50 anos de dados, ou seja, 600 meses, a partir de janeiro de 1994, realizada através da interligação de várias planilhas (uma planilha para cada sub-bacia) com a ajuda da Visual Basic do Microsoft Excel para a execução de rotinas comuns a todas elas.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Calibração do MODHISA

Os primeiros resultados obtidos foram os da calibração do MODHISA nas sub-bacias, ou seja, o ajuste dos parâmetros do modelo conforme explicado em Métodos.

A repetição desse processo nas diversas sub-bacias fez com que fosse adquirida sensibilidade com relação aos valores dos parâmetros, tornando possível uniformizar alguns deles, como os coeficientes máximo e mínimo de escoamento superficial (C_{\max} e C_{\min}); e alterar manualmente o resultado encontrado pelo Solver, pois este muitas vezes não fornece a melhor solução, ou ainda, a mais conivente.

A seguir, são exibidas as tabelas com os resultados dos parâmetros, separadamente para cada sub-bacia.

Tabela 01- Parâmetros do MODHISA para as bacias dos açudes localizados na sub-bacia do rio Seridó

| Açudes | D (mm/mês) | C _{min} | C _{máx} | X | α | R _{máx} (mm/mês) |
|-----------------------|---------------|------------------|------------------|------|-----|------------------------------|
| Boqueirão | 65 | 0,01 | 0,04 | 0,1 | 0,9 | 500 |
| Caldeirão | 125 | 0,01 | 0,04 | 0,1 | 0,2 | 300 |
| Dourado | 35 | 0,01 | 0,04 | 0,1 | 0,1 | 100 |
| Marechal Dutra | 79,6 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,8 | 150 |
| Várzea Grande | 60 | 0,01 | 0,04 | 0,25 | 0,8 | 178,7 |
| Passagem das Trairais | 40 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,8 | 100 |
| Cruzeta | 60 | 0,01 | 0,04 | 0,12 | 0,1 | 242 |
| Itans | 50 | 0,01 | 0,04 | 0,17 | 0,8 | 300 |
| Sta Luzia | 71 | 0,01 | 0,04 | 0,07 | 0,4 | 200 |
| São Mamede | 37,76 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,8 | 70 |
| Sabugi | 50 | 0,03 | 0,05 | 0,16 | 0,5 | 300 |

Tabela 02- Parâmetros do MODHISA para as bacias dos açudes localizados na sub-bacia do rio Espinharas

| Açudes | D (mm/mês) | C _{min} | C _{máx} | X | α | R _{máx} (mm/mês) |
|----------|---------------|------------------|------------------|------|------|------------------------------|
| Farinha | 53 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 250 |
| Capoeira | 10,3 | 0,01 | 0,04 | 0,1 | 0,1 | 100 |
| Jatobá I | 20 | 0,01 | 0,04 | 0,16 | 0,4 | 100 |

Tabela 03- Parâmetros do MODHISA para as bacias dos açudes localizados na sub-bacia Médio Piranhas

| Açudes | D (mm/mês) | C _{min} | C _{máx} | X | α | R _{máx} (mm/mês) |
|--------------------------|---------------|------------------|------------------|------|----------|------------------------------|
| Açude Escondido I | 132 | 0,01 | 0,04 | 0,15 | 0,8 | 300 |
| Açude Tapera | 100 | 0,01 | 0,04 | 0,9 | 0,9 | 366 |
| Açude Santa Rosa | 100 | 0,01 | 0,04 | 0,05 | 0,9 | 340 |
| Açude Riacho dos Cavalos | 50 | 0,01 | 0,04 | 0,19 | 0,7 | 200 |
| Açude Carneiro | 100 | 0,01 | 0,04 | 0,28 | 0,77 | 250 |
| Açude Eng. Arcoverde | 50 | 0,01 | 0,04 | 0,2 | 0,8 | 150 |

Tabela 04- Parâmetros do MODHISA para as bacias dos açudes localizados na sub-bacia do Alto Piranhas e rio do Peixe

| Açudes | D (mm/mês) | C _{min} | C _{máx} | X | α | R _{máx} (mm/mês) |
|----------------------|---------------|------------------|------------------|------|----------|------------------------------|
| Açude Pilões | 130 | 0,01 | 0,04 | 0,05 | 0,2 | 200 |
| Açude Lagoa do Arroz | 70 | 0,01 | 0,04 | 0,2 | 0,8 | 200 |
| Açude Bartolomeu I | 90 | 0,01 | 0,04 | 0,6 | 0,89 | 120 |
| Açude Eng. Ávidos | 90 | 0,01 | 0,04 | 0,3 | 0,9 | 230 |
| Açude São Gonçalo | 50 | 0,01 | 0,04 | 0,1 | 0,9 | 200 |

Tabela 05- Parâmetros do MODHISA para as bacias “livres”, monitoradas em seu exutório

| Bacias | D (mm/mês) | C _{min} | C _{máx} | X | α | R _{máx} (mm/mês) |
|-----------------------|---------------|------------------|------------------|------|----------|------------------------------|
| Posto São Fernando | 43 | 0,05 | 0,1 | 0,5 | 0,8 | 350 |
| Posto Serido | 55 | 0,1 | 0,12 | 0,3 | 0,1 | 425 |
| Posto Caicó | 99,5 | 0,25 | 0,63 | 0,1 | 0,6 | 136 |
| Posto Serra Negra | 86,7 | 0,04 | 0,14 | 0,20 | 0,25 | 195,1 |
| Posto Aparecida | 80 | 0,01 | 0,04 | 0,46 | 0,4 | 223,9 |
| Posto Antenor Navarro | 30 | 0,04 | 0,09 | 0,1 | 0,1 | 100 |

Convém lembrar que bacias “livres” são aquelas cujo escoamento não é barrado por um açude, mas sim, medido por um posto fluviométrico localizado em seu exutório. Porém, nem todas as bacias “livres” possuem medição em seu exutório; e nestas, os parâmetros foram considerados iguais aos da bacia de montante, devido à impossibilidade de calibração. Exemplos: as bacias à jusante dos açudes do Carneiro, Riacho dos Cavalos, e Santa Rosa (ver Figura 04 do item delimitação das sub-bacias).

Uma exceção a esse procedimento foi a bacia à jusante do açude São Gonçalo, no Alto Piranhas, que pôde ser calibrada devido à presença do posto Sítio Vassouras localizado imediatamente à jusante do seu exutório. Logo, o deflúvio gerado pela chuva ocorrida nessa bacia, somado ao deflúvio resultante da bacia do rio do Peixe, corresponde à vazão afluente ao rio Piancó nesse ponto; que pôde ser calculada pela diferença entre a vazão observada no posto Sítio Vassouras e a vazão observada no

posto Pau Ferrado, já que a contribuição lateral para o rio, nesse trecho entre esses os dois postos, é ínfima.

O resultado da calibração de algumas bacias é mostrado a seguir, juntamente com a chuva média da bacia no período da calibração:

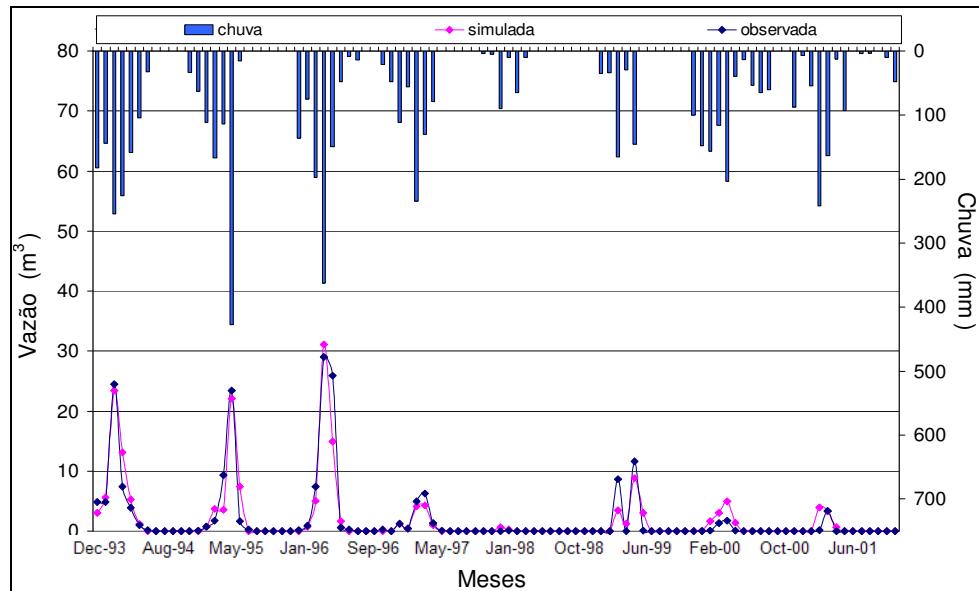


Figura 04- Calibração da bacia do posto Serra Negra do Norte localizado no rio Espinharas

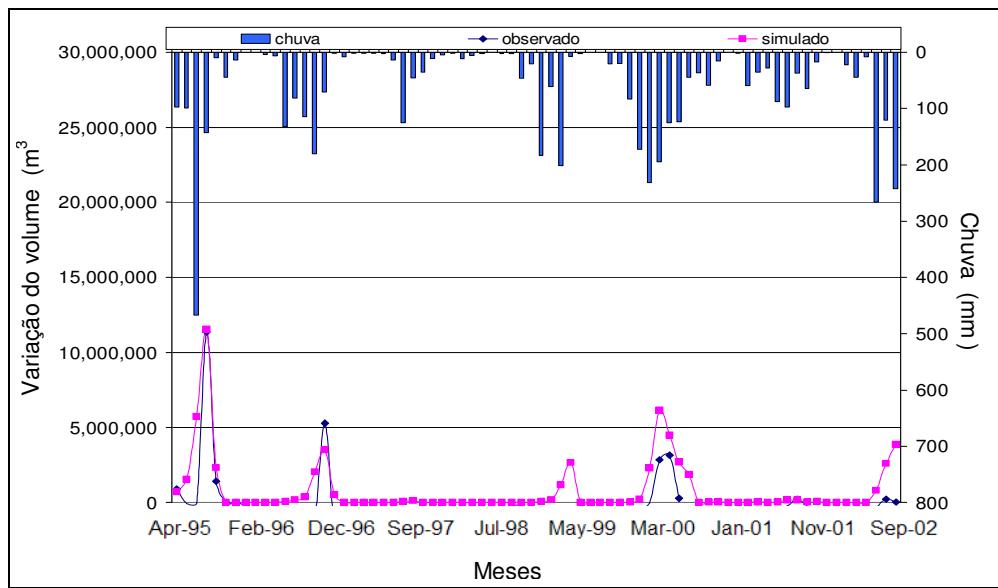


Figura 05- Calibração da bacia do açude Riacho dos Cavalos

Verifica-se que, de modo geral, o MODHISA representou bem os picos de vazão e de variação do volume dos açudes. Porém, superestimou alguns valores de deflúvio, em resposta a pequenos eventos

ocorridos. Uma explicação para esse fato é a de não se conhecer as retiradas de água dessas sub-bacias, antes da chegada ao seu exutório. Todavia, o MODHISA apresentou uma boa relação de causa e feito entre as precipitações e os deflúvio na bacia, ou seja, nem todo evento chuvoso resulta em um deflúvio capaz de variar de forma significativa o volume dos açudes; e o MODHISA mostrou-se eficiente quando foram comparados seus resultados com a variação positiva destes.

3.2 – Curvas de Permanência

Foram construídas as curvas de permanência das principais confluências do rio Piranhas-Açu com seus afluentes, utilizando-se a série de vazões geradas na simulação integrada da bacia, considerando a disposição dos açudes estudados.

A seguir é apresentada a curva de permanência da seção localizada na confluência do rio do Peixe com o rio Piranhas, apenas com os dados da série completa do posto Aparecida, com 18 anos de medição ininterruptos (figura 07). Em seguida, na figura 08, é apresentada a curva de permanência construída com a série de vazão resultante da simulação integrada da bacia, ou seja, levando em consideração os açudes e seus vertimentos, no período de 50 anos.

Verifica-se que existe uma concordância quanto aos períodos de vazões nulas; e como era esperado, as vazões sintéticas são maiores que as observadas, quando comparada a mesma porcentagem de tempo. Uma provável justificativa é que o modelo pode ter simulado vertimentos dos açudes que na realidade não ocorreram, aumentando assim o deflúvio.

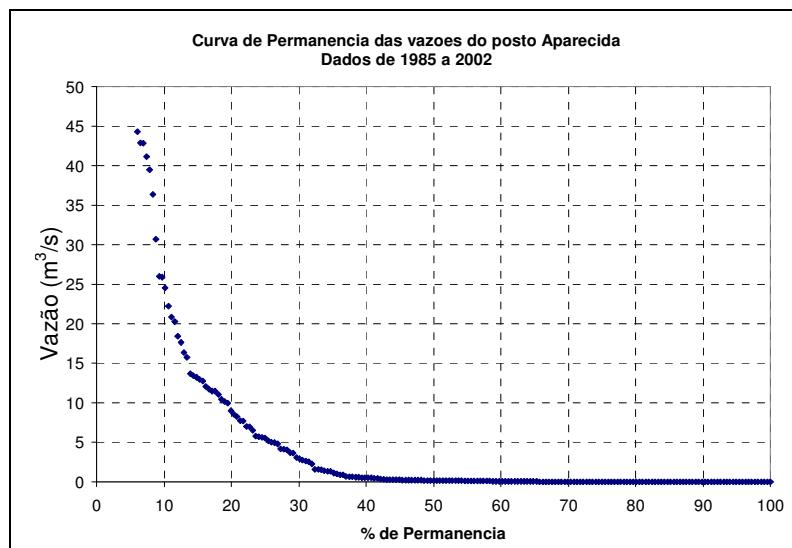


Figura 06- Curva de Permanência das vazões do posto Aparecida

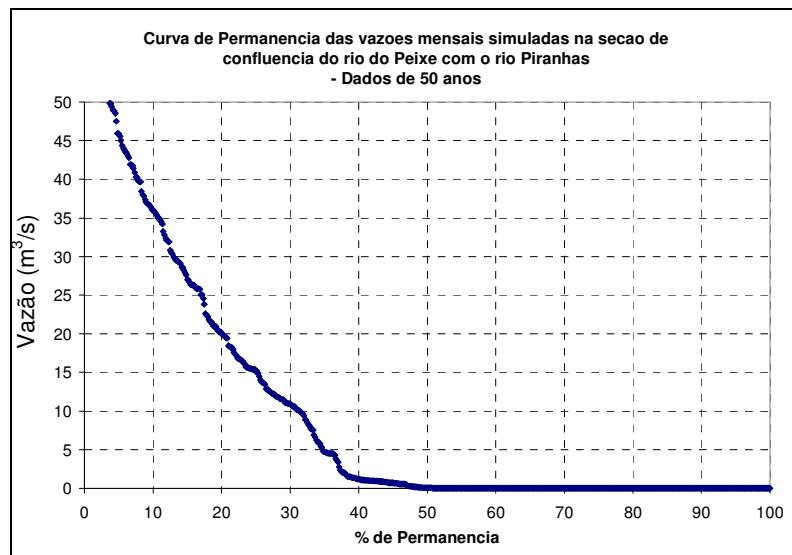


Figura 07- Curva de Permanência das vazões sintéticas geradas pelo MODHISA e pelo balanço hídrico dos açudes

Outra seção importante a ser analisada é a confluência do rio Piranhas com o rio Piancó. As vazões sintéticas geradas pelo modelo no ponto de confluência do rio Piranhas com o rio Piancó refletem a contribuição de toda a bacia do rio do Peixe e Alto Piranhas, levando em conta os açudes. A curva de permanência dessas vazões foi plotada na figura 08 juntamente com a curva mostrada acima, para uma série de vazão de 40 anos.

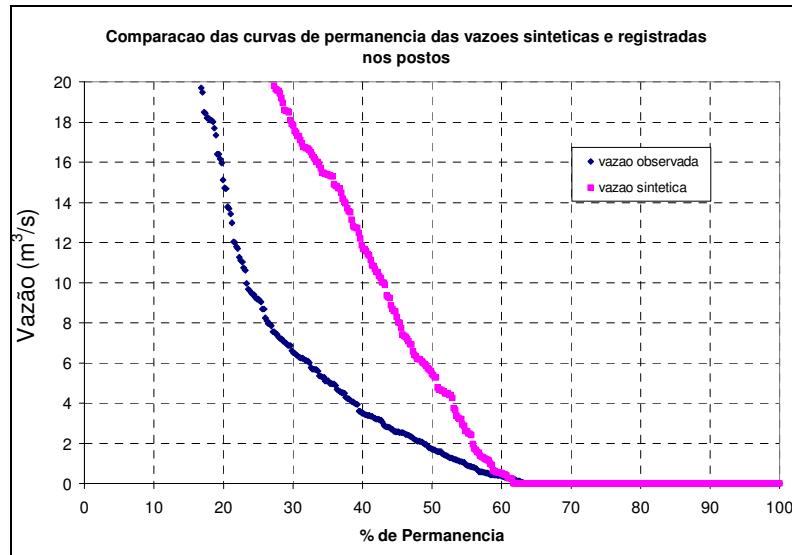


Figura 08- Curva de Permanência das vazões mensais sintéticas, e observadas nos postos

Portanto, a curva sintética novamente superestimou as vazões; fato que pode ser decorrente da desconsideração das demandas nas bacias de contribuição (Alto Piranhas e rio do Peixe), devido à falta de informações.

Essa demanda inclui também o volume de água retirado dos pequenos açudes, para subsistência. O MODHISA, ao simular o enchimento dos pequenos açudes através da variável R_j , considerara que este varia apenas com a evaporação; portanto, seria interessante a incorporação de um fator que estimasse as perdas de água dos pequenos açudes pela retirada de água dos seus usuários.

4 - CONCLUSÕES

Conclui-se que o modelo chuva-vazão empregado, o MODHISA, apresentou boa adequação às características hidrológicas das sub-bacias contribuintes do rio Piranhas-Açu e seus afluentes; tornando-se uma ferramenta de fácil aplicação e de bons resultados.

A simulação da operação dos açudes, que reproduziu o balanço hídrico mensal no decorrer dos 50 anos de precipitações gerados, e deflúvios calibrados pelo MODHISA, forneceram as curvas de permanecia em seções de interesse, as quais se assemelham com aquelas construídas a partir dos dados dos postos fluviométricos, principalmente nos períodos de vazão nula. Porem superestimaram as maiores vazões, ou seja, aquelas com tempos de permanência mais curtos.

5 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq . Agradecemos também a SERHID-Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, a AESA- Agencia de Água e Saneamento da Paraíba, e ao DNOCS- Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, pelos dados fornecidos.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, L. G. T. e PORTO, R. L. L (1997). *MODSIM: Modelo de Rede de Fluxo para Simulação de Bacias Hidrográficas - manual do usuário e estudos de casos.*
- BRAGA, C. F. C.; DINIZ, L. S.; GARJULLI, R. (2004). *Construção do marco regulatório do Sistema Curema-Açu*. In Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís.
- CONSÓRCIO-CNEC-SOGREAH (1975). *Aproveitamento Hidro-Agrícolas dos Açudes de Itans, Sabugi, Cruzeta e Pau dos Ferros-RN*. Ministério do Interior-Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Volume 2.

- LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. (1989). *MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-calibrável*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 55p. (Recursos Hídricos Publicação n. 21).
- MAUAD, F.F.; ALBERTIN, L.L.; CORRÊA FILHO, C. R. R.; BARBOSA, A. R. A.; OLIVEIRA, H. R..(2003). *Avaliação de Conflitos de Usos Múltiplos de Água em Sistemas de Recursos Hídricos: o Estado da Arte*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR
- NASCIMENTO JÚNIOR, C. N.S. N.(2004). *Transformação Chuva/Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Espinharas – Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído AçuMod*. Dissertação de Mestrado, à Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN
- PAIVA, A.E.D.B.; ALBUQUERQUE, D.J.S.; PASSERAT DE SILANS, A.M.B.; ALMEIDA, C.N. (1999). *Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia do Rio Taperoá – Estado da Paraíba*. Anais eletrônico do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Novembro, 1999.
- RIGHETTO, A. M.;GUIMARÃES FILHO, J. A. (2003).*Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8 n.2, abr/jun 2003, 19-29.
- RIGHETTO, A. M.;GUIMARÃES JÚNIOR, J. A.;MELO, J. M. B. G. (2002). *Aplicação do Modelo MODHISA para Geração de Vazões Médias Mensais em Rios do Semi-Árido Nordestino*. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió-AL.
- SCIENTEC - Associação para o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia (1998). *Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte-Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas – Açu no Território Paraibano*.
- SILANS¹, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B.(2000). *Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído AÇUMOD à Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe- Estado da Paraíba*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH. Vol 5, n. 3, jul/set
- SILANS², A.M.B.P.; PAIVA, A.E.D.B. e SILVA JÚNIOR, A.N.(2000) - *Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído AÇUMOD à Bacia Hidrográfica do Rio Gramame - Estado da Paraíba*. Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal-RN, Novembro 2000.