

# INFILTRAÇÃO, RECARGA E DESCARGAS SUPERFICIAIS EM REGIÃO LITORÂNEA

Antonio Marozzi Righetto<sup>1</sup>

**Resumo** – Este estudo refere-se a bacia litorânea muito permeável, a do sistema lacustre do Bonfim, situada ao sul de Natal, RN. Nessa região, a capacidade de infiltração do solo é elevada e a resposta em vazão dos cursos d'água decorrente da ocorrência de precipitação somente é possível de ser avaliada, quantificada e simulada através de um modelo hidrológico que priorize os processos de infiltração e percolação das águas do lençol freático que mantém o escoamento de base desses riachos litorâneos. Neste trabalho é descrita a concepção do modelo de transformação chuva-vazão, apresentada a formulação utilizada e, como aplicação do modelo, são fornecidos os dados utilizados no estudo de duas pequenas bacias litorâneas e os resultados alcançados, quais sejam: os hidrogramas simulados e as curvas de permanência geradas. A facilidade de utilização do modelo desenvolvido, o pequeno tempo de processamento para gerar uma seqüência temporal de vazões em intervalos de tempo de 1 h de duração ao longo de várias décadas são atributos que qualificam o modelo como um instrumento de valia para a análise da transformação da chuva em vazão em bacias litorâneas permeáveis.

**Abstract** – The study of a very permeable shore watershed, the Bonfim lacustre system sited at south of Natal in Rio Grande do Norte State, resulted in the development of a rainfall-discharge model which motivated this presentation. In the studied region, the soil infiltration capacity is very high so that the response of the watershed due to rainfall only can be evaluated, quantified and simulated through a hydrologic model which emphasizes the infiltration, groundwater recharge and free-surface percolation, the principal components to the baseflow of the creeks in the catchment. Model conception, formulation and, as model application, the data employed and the results of simulations, i.e., the simulated hydrographs and the generated permanent curves which characterizes the regime of creeks, are presented. The easiness of using the model, the low processing time to generate a very large discharge time series with 1 h resolution are attributes

---

<sup>1</sup> Professor Dr. da Universidade Federal do Rio Grande do Norte LARHISA / CT / UFRN - Rua das Tílias, 2114; Pitimbu; 59067-690 Natal, RN, righetto@ct.ufrn.br

which qualify the model as an important tool to the analysis of rainfall-discharge transformation in shore watersheds.

**Palavras-Chave** – Modelo chuva-vazão; Recarga; Escoamento de Base.

## **INTRODUÇÃO**

Modelos de transformação da chuva em vazão são de grande valia para a geração de séries temporais de vazões em cursos d'água, principalmente quando é precária a disponibilidade de informações fluviométricas.

Apesar de inúmeros modelos de transformação chuva-vazão estarem disponíveis, a grande maioria baseia-se na geração de deflúvios superficiais a partir do instante em que a capacidade de infiltração do solo se iguala com a intensidade de precipitação. Recente levantamento de modelos hidrológicos dessa natureza encontra-se em Singh e Woolhiser (2002).

Entretanto, em bacias muito permeáveis como é o caso de bacias litorâneas com litologia dunar, os deflúvios superficiais somente ocorrem em pequenas áreas próximas dos cursos d'água. Quase toda a área de drenagem absorve a precipitação e desta absorção parte é drenada aos cursos d'água através dos processos de percolação subsuperficial e profunda e de elevação da superfície potenciométrica do aquífero freático.

A disponibilidade de modelos hidrológicos para simular o processo de transformação da chuva em vazão em bacias muito permeável é praticamente inexistente, principalmente quando se deseja utilizar modelos simplificados, com a atribuição de valores dos parâmetros realizada de forma sistemática através de simulações planejadas para realizar a calibração desses parâmetros.

Apesar da viabilidade de se utilizar modelos com embasamento físico, como os apresentados por Freeze(1969, 1971, 1972<sup>a</sup>, 1972<sup>b</sup>), a tarefa de calibração dos parâmetros e o uso do modelo para bacias com dimensões que permitam o uso contínuo da produção de águas geradas pelas precipitações é extremamente onerosa e quase sempre impraticável em estudos voltados a projetos de engenharia.

O presente trabalho é fruto do estudo de uma bacia litorânea muito permeável, a do sistema lacustre do Bonfim, situada ao sul de Natal, RN. Nessa região, a capacidade de infiltração do solo é elevada e a resposta em vazão dos cursos d'água decorrente da ocorrência de precipitação somente é possível de ser avaliada, quantificada e simulada através de um modelo hidrológico que priorize os processos de infiltração e percolação das águas do lençol freático que mantém o escoamento de base desses cursos d'água litorâneos.

Nesta apresentação, é descrita a concepção do modelo de transformação chuva-vazão, apresentada a formulação utilizada e, como aplicação, são fornecidos os dados utilizados no estudo de duas pequenas bacias litorâneas e os resultados alcançados, quais sejam: os hidrogramas simulados e as curvas de permanência geradas.

A facilidade de utilização do modelo desenvolvido, o pequeno tempo de processamento para gerar uma seqüência temporal de vazões em intervalos de tempo de 1 h de duração ao longo de várias décadas são atributos que qualificam o modelo como um instrumento de valia para a análise da transformação da chuva em vazão em bacias litorâneas permeáveis.

## **O MODELO MATEMÁTICO**

Basicamente, o modelo consiste de dois módulos principais. O primeiro módulo realiza a transformação do resultado do binômio precipitação/evapotranspiração diária sobre a superfície do terreno em percolação profunda e recarga do aquífero freático. O segundo módulo associa o nível piezométrico com a recarga e com a vazão de contribuição lateral aos trechos considerados dos cursos d'água ou drenos naturais.

Evidentemente, o modelo numérico composto por esses dois módulos não pode ser entendido como totalmente físico, uma vez que não se dispõe de informações suficientes. O modelo deve ser classificado como semi-empírico, pois, certas variáveis do modelo assumirão valores fictícios ou aproximados de modo a que os resultados de simulação forneçam valores de vazões compatíveis com as vazões observadas.

Para simular a recarga do aquífero freático, construiu-se um modelo matemático/ algoritmo computacional baseado na equação de Richards, que exprime o movimento da água em uma coluna vertical de solo insaturado. Na coluna de solo, de espessura variável (da ordem de 20 m para a região do Sistema Lacustre do Bonfim, RN), existem duas condições de contorno: a de superfície e a de recarga do lençol freático.

Na superfície do terreno, tem-se como condição de contorno o fluxo de água descendente ou ascendente. Ocorrendo precipitação, o valor da precipitação diária,  $P$ , se identifica com o fluxo descendente nessa fronteira. Nos dias em que não ocorrem precipitações, em função da evapotranspiração potencial e disponibilidade de água da camada superficial de solo (fixada nos dois primeiros metros de profundidade), determina-se a evapotranspiração real,  $ET$ ; que é o fluxo vertical ascendente nessa fronteira.

No contorno inferior, na interface com a superfície piezométrica do lençol freático, o fluxo não é conhecido, porém, a carga de sucção do solo é fixada e constante, igual à atmosfera e tomada

como zero. O fluxo nesse contorno será o principal resultado da simulação desse modelo de percolação, que corresponde à recarga diária do aquífero freático.

A percolação de água no perfil vertical de solo não saturado é simulada através da discretização da seguinte equação diferencial de Richards (Righetto, 1998):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial}{\partial z} (\psi + z) \right] \quad (1)$$

sendo  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) o teor de umidade do solo e função da profundidade  $z$  (cm) e do tempo  $t$  (dia);  $K$  (cm/dia) a condutividade hidráulica do solo, uma função do teor de umidade do solo;  $\psi$  (cm) a carga de sucção do solo.

A solução numérica dessa equação diferencial exige a especificação da relação empírica entre  $K$  e  $\theta$  e entre  $\psi$  e  $\theta$ . A literatura especializada fornece relações empíricas entre essas variáveis, válidas para um grande número de solos. Neste estudo, foram utilizadas as relações empíricas de van Genuchten, amplamente aceitas pelos especialistas em água no solo, expressas por:

$$K = K_{\text{sat}} \cdot \left( \frac{\theta}{n} \right)^{m_1} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_{\text{res}} + \frac{n - \theta_{\text{res}}}{1 + (C \cdot |\psi|)^{m_2}} \quad (3)$$

em que  $K_{\text{sat}}$  (cm/dia) é a condutividade hidráulica do solo saturado;  $n$  é a porosidade do solo;  $\theta_{\text{res}}$  é o teor de umidade residual do solo;  $m_1$  e  $m_2$  expoentes empíricos do solo; e  $C$  um parâmetro de calibração.

Com essas equações, a incógnita do problema passa a ser  $\theta(z, t)$  e calculada no centro de cada célula de discretização do perfil vertical do solo.

A recarga  $R(t)$  é determinada através da seguinte expressão de fluxo efluente à célula em contato com a superfície freática:

$$R(t) = \bar{K} \cdot (\psi / \Delta z + 1) \quad (4)$$

sendo:  $\psi$  a carga de sucção da célula adjacente acima da superfície freática;  $\Delta z$  é a espessura da célula; e  $\bar{K}$  a condutividade hidráulica média dessa célula.

Por conveniência, adianta-se aqui que a recarga profunda foi subdividida em duas parcelas: a de recarga efetiva para o aquífero freático e, outra, para o escoamento hipodérmico ou subsuperficial, acompanhando a topografia do terreno. Os percentuais de repartição da recarga nesses dois fluxos são obtidos no processo de calibração do modelo. Essa subdivisão de fluxo foi necessária para se conseguir ajustar as vazões produzidas com as vazões observadas nos cursos d'água. Conceitualmente é correta essa subdivisão, uma vez que necessariamente ocorrem escoamentos subsuperficiais nas encostas de bacias permeáveis.

O segundo módulo do modelo de simulação tem como entrada a recarga diária espacial sobre a superfície freática e fluxos subsuperficiais e, como saída, as vazões laterais aos trechos considerados dos riachos ou drenos, quantificadas pelo fluxo subterrâneo saturado e pelo fluxo subsuperficial ou hipodérmico. Além dos fluxos direcionados aos cursos d'água, foram considerados, também, os fluxos subterrâneos profundos e direcionados ao mar. A introdução desses fluxos é essencial para a obtenção de vazões aos cursos d'água, compatíveis com os valores observados.

Para cada trecho  $i$ , de comprimento  $L_i$ , associa-se uma área de influência  $A_i$ . Em cada uma dessas áreas, tem-se um compartimento com distribuição espacial de armazenamento de água que representa o aquífero freático associado ao trecho.

Através de uma equação de balanço, associa-se a recarga diária,  $R(t)$ , com o nível da superfície freática  $H$ , ou melhor, com a variação do nível da superfície freática,  $\Delta H$ , com a vazão lateral afluente ao trecho de riacho considerado,  $Q_L$ , assim como com a vazão subterrânea profunda,  $Q_{\text{sub}}$  e com as contribuições superficial direta e subsuperficial ou hipodérmica.

Nas simulações de calibração do modelo, as bacias de drenagem Boacica e Pium, RN, chegou-se a conclusão de que há escoamento direto na bacia de drenagem, que ocorre próximo aos cursos d'água e na encosta sujeita à saturação do solo, provocada pelo escoamento hipodérmico. Assim, considerou-se no modelo que uma fração da precipitação diária transforma-se em escoamento direto, toda vez que a precipitação diária é superior a um certo valor mínimo, ajustado em 30,0 mm/dia.

A superfície piezométrica associada a um trecho de riacho foi expressa por uma parábola, de modo que, a uma distância  $x$  do riacho, a superfície freática é calculada pela seguinte expressão:

$$H = H_0 - a \cdot x^2 - bx \quad (5)$$

sendo  $H$  a cota piezométrica da superfície freática na posição  $x$ ;  $H_0$  a cota piezométrica da superfície piezométrica na seção central do trecho do riacho considerado; e  $a$  e  $b$  parâmetros de calibração, sendo que

$$a = 2 \frac{H_d - H_o}{d} \quad (6)$$

$$b = -\frac{H_d - H_o}{d^2} \quad (7)$$

e  $H_d$  a cota piezométrica no divisor de águas correspondente à área de drenagem do trecho de riacho considerado;  $d$  é o comprimento total da área de drenagem transversalmente ao trecho considerado.

Pela equação da continuidade se obtém a seguinte expressão que relaciona a recarga,  $R(t)$ , com a variação da cota piezométrica no divisor de águas,  $\Delta H_d$ , a vazão lateral ao trecho de riacho considerado,  $Q_L$ , e as vazões subterrâneas afluyente e efluente à área considerada,  $Q_{BM}$  e  $Q_{BJ}$ :

$$\Delta H_L(t) = H_L(t) - H_L(t - \Delta t) = \alpha_1 (R_{\text{efet}}(t) - (Q_L(t) + Q_{BJ}(t) + Q_{BM}(t))) \cdot \frac{\Delta t}{n.A} \quad (8)$$

sendo  $\alpha_1$  um parâmetro de calibração do modelo. A vazão lateral ao trecho de riacho considerado é relacionada com a superfície freática através da seguinte expressão:

$$Q_L = -K_{\text{sat}} \cdot L \cdot (H_o - H_f) \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)_o = K_{\text{sat}} \cdot L \cdot (H_o - H_f) \cdot a \cdot \alpha_2 \quad (9)$$

sendo  $L$  o comprimento do trecho do curso d'água,  $H_f$  a elevação do nível mínimo do aquífero que contribui para com o escoamento de base do curso d'água e,  $\alpha_2$  um parâmetro de calibração do modelo.

A vazão subterrânea entre os compartimentos do aquífero é avaliada por uma relação semelhante à utilizada para as estimativas das vazões de contribuição lateral aos cursos d'água, expressa por:

$$Q_{\text{sub}}(t) = Q_{BJ}(t) = K_{\text{sat}} \cdot d \cdot \frac{H_o + H_f}{2} \cdot a' \cdot \alpha_3 \quad (10)$$

em que  $a'$  é o gradiente da superfície potenciométrica do aquífero e  $\alpha_3$  um coeficiente de ajuste, de calibração do modelo.

A contribuição de vazão do deflúvio superficial é simplesmente avaliada pela relação de runoff, ou seja:

$$Q_{\text{direto}}(t) = C_{\text{runoff}} \cdot A \cdot I(t) \quad (11)$$

em que  $C_{\text{runoff}}$  é o coeficiente de deflúvio superficial, estimado no processo de calibração do modelo, como já definido anteriormente,  $A$  é a área de superfície do compartimento e  $I(t)$  a precipitação diária.

O escoamento hipodérmico é estimado pela seguinte relação:

$$Q_{\text{hipo}}(t) = [R(t) - R_{\text{efetivo}}(t)] \cdot A \quad (12)$$

sendo  $R(t)$  a recarga diária subterrânea e  $R_{\text{efetivo}}(t)$  a recarga que efetivamente atinge a superfície freática do aquífero livre.

Em suma, com essas equações, para cada compartimento do sistema obtém-se, a partir da seqüência de precipitações diárias,  $I(t)$ , o deflúvio superficial,  $Q_{\text{runoff}}(t)$ , a recarga  $R(t)$ , o escoamento hipodérmico,  $Q_{\text{hipo}}(t)$ , a descarga subterrânea,  $Q_{\text{sub}}(t)$  e a contribuição lateral de vazão ao curso d'água,  $Q_L(t)$ . Com a topologia da geomorfologia da região, faz-se as conexões entre as contribuições permitirão que sejam estimadas nas seções consideradas, as vazões diárias dos riachos ou drenos naturais.

Para o Sistema Lacustre do Bonfim, RN, a área de drenagem que contribui para as vazões do riacho Boa Cica foi subdividida em 12 compartimentos compreendendo as áreas de nascente na região das lagoas existentes e as encostas dos riachos Boa Cica e Timbó. Com relação à área de drenagem do riacho Pium, esta foi subdividida em 4 compartimentos. O exutório considerado no riacho Boa Cica foi a seção imediatamente a jusante da confluência dos riachos Timbó e Boa Cica. No riacho Pium, a seção exutória considerada para efeito de possível captação de água para abastecimento, foi a seção localizada imediatamente a jusante de um pequeno açude existente. A área de drenagem do riacho Boa Cica considerada neste estudo é igual a 69 km<sup>2</sup> e a do riacho Pium, 52 km<sup>2</sup>.

## SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Através de informações topográficas, de níveis d'água de poços de observação e de vazões observadas em trechos dos riachos Boa Cica e Pium, foi possível ajustar os valores dos parâmetros do modelo matemático de forma a se obterem, nas simulações computacionais, valores simulados de vazões compatíveis com os valores observados. Entretanto, devido ao número elevado de

variáveis e parâmetros do modelo e pela pouca informação disponível sobre as vazões dos riachos Boa Cica e Pium - inexistência de série diária contínua - não se pode pretender obter a calibração do modelo no sentido de se reproduzir valores observados, uma vez que o processo de transformação chuva-vazão envolve estágios fenomenológicos intermediários complexos e tais fenômenos só poderiam ser investigados através de campanhas intensivas em campo, cujas atividades só poderiam ser planejadas ao nível de pesquisa técnico-científica de médio ou longo prazos.

Com o modelo ajustado, foram realizadas simulações de vazões afluentes aos riachos durante um período longo de 60 anos de dados de precipitação diária. Como já relatado anteriormente, com a seqüência de precipitações diárias foi obtida a seqüência de valores diários da recarga do aquífero para cada área de contribuição considerada e, em seguida, as vazões diárias correspondentes aos trechos dos riachos Boa Cica e Pium.

De posse da seqüência de vazões diárias do riacho Boa Cica na seção logo a jusante da confluência desse riacho com o riacho Timbó, e a jusante do açude existente no riacho Pium, foram analisadas estatisticamente as vazões diárias sintéticas no sentido de serem levantadas as curvas de permanência de vazão diária desses riachos a fim de se verificar a capacidade exploratória de tais mananciais superficiais.

Com esses resultados, foi possível estabelecer, com certa garantia, a vazão de derivação permitida do riacho Boa Cica e do riacho Pium para o abastecimento de água.

Essa descrição metodológica para a estimativa da vazão de derivação permitida do riacho Boa Cica não contempla o represamento de água por açudagem, uma vez que as condições locais não são favoráveis à regularização de vazões.

Para as simulações da infiltração, percolação da água no solo e recarga do aquífero freático é preciso especificar os seguintes parâmetros do solo: porosidade, condutividade hidráulica saturada e parâmetros das equações que relacionam o teor de umidade do solo com a condutividade hidráulica e com a carga de sucção. Os valores ajustados desses parâmetros encontram-se na Tabela 1.



**Tabela 1** – Parâmetros adotados ou ajustados do modelo de infiltração e percolação de água no solo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor fixado ou ajustado</b>
Porosidade, $n$	0,40
Porosidade efetiva, $n_{ef}$	0,15
Teor de umidade residual, $\theta_r$	0,01
Coefficiente empírico $C$ da relação $\theta - \psi$	0,01
Condutividade hidráulica saturada, $K_{sat}$	1000 cm/dia
Espessura de cada célula de discretização, $\Delta z$	2000cm
Profundidade média da zona não saturada, $z$	20.000 cm
Parâmetro de ajuste, $\alpha_1$	0,9
Parâmetro de ajuste, $\alpha_2$	0,6
Parâmetro de ajuste, $\alpha_3$	0,6

Os parâmetros  $m_1$  e  $m_2$  foram determinados através das seguintes equações empíricas, ajustadas para garantir a condição hidrostática do perfil de água na zona não saturada do solo:

$$m_1 = \ln[(n - \theta_r)/(\theta_r \cdot (\xi - 1)) - 1] / \ln[C \cdot z] \quad (13)$$

$$m = \ln[k_c] / \ln[(\theta_c - \theta_r)/(n - \theta_r)] \quad (14)$$

sendo  $k_c=0,1$ ,  $\theta_c=0,25$ ,  $\xi=1,5$ ,  $C=0,01$  os parâmetros de ajuste do perfil de solo; e  $z$  a espessura da zona não saturada do solo.

Os valores levantados das cotas piezométricas da superfície piezométrica nos vários compartimentos do Sistema Lacustre do Bonfim permitiram a fixação de uma superfície potenciométrica inicial para efeito de simular temporalmente o processo de recarga do aquífero e fluxos de descarga para os cursos d'água e para o mar. A Tabela 2 fornece os valores fixados e/ou ajustados dos principais parâmetros associados ao aquífero freático dos 12 compartimentos (denominados 1BC, 2BC,...,12BC) da área de drenagem do riacho Boa Cica e dos 4 compartimentos (denominados 1P, 2P, 3P,4P) do riacho Pium. A Figura 1 mostra os compartimentos adotados para as simulações das vazões superficiais. A base impermeável do aquífero foi fixada em  $-50,0$  m para efeito de avaliação das descargas subterrâneas para o mar.

Valores de vazões dos riachos Boa Cica e Timbó foram levantados durante o período de junho a agosto de 2001 e, agrupado a esses valores, medidas realizadas pela SERHID em meses anteriores; tais valores, acrescidos a medidas realizadas ao longo do desenvolvimento deste projeto, foram fundamentais para se ajustar o modelo matemático e dar credibilidade aos valores de vazões

gerados sinteticamente. A Figura 2 apresenta os dados de vazões do riacho Boa Cica levantados pela SERHID. A Tabela 3 fornece valores de medições de vazões dos riachos Boacia e Timbó, levantados durante ao ano de 2001.

A Figura 3 mostra os locais de medições de vazão dos riachos Boa Cica, Timbó e Pium.

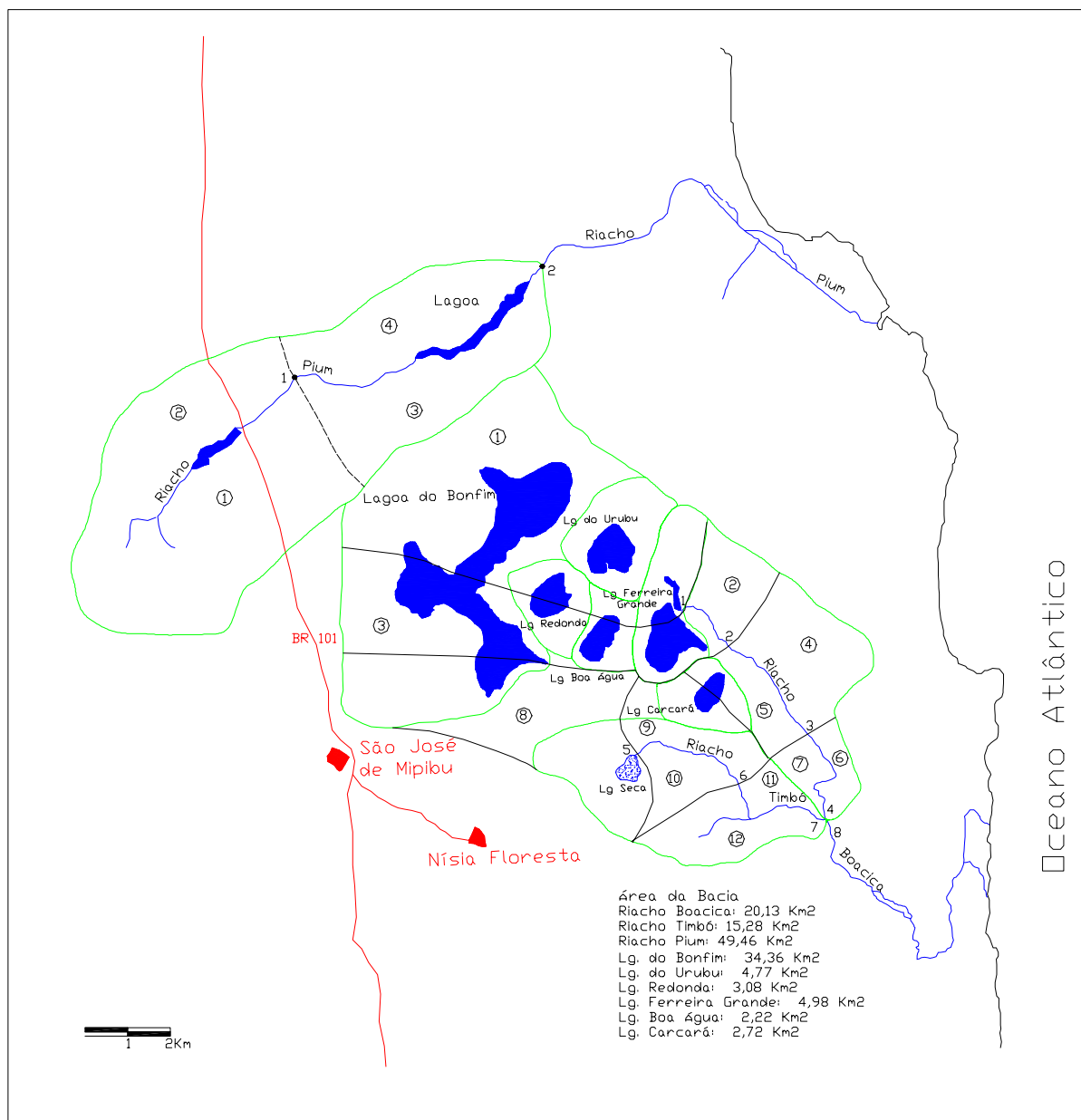
As precipitações diárias utilizadas para simular as vazões diárias dos riachos acima mencionados cobrem um período de 60 anos e foram registradas pelo posto pluviométrico de São José do Mipibu, RN. Nas simulações computacionais, os 10 primeiros anos de precipitações diárias foram usados para “aquecer” o modelo, uma vez que se adotou como condição inicial uma situação hidrostática do perfil de água no solo não saturado. Dessa maneira, após 10 anos de simulações diárias, obteve-se uma situação realista de percolações de água do solo e, desta situação, foram então realizadas simulações cobrindo um período adicional de 50 anos. Os resultados gerados nesse período foram utilizados para a obtenção das curvas de duração de vazões diárias dos riachos Boa Cica e Pium.

## **RESULTADOS**

A Figura 4 e 5 ilustram as seqüências de precipitações diárias observadas e de recargas diárias simuladas com o modelo de infiltração e percolação de água no solo, apenas para os anos de 1999 e 2000. Na realidade, foi gerada uma seqüência de 50 anos de recargas diárias a partir das precipitações diárias observadas, período que compreende as décadas de 50 a 90.

Observa-se, por essas figuras, a capacidade de atenuação dos pulsos de precipitação pela percolação da água no solo não saturado. Enquanto são observadas precipitações que cobrem uma faixa entre 0 e 120 mm, a recarga profunda varia entre valores de 0,5 e 22,0 mm.

A Figura 6 sintetiza os valores de recarga profunda para todo o período de 50 anos de simulação, por meio da distribuição de freqüência relativa a intervalos de classe de amplitude de 0,50 mm/dia.



**Figura 1** – Compartimentos adotados para as simulações de vazões dos riachos Boa Cica e Pium.

A recarga diária média é igual a 1,4 mm/dia com variações significativas em torno desse valor, em faixa que varia desde 0,5 mm/dia até valores de 22,0 mm/dia. No entanto, devido a grande persistência dos valores em torno da média, esta pode ser considerada como valor significativo nas estimativas de recarga para períodos anuais.

As Figuras 7 e 8 apresentam as vazões diárias simuladas do rio Boa Cica, apenas para os anos de 1999 e 2000. As Figuras 9 e 10 apresentam as vazões diárias correspondentes para o riacho Pium. Na realidade, foram simulados 50 anos de vazões diárias, cuja apresentação de resultados são sintetizadas nas distribuições de frequências mostradas nas Figuras 11 a 14.

Verifica-se que as vazões médias dos riachos Boa Cica e Pium nas seções consideradas são, respectivamente, iguais a 450 e 400 L/s. Embora o riacho Boa Cica apresente área de drenagem

superior ao do Pium, este recebe água subterrânea através de gradiente potenciométrico superior aos estimados para o Boa Cica. Por essa razão, avalia-se que as vazões dos dois riachos são de mesma ordem de grandeza.

### Vazões de Captação Recomendadas

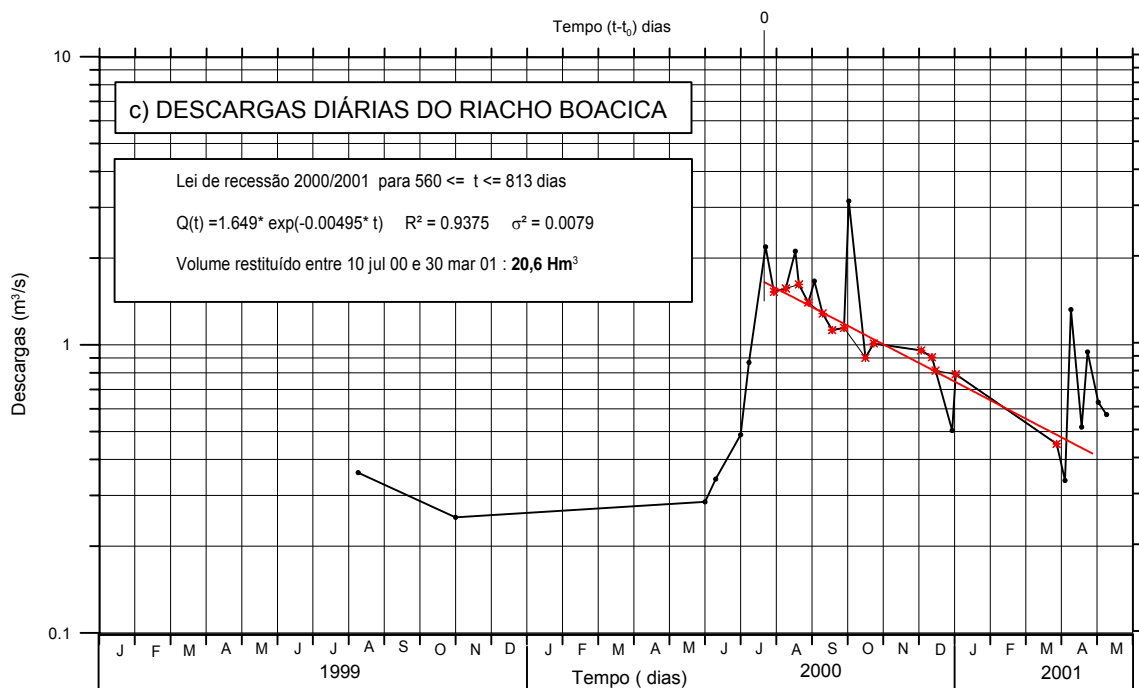
As vazões recomendadas de utilização dos riachos Boa Cica e Pium para o abastecimento de água devem se situar na faixa de garantia superior a 90 %, correspondendo a valores de vazões da ordem de 300 l/s uma vez que se desaconselha a regularização de vazões desses riachos por represamento, dada a alta permeabilidade do solo.

Ressalta-se que o riacho Pium vem sendo utilizado mais intensamente, uma vez que atravessa região com significativo desenvolvimento sócio-econômico, o que poderá trazer conflitos de uso da água caso sejam transpostos valores superiores a 250 l/s desse manancial.

O riacho Boa Cica é pouco explorado, com pequenas propriedades que retiram vazões inexpressivas para o abastecimento e irrigação de pequenas lavouras. Neste caso, a captação de água do riacho levaria ao estabelecimento de uma situação de fato quanto à disponibilidade hídrica para os proprietários das áreas ribeirinhas ao riacho Boa Cica, antecipando assim, possíveis conflitos futuros.

**Tabela 2** – Parâmetros fixados ou ajustados do aquífero freático nos compartimentos considerados.

Compartimento	A (km <sup>2</sup> )	H <sub>d</sub> (m)	H <sub>o</sub> (m)	H <sub>base</sub> (m)	d (m)	K <sub>sat</sub> (m/dia)
1BC	20,0	40,0	35,0	34,0	2,000	10,000
2BC	3,0	40,0	30,0	29,0	0,800	10,000
3BC	13,0	40,0	30,0	29,0	4,000	10,000
4BC	7,0	25,0	20,0	19,0	1,500	10,000
5BC	3,0	25,0	20,0	19,0	0,700	10,000
6BC	2,0	10,0	5,0	4,0	0,400	10,000
7BC	2,0	10,0	5,0	4,0	0,400	10,000
8BC	15,0	30,0	25,0	24,0	4,000	10,000
9BC	5,0	20,0	15,0	14,0	1,500	10,000
10BC	3,0	20,0	15,0	14,0	1,500	10,000
11BC	2,0	15,0	10,0	9,0	0,700	10,000
12BC	4,0	15,0	10,0	9,0	0,700	10,000
1P	20,0	40,0	30,0	25,0	6,000	10,000
2P	10,0	40,0	30,0	25,0	2,000	10,000
3P	14,0	40,0	20,0	15,0	6,000	10,000
4P	8,0	40,0	20,0	15,0	2,000	10,000



**Figura 2** – Vazões observadas do riacho Boa Cica pela SERHID.

**Tabela 3** – Medições de vazão dos riachos Boa Cica, Timbó e Pium.

Seção	Resumo das Medições de vazão (l/s)				
	1ª (23 e 24/jun)	2ª (07 e 08/jul)	3ª (21 e 22/jul)	4ª (04 e 05/ago)	5ª (18 e 19/ago)
Seção 1-Rio Timbó	435.11	486.86	499.89	513.34	559.88
Seção 2-Rio Boacica/Timbó	1,576.00	1,611.35	1,787.66	1,462.08	1,222.13
Seção 3-Rio Boacica	766.64	709.50	716.20	715.69	654.91
Seção 4-Rio Timbó nascente	110.71	87.39	97.65	105.38	81.53
Seção 5-Riacho Boacica depois da cachoeira	448.25	512.30	541.27	580.24	508.19
Seção 6-Riacho Boacica saída da lagoa	530.78	512.93	572.63	470.31	369.97
Seção 7-Riacho Pium - Linha do trem	269.95	268.31	279.23	276.87	249.78
Seção 8-Riacho Pium - depois da lagoa	758.25	856.79	755.34	763.85	732.94

## CONCLUSÕES

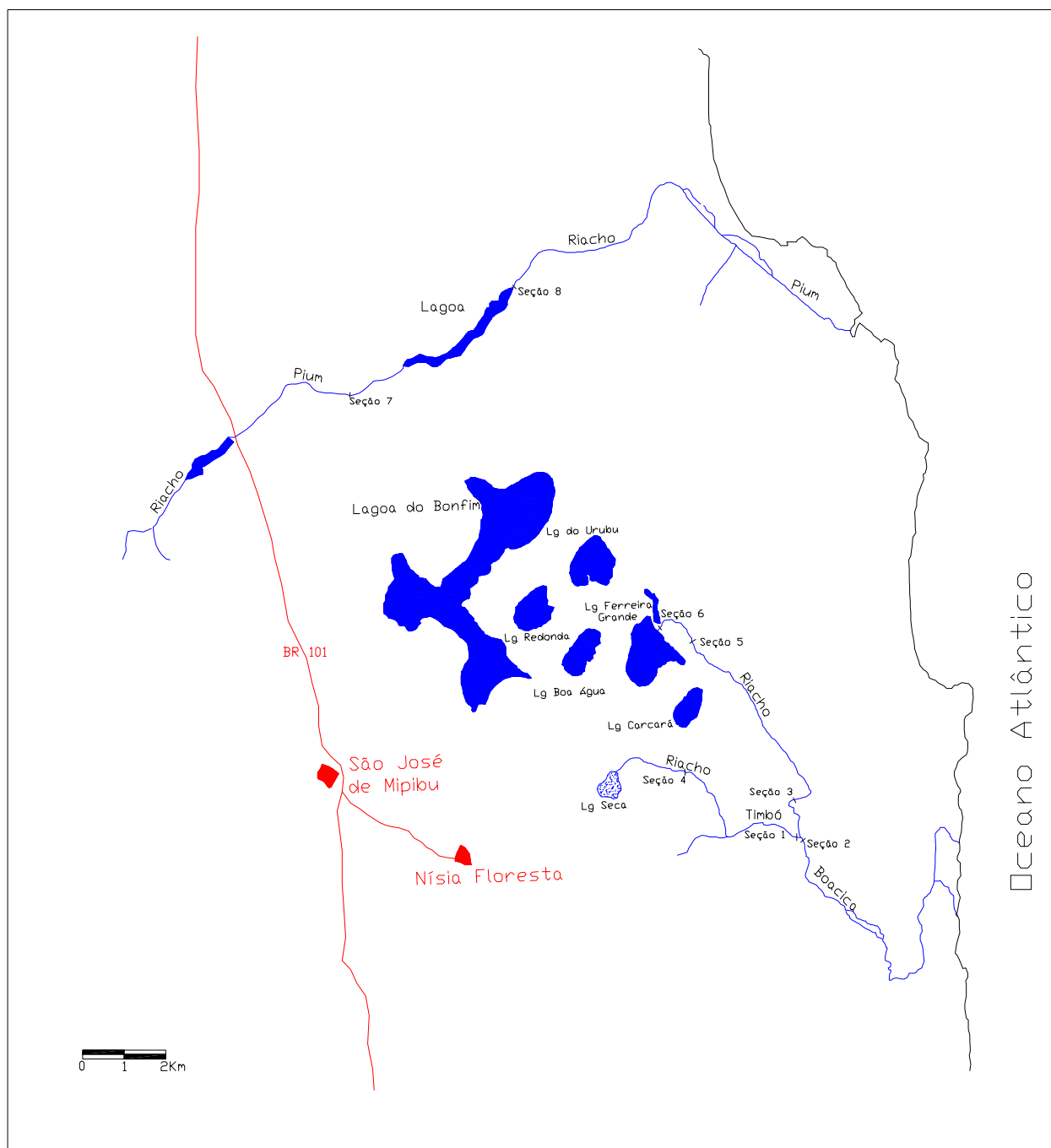
Os estudos referentes ao levantamento das disponibilidades hídricas superficiais na área de domínio do Sistema Lacustre do Bonfim possibilitaram a quantificação de vazões associadas a garantias, necessárias para o planejamento e projeto de obras de captação de água para abastecimento de água.

Os estudos de balanço hídrico da lagoa do Bonfim, mostraram que o atual sistema de captação de água para o Sistema Adutor Monsenhor Expedito tem condições de retirar com garantia a vazão de 100 l/s da lagoa e 150 l/s através da atual bateria de poços existentes.

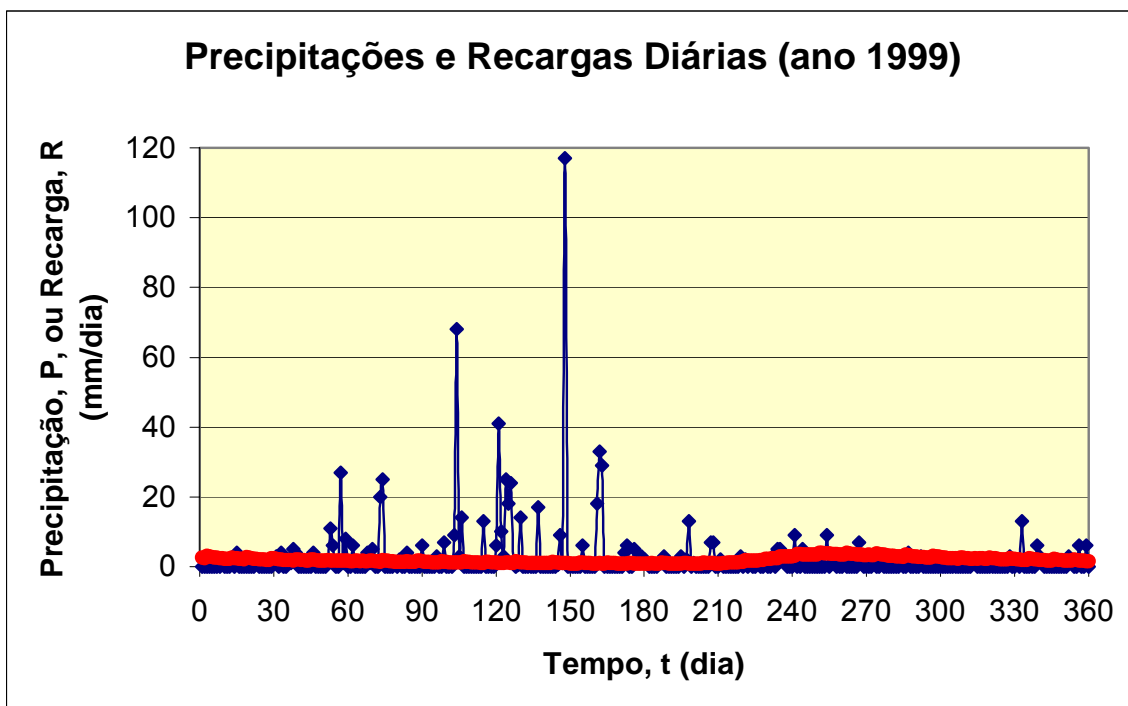
No entanto, não se recomenda um aumento de retirada de água desse sistema atual de captação, quer diretamente da lagoa quer através de poços, uma vez que a região é de recarga e susceptível a fortes rebaixamentos sem a devida reposição temporal de água pela chuva.

Recomenda-se, fortemente, que captações complementares estejam localizadas nos exutórios do aquífero, quer através de bateria de poços, quer através de estações elevatórias com retirada de água do riacho Boa Cica e/ou riacho Pium.

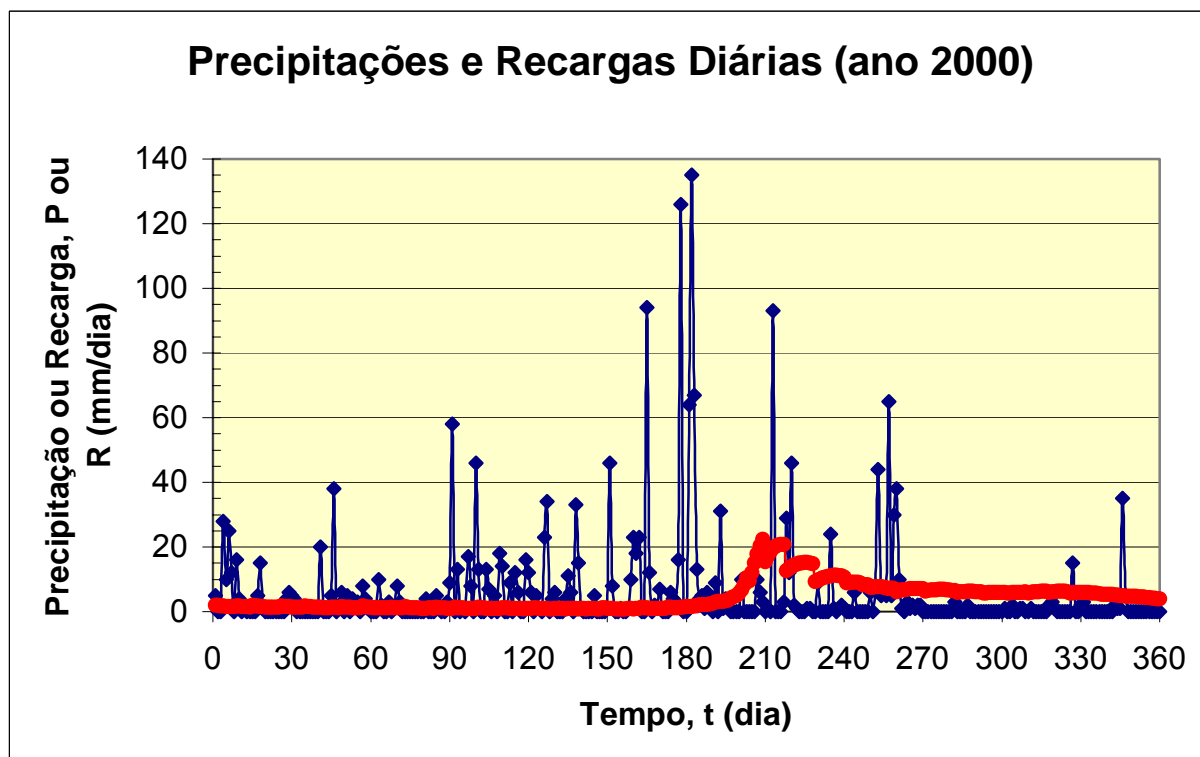
Para as duas alternativas de captação de água, no riacho Boa Cica ou no riacho Pium, recomenda-se que as capacidades das instalações sejam para bombeamento de 250 l/s, com garantia de 90%.



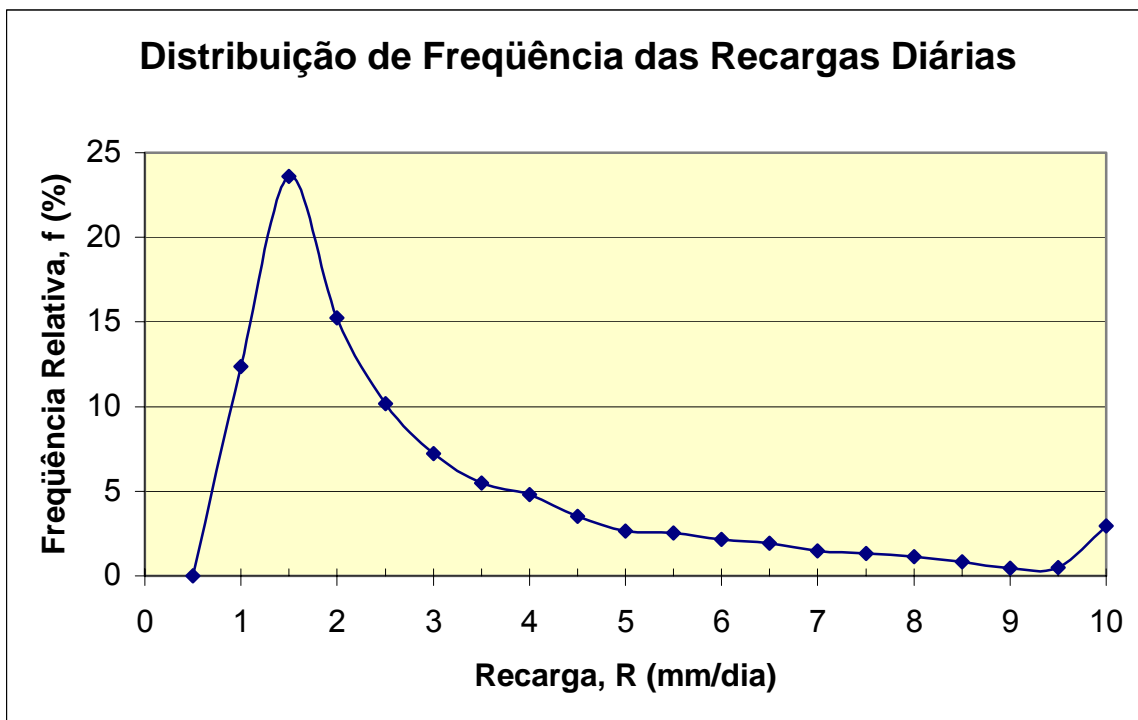
**Figura 3** – Localização das seções de medições de vazão dos riachos Boa Cica, Timbó e Pium.



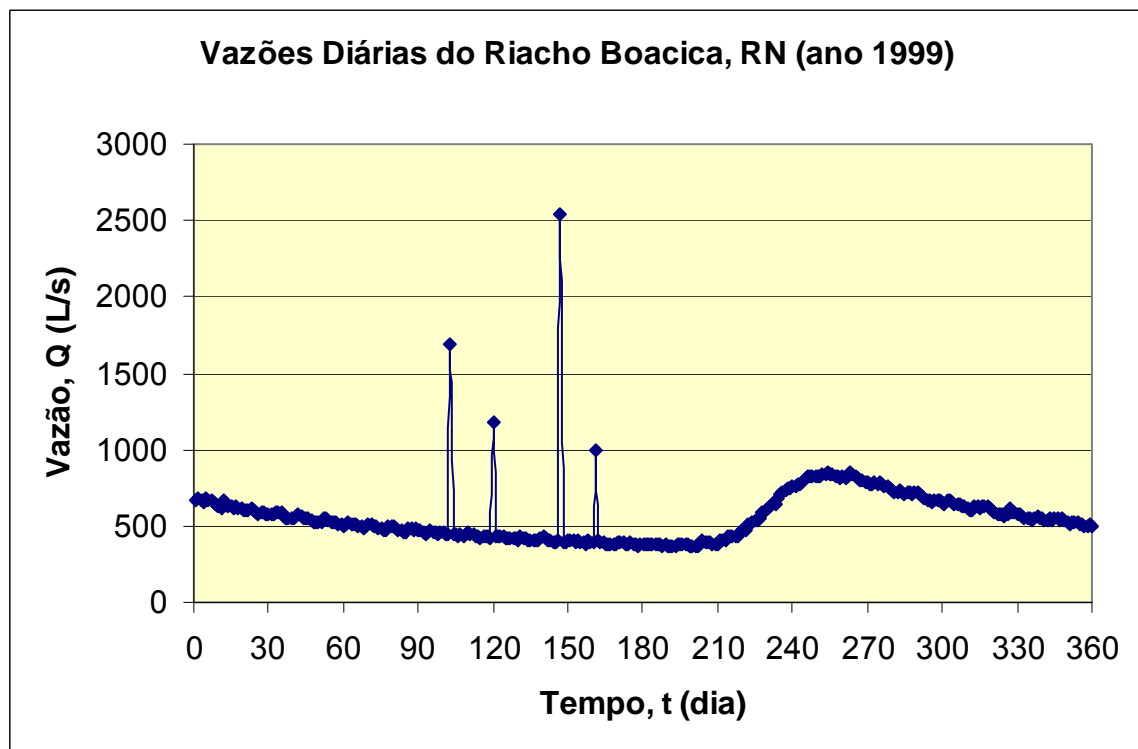
**Figura 4** – Precipitações diárias observadas no ano de 1999 e as recargas profundas simuladas.



**Figura 5** – Precipitações diárias observadas no ano de 2000 e as recargas profundas simuladas.

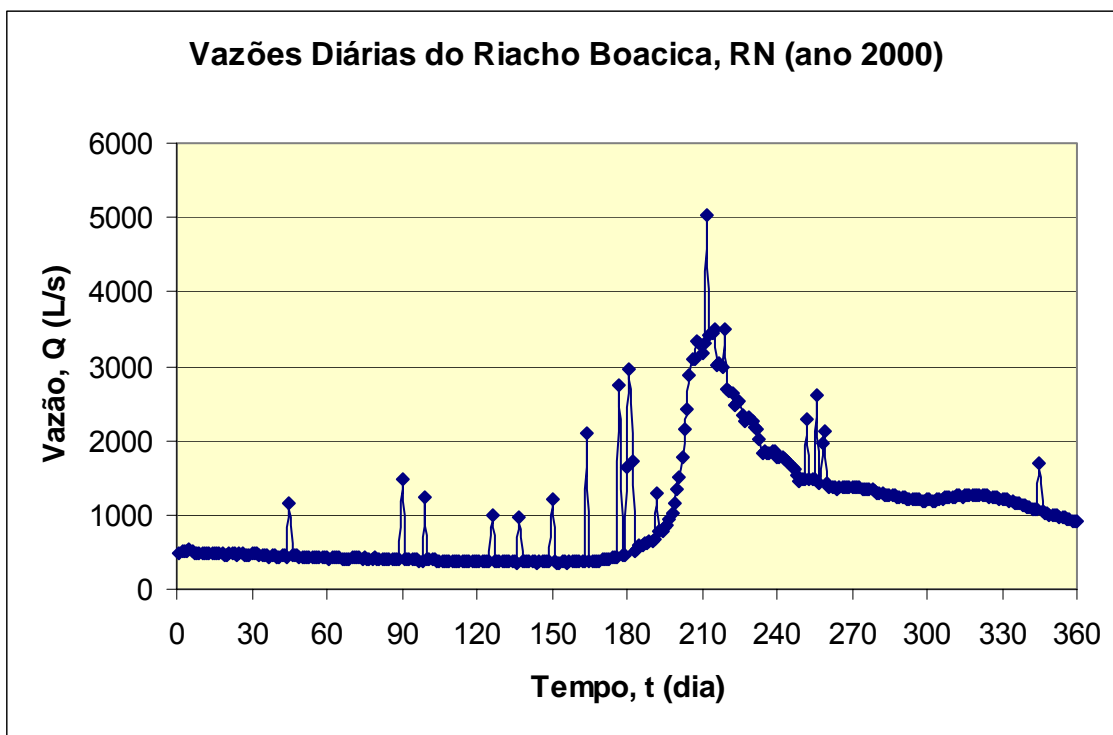


**Figura 6** – Distribuição de frequência das recargas diárias simuladas para um período de 50 anos.

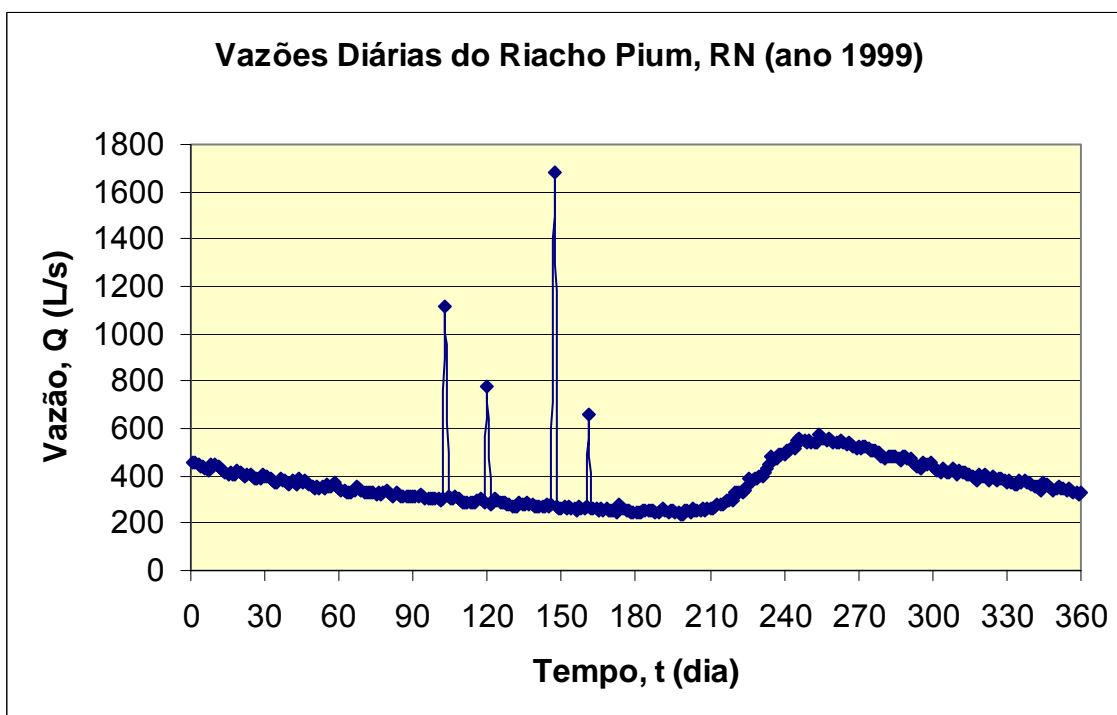


**Figura 7** – Vazões diárias do riacho Boa Cica no ano de 1999, simuladas com o modelo ajustado.

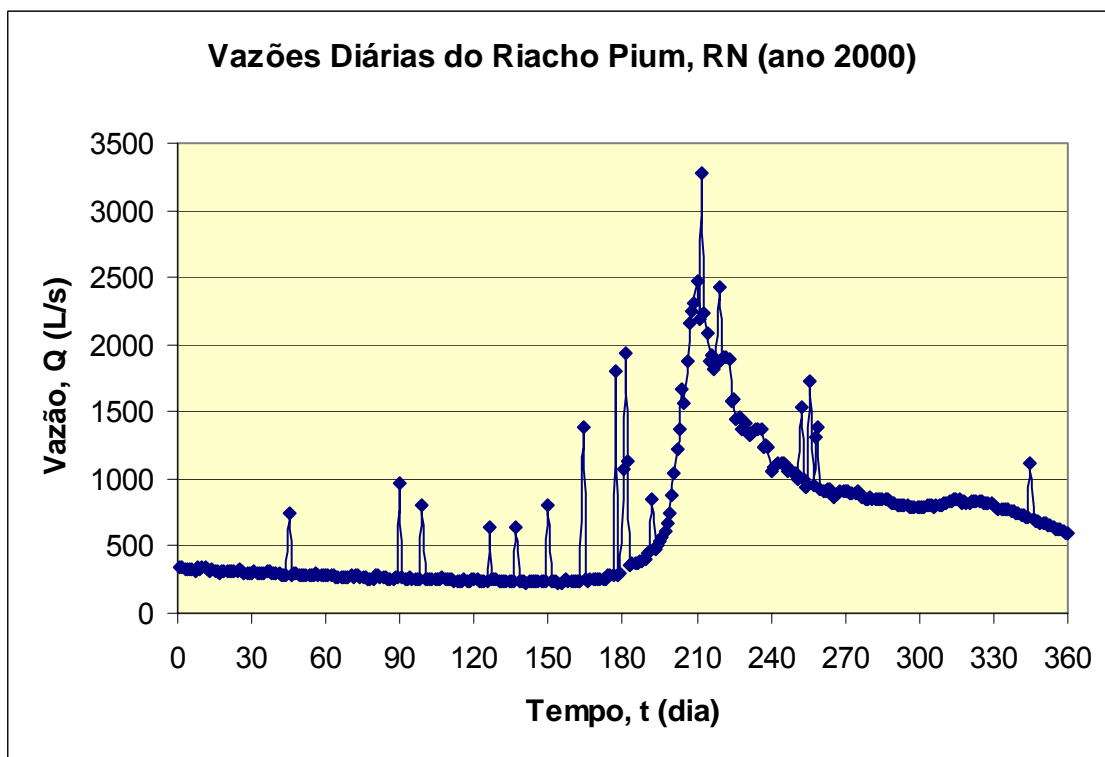




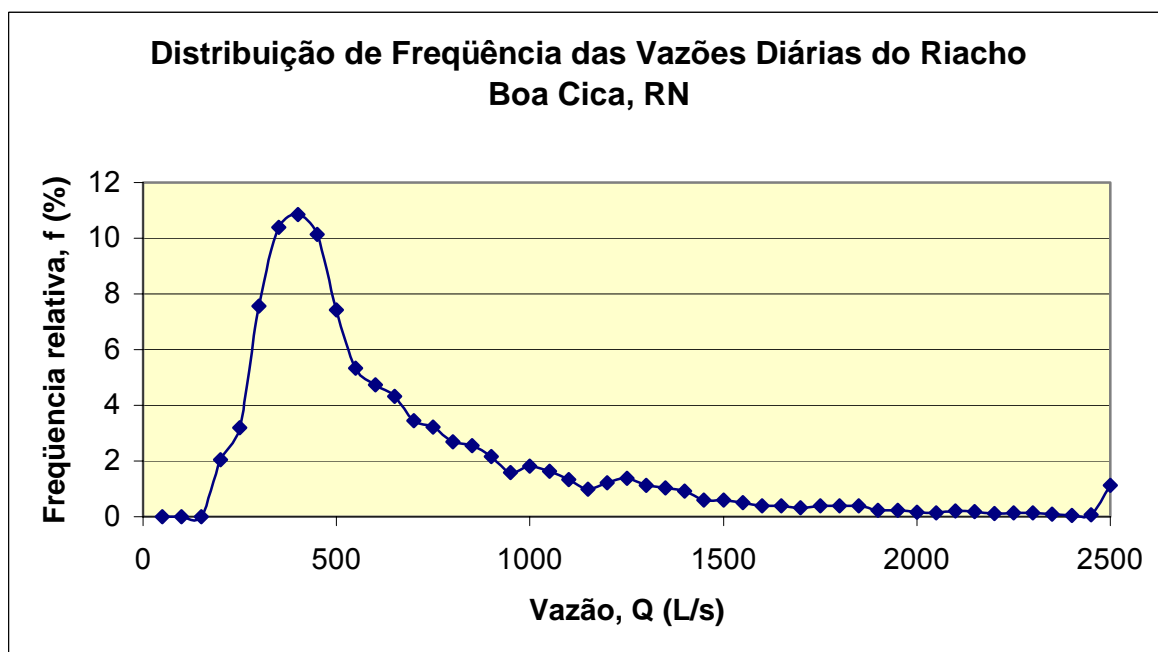
**Figura 8** – Vazões diárias do riacho Boa Cica no ano de 2000, simuladas com o modelo ajustado.



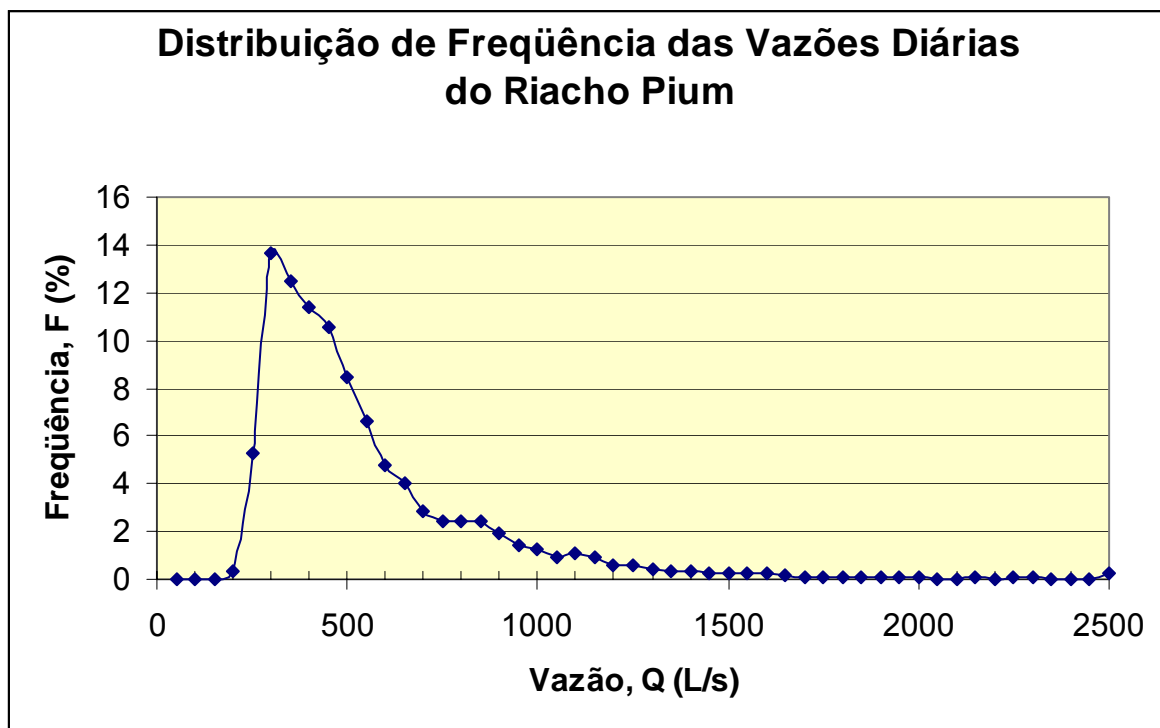
**Figura 9** – Vazões diárias do riacho Pium no ano de 1999, simuladas com o modelo ajustado.



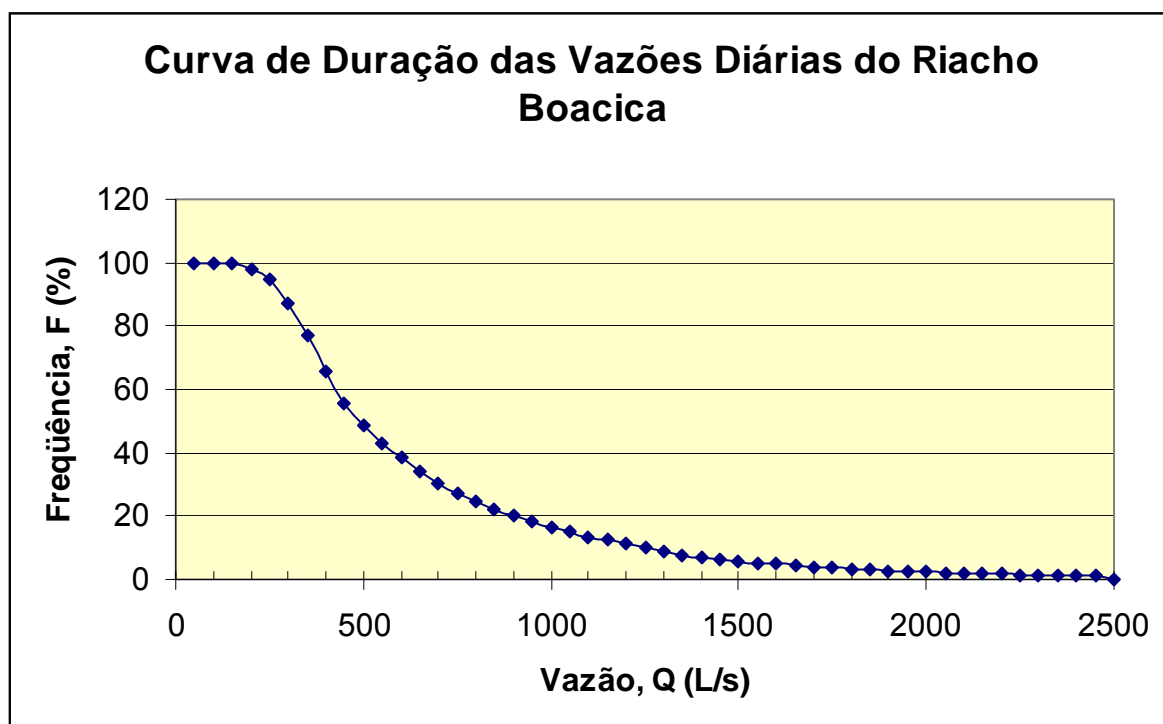
**Figura 10** – Vazões diárias do riacho Pium no ano de 2000, simuladas com o modelo ajustado.



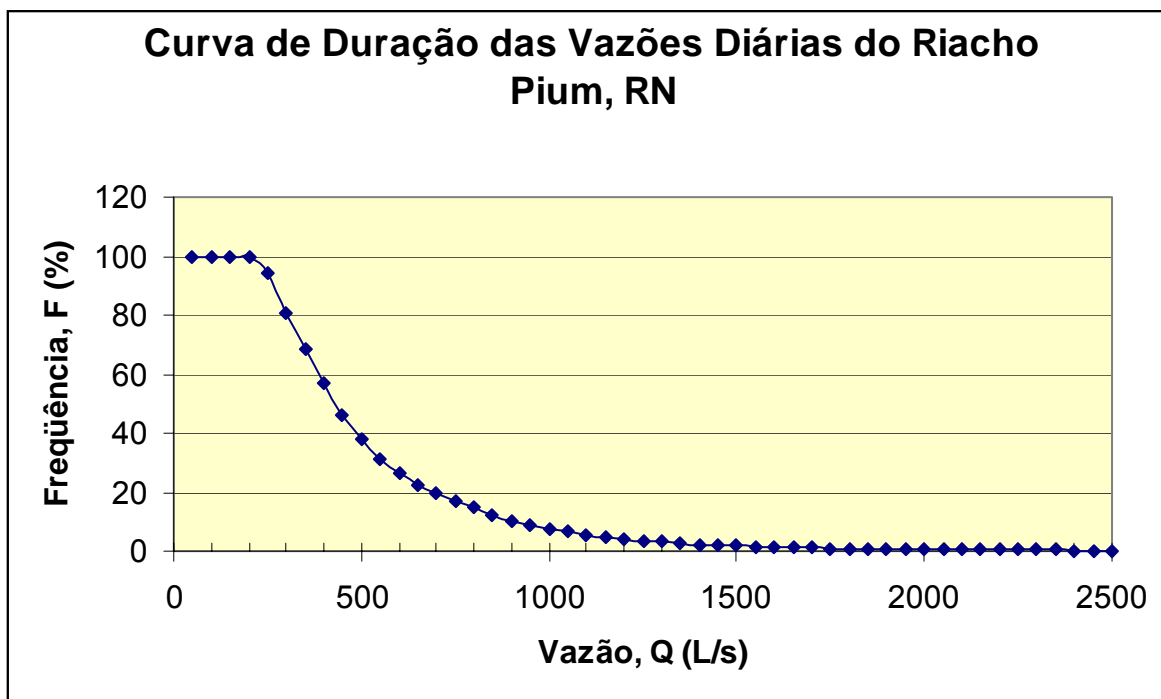
**Figura 11** – Distribuição de frequência relativa das vazões diárias do riacho Boa Cica obtida por simulação computacional para um período de 50 anos.



**Figura 12** – Distribuição de frequência relativa das vazões diárias do riacho Pium obtida por simulação computacional para um período de 50 anos.



**Figura 13** – Curva de duração das vazões diárias do riacho Boa Cica obtida por simulação computacional para um período de 50 anos.



**Figura 14** – Curva de duração das vazões diárias do riacho Pium obtida por simulação computacional para um período de 50 anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RIGHETTO A. M. (1998) *Hidrologia e Recursos Hídricos*, publicação EESC- FINEP – REENGE, são Carlos, SP: 820p.
- [2] SEHRID (2001). Dados Hidrométricos do rio Boacia – Sistema Lacustre do Bonfim, RG. Relatório Interno.
- [3] Freeze R. A. 1969. “The mechanism of natural groundwater recharge and discharge: 1. One-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging groundwater flow system”. *Water Resources Research*, 5: 153-171.
- [4] Freeze R. A. 1971<sup>a</sup>. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Research*, 7: 347-366.
- [5] Freeze R. A. 1972<sup>a</sup>. “Role of subsurface flow in generating surface runoff: 1. Baseflow contributions to channel flow”. *Water Resources Research* 8: 609-623.
- [6] Freeze R. A. 1972<sup>b</sup>. “Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source áreas”. *Water Resources Research*, 8: 1272-1283.
- [7] Singh V. P. e Woolhiser D. A. 2002. “Mathematical modeling of watershed hydrology”. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol 7, No. 4: 270-292.