

CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO EM BACIAS COM CONTRIBUIÇÕES EXTERNAS À ÁREA DE CAPTAÇÃO: O CASO DO SUDESTE DO TOCANTINS SOB INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS CÁRSTICOS

Thiago Alberto da Silva Pereira¹, Luís de Gustavo Moura Reis² & Denis Duda Costa³

RESUMO --- Os aquíferos cársticos representam contribuições externas de água que não são provenientes da área de drenagem da bacia hidrográfica, aumentando significativamente os valores de contribuições de base dos hidrogramas em bacias com este tipo de contribuição. Nestes casos os algoritmos computacionais dos modelos hidrológicos não são preparados para ajustar calibrações neste tipo de dado observado, haja vista que trabalham com o ciclo hidrológico da água precipitada sobre a bacia. Este artigo traz um artifício de modo a contornar este problema e permitir que a calibração seja realizada sem a distorção dos parâmetros, permitindo inclusive a geração de vazões com dados de bacias vizinhas (*Proxy basin test*). Como estudo de caso, escolheu-se a bacia do rio das Balsas, na região Sudeste do Tocantins, com aproximadamente 12.386,7 km², sob influência dos sistemas Urucuia e Bambuí. A calibração foi realizada na bacia vizinha do rio Manuel Alves da Natividade, também sob influência dos referidos sistemas aquíferos e cujos parâmetros foram transpostos para a bacia do rio das Balsas, com resultados satisfatórios.

ABSTRACT --- Karst aquifers represent external inputs of water that are not from the area's drainage basin, greatly values the contributions of hydrographs based on basins with this type of contribution. In these cases the computational algorithms of the hydrologic models are not prepared to adjust calibrations in this type of observed data, given that work with the hydrologic cycle of water precipitated on the basin. This paper provides a device in order to circumvent this problem and allow the calibration to be performed without distortion of the parameters, also allowing the generation of data flows with neighboring basins (proxy basin test). As a case study, chosen to the Balsas River basin in southeastern Tocantins, with about 12,386.7 km², under the influence of Urucuia and Bambuí aquifers systems. Calibration was performed in the basin of the river nearby Manuel Alves da Natividade, also under the influence of such aquifer systems whose parameters were transferred to the Balsas River basin, with satisfactory results.

Palavras-chave: Sistemas Cársticos; Vazões Mínimas e Win_IPH2.

1) Consultor da Gama Engenharia de Recursos Hídricos LTDA. E-mail: thiago_alb@hotmail.com;

2) Engenheiro Hidrólogo da Gama Engenharia de Recursos Hídricos LTDA. luis.gustavo@gamaengenharia.com.br

3) Graduando de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas. Estagiário da Gama Engenharia de Recursos Hídricos LTDA. E-mail: denis.duda@hotmail.com

1 - INTRODUÇÃO

Os Sistemas cársticos no Brasil podem fornecer vazões superiores a 200 m³/h, na formação Bambuí; ou 135 m³/h, no aquífero Pirabas (ABAS, 2011). Em função de diversos fatores, essas formações podem encontrar zona de descarga, onde as águas emergem do sistema alimentando rios, fazendo com que apresentem altos valores de vazões mínimas ou de estiagens. No entanto, esse comportamento no regime de vazões, geralmente, não pode ser bem representado nos modelos hidrológicos (chuva-vazão) comumente utilizado na literatura. Assim, neste trabalho será apresentado um artifício para contornar esta peculiaridade, através do uso de modelos hidrológicos.

2 – OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo apresentar um método simplificado para utilização de modelo hidrológico em bacias com contribuição externas, como é o caso do sudeste do Tocantins que recebe contribuição dos sistemas Urucuia e Bambuí.

O método tem como objetivo permitir a calibração de séries chuva-vazão em bacias com este tipo de característica, fazendo uso de uma abordagem forma simplificada, sem se ater aos processos hidrogeológicos.

3 – ÁREA DE ESTUDO

3.1 – Localização Geográfica

A bacia hidrográfica do rio Balsas (Figura 1) localiza-se no sudeste do Tocantins, possui área de drenagem de 12.386,7 km² e um perímetro de 780 quilômetros. A bacia é delimitada pelas coordenadas geográficas 09°53' e 11°07' de latitude sul e 46°40' e 48°10' de longitude oeste. Limita-se ao norte e leste com a bacia do rio do Sono; a oeste com a bacia do rio Tocantins; e ao sul com a bacia do rio Manuel Alves.

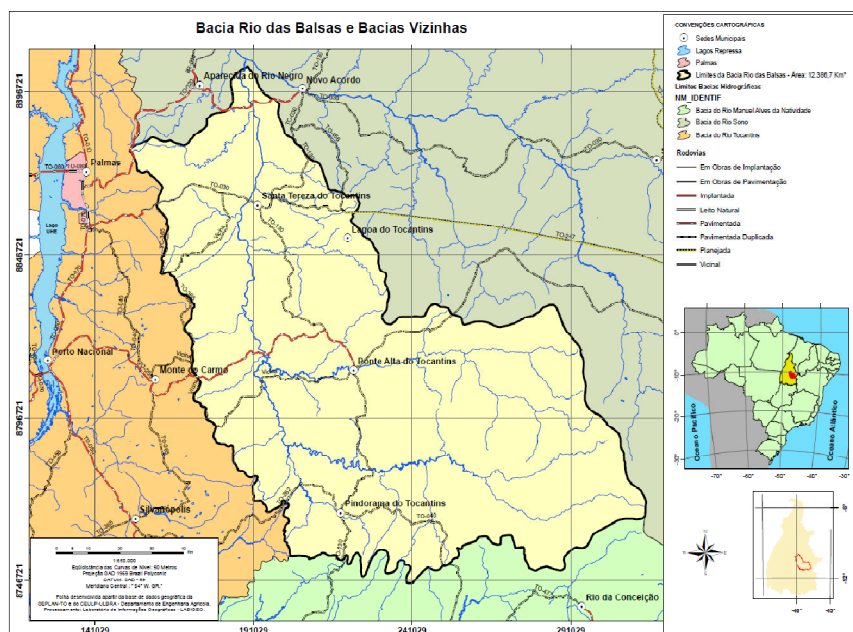


Figura 1 – Localização da Bacia do Rio das Balsas (Tocantins, 2010)

O rio das Balsas é um dos principais afluentes do rio do Sono, nasce na Estação Ecológica da Serra Geral do Tocantins (na formação Urucuaia), com altitude média de 650 metros em relação ao nível do mar. Têm como principais afluentes os rios Soninho e Ponte Alta, o córrego Caracol e o Ribeirão Gameleira e São Silvestre.

As precipitações médias anuais na bacia do rio das Balsas são da ordem de 1.600 mm, distribuída ao longo do ano em dois períodos bastante distintos. O período seco está compreendido entre os meses de abril a setembro, com valores médios entre junho e agosto inferiores a 13 mm; já o chuvoso vai de outubro a março e concentra cerca de 85% do volume anual com valores entre novembro e março acima de 240 mm. A Figura 2 apresenta a distribuição da precipitação média mensal para a bacia do rio das Balsas.

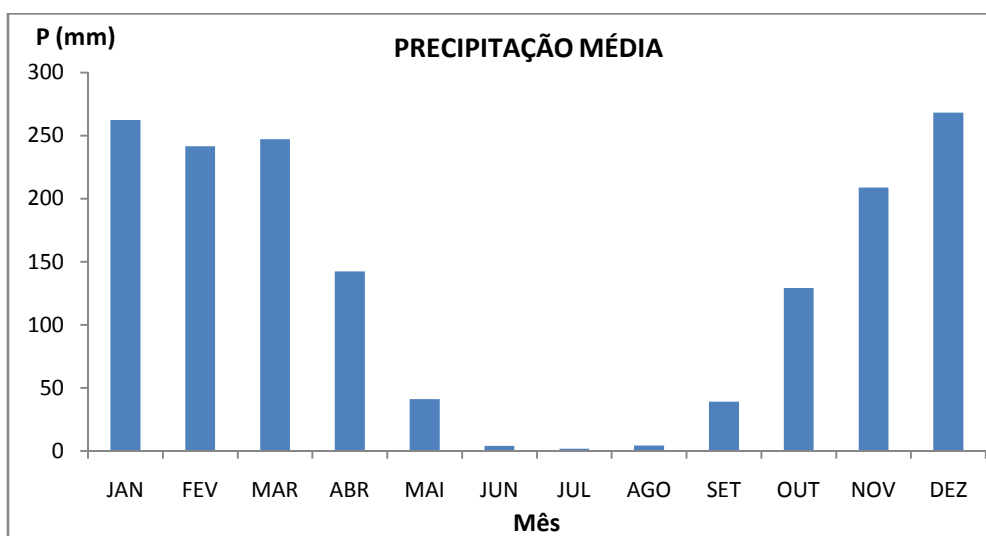


Figura 2 – Precipitação média mensal na bacia do rio das Balsas.

4 – ANÁLISE SELEÇÃO DE INFORMAÇÕES FLUVIOMÉTRICOS NA BACIA

Os 2 postos fluviométricos inventariados no interior da bacia do rio das Balsas são o Porto Girândia (22730000) e o Isamu Ikeda (22735080).

Os dados do posto Isamu Ikeda (22735080) não estavam disponíveis no sistema Hidroweb da ANA, mas foram conseguidos em relatórios privados de serviços de consultoria realizados por empresas que possuem empreendimentos hidrelétricos na região. A sua série histórica apresenta apenas 3 anos de dados, de 09/2002 a 12/2006. Sendo assim, optou-se por não utilizar seus dados para fins de calibração de modelo hidrológico chuva-vazão.

Quanto ao posto Porto Girândia (22730000), foi realizada uma análise de consistência das suas vazões no período de observações de 1969 a 1981, através do confronto visual do comportamento das vazões médias anuais e chuvas médias, ambas normalizadas, conforme Figura 3.

Observa-se, ainda na Figura 3 uma inconsistência dos dados de vazões, sobretudo a partir de 1977, pois as vazões normalizadas não acompanham as tendências dos valores de precipitados normalizados. Dado que o período de dados disponíveis deste posto abrange os anos de 1969 a 1981, o período que possui consistência dos dados se reduz aos anos compreendidos entre 1969 a 1976.

Mesmo com a disponibilidade de uma série no período de 1969 à 1976, observa-se neste posto ainda existe falha de observações no ano de 1973, foi decidido então pela sua não utilização na calibração do modelo hidrológico, sendo o mesmo utilizado para fins de verificação e validação da mesma (como será visto adiante).

Diante do exposto acima, a estratégia de geração de séries sintéticas foi a de utilizar informações de bacia próxima e com características climato-fisiográficas próximas à das Balsas - a do rio Manuel Alves - para calibrar os parâmetros do modelo hidrológico, e gerar vazões na bacia do rio das Balsas aplicando-se as chuvas nela observadas como dados de entrada.

Para tanto, foi selecionado o posto fluviométrico Porto Alegre (22190000) na bacia do rio Manuel Alves, realizando-se para este posto fluviométrico os mesmos testes de consistência aplicada ao posto Porto Girândia (confronto visual de vazões médias anuais normalizadas e precipitação acumulada normalizada). O resultado desta análise pode ser visto na Figura 4, onde se verifica que a estação Porto Alegre (22190000) apresenta consistência quanto à aderência entre os valores de precipitação e vazão adimensionalizados pela média, o que justifica sua seleção em relação ao preterido posto Porto Girândia.

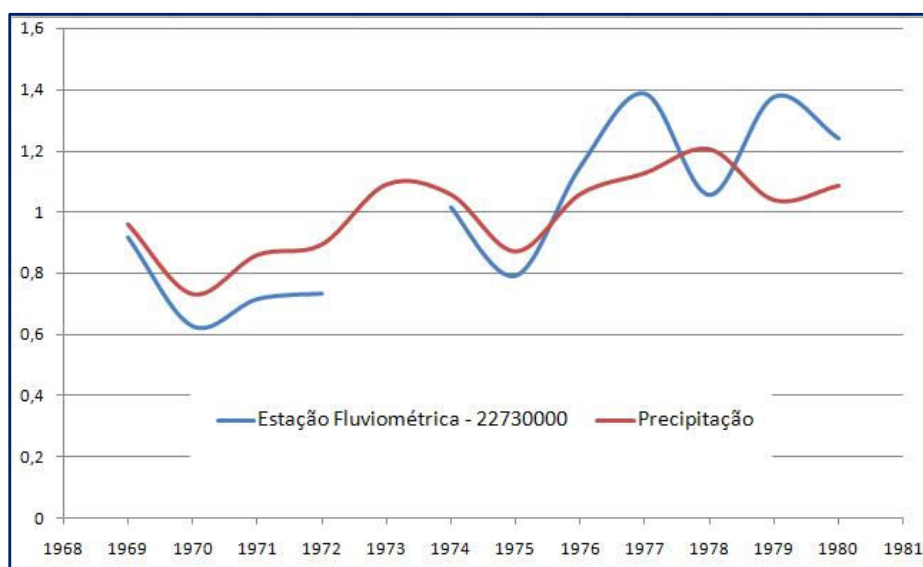


Figura 3 – Vazões médias anuais e chuvas anuais normalizadas para o posto Porto Girândia (22730000).

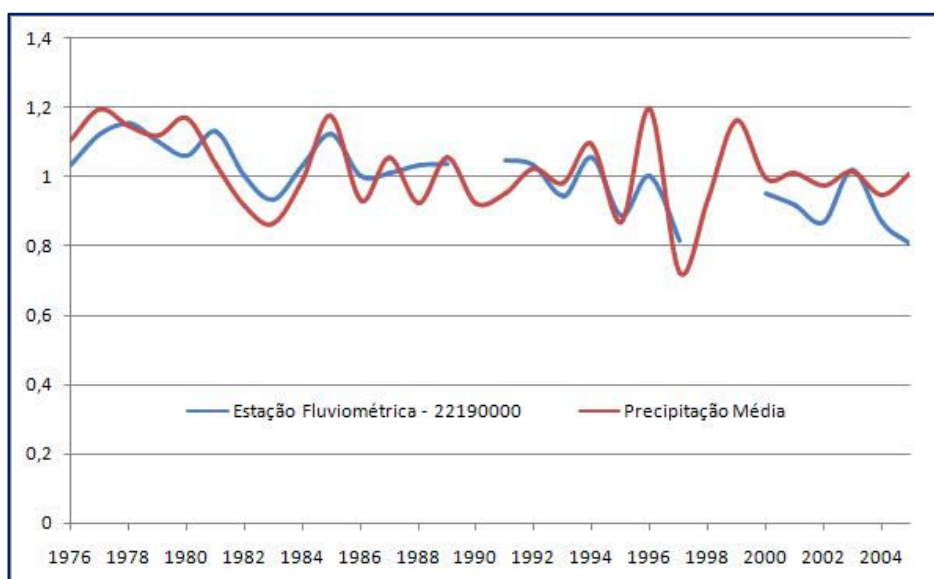


Figura 4 – Vazões médias anuais e chuva anual normalizadas para o posto Porto Alegre (22190000).

Diante das análises das figuras 3 e 4, demonstrando inconsistências na série de Porto Girlandia, optou-se pela calibração na bacia vizinha, Rio Manuel Alves (posto 22190000) e transferência de Parâmetros calibrados para a bacia do rio Balsas.

4 – CONTEXTO DO PROBLEMA

Diante do fato de não se ter uma série histórica consistente na bacia do rio das Balsas e se possuir uma campanha de medições de vazão a partir da qual foram estimadas as vazões de permanência (Q_{90}) com base em correlações instantâneas, optou-se pela calibração do modelo na bacia vizinha (rio Manuel Alves) e transferência dos parâmetros para a bacia do rio das Balsas.

Este procedimento, entretanto, antes de ser operacionalizado, esbarra nos seguintes problemas:

- Tanto a bacia do rio das Balsas, como a bacia do rio Manuel Alves possuem influência da vazão de base do sistema Urucuia, portanto a calibração do modelo hidrológico na bacia vizinha e transferência dos parâmetros para geração de vazões provocaria distorções;
- Os modelos hidrológicos disponíveis simplificados não são capazes de modelar sistemas com contribuições externas, como é o caso de aquíferos cartiscos, cuja área de recarga se encontra fora e distante da área de captação da bacia hidrográfica.

Na Tabela 1, a seguir, são apresentados os resumos das características das estações de Porto Alegre (22190000) e Porto Girlandia (22730000). Pode ser observado que existe grande aproximação entre as vazões mínimas e as vazões médias e altos valores de coeficiente de escoamento, decorrentes da influência do sistema aquífero Urucuia. E que a influência é maior na bacia do rio Manuel Alves que na bacia do rio das Balsas.

Tabela 1 – Estatísticas das séries de vazões nas estações fluviométricas.

Postos	Área (km ²)	Precipitação média (mm)	Vazão observada (m ³ /s ou m ³ /s/km ²)					Coeficiente de escoamento
			Mínima	Média	Máxima	Q ₉₀	Específica	
22190000 – Porto Alegre	1.930	1.644,24	13,9	38,9	245	23,9	0,0202	0,45
22730000 - Porto Girlandia	5.270	1.635,45	28,3	94,5	844	35,0	0,0179	0,34

Diante do problema exposto, foi desenvolvida uma metodologia simplificada para permitir a que a calibração do Rio Manuel Alves (bacia vizinha) pudesse ser realizada e testada na bacia do rio das Balsas.

4 – PROPOSTA METODOLÓGICA

Como dito anteriormente, o trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para utilização de modelos hidrológicos em bacias com contribuições externas, dado que estes modelos comumente não apresentam algoritmos que representam este comportamento, não permitindo a transposição dos parâmetros hidrológicos no contexto da bacia.

Assim, a metodologia se baseia em 07 (sete) passos para a obtenção do objetivo aspirado, os quais são:

1. Estimar a vazão de base correspondente ao aporte externo;
2. Retirar (descontar) a vazão de aporte externo da série histórica observada;
3. Calibrar o modelo para a série “descontada” e obter parâmetros hidrológicos para a série com desconto da vazão de aporte externo;
4. Transpor a calibração para os pontos (seções fluviais) onde se deseja gerar informação;
5. Gerar séries sintéticas com os parâmetros transpostos;
6. Estimar e somar a vazão de base correspondente em cada ponto onde foi gerada a vazão;
7. Checar se a vazão gerada com a transferência de parâmetros calibrados para a bacia vizinha adicionada à contribuição de base apresenta resultados satisfatórios.

Para um melhor entendimento da metodologia proposta, a Figura 5 apresenta um fluxograma ilustrativo dos procedimentos a serem utilizados.

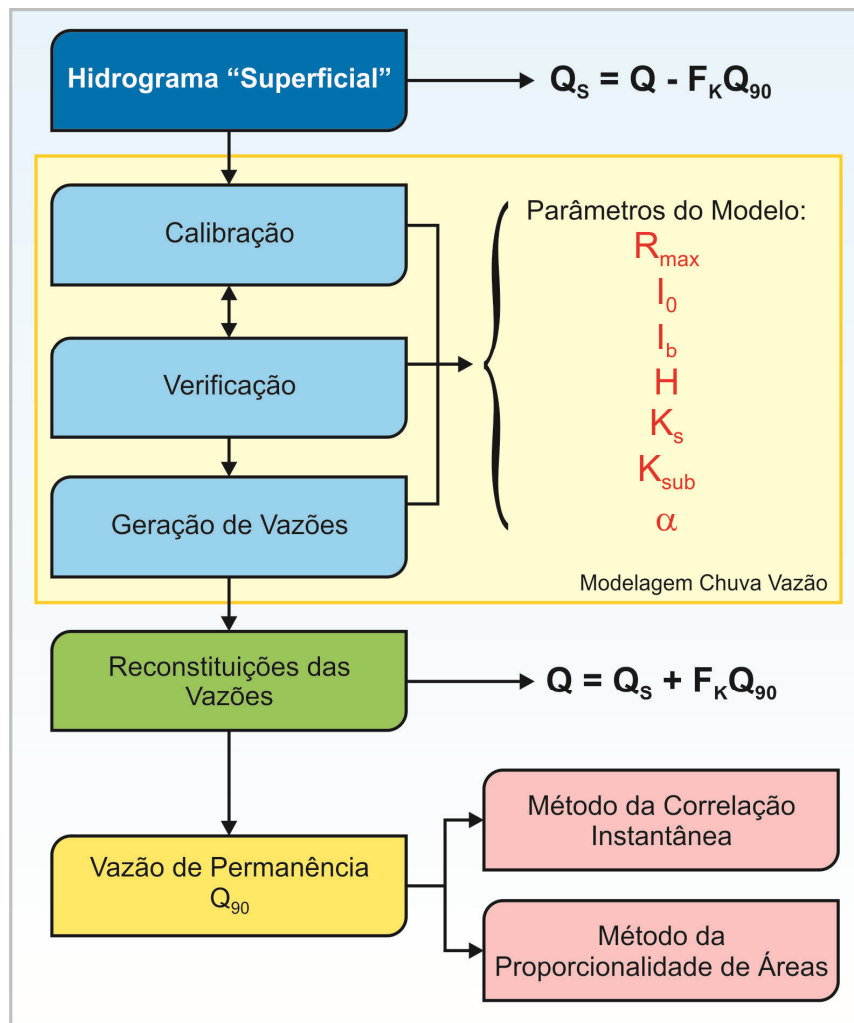


Figura 5 – Fluxograma de etapas para aplicação da metodologia

4.1 – Cálculo da série histórica “descontada” das contribuições externas

As contribuições externas foram estimadas como um percentual (F_k) da vazão de referência (Q_{90}), de forma que descontando-se da série de vazões naturais $Q(t)$, a parcela de base (equação 1) obtém-se a série histórica de vazões descontadas que será utilizada nas calibrações.

$$Q^*(t) = Q(t) - F_k \cdot Q_{90} \quad (1)$$

O diferencial nesta modelagem são as séries de vazões utilizadas, que corresponde às vazões sem o aporte externo, ou seja, vazões descontadas ou “superficial” dada pela equação 1.

Onde:

$Q^*(t)$ – Série histórica de vazões descontadas;

$Q(t)$ – Vazões observadas;

F_k – Fator de Redução dos Hidrogramas;

Q_{90} – Vazão com 90% de Permanência.

4.2 – Modelagem Chuva Vazão

O modelo chuva-vazão teve seus parâmetros calibrados para a série $Q^*(t)$, na bacia vizinha (rio Manuel Alves), utilizando-se o modelo IPH2 (Bravo *et al*, 2006) com a interface gráfica WIN_IPH2, cujos parâmetros calibrados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros a serem calibrados no modelo WIN_IPH2

Parâmetros	Descrição
R_{max}	Capacidade máxima do reservatório de interceptação
I_o	Capacidade de infiltração do solo quando o solo está na capacidade de campo
I_b	Capacidade de infiltração quando o solo está saturado
H	Parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo
K_s	Tempo médio de esvaziamento do reservatório superficial
K_{sub}	Tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo
α	Parâmetro que corrige parcela do escoamento superficial

Para a metodologia proposta, o F_k será um dos parâmetros a serem calibrados, além daqueles citados na Tabela 2, entretanto por tentativas.

O método de calibração do modelo será descrito a seguir:

1. Adota-se um valor para F_k , partindo de uma estimativa inicial;
2. Calcula-se o hidrograma $Q^*(t)$ através da equação 1;
3. Calibra-se¹ o modelo Win_IPH2 para o hidrograma $Q^*(t)$ encontrado no item anterior;
4. Para os parâmetros do item anterior e o F_k adotado no item 1 procede-se com a verificação no Posto Porto Girândia - 22730000;
5. Analisa-se os resultados da verificação através de comparação visual dos hidrogramas gerados e observados; e dos parâmetros estatísticos, vazão média, vazão mínima, volume escoado, Q_{90} , Q_{95} ;
6. Se o resultado for satisfatório o modelo está calibrado, caso contrário atribui-se outro valor do F_k e segue os passos anteriores de forma sucessivas até encontrar resultados satisfatórios na etapa 5.

4.3 – Resultados e Avaliação da Calibração

Aplicando-se os métodos de calibração do item anterior, por tentativas, foram obtidos os parâmetros do ajuste na bacia do rio Manuel Alves (estação Porto Alegre) na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do ajuste do modelo Win_IPH2.

Parâmetros	I_O	I_B	H	K_S	K_{SUB}	R_{MAX}	α
Valores	48,52	2,1	0,00001	5,93	160,71	10	0,00004

Os valores de F_k que apresentaram ajustes mais satisfatórios foram:

- a) F_k igual 71% para a estação Porto Alegre;
- b) F_k igual 60% para a estação Porto Girândia.

As figuras 6 e 7 apresentam os ajustes para as estações Porto Alegre (Manuel Alves) e Porto Girândia, respectivamente. A tabela 3 apresenta para as mesmas estações, o resumo entre os ajustes observados e calculados.

¹Foi utilizada a calibração automática multiobjetivo, utilizando duas funções objetivo: Coeficiente Nasc-Sutcl e de erro de volume. O Algoritmo de otimização utilizado é MOCOM-UA (Multi-Objective Complex Evolution Method – University of Arizona). Após a calibração automática foi realizada uma calibração manual, a partir dos parâmetros encontrados na calibração automática, priorizando um melhor ajuste para os períodos de vazões mínimas.

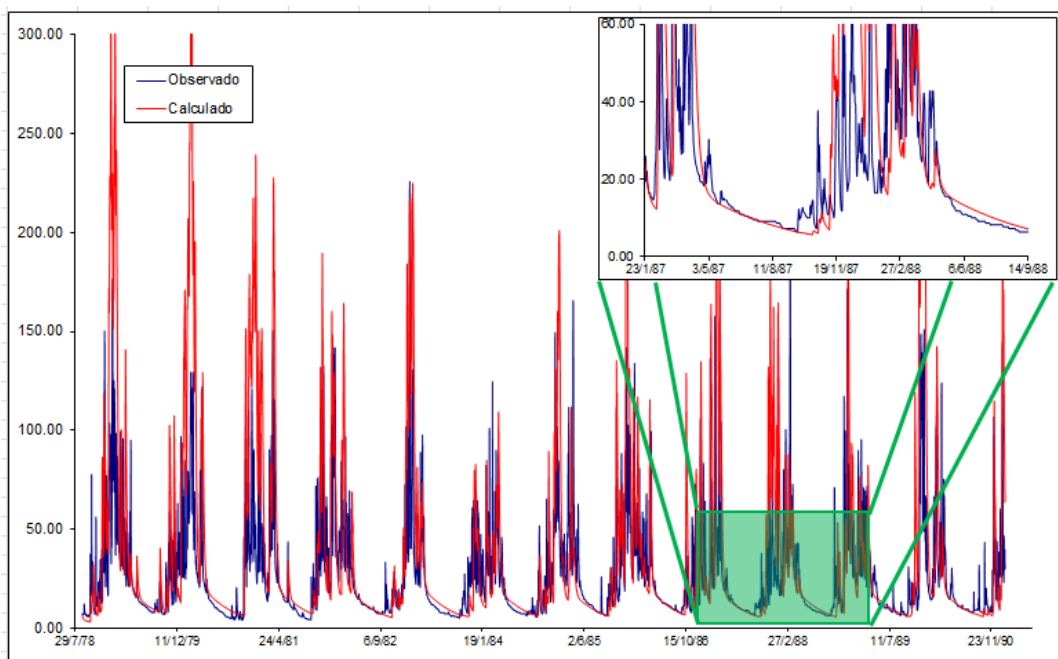


Figura 6 - Hidrograma das vazões diárias observadas e calculadas (posto Porto Alegre).

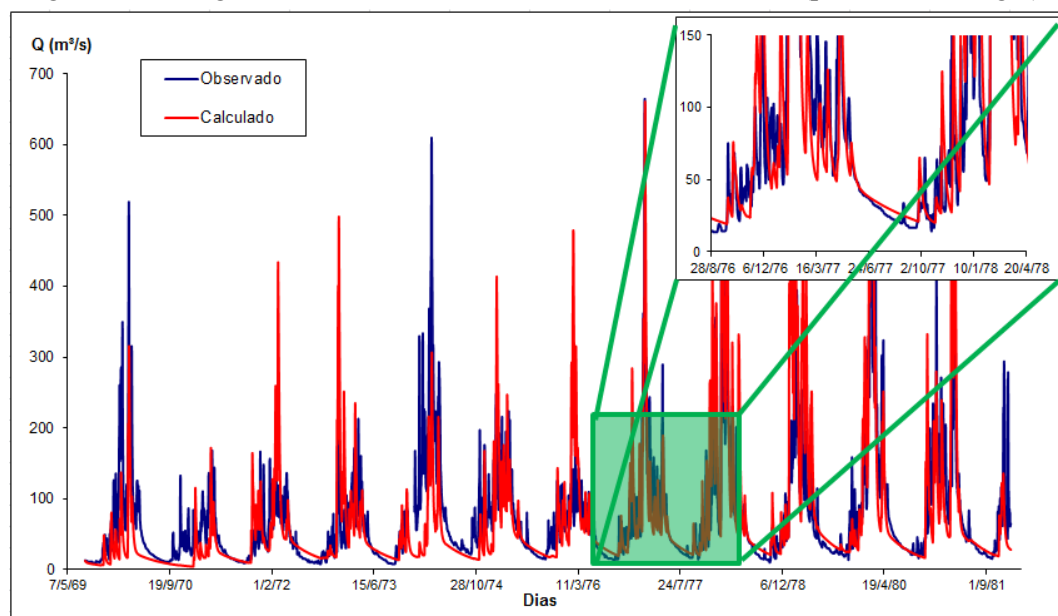


Figura 7 - Hidrograma das Vazões Diárias Observadas e Calculadas (Posto Porto Girândia).

Tabela 3 – Estatísticas dos ajustes no Modelo Win-IPH2.

Séries	Porto Alegre		Porto Girândia	
	Observado	Calculado	Observado	Calculado
Média (m ³ /s)	26,35	37,56	74,13	70,89
Mínima (m ³ /s)	3,86	3,10	7,90	4,12
Máxima (m ³ /s)	225,56	387,34	823,60	814,90
Desvio (m ³ /s) ²	25,53	52,31	79,80	96,76
Q ₉₀ (m ³ /s)	7,00	7,18	14,50	15,25
Q ₉₅ (m ³ /s)	6,00	6,45	10,80	8,40
Q ₅₀ (m ³ /s)	16,00	15,49	46,60	35,52

Nota-se que o ajuste para as vazões mínimas como já observados nas Figuras 6 e 7 apresentaram valores semelhantes próximos entre os observados e calculados, no que se refere aos indicadores de vazões de estiagens, como vazões mínimas, Q_{90} e Q_{95} . Contudo, devido à limitação do algoritmo utilizado pelo modelo hidrológico linear, é difícil se obter um bom ajuste para vazões máximas e mínimas, simultaneamente.

Fazendo por fim, uma avaliação cruzada, utilizando-se a calibração da estação Porto Alegre (rio Manuel Alves) para gerar vazões na estação Porto Girândia (rio Balsas), obteve-se resultados satisfatórios, apresentados a seguir nas Figuras 8 e 9.

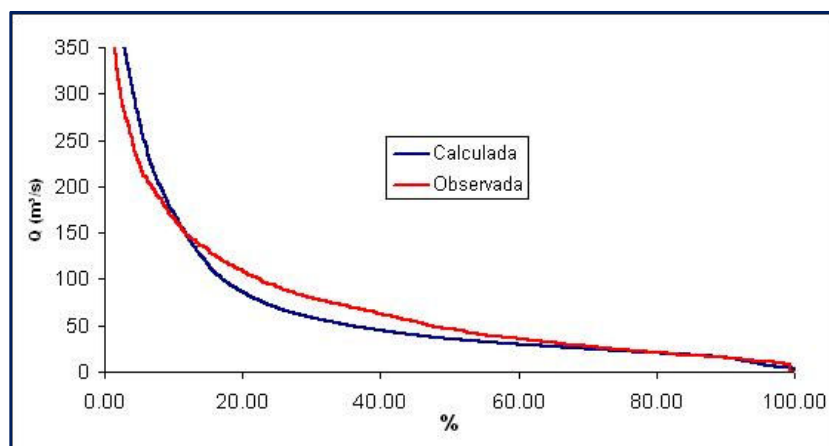


Figura 8 – Curva de permanência das vazões calculadas e observadas (posto Porto Girândia).

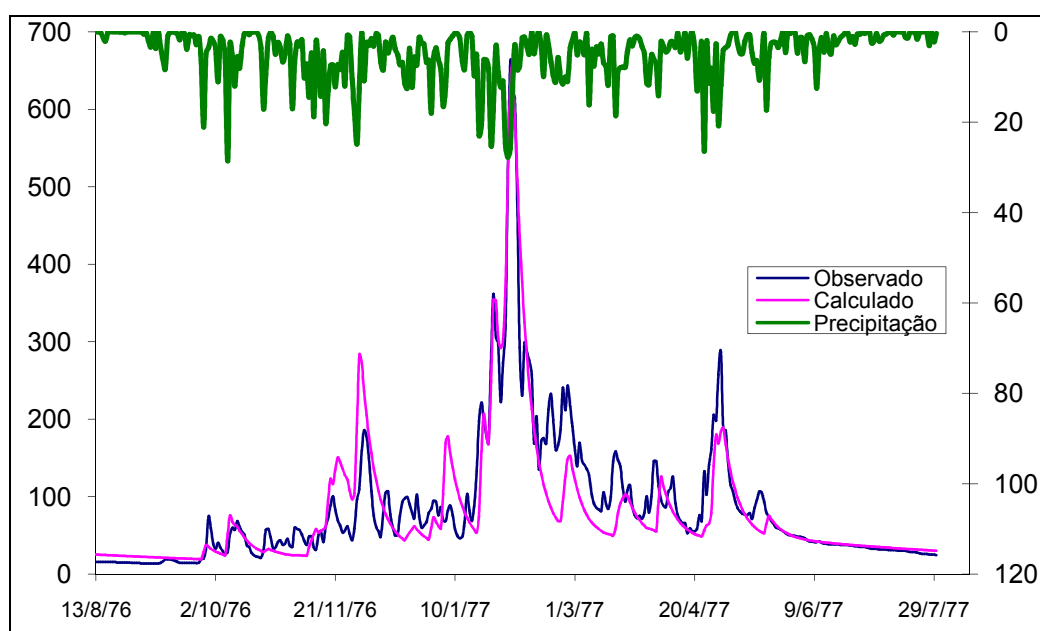


Figura 9 – Verificação da calibração na estação Porto Alegre (22190000) com a série histórica da estação Porto Girândia (22730000)

Apesar de identificar algumas inconsistências na série de vazões da estação Porto Girândia, é possível mostrar que o ajuste realizado para a estação Porto Alegre, quando transposto para o posto Porto Girândia mostrou resultados adequados.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia aqui apresentada se constitui numa ferramenta simples de ser aplicada em rios com contribuições externas às captadas e infiltradas na área de drenagem da própria bacia, como é o caso dos aquíferos carsticos-fissurais existentes no Sudeste do Tocantins.

A aplicação desta metodologia permitiu que se fosse modelado o fenômeno do aporte externo sem se recorrer a modelos hidrogeológicos, com o uso de modelos hidrológicos clássicos concentrados por sub-bacia.

A metodologia permitiu a calibração de parâmetros consistentes, testados de forma cruzada (Proxy basin test) e apresentando resultados satisfatórios.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todos os colaboradores da Gama Engenharia de Recursos Hídricos que contribuíram para concretização deste trabalho.

7- BIBLIOGRAFIA

ABAS, 2001. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Disponível em <<http://www.abas.org/educacao.php>> Acesso em 1 de junho de 2011.

ANA, 2011. Agência Nacional de Água. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em 2 de maio de 2011.

BRAVO J. M. et al. (2006) “Avaliação Visual e Numérica da Calibração do Modelo Hidrológico IPH II com Fins Educacionais” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Nov. 2006.

TOCANTINS,2010. Plano Diretor das Bacias Hidrográficas dos rios das Balsas e São Valério. Relatório Técnico Parcial Fase A - Diagnóstico. Secretaria dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado do Tocantins. Contrato 150/2009.

TOCANTINS, 2011. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública do Estado do Tocantins. Disponível em <[http://www.ceuto.seplan.to.gov.br/ website/geologia/viewer.htm](http://www.ceuto.seplan.to.gov.br/website/geologia/viewer.htm)> Acesso em 2 de maio de 2011.