

ANÁLISE DE CENÁRIOS

**RESERVATÓRIOS PROPOSTOS NO PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DA REGIÃO TAQUARI-ANTAS DE 1972**

PROJETO TAQUARI-ANTAS

## **Relatório Taquari-Antas: reservatórios propostos no Programa de Desenvolvimento Integrado da Região Taquari-Antas de 1972**

A construção de barragens e a criação de reservatórios já foi analisada como uma possível solução para controle de cheias na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas em estudos anteriores. No final dos anos 1960, por exemplo, foi realizado um estudo na bacia Taquari-Antas com o intuito de gerar diretrizes para o desenvolvimento da região, visando à industrialização e expansão econômica da mesma (Montor-Montreal, 1972). Foram propostos 14 reservatórios, sendo alguns de usos múltiplos e oito destes destinados para controle de cheias (Figura 1 e Tabela 1).

De maneira geral os projetos propostos no final da década de 1960 não foram realizados, com exceção da barragem de Bom Retiro do Sul, que foi construída para permitir a navegação no rio Taquari até o Porto de Estrela. Os demais projetos de barragens não foram realizados, possivelmente em função de novas avaliações ambientais e de novas análises de custos e benefícios.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar a simulação hidrológica dos oito reservatórios propostos destinados para controle de cheias, a fim de investigar se a construção dos mesmos poderia ter sido eficiente na redução dos eventos extremos que ocorrem nas regiões mais baixas da bacia. É importante notar que a construção de várias destas barragens hoje seria dificultada pela existência de diversas pequenas barragens e estradas. Por exemplo, na área que seria inundada pela barragem projetada na década de 1960, denominada Antas-Prata, foram construídas posteriormente as três usinas do Complexo Energético Rio das Antas (CERAN).

Para o estudo foi utilizada uma versão modificada do modelo hidrológico do tipo chuva-vazão MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN ET AL., 2007), em que foi acrescentada uma metodologia para simular o efeito de reservatórios. Os resultados foram analisados em termos da capacidade de cada empreendimento de atenuar os picos de cheia e do amortecimento observado em cidades do baixo Taquari (Lajeado e Encantado), comparando cenários com e sem reservatórios (estado natural do rio).

A figura 1 apresenta a localização das barragens sugeridas no estudo do final da década de 1960, e a tabela 1 apresenta os objetivos de cada um dos projetos (Montor-

Montreal, 1972). Dentre os 14 projetos propostos, apenas oito tinham entre seus objetivos o controle de cheias.

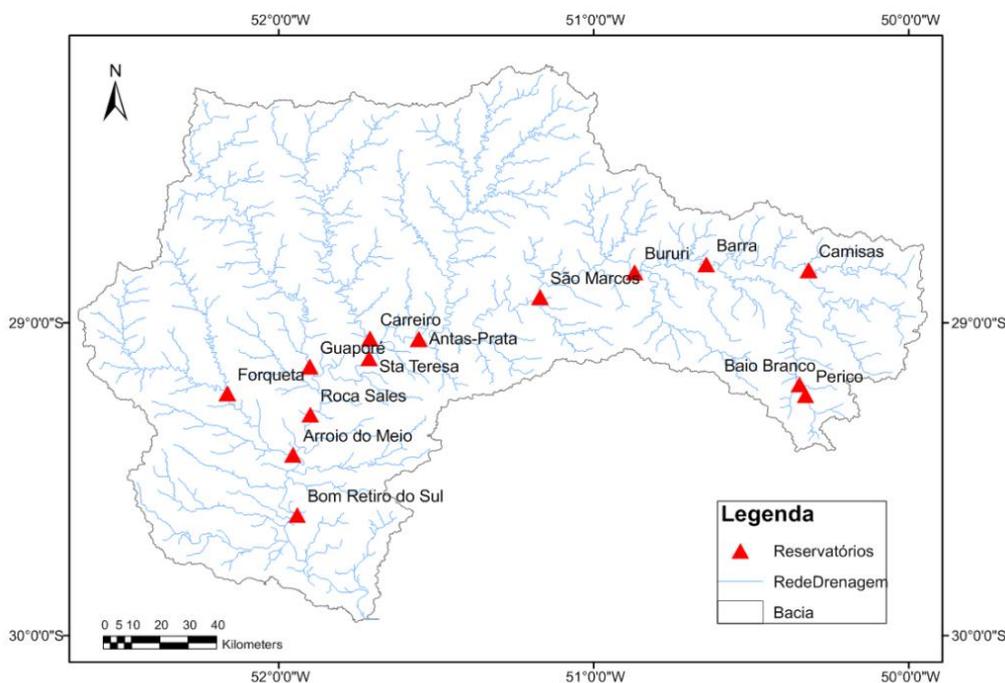


Figura 1. Reservatórios propostos no estudo de 1970.

Tabela 1. Reservatórios propostos no estudo de 1970 e respectivos usos; oito empreendimentos atuariam no controle de cheias.

Simulação	Nome	Uso proposto
sim	Forqueta	Controle de cheias
sim	Guaporé	Controle de cheias
sim	Carreiro	Controle de cheias
sim	Antas-Prata	Regularização, controle de cheias e geração de energia
sim	São Marcos	Regularização, controle de cheias e geração de energia
sim	Bururi	Regularização, controle de cheias e geração de energia
sim	Barra	Regularização, controle de cheias e geração de energia
sim	Camisas	Regularização, controle de cheias e geração de energia
não	Arroio do Meio	Canalização e geração de energia
não	Roca Sales	Canalização e geração de energia

não	Santa Tereza	Geração de energia
não	Perico	Geração de energia
não	Baio Branco	Geração de energia
não	Bom Retiro do Sul	Navegabilidade

## Metodologia

### **Simulação hidrológica**

A simulação envolveu a implementação dos oito reservatórios cujo objetivo incluía o controle de cheias no modelo hidrológico de simulação contínua MGB-IPH (descrito no Anexo I), seguindo a mesma metodologia apresentada na avaliação dos efeitos das usinas do CERAN.

Em cada ponto da rede de drenagem em que há uma barragem, a vazão afluente ao ponto é propagada com a equação da continuidade concentrada, apresentada abaixo:

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} + \frac{I_{t+1} + I_t}{2}$$

Onde  $S$  é o volume armazenado,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo,  $Q$  é a vazão defluente e  $I$  a vazão afluente à usina. Os índices  $t$  e  $t+1$  referem-se ao passo de tempo analisado.

Esta equação resolve um simples balanço de massas considerando um volume de controle que envolve o reservatório analisado. Para cada passo de tempo, analisa-se a variação no volume armazenado  $S$  devido às entradas  $I$  e saídas  $Q$  do reservatório. Como o objetivo da simulação era a análise de eventos de cheia, optou-se por desprezar as retiradas por evapotranspiração.

Como os termos  $S$  e  $Q$  são as incógnitas da equação de continuidade, e estes podem ser representados em função da variável nível ( $h$ ), a resolução numérica da equação foi efetuada iterativamente a fim de se encontrar, em cada passo de tempo, o valor de  $h$  que seja raiz da equação mostrada abaixo, que é a equação da continuidade reescrita.

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} - \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} - \frac{I_{t+1} + I_t}{2} = 0$$

O método numérico utilizado para obtenção da raiz foi o de falsa posição, para o qual são fornecidos valores limites superiores e inferiores de um intervalo que contenha

a raiz  $h$ . A cada iteração este subintervalo diminui para valores cada vez menores, até convergir para a raiz que forneça erros aceitáveis, ou seja, para a solução que forneça um valor do termo à esquerda da equação  $x$  que seja satisfatoriamente próximo a zero. O erro arbitrado nesta aplicação foi de  $0,1 \text{ m}^3$ , considerando que valores desta ordem de grandeza não afetam os resultados obtidos de forma expressiva. No tempo inicial ( $t=0$  h), considera-se que  $I_t = I_{t+1}$  e  $Q_t = I_{t+1}$ , sendo  $I_{t+1}$  a vazão afluyente no tempo  $t=1$  h. Em cada iteração, o volume armazenado é calculado pela equação da curva cota-volume do reservatório, e a vazão defluente é calculada para o valor de nível obtido com a equação característica da estrutura de saída (ver seção a seguir).

Para o MGB-IPH é necessário discretizar a bacia hidrográfica de estudo em diversas mini-bacias, definidas para cada trecho da rede de drenagem (existe um trecho entre cada duas confluências e entre cada cabeceira e a respectiva primeira confluência). As vazões são propagadas ao longo destes trechos da rede através do método Muskingum-Cunge linear, sendo que a vazão defluente de uma determinada mini-bacia é a vazão afluyente da mini-bacia de jusante, somada à contribuição dos volumes gerados na própria mini-bacia.

Para representar o efeito de reservatórios na propagação de cheias, implementou-se no modelo a resolução numérica da equação da continuidade concentrada. A rotina adotada para propagação de vazões seguiu os seguintes passos, para cada mini-bacia e em cada intervalo de tempo: 1) propagação da vazão ao longo do trecho da mini-bacia; 2) avaliação se a mini-bacia contém um reservatório; 3) caso afirmativo, propagação no reservatório através da resolução numérica da equação da continuidade concentrada, tendo como vazão de entrada a vazão propagada no trecho da mini-bacia a montante, e passagem da vazão liberada pelo reservatório para a mini-bacia de jusante; 4) caso negativo, liberação da vazão propagada na mini-bacia para a mini-bacia de jusante.

O período simulado foi de Junho/2009 a Dezembro/2014, para o qual se dispunha de dados horários de precipitação observados. Os resultados de vazão foram avaliados (1) para cada barragem, de modo a explorar a capacidade de amortecimento de cheias de cada empreendimento proposto, e (2) em locais de interesse da bacia, nomeadamente as cidades de Lajeado e Encantado, que sofrem com inundações periódicas. Para Encantado, foi também possível avaliar a redução dos níveis de inundação devido à implementação dos reservatórios, através do uso de uma curva-chave produzida pela CPRM para o local.

### Características dos reservatórios simulados

As curvas cota-volume de cada empreendimento proposto foram obtidas através da ferramenta "Depth-Area-Volume" do software IPH Hydro-Tools (disponível em <<http://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/iph-hydro-tools/>>), calculando as curvas a partir do Modelo Digital de Elevação STRM 90 m.

Quanto aos aspectos de estruturas de saída de água, para manter as características semelhantes ao projeto original, optou-se por simular os reservatórios com um descarregador de fundo e um vertedor livre, com as seguintes especificações:

- Descarregador do fundo na metade da altura da barragem, dimensionado para permitir a passagem da vazão máxima de 2 anos de tempo de retorno ( $Q_{TR=2 \text{ anos}}$ );
- Vertedor de soleira livre com soleira em cota 15 a 23 m menor do que a crista da barragem, de acordo com o projeto original, e dimensionados para permitir a vazão máxima de 100 anos de tempo de retorno ( $Q_{TR=100 \text{ anos}}$ ).

Foram adotadas as vazões de tempo de retorno de 2 e 100 anos da regionalização de vazões do presente projeto, previamente apresentadas no relatório de caracterização da bacia.

As características de cada um dos reservatórios simulados são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das barragens simuladas na avaliação das propostas do PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DA REGIÃO TAQUARI-ANTAS DE 1972 .

Característica	Antas-Prata	Forqueta	Guaporé	Carreiro	São Marcos	Bururi	Barra	Camisas
<b>Cota fundo (m)</b>	115	79	52	85	274	386	514	656
<b>Cota crista (m)</b>	260	215	100	150	360	510	650	750
<b>Altura da barragem (m)</b>	145	136	48	65	86	124	136	94
<b>Volume útil (hm<sup>3</sup>)</b>	1919	852	99	117	241	288	1605	229

<b>Q TR=2 anos</b>	4899	977	979	1088	2719	2108	1425	556
<b>Cota do descarregador de fundo (m)</b>	193	147.5	76.5	118	317.5	448.5	582.5	703.5
<b>Área do descarregador de fundo (m<sup>2</sup>)</b>	225	45	76	72	157	101	65	31
<b>Coefficiente do descarregador de fundo</b>	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
<b>Q TR=100 anos</b>	14298	2851	2858	3178	7935	6154	4160	1625
<b>Cota vertedor (m)</b>	242	197	80	132	337	495	625	732
<b>Comprimento vertedor (m)</b>	74	15	13	16	30	40	14	8
<b>Coefficiente do vertedor livre</b>	2	2	2	2	2	2	2	2

### Cenários simulados

Foram estudados três cenários, sendo que o cenário 1 (sem barragens) será apresentado a fim de comparação com os cenários 2 e 3 nas próximas seções.

- **Cenário 1:** Sem a existência de reservatórios, simulando a condição natural do rio;
- **Cenário 2:** Apenas reservatório de Antas-Prata, que é o maior empreendimento proposto em termos de volume útil e altura;
- **Cenário 3:** Simulação dos oito reservatórios propostos em 1970 para controle de cheias - Forqueta, Guaporé, Carreiro, Antas-Prata, São Marcos, Bururi, Barra e Camisas.

### **Resultados do Cenário 2 - Implementação apenas do reservatório de Antas-Prata**

O reservatório Antas-Prata é o maior reservatório dos propostos no estudo do final da década de 1960 na bacia do rio Taquari-Antas. As simulações revelam que a

construção apenas do reservatório de Antas-Prata, que controla os volumes gerados em cerca de 47% da bacia (Figura 3), seria suficiente para reduzir uma fração relevante dos picos de cheia. O efeito de amortecimento dos picos pode ser visto na Figura 4, que apresenta o hidrograma em Encantado para os cenários com e sem barragem. O hidrograma com reservatório possui um tempo de duração maior, devido à lenta liberação do volume pela barragem de Antas-Prata, atenuando desta forma os picos de cheias.

A série de afluições e defluências à barragem durante o evento de 21/07/2011 está apresentada na Figura 5. Observa-se elevado amortecimento das cheias promovido pela barragem Antas-Prata. Também se pode notar que os picos de defluências ocorrem no momento de interseção das vazões afluente e defluente (o ponto de máximo armazenamento da equação da continuidade concentrada é encontrado quando  $Q$  é igual a  $I$ , pois neste ponto a variação do volume deve ser nula). Esta é uma boa forma de aferir os cálculos de propagação em reservatórios (Tucci, 1998).

Na seção "Análise dos Cenários 1 e 2" o efeito da barragem Antas-Prata será mais explorado, comparando seus efeitos aos demais cenários.

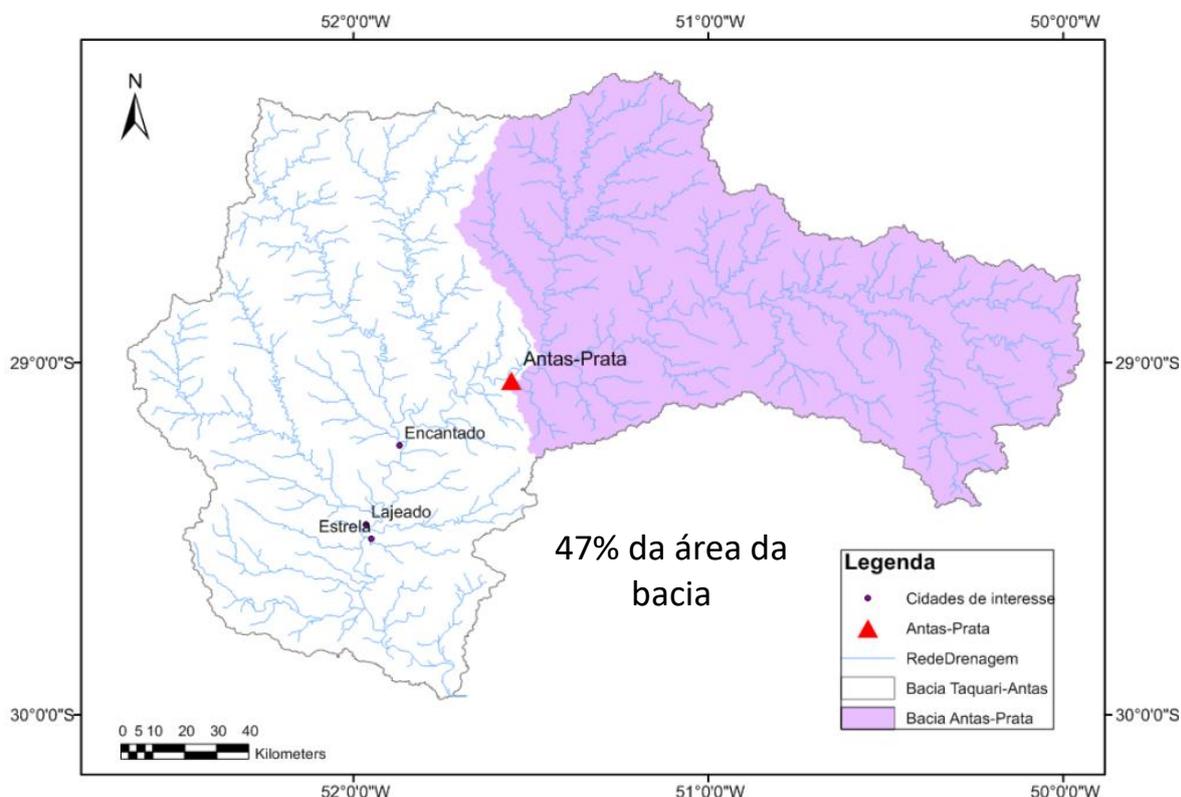


Figura 3. Localização do reservatório de Antas-Prata, cuja área de drenagem equivale a cerca de 47% da área da bacia do Taquari-Antas.

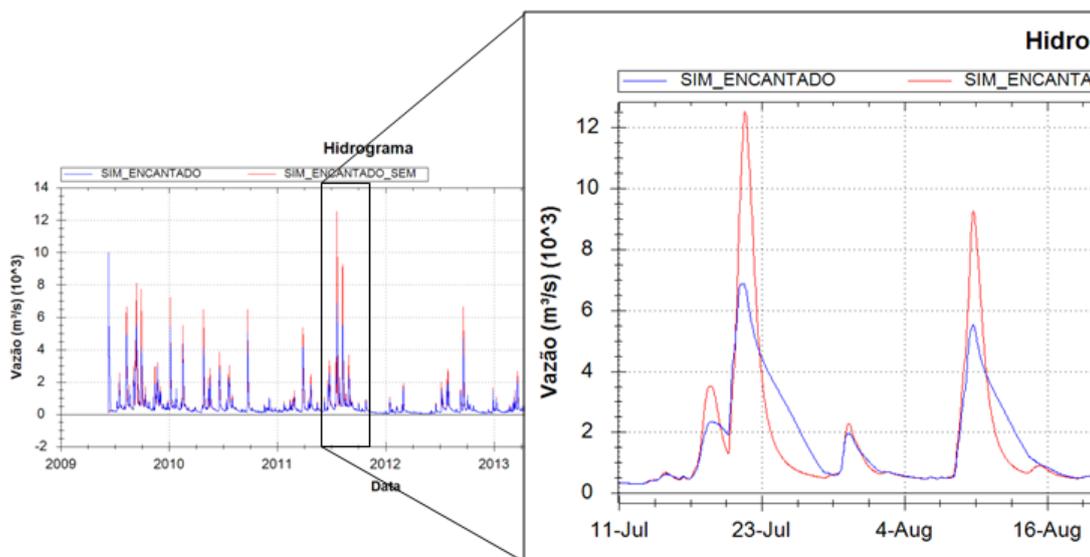


Figura 4. Hidrogramas em Encantado, com e sem a barragem de Antas-Prata, durante o evento de 21/07/2011.

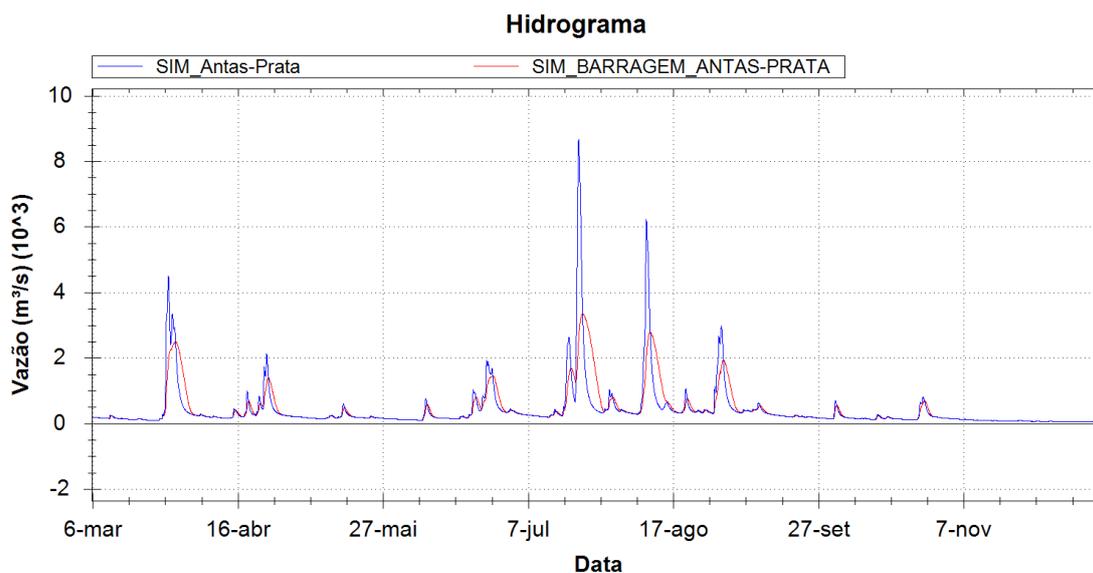


Figura 5. Hidrogramas afluente e defluente da barragem Antas-Prata durante o evento de 21/07/2011.

### **Resultados do Cenário 3 - Implementação dos oito reservatórios**

Neste cenário foi analisado, além do empreendimento de Antas-Prata, o efeito dos outros sete reservatórios propostos no relatório de 1972 no amortecimento de cheias (Figura 6).

As simulações revelam que a existência destas barragens seria suficiente para amortecer de forma expressiva as cheias na bacia. Por exemplo, o evento de 21/07/2011, um dos maiores já registrados na bacia, teria o pico em Encantado reduzido de 12518 m<sup>3</sup>/s para 5887 m<sup>3</sup>/s (Figura 7). Cabe ressaltar que em Encantado não há a influência da barragem do rio Forqueta.

A diferença de capacidade de amortecimento entre os reservatórios levaria a mudanças na dinâmica das cheias da bacia. O evento de 28/06/2014, por exemplo, passaria a ter um pico maior que o de 06/06/2014 devido à cheia nos rios Guaporé e Carreiro, cujos reservatórios têm menor capacidade de atenuação que os cinco reservatórios localizados no alto Antas (Figura 8). Na próxima seção os efeitos destes reservatórios serão explorados, comparando seus efeitos aos demais cenários.

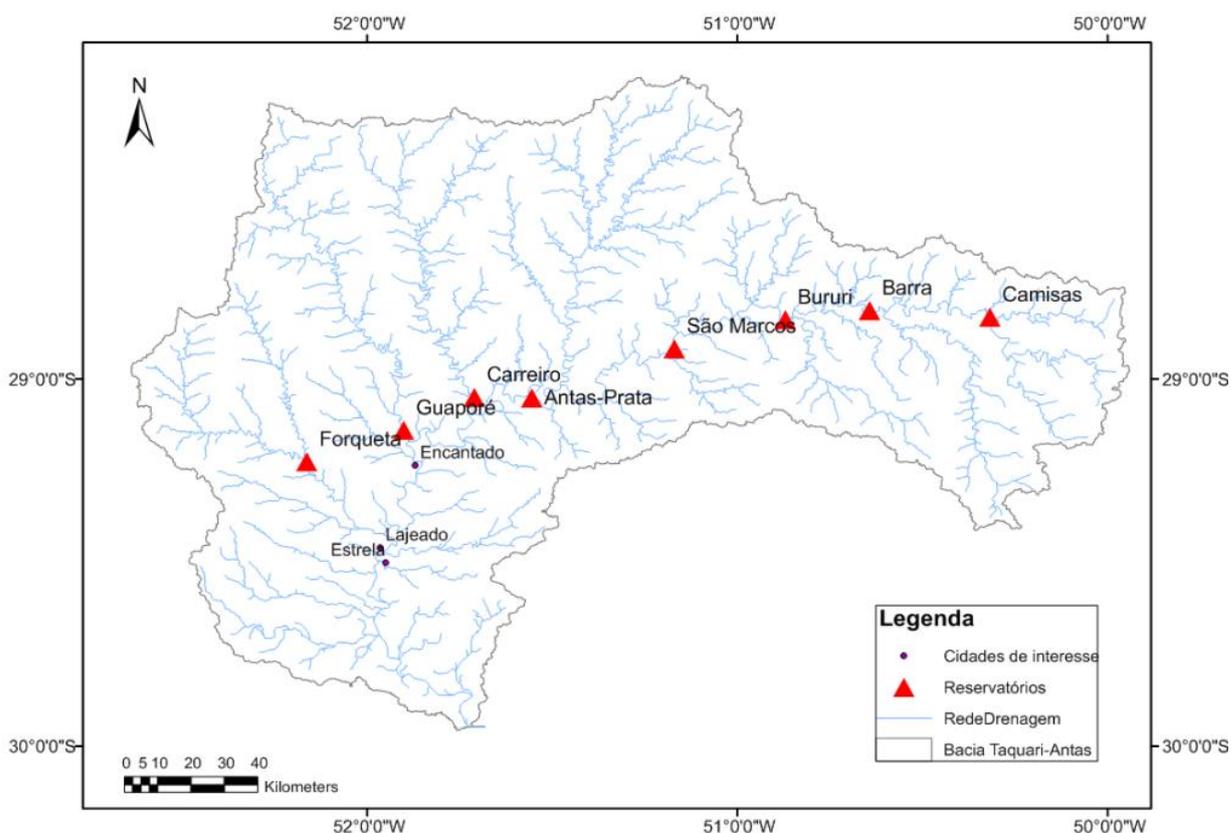


Figura 6. Localização dos oito empreendimentos propostos para controle de cheias.

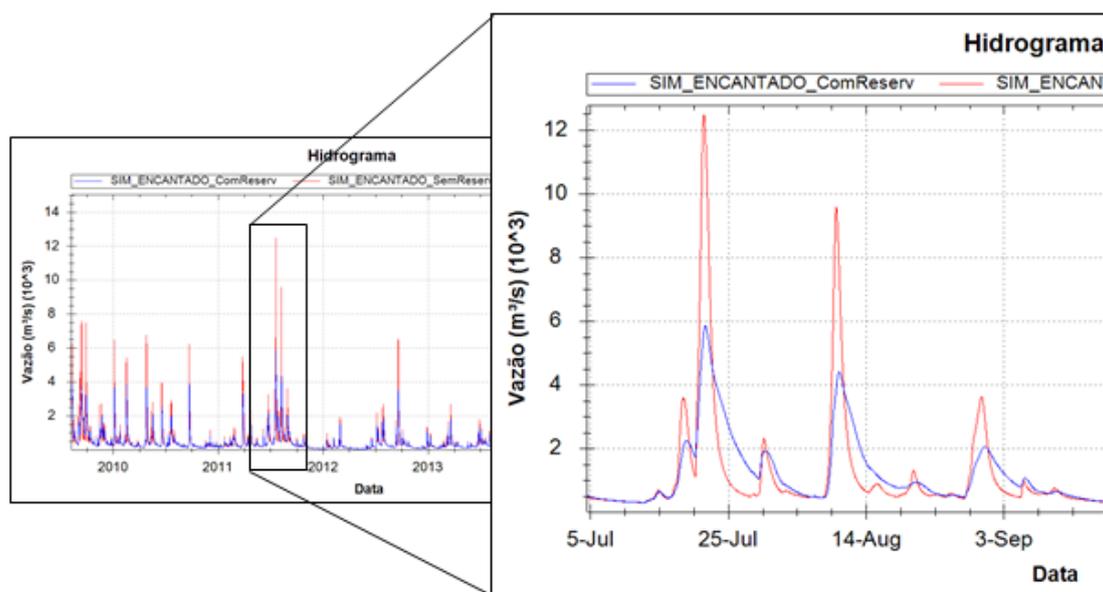


Figura 7. Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, durante o evento de 21/07/2011.

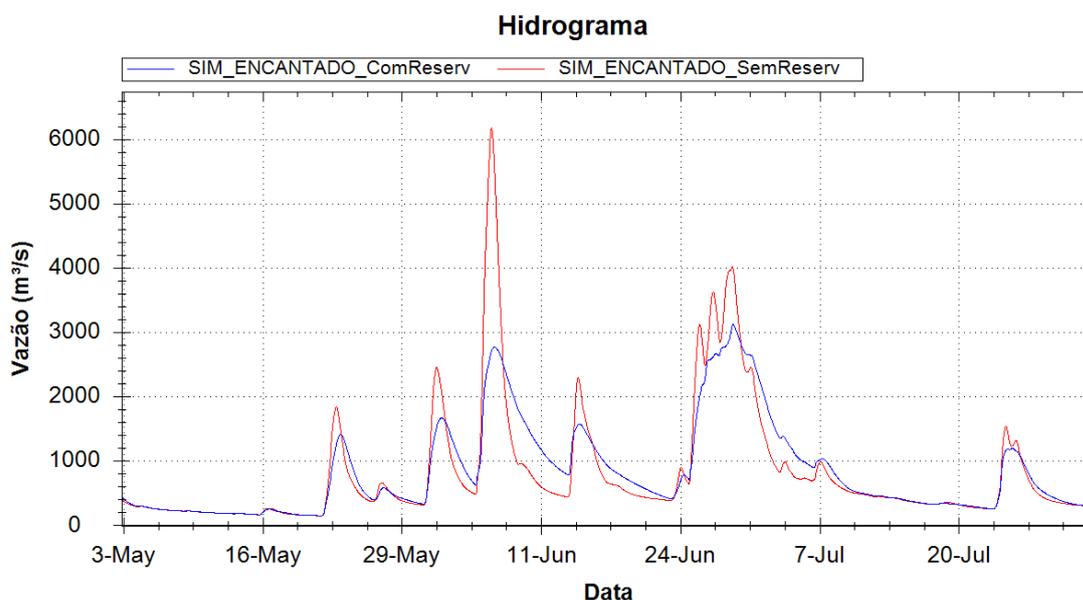


Figura 8. Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, para o ano de 2014. Nota-se que o evento de 28/06/2014 passa a apresentar pico maior que o de 06/06/2014 devido a cheia nos rios Guaporé e Carreiro.

### Análises conjunta dos cenários 1, 2 e 3

A comparação entre os cenários 1, 2 e 3 mostra que seria possível uma redução expressiva dos eventos de inundação na bacia Taquari-Antas com a construção de barragens de controle de cheia. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores absolutos de redução dos picos de cheia das vazões afluente e defluente de cada empreendimento proposto, para os cenários 2 e 3, respectivamente. As Tabelas 5 e 6 apresentam a porcentagem da redução do pico da vazão defluente em relação à afluente para os eventos listados. Finalmente, a Tabela 7 avalia os impactos observados nas cidades de Encantado e Lajeado, que são frequentemente inundadas pelo rio Taquari-Antas, em termos (i) de redução do pico da vazão simulada no cenário sem barragens e com barragens, e (ii) de redução do nível entre os dois cenários em Encantado, através do uso de curva-chave fornecida pela CPRM para o local.

Nos eventos analisados, o cenário apenas com a barragem Antas-Prata seria suficiente para reduzir os picos de cheia em Encantado entre 30% e 48%, enquanto os oito reservatórios poderiam elevar esta redução para valores entre 47% e 57%, alterando

os níveis em Encantado da situação de "inundação" para "alerta" ou "atenção" em três dos quatro eventos analisados. Para Lajeado, a construção apenas de Antas-Prata reduziria os picos entre 22% e 43%, enquanto o efeito conjunto dos oito reservatórios seria uma redução entre 44% e 52%.

A barragem de Antas-Prata apresentou os maiores valores de redução da magnitude dos picos, diminuindo em mais de 1000 m<sup>3</sup>/s os picos de vazão afluente em todos os eventos analisados, o que reflete o elevado volume útil deste empreendimento. Em termos de eficiência de redução do pico, por outro lado, os reservatórios de Forqueta, Barra e Camisas apresentaram os maiores valores (diminuição superior a 60% do pico da vazão afluente), indicando uma maior capacidade de regularização das vazões afluentes nestes pontos.

Tabela 3. Avaliação da redução dos picos de cheia das vazões afluente e defluente às barragens no cenário apenas com a barragem Antas-Prata (cenário 2).

Aproveitamento	Fração de redução do pico em eventos de cheia			
	06/06/2014	09/08/2011	21/07/2011	19/09/2012
Antas-Prata	2809	3452	5284	1508

Tabela 4. Avaliação da redução dos picos de cheia das vazões afluente e defluente às barragens no cenário com as oito barragens (cenário 3). Critério adotado para melhor visualização dos resultados: 0-500, 500-1000, >1000 m<sup>3</sup>/s.

Aproveitamento	Redução do pico em eventos de cheia			
	06/06/2014	09/08/2011	21/07/2011	19/09/2012
Antas-Prata	1072	1662	2455	1046
Forqueta	459	1298	1537	1274
Carreiro	200	458	263	564
Guaporé	214	283	271	438

São Marcos	571	616	825	318
Bururi	512	461	1058	184
Barra	914	907	1553	542
Camisas	681	603	675	413

Tabela 5. Avaliação da porcentagem de redução dos picos de cheia das vazões afluente e defluente às barragens no cenário apenas com a barragem Antas-Prata (cenário 2).

Aproveitamento	Fração de redução do pico em eventos de cheia			
	06/06/2014	09/08/2011	21/07/2011	19/09/2012
Antas-Prata	53%	55%	61%	42%

Tabela 6. Avaliação da porcentagem de redução dos picos de cheia das vazões afluente e defluente às barragens no cenário com as oito barragens (cenário 3). Critério adotado para melhor visualização dos resultados: 20-40%, 40-60%, 60-80%.

Aproveitamento	Fração de redução do pico em eventos de cheia			
	06/06/2014	09/08/2011	21/07/2011	19/09/2012
Antas-Prata	38%	43%	48%	40%
Forqueta	64%	77%	80%	78%
Carreiro	30%	30%	15%	42%
Guaporé	32%	22%	15%	33%
São Marcos	32%	32%	35%	27%
Bururi	41%	39%	51%	27%
Barra	65%	65%	72%	58%
Camisas	71%	68%	70%	67%

Tabela 7. Resultados das simulações com oito reservatórios (8R), apenas Antas-Prata (1R-AP), e sem reservatórios (SR) em Encantado (vazão e nível) e Lajeado (vazão) - magnitude dos picos e porcentagem de redução dos picos em relação ao cenário sem

reservatórios. Critérios para cotas de interesse do Sistema de Alerta Contra Enchentes da CPRM para o posto de Encantado: **Atenção: 5.6**, **Alerta: 8.7**, **Inundação: 9.5**.

Localização	06/06/2014			09/08/2011			21/07/2011			19/09/2012		
	8R	1R- AP	SR	8R	1R- AP	SR	8R	1R- AP	SR	8R	1R- AP	SR
Encantado- Vazão	2708	3259	6326	4366	5518	9248	5887	6872	12518	3504	4658	6630
	57%	48%	-	53%	40%	-	53%	45%	-	47%	30%	57%
Encantado- Nível	6.7	7.6	11.6	9.1	10.6	14.85	11.1	12.2	18.1	7.9	9.5	11.9
Lajeado - Vazão	3061	3647	6431	5075	6550	9765	6642	8625	13188	4208	5838	7475
	52%	43%	-	48%	33%	-	50%	35%	-	44%	22%	-

### Avaliação de eventos sintéticos extremos

As simulações apresentadas nas seções anteriores analisaram o efeito dos reservatórios propostos no relatório de 1972 na atenuação das cheias ocorridas no período de Junho/2009 a Dezembro/2014, utilizando a simulação com dados observados do período. Neste intervalo, a maior cheia observada foi a de 21/07/2011, cujo tempo de retorno associado está entre 25 e 50 anos (Tabela 8, de acordo com os resultados obtidos no relatório de caracterização da bacia do Projeto Taquari-Antas).

Para analisar a capacidade dos reservatórios em atenuar cheias maiores, foi adotada uma metodologia de geração de eventos sintéticos, em que a chuva observada no período do principal evento de 2011 (entre 07/07/2011 e 07/08/2011) foi majorada adotando diferentes fatores multiplicadores, de modo a gerar vazões extremas em Encantado. Assim, aplicando fatores de multiplicação 1,2 e 1,4 em toda a precipitação do período citado, obtiveram-se picos de 15492 m<sup>3</sup>/s e 18457 m<sup>3</sup>/sem Encantado, cujos valores de tempo de retorno associados estão entre 100 e 200 anos (fator 1,2) e bem acima de 200 anos (1,4).

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados das simulações com e sem reservatórios para os eventos com fatores 1,2 e 1,4, respectivamente. Pode-se observar que os oito reservatórios propostos teriam um forte efeito de atenuação das cheias,

mesmo durante eventos extremos. Os picos nos cenários com barragens foram 7148 m<sup>3</sup>/s (1,2) e 8396 m<sup>3</sup>/s (1,4), apresentando ambas as simulações uma redução de 54%.

Tabela 8. Estimativa das vazões extremas em Encantado, de acordo com o relatório de diagnóstico hidrológico da bacia do Projeto Taquari-Antas.

Tempo de Retorno	2 anos	5 anos	10 anos	25 anos	50 anos	100 anos	200 anos
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	4954	7950	9447	10945	13134	14459	16015

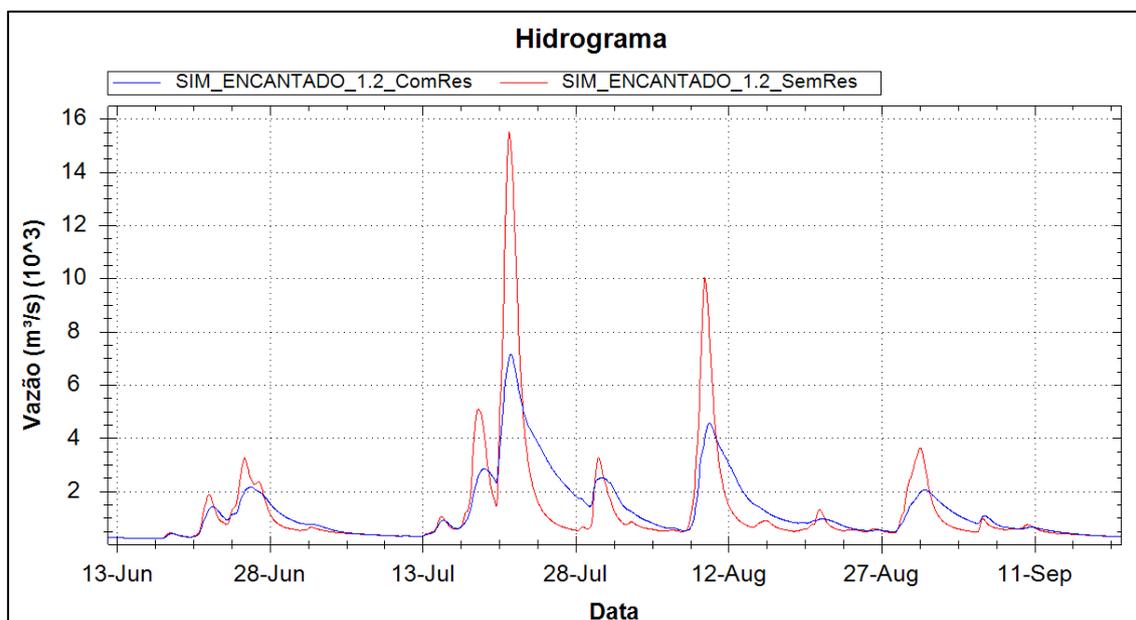


Figura 9. Simulação com e sem reservatórios para o evento de 21/07/2011 em Encantado com precipitação multiplicada por um fator de 1,2.

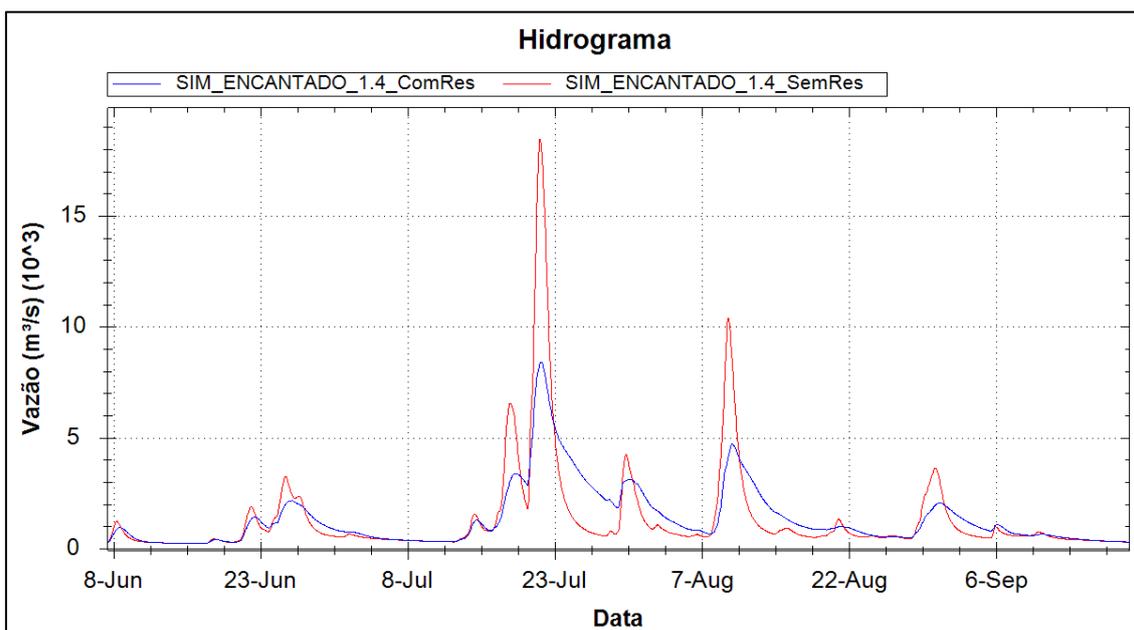


Figura 10. Simulação com e sem reservatórios para o evento de 21/07/2011 em Encantado com precipitação multiplicada por um fator de 1,4.

### Considerações finais

Este relatório apresentou uma avaliação do efeito na propagação de cheias de oito reservatórios para controle de cheias na bacia do Taquari-Antas, de acordo com proposta constante no plano diretor de desenvolvimento da região de 1972 (Montor-Montreal, 1972).

Os reservatórios foram inseridos no modelo hidrológico MGB-IPH de forma a avaliar o efeito do amortecimento destes em cheias ocorridas na bacia. Os resultados indicaram a possibilidade de controle parcial de cheias na bacia com a implantação destes empreendimentos. Por exemplo, a implantação dos oito reservatórios seria capaz de reduzir em cerca de 54% o pico de uma cheia superior a 200 anos de tempo de retorno na localidade de Encantado. O evento de Julho de 2011, um dos maiores já registrados, teria o pico reduzido 53% em Encantado e 48% em Lajeado.

Por outro lado, grande parte dos empreendimentos propostos no estudo antigo não podem mais ser construídos, em função de que a área a ser inundada já está ocupada

por outros empreendimentos, ou porque existem limitações de outro tipo. Considerando os oito aproveitamentos propostos para controle de cheias, apenas os de Guaporé e São Marcos poderiam ser hoje construídos de modo a não interferir com outras barragens ou estradas existentes. Além disso, a FEPAM (órgão ambiental do estado do RS) não autoriza intervenções estruturais no rio Guaporé, a fim de mantê-lo em seu estado natural.

No entanto, apesar da dificuldade da construção destes reservatórios na situação atual da bacia, o estudo aqui apresentado salienta a possibilidade de controle de cheias na bacia do Taquari-Antas através da construção de grandes reservatórios (as barragens simuladas possuíam entre 48 e 145 m de altura).

### Referências

COLLISCHONN, W. (2001) Simulação hidrológica de grandes bacias. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52(5), p. 878-895.

MONTOR-MONTREAL. 1972. Plano diretor – Programa de Desenvolvimento Integrado da Região Taquari-Antas. Porto Alegre: Secretaria de Desenvolvimento Regional e Obras Públicas.

TUCCI, C.E.M. (1998). Modelos hidrológicos. Ed. 2. Porto Alegre: Ed. da UFRGS.

### Anexos

## Anexo I. Modelo hidrológico MGB-IPH

### **Descrição do modelo hidrológico MGB-IPH**

O Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001) é um modelo hidrológico distribuído e composto de módulos específicos que representam matematicamente os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Este modelo, amplamente aplicado nos estudos envolvendo bacias na região da América do Sul incluindo a própria bacia do Taquari-Antas (Collischonn, 2001; Larentis, 2004, 2009), tem sido utilizado por diversas vezes em trabalhos relacionados à previsão de vazões afluentes a reservatórios no contexto hidrelétrico brasileiro, o que motivou sua adaptação para o presente projeto especificamente no que se refere à temática das cheias.

A maior vantagem na utilização de um modelo de caráter conceitual, ou seja, capaz de representar os processos da bacia através de uma representação matemática, reside na possibilidade de fornecer resultados para diferentes locais mesmo onde a carência de dados acaba sendo um fator limitante. A seguir, é feita uma breve descrição do modelo supracitado, sendo que a descrição completa pode ser encontrada em trabalhos como de Collischonn (2001) e Paiva (2009).

A versão mais recente do modelo hidrológico MGB-IPH permite a utilização de até três níveis de divisão dos dados espaciais: 1) a bacia; 2) as sub-bacias; e 3) as minibacias. A bacia é a área total que será representada no modelo hidrológico, enquanto que as minibacias são os menores elementos usualmente definidos para cada segmento da rede hidrográfica. As sub-bacias são unidades intermediárias em relação às outras duas, as quais podem ser utilizadas para a definição de valores de parâmetros do modelo hidrológico necessários para procedimentos de calibração. A principal divisão da bacia para o modelo hidrológico corresponde à discretização em minibacias, as quais permitem espacializar as informações a serem fornecidas como entrada, por exemplo, a precipitação.

Além da variabilidade espacial da chuva, que pode ser representada por meio de séries distintas em cada uma das minibacias, há também a variabilidade espacial das características físicas da bacia que deve ser considerada. O tratamento desta variabilidade dentro do modelo é feito através da discriminação de áreas com comportamento hidrológico similar, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), ou, simplesmente, "blocos". Desta forma, cada minibacia é ainda subdividida em classes com respostas hidrológicas distintas, dentro das quais o modelo calcula o balanço vertical de água e determina as parcelas de escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. No caso da interceptação da chuva ocasionada pela cobertura vegetal, esta é representada por um reservatório cujo volume depende do índice de área foliar. A evapotranspiração é estimada para cada URH através do método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993), considerando aspectos climáticos como insolação, velocidade do vento, umidade relativa e pressão, além de outros parâmetros como albedo, altura das árvores e resistência superficial. Estes últimos são exemplos de parâmetros fixos que não são alterados espacialmente, porém existem ainda alguns parâmetros calibráveis que podem ser modificados de acordo com o comportamento hidrológico associado a uma determinada URH.

Após o balanço de água no solo, os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo resultantes, antes de alcançarem a rede de drenagem, sofrem efeito de atenuação e retardo através da metodologia do reservatório linear simples, considerando uma relação direta entre a vazão escoada e o volume de água armazenado em cada um dos reservatórios conceituais correspondentes. Na sequência, a propagação da vazão ao longo dos rios é realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge linear (Tucci, 1998), cujos parâmetros são calculados com base em informações hidráulicas como comprimento, declividade, rugosidade e largura média da seção.

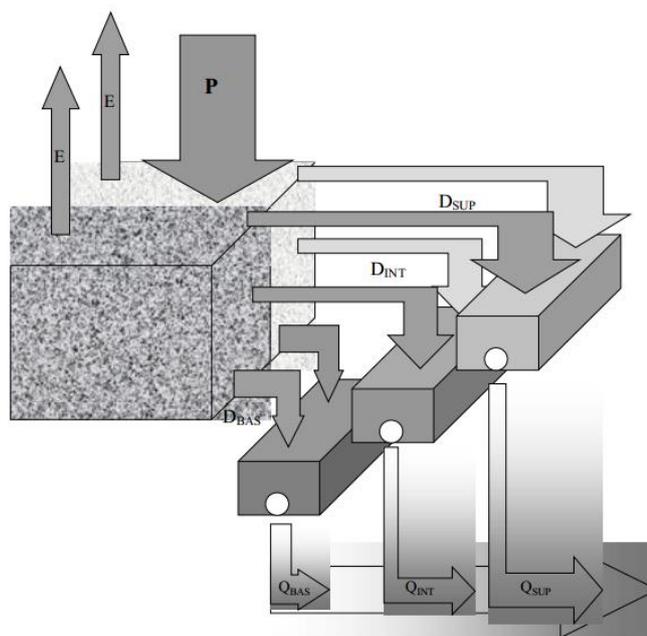


Figura 1. Representação do processo de geração de escoamento na minibacia, considerando a existência de dois blocos distintos. Fonte: Collischonn e Tucci (2001).

### **ETAPA 1: Coleta de dados e Simulação Hidrológica**

A primeira etapa para uso do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia Taquari-Antas envolveu a coleta de informações hidrológicas (precipitação, níveis de água e vazões) nos pontos de monitoramento existentes, dados físicos da bacia hidrográfica, e simulação hidrológica. Esta etapa inicial é caracterizada como preparação do modelo, de maneira que sejam representados, com a maior proximidade possível da realidade, os processos que envolvem a transformação da chuva em escoamento na bacia.

#### ***Dados hidrológicos***

O modelo MGB-IPH, no escopo de sua aplicação, normalmente é utilizado para intervalos de cálculo de 1 dia, o que pode ser considerado suficientemente adequado para a representação dos processos que ocorrem em grandes bacias. Todavia, em rios de característica montanhosa com elevadas declividades, da mesma forma como pode ser verificado na bacia do Taquari-Antas principalmente nos trechos a montante da cidade de Encantado, este intervalo de cálculo pode não se ajustar muito bem à realidade, visto as grandes

elevações de nível - e vazão - que ocorrem no período de poucas horas durante as cheias.

Sendo assim, foram reunidos para o presente projeto dados horários para calibração e composição da base dados do sistema. As informações pluviométricas em intervalo de tempo horário identificadas (Tabela 1) são provenientes de três diferentes entidades, sendo estas o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a CPRM e a Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior (UNIVATES):

Tabela 1. Estações telemétricas com envio de dados de precipitação em tempo real, na bacia do rio Taquari-Antas.

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude (°)	Longitude (°)	Período de dados
1	Encantado	CPRM	-29,2344	-51,8551	Nov/2013 - Atual
2	Estrela	CPRM	-29,4733	-51,9601	Out/2013 - Atual
3	Muçum	CPRM	-29,1672	-51,8686	Nov/2013 - Atual
4	Santa Lúcia	CPRM	-29,1194	-51,9122	Out/2013 - Atual
5	Linha José Julho	CPRM	-29,0977	-51,6996	Nov/2013 - Atual
6	Passo Tainhas	CPRM	-28,8640	-50,4232	Out - Dez/2013
7	Bento Gonçalves	INMET	-29,1672	-51,5347	Jun/2009 - Atual
8	Canela	INMET	-29,3688	-50,8274	Jun/2009 - Atual
9	Lagoa Vermelha	INMET	-28,2219	-51,5122	Jun/2009 - Atual
10	Passo Fundo	INMET	-28,2294	-52,4039	Jun/2009 - Atual
11	São José dos Ausentes	INMET	-28,7514	-50,0583	Jun/2009 - Atual
12	Soledade	INMET	-28,8536	-52,5417	Jun/2009 - Atual
13	Teutônia	INMET	-29,4501	-51,8242	Ago/2012 - Atual
14	Vacaria	INMET	-28,5136	-50,8828	Jun/2009 - Atual
15	André da Rocha	UNIVATES	-28,6306	-51,5765	Abr/2014 - Atual
16	Anta Gorda	UNIVATES	-28,9832	-52,0004	Abr/2014 - Atual
17	Fontoura Xavier	UNIVATES	-28,9814	-52,3465	Abr/2014 - Atual
18	Marau	UNIVATES	-28,4503	-52,1991	Abr/2014 - Atual
19	Marques de Souza	UNIVATES	-29,3256	-52,0954	Abr/2014 - Atual
20	Monte Alegre dos Campos	UNIVATES	-28,6858	-50,7814	Abr/2014 - Atual
21	Rio das Antas	UNIVATES	-29,0455	-51,5698	Abr/2014 - Atual
22	São Marcos	UNIVATES	-28,9677	-51,0653	Abr/2014 - Atual

Embora a quantidade de estações telemétricas existentes na bacia seja relativamente suficiente para uma boa cobertura da precipitação, a mesma consideração não pode ser feita quanto à disponibilidade de registros históricos com transmissão em tempo real. Observando a tabela acima, apenas as estações do INMET fornecem um período de dados suficiente para a calibração, as quais se encontram localizadas principalmente nas proximidades do divisor de águas, sobretudo na região das cabeceiras de drenagem. Para aumentar a variabilidade espacial em função da inserção de medições intermediárias da bacia, um procedimento de adequação dos dados de entrada foi realizado considerando a desagregação horária a partir de dados diários. As informações de chuva em intervalo de tempo diário foram selecionadas através do sistema Hidroweb/ANA, sendo identificado um total de 27 postos pluviométricos - considerando o mesmo período de dados verificado nos postos do INMET.

Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
1	02849019	-28,8350	-49,8377
2	02849035	-28,6263	-49,9333
3	02850006	-28,4494	-50,2963
4	02850009	-28,8675	-50,4561
5	02850016	-28,9375	-50,6540
6	02850020	-28,6833	-50,7808
7	02851003	-28,8533	-51,2844
8	02851021	-28,8677	-51,4483
9	02851022	-28,6194	-51,8666
10	02851024	-28,7561	-51,6280
11	02851044	-28,8444	-51,8791
12	02851051	-28,3238	-51,2111
13	02851052	-28,4619	-51,5377
14	02852030	-28,5613	-52,5527
15	02852031	-28,4666	-52,3666
16	02852052	-28,3263	-52,0538
17	02852053	-28,8130	-52,5113
18	02950063	-29,2769	-50,3105
19	02951022	-29,3357	-51,1902
20	02951027	-29,3663	-51,3711
21	02850004	-28,1522	-50,4408
22	02952035	-29,4538	-52,6325
23	02952036	-29,3125	-52,4225
24	02952037	-29,4702	-52,2497

Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
25	02952038	-29,0405	-52,2847
26	03051005	-30,0897	-51,6305
27	03051031	-30,1588	-51,9311

Para a desagregação, os registros diários das estações pluviométricas são transformados para intervalo de tempo horário com base na estação telemétrica mais próxima do INMET e com disponibilidade de dados, assumindo-se esta como sendo representativa da distribuição temporal da chuva. Embora esta consideração possa levar a resultados bem distintos se comparado à realidade - principalmente para eventos de chuva localizados - ela pode ser melhor aceita durante eventos de precipitação de maior escala e que causam a maior parte das cheias na bacia, já que nesses casos a chuva tende a ser mais bem distribuída no tempo e no espaço. A figura a seguir apresenta a distribuição geográfica dos postos de chuva utilizados.

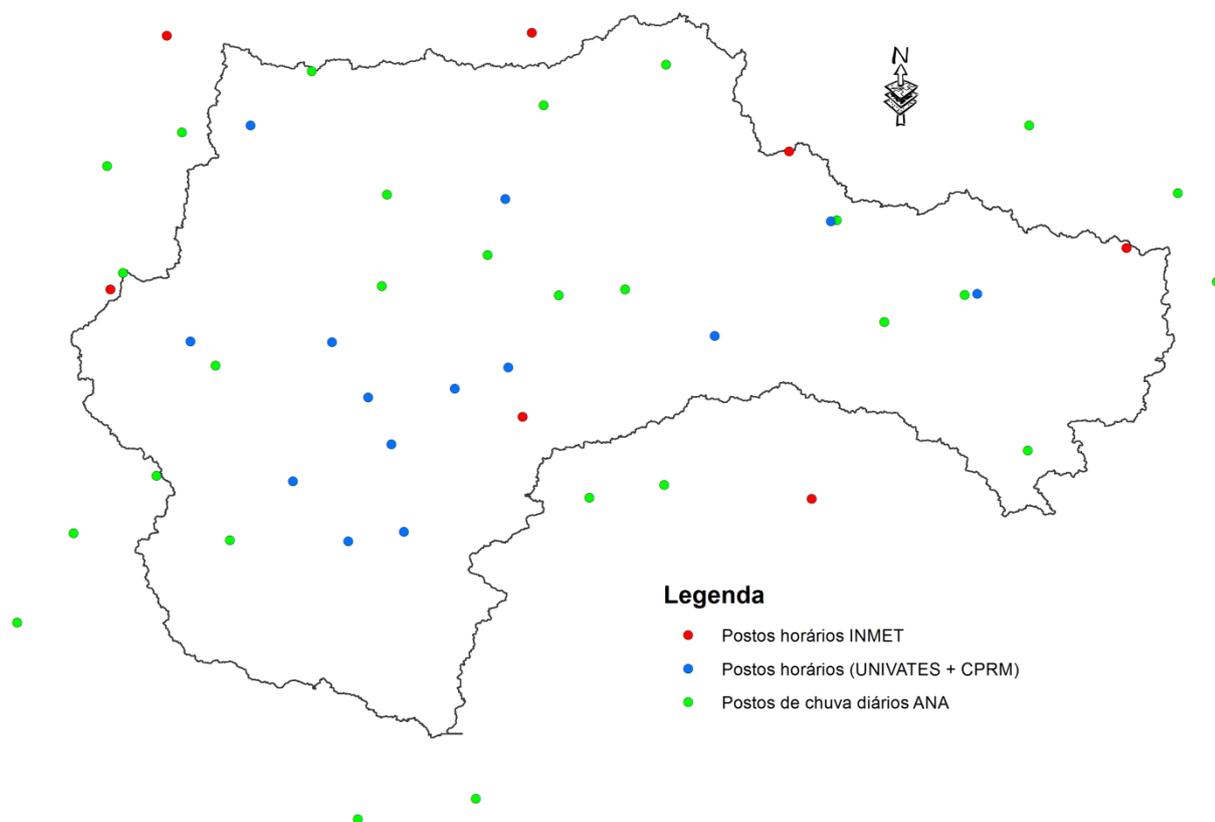


Figura 2. Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados no modelo MGB-IPH.

As estações fluviométricas com transmissão de dados em tempo real na bacia do Taquari-Antas fazem parte da rede telemétrica da CPRM e da UNIVATES, em sua grande maioria posicionadas juntamente com as estações automáticas de medição de precipitação. Entretanto, foram selecionadas somente aquelas estações com a existência de curva-chave (Tabela 2), uma vez que a telemetria fornece apenas a informação referente ao nível do rio no local. Além disso, são obtidos também dados de vazão horária defluente das 3 usinas hidrelétricas existentes no Rio das Antas (Tabela 3) - Castro Alves, Monte Claro e 14 de Julho, os quais são estimados pela CERAN a partir de equações locais de vertedor, descarregador de fundo e vazão turbinada nas UHEs.

Tabela 2. Estações telemétricas com transmissão automática de informação de níveis.

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude	Longitude	Período de dados
1	Encantado	CPRM	-29,2344	-51,8551	Nov/2013 - Atual
2	Muçum	CPRM	-29,1672	-51,8686	Out/2013 - Atual
3	Santa Lúcia	CPRM	-29,1194	-51,9122	Out/2013 - Atual

Tabela 3. Informações referentes à vazão defluente nas usinas hidrelétricas da CERAN.

Nº	UHE	Responsável	Latitude	Longitude	Período de dados
1	Castro Alves	CERAN	-29,2344	-51,8551	Abr/2014 - Atual
2	Monte Claro	CERAN	-29,0310	-51,5209	Abr/2014 - Atual
3	14 de Julho	CERAN	-29,1194	-51,9122	Abr/2014 - Atual

Entretanto, o período de dados com informações horárias atualmente disponível, da mesma forma que a grande maioria dos dados de precipitação, é bastante limitado. Por este motivo, cotas da dupla medição diária - 7:00 e 17:00 - de algumas estações fluviométricas na bacia (Tabela 4) foram obtidas a partir da CPRM para o período entre 2009 e 2013, buscando-se adequar à disponibilidade de dados pluviométricos horários do INMET. As medições duplas foram submetidas a um procedimento de interpolação linear de modo a estimar os níveis nos demais instantes, cujas vazões correspondentes foram determinadas através das equações de curvas-chave existentes para os postos nestes locais.

Tabela 4. Postos fluviométricos com dados de dupla medição de níveis (7:00 e 17:00).

Nº	Código	Nome do posto	Localização	Latitude	Longitude
1	86720000	Encantado	Rio Taquari	-29,2344	-51,8551
2	86510000	Muçum	Rio Taquari	-29,1672	-51,8686
3	86580000	Santa Lúcia	Rio Guaporé	-29,1194	-51,9122
4	86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio da Prata	-28,7391	-51,4250
5	86160000	Passo Tainhas	Rio Tainhas	-28,8640	-50,4232

Quanto às variáveis climáticas na bacia do Taquari-Antas, também necessárias para a aplicação do modelo, as mesmas foram obtidas a partir das Normais Climatológicas associadas a cada uma das estações representativa da bacia, conforme já identificado no relatório de caracterização hidrológica.

### *Unidades de Resposta Hidrológica*

Dada a escala de aplicação do modelo MGB-IPH para a qual foi concebido (grandes bacias, entendidas como aquelas com área superior a 10.000 km<sup>2</sup>) e a sua característica de modelo distribuído, a variabilidade espacial das características físicas da bacia precisa ser considerada. Nesse sentido, considera-se que o comportamento hidrológico dos URHs possa ser explicado por características físicas relacionadas aos solos (ex. capacidade de armazenamento d'água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e à cobertura vegetal (ex. índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo). Desta forma, as URHs são geralmente definidas através da superposição de dois mapas distintos de uma mesma região: 1) mapa de tipos de solo; 2) mapa de uso de solo e cobertura vegetal, conforme Figura 3.

O número de URHs depende da quantidade de classes de tipos e de usos de solo. No caso de existirem, por exemplo, quatro tipos de solos e cinco classes de vegetação e uso da terra, a sobreposição destes dois mapas levaria a um número potencial de  $4 \times 5 = 20$  URHs. Entretanto, algumas destas combinações simplesmente não ocorrem, seja por acaso ou porque certos tipos de vegetação ou uso da terra são incompatíveis com certos tipos de solos. De qualquer forma, a definição das URHs é subjetiva e deve ser criteriosa, pois quanto maior for o número de classes definidas maior será a dificuldade na

calibração do modelo e conseqüentemente o número de graus de liberdade associado aos parâmetros. Além disso, não necessariamente haverá grande benefício no uso de um maior número de URH em termos de melhoria da representação dos hidrogramas.

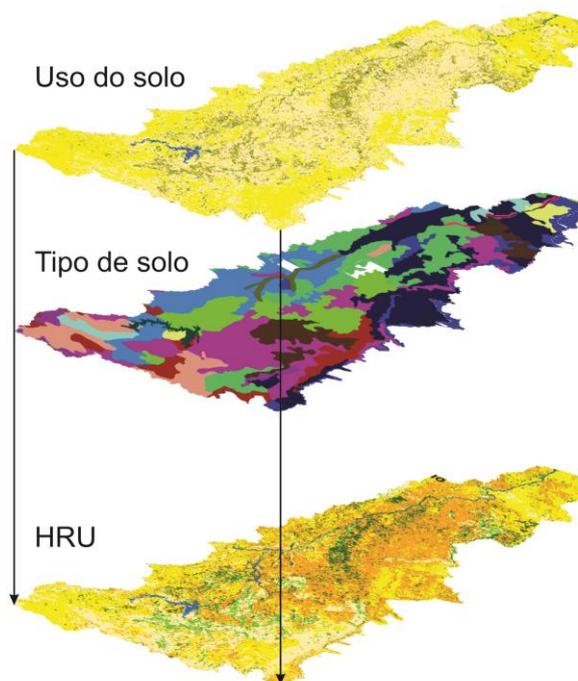


Figura 3. Representação esquemática do procedimento de combinação de mapas de uso e tipos de solo para elaboração de Unidades de Resposta Hidrológica - URH.

### Mapa do tipo de solo

O mapa de solos utilizado para a bacia do Rio Taquari-Antas foi obtido a partir da base de dados geográfica do Plano de Bacia Hidrográfica (DRH/SEMA, 2011). Este mapa teve como base os levantamentos exploratórios do projeto RADAMBrasil desenvolvido ao longo dos anos de 1970 e 1980, sendo posteriormente complementado por estudos mais detalhados produzidos pela Embrapa Solos e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Através da Figura 4, é possível identificar que a maior parte da bacia é formada por Argissolos e Neossolos - aproximadamente 50% da área, principalmente na região central. Já na região norte, o tipo de solo é distinto com predominância de Latossolo, enquanto que na área ao leste, região das nascentes do Rio das Antas, o Cambissolo caracteriza-se pelo tipo de solo mais usual..

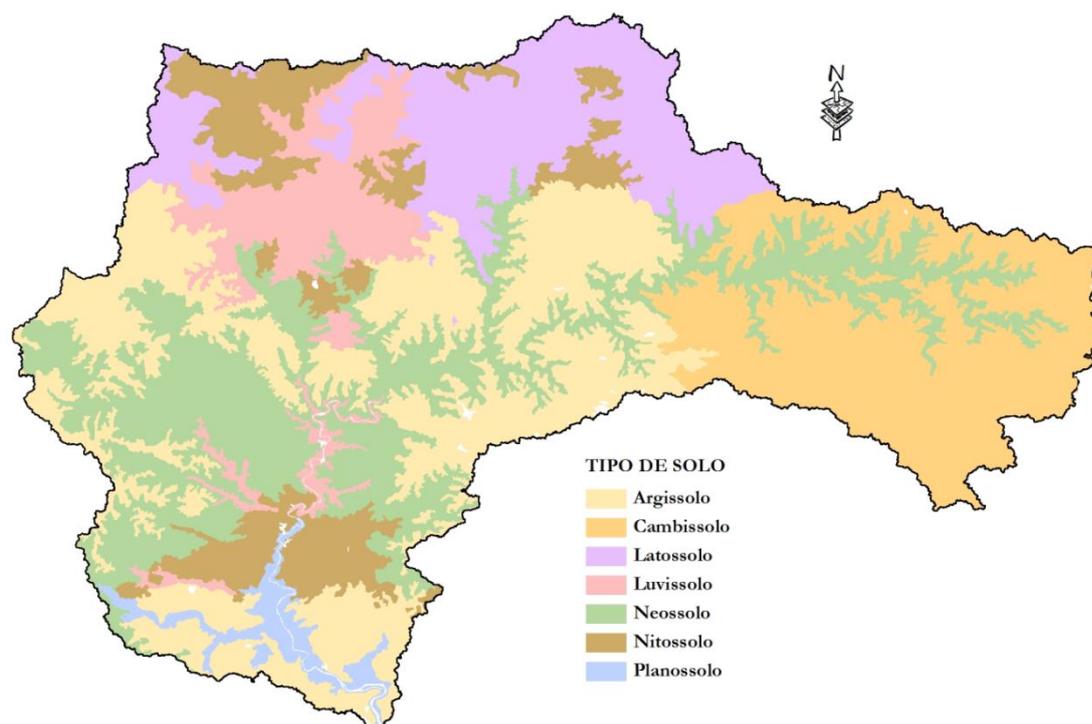


Figura 4. Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: IBGE/Embrapa Solos - DRH/SEMA (2011).

No entanto, as classificações tradicionais dos mapas de tipos de solos tem, geralmente, objetivos que vão muito além da questão hidrológica, sendo necessário reclassificá-los em um número menor de classes para aplicação no modelo MGB-IPH. A simplificação deve considerar o potencial de geração de escoamento superficial e de base, bem como seu potencial de armazenamento de água.

Nesse caso, o critério utilizado para a reclassificação foi a profundidade relacionada a cada um dos tipos de solo existentes, bem como suas subdivisões, cuja informação é proveniente do levantamento exploratório de solos RADAMBrasil e disponível na base de dados geográficos utilizada. Para solos com profundidade inferior a 150 cm foi atribuído a classificação de solos rasos, com alto potencial de geração de escoamento superficial; já para solos com profundidades acima de 150 cm, ou inferiores desde que com boa drenagem, a atribuição foi de médio potencial de geração de escoamento superficial, cujo resultado pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 5. Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas (RADAMBrasil).

<b>Tipo do solo reclassificado (quanto à produção de escoamento superficial)</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Tipos de solo que se enquadram na classificação de profundidade</b>
Alta produção de escoamento superficial (solos rasos)	< 50 cm	- Neossolo
	< 100 cm	- Argissolo Amarelo alítico
	< 150 cm - drenagem moderada	- Argissolo Vermelho alumínico
	< 150 cm - boa drenagem	- Luvisolo
Média produção de escoamento superficial (solos profundos)	> 150 cm	- Nitossolo Bruno alumínico - Nitossolo Vermelho eutroférico - Cambissolo - Argissolo Bruno-acinzentado
	> 200 cm	- Planossolo - Argissolo Vermelho-amarelo distrófico
	> 250 cm	- Latossolo - Nitossolo Vermelho Alumínico

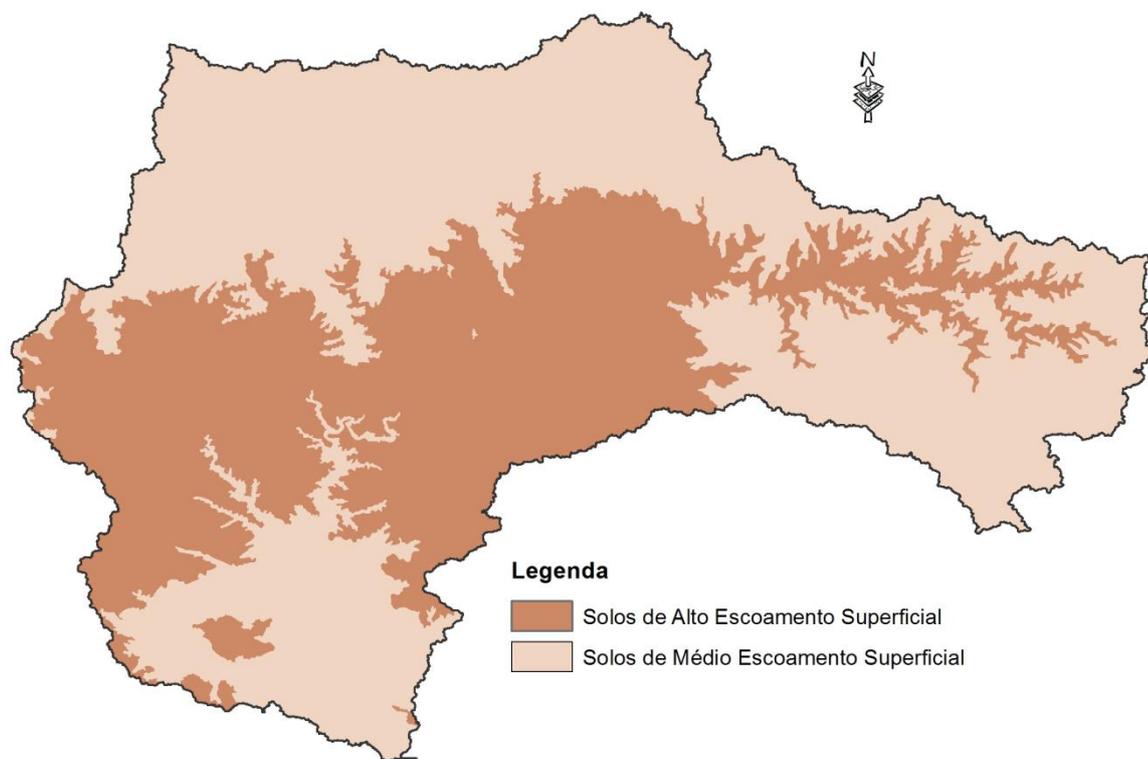


Figura 5. Mapa de solos reclassificado para a bacia do Taquari-Antas.

### Mapa do uso de solo

Da mesma forma que o tipo de solo, o mapa de uso do solo e cobertura vegetal foi obtido a partir do banco de dados disponível no Plano de Bacia. Conforme descrito por DRH/SEMA (2011), o desenvolvimento deste mapa envolveu a utilização de imagens de satélite CBERS – Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres - 2B com resolução espacial de 20 m, sendo as imagens obtidas no período compreendido entre janeiro de 2008 e fevereiro de 2009. O mapeamento resultou na atribuição de 11 classes de uso e cobertura vegetal (Tabela 6), conforme apresentado na Figura 6 a seguir.

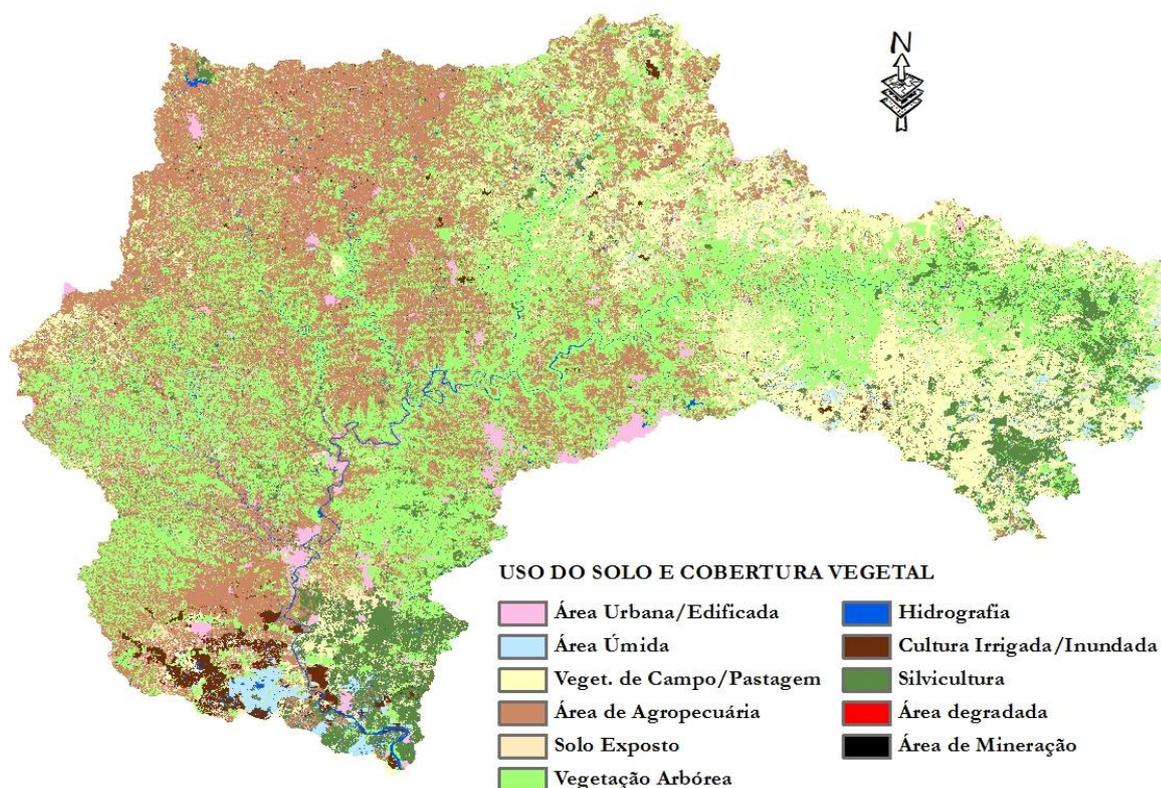


Figura 6. Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas. Fonte: DRH/SEMA

Tabela 6. Classes de uso e ocupação do solo/cobertura vegetal identificadas na bacia do Taquari-Antas.

ID	Classe de uso e cobertura vegetal	Percentual da área (%)
1	Área Urbana/Edificada	1,73
2	Área Úmida	2,92
3	Vegetação de campo/pastagem	16,49
4	Área de agropecuária	32,58
5	Solo exposto	2,93

ID	Classe de uso e cobertura vegetal	Percentual da área (%)
6	Vegetação arbórea	33,54
7	Hidrografia	1,18
8	Cultura Irrigada/Inundada	1,36
9	Silvicultura	7,21
10	Área degradada	0,03
11	Área de Mineração	0,03
<b>TOTAL</b>		<b>100,00</b>

Para a reclassificação, considerou-se que as classes "Vegetação de campo / pastagens" e "Solo exposto" possam ser representadas simplesmente por "campos". Áreas artificiais (e.g. áreas urbanas) são locais com capacidade elevada para geração de escoamento superficial, portanto foram classificadas como "Áreas Semi-Impermeáveis". Áreas de mineração e áreas degradadas foram incluídas nesta classificação, o que acaba causando pouco efeito em função do baixo percentual de área correspondente. Vegetação arbórea e silvicultura foram agrupadas na classe "Floresta", enquanto que áreas de Cultura Irrigada / Inundada e áreas úmidas foram classificadas como "Várzeas Inundáveis".

#### Definição final das URHs

Os dois mapas reclassificados de uso e tipo do solo apresentados foram sobrepostos para a criação de classes de Unidades de Resposta Hidrológica, compondo o conjunto final de parâmetros a serem calibrados no MGB-IPH. Entretanto, algumas das combinações geradas simplesmente não são diferenciáveis (ex: classe "água" em solo profundo ou raso, ou "água" com qualquer tipo de classe de cobertura vegetal, deve compor uma única classe "água", pois não há importância hidrológica na distinção entre os solos, nem entre os tipos de cobertura vegetal, das regiões cobertas por água), ou não ocorrem, seja por acaso ou porque certos tipos de vegetação ou uso da terra são incompatíveis com certos tipos de solos.

A partir dessas premissas, o procedimento de reclassificação resultou na obtenção de nove blocos distintos, sendo estes: 1) Agricultura em solos rasos; 2) Agricultura em solos profundos; 3) Campo em solos rasos; 4) Campo em

solos profundos; 5) Florestas em solos rasos; 6) Florestas em solos profundos; 7) Várzeas inundáveis; 8) Áreas Semi-Impermeáveis e; 9) Água. A representação espacial das URHs na bacia do rio Taquari-Antas, é apresentada na Figura 7.

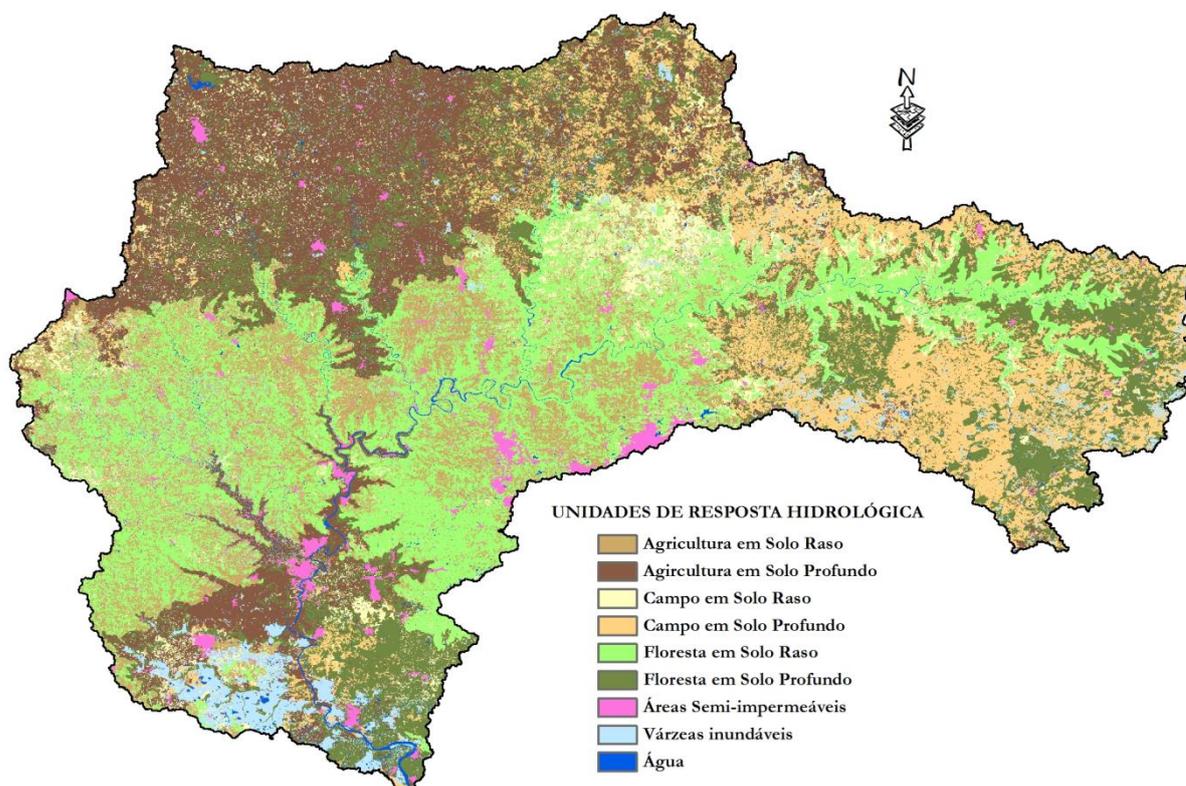


Figura 7. Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.

### ***Discretização do MGB-IPH***

#### ***Definição das minibacias***

A discretização da bacia em minibacias é efetuada a partir de uma divisão nos pontos de confluência entre dois trechos de rio ou em pontos de controle como reservatórios, tomadas d'água e estações de medições de vazão. A inserção de uma minibacia com exutório sobre o ponto de controle é particularmente importante, pois permite que os hidrogramas gerados pelo modelo sejam compatíveis em relação às informações do local para onde o mesmo esteja sendo simulado (ou controlado, no caso).

Para o procedimento de discretização utilizou-se o ArcHydro, um conjunto de ferramentas desenvolvido pela Universidade do Texas em parceria com a empresa ESRI, que opera internamente ao *software* ArcGIS (Maidment, 2002). Uma sequência típica de utilização das ferramentas ArcHydro inicia com o MDE, a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento, área de drenagem, rede de drenagem, definição de trechos de rios bem como de bacias hidrográficas. No caso específico da discretização da bacia, a delimitação de bacias é importante. O resultado final desta discretização foi a geração de 980 minibacias.

#### Definição das sub-bacias

Para a delimitação das sub-bacias foram consideradas as localizações dos postos fluviométricos com dados horários disponibilizados pela CPRM bem como a configuração dos principais afluentes, os quais podem ser considerados como pontos de interesse para monitoramento das previsões. Seguindo esta lógica, as minibacias foram agrupadas em um total de 14 sub-bacias. Esta divisão permite que a calibração do modelo seja realizada através de diversos conjuntos de parâmetros, específicos para cada sub-bacia, o que resulta em uma melhor representação do comportamento hidrológico em regiões intermediárias.



Figura 8. Mapa final com a discretização do modelo para a bacia do Taquari-Antas.

### ***Extração das características físicas da bacia***

A extração das características físicas e hidráulicas de cada minibacia necessárias para aplicação do modelo é realizada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando uma rotina computacional desenvolvida especialmente para o MGB-IPH (Buarque *et al.*, 2011). A rotina de extração automática analisa os dados de relevo da bacia fornecidos pelo MDE bem como outras informações provenientes de pre-processamento em SIG (ex: da bacia, das minibacias, da rede de drenagem, das sub-bacias e das URH geradas), sintetizando as informações das características fisiográficas de cada minibacia em uma tabela contendo:

1) Número das minibacias em ordem topológica, iniciando pelas minibacias de cabeceira até a minibacia exutório. Este número serve para

organizar a ordem em que são realizados os cálculos no modelo MGB-IPH (de montante para jusante);

2) Coordenadas do centróide das minibacias, utilizado no processo de interpolação de dados de chuva e de variáveis climáticas. Cada minibacia terá os valores de chuva e das variáveis climáticas determinados para o seu centróide, assumindo como representativo da sua área. Desta forma, quanto maior for o número de postos disponíveis maior deve ser a discretização do modelo (nº de minibacias);

3) Sub-bacia para a qual pertence a minibacia. As sub-bacias têm a função de permitir a formação de conjuntos distintos de parâmetros, os quais podem ser necessários à calibração do modelo hidrológico em diferentes regiões internas à bacia;

4) Área de drenagem, utilizada principalmente nos cálculos de vazão gerada em cada minibacia;

5) Área de drenagem total a montante de cada minibacia. Esta área é utilizada para calcular características de seção transversal necessárias à propagação de vazão nos rios, com base numa relação geomorfológica entre a área de drenagem e a largura do rio;

6) Comprimento e declividade do trecho de rio, pertencente à rede de drenagem, que atravessa a minibacia. Estas são informações utilizadas para calcular a propagação de vazão nos rios;

7) Comprimento e declividade do afluente mais longo dentro de uma minibacia. Estes parâmetros são utilizados no cálculo do tempo de concentração de cada minibacia;

8) Número da minibacia localizada imediatamente a jusante. Esta informação permite a propagação da vazão de uma minibacia para a próxima;

9) Ordem do curso d'água da minibacia. Esta informação é útil para organizar a ordem em que são realizados os cálculos no modelo (de montante para jusante);

10) Percentual da área da minibacia correspondente à parcela de cada uma das Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Estes percentuais indicam a fração da área da minibacia que terá um determinado comportamento hidrológico, dado com base nas características físicas identificadas na região considerada.

### *Calibração e verificação do MGB-IPH na bacia do Taquari-Antas*

A calibração do modelo hidrológico consiste em encontrar o valor dos parâmetros que resultem em uma boa concordância entre dados observados e calculados. Esse ajuste pode ser feito manualmente ou através de um algoritmo de otimização automática, porém nesse caso o ajuste manual foi adotado exclusivamente devido às simplificações utilizadas para adequar os dados para intervalo de tempo horário.

Alguns dos parâmetros de pouca sensibilidade são fixos e estão definidos implicitamente no modelo, como é o caso do coeficiente de rugosidade de Manning e parte dos parâmetros relacionados ao movimento de água no solo. Outros parâmetros - os chamados fixos - são definidos à priori, enquanto que os parâmetros calibráveis estão associados às propriedades físicas das URHs e devem ser ajustados, uma vez que o modelo é mais sensível aos mesmos. As Tabela 7 e Tabela 8 sumarizam os parâmetros utilizados pelo MGB-IPH.

**Tabela 7: Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).**

<b>Parâmetro Fixo</b>	<b>Descrição</b>
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ( $m^2.m^{-2}$ ) e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.

Altura do Dossel

A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

Tabela 8: Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo ( $W_m$ )	Capacidade de armazenamento de água no solo. Valores baixos implicam em maiores vazões escoadas devido à saturação mais rápida do solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação ( $b$ )	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de $W_m$ .
Vazão durante a estiagem ( $K_{bas}$ )	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que esco subsuperficialmente ( $K_{int}$ )	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que esco subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária ( $XL$ )	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial ( $CAP$ )	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual ( $W_c$ )	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial ( $CS$ )	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas mini bacias.
Calibração da propagação sub-superficial ( $CI$ )	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas mini bacias.
Retardo do reservatório subterrâneo ( $CB$ )	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.

A calibração foi realizada considerando o ajuste visual dos hidrogramas observado e simulado em diferentes locais, bem como valores quantitativos de

diferentes estatísticas normalmente utilizadas na calibração de modelos hidrológicos, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS); o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões ( $NS_{Log}$ ) e o erro médio de volume.

Em relação aos coeficientes de Nash-Sutcliffe, valores que correspondem à unidade indicam a perfeita concordância entre dados simulados e observados, enquanto que valores negativos indicam que a média dos dados observados é um melhor preditor do que os resultados do modelo. Enquanto que o índice NS dá um maior peso para as maiores cheias, o  $NS_{Log}$  possibilita a avaliação das vazões baixas e pequenos picos. Já o erro de volume permite a avaliação de outros fatores, como perdas por evapotranspiração, por exemplo.

O período de calibração do MGB-IPH ocorreu entre junho/2009 a dezembro/2011, sendo o período seguinte (2012-2013) adotado para a verificação do modelo. De uma maneira geral, as medidas estatísticas tiveram um bom resultado na bacia do Taquari-Antas durante a calibração, conforme pode ser verificado na Tabela 9. Apesar do erro de volume ser significativo, os coeficientes de Nash-Sutcliffe podem ser considerado bons para o período, sendo em sua maioria superiores a 0,8.

Tabela 9. Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração.

<b>Código</b>	<b>Nome da Estação</b>	<b>Nash-Sutcliffe</b>	<b>Log Nash-Sutcliffe</b>	<b><math>\Delta V</math></b>
86160000	Passo Tainhas	0,685	0,797	-15.8%
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	0,817	0,880	-20.6%
86580000	Santa Lúcia	0,834	0,910	-13.9%
86510000	Muçum	0,869	0,843	-13.9%
86720000	Encantado	0,923	0,890	-9.2%

A Figura 9 mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Tainhas no posto fluviométrico de Passo Tainhas, próximo às cabeceiras do Rio das Antas, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 1.120 km<sup>2</sup>. A concordância dos hidrogramas para este posto foi razoável no período de calibração, o que pode estar associada a fatores como pequena área de drenagem em relação à concepção do modelo hidrológico e baixa cobertura de postos pluviométricos a montante do local.

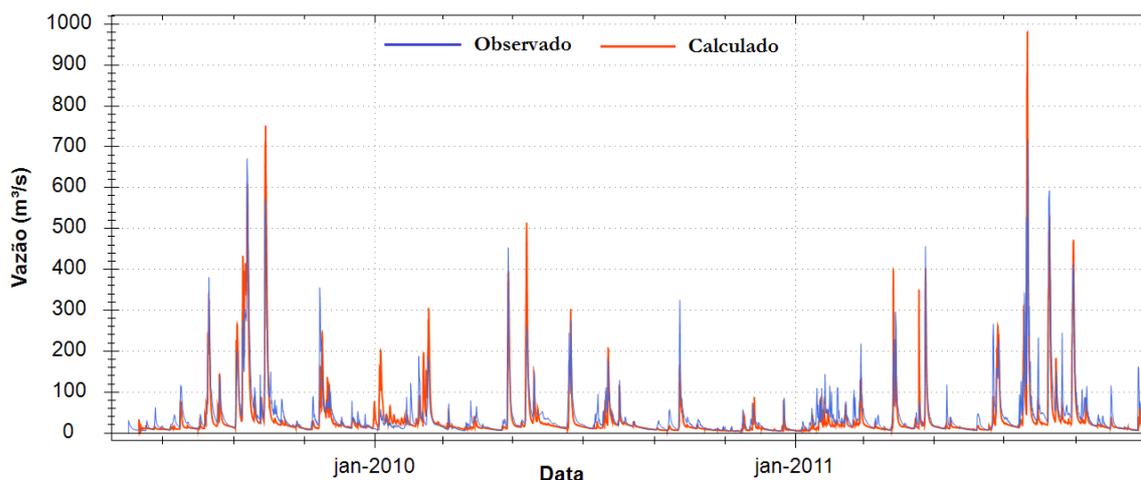


Figura 9 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011.

A Figura 10 mostra os hidrogramas no posto fluviométrico de Barra do Guaiaveira, situado no rio Turvo - afluente do rio da Prata, cuja área de drenagem é de 2.820 km<sup>2</sup>. Neste caso, os resultados podem ser considerados bons apesar do erro de volume ter sido o de maior magnitude entre os demais postos analisados.

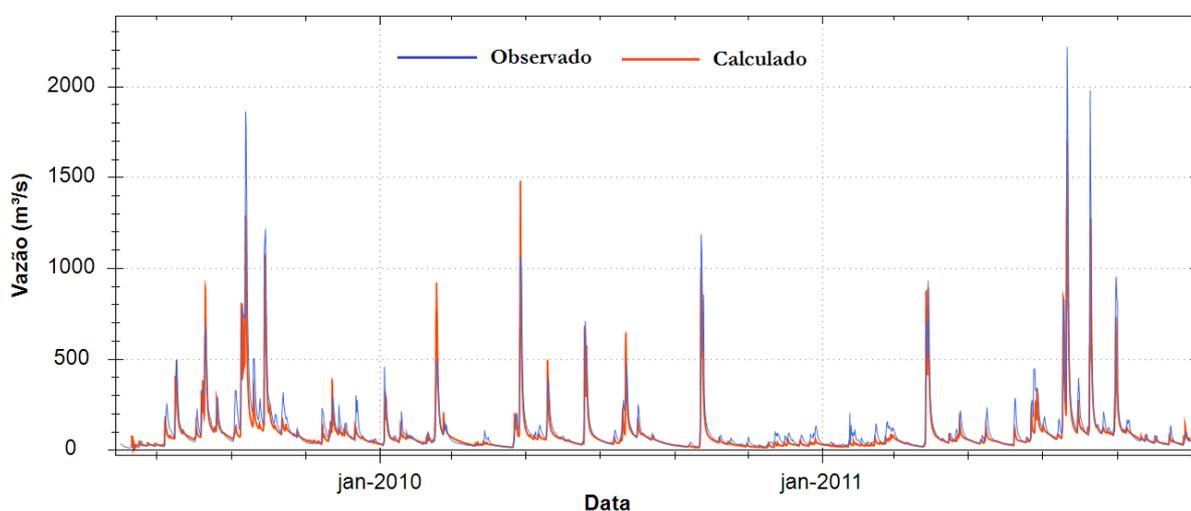


Figura 10. Resultado final da calibração horária para o posto de Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio Turvo, período de junho/2009 a dezembro/2011.

A Figura 11 mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Guaporé no posto fluviométrico de Santa Lúcia, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 2.470 km<sup>2</sup>. Observa-se que as vazões mais baixas são geralmente intensificadas pelo modelo, enquanto que as vazões mais altas são

em sua maioria subestimadas. Isso pode estar relacionado a uma dificuldade no método de propagação do modelo durante as maiores cheias bem como uma possível incoerência da curva-chave para estas situações, uma vez que a mesma é obtida por extrapolação nesta faixa de vazão.

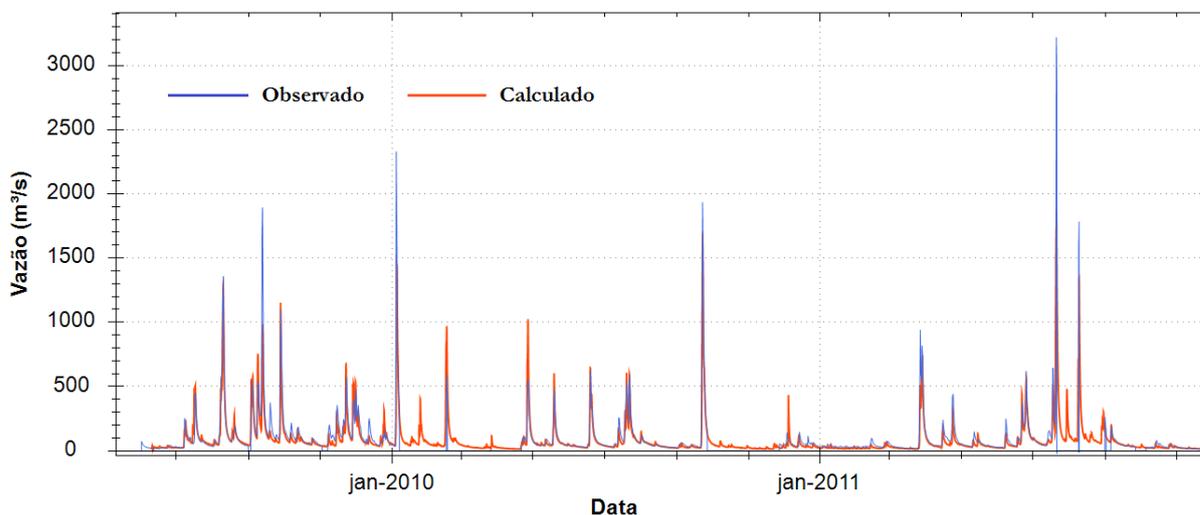


Figura 11. Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.

As Figura 12 e Figura 13 apresentam os hidrogramas observado e calculado do rio Taquari nos postos fluviométricos de Muçum e Encantado. A área de drenagem destes postos fluviométricos são de, respectivamente, 16.000 e 19.100 km<sup>2</sup>, cujos valores correspondem por cerca de 60 e 70% da área de drenagem total da bacia. Observa-se que as observações e o resultado da simulação possuem uma boa concordância, tanto nos períodos de vazões mais altas como nos períodos de pouca chuva.

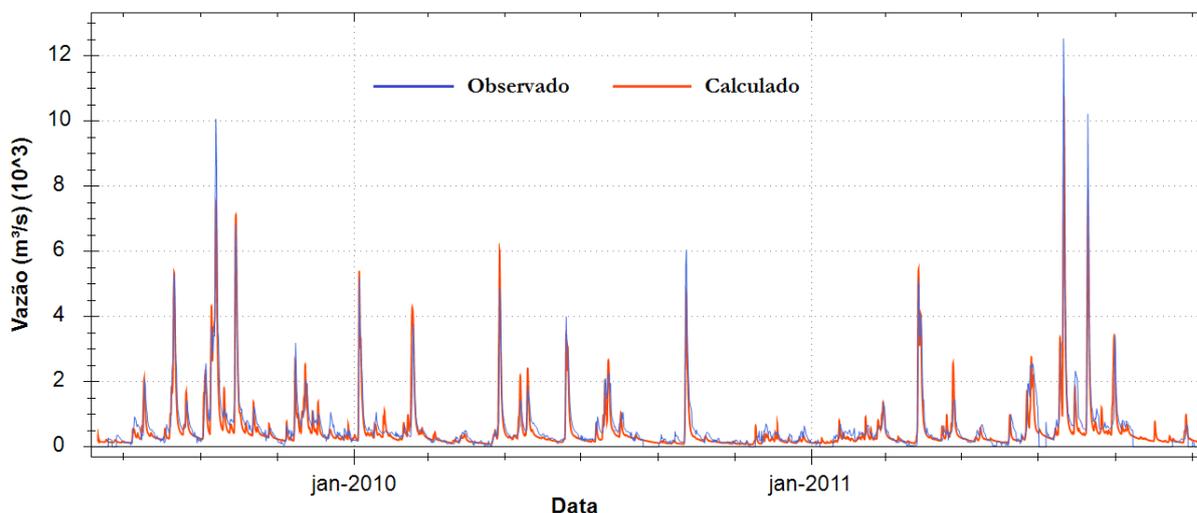


Figura 12. Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.

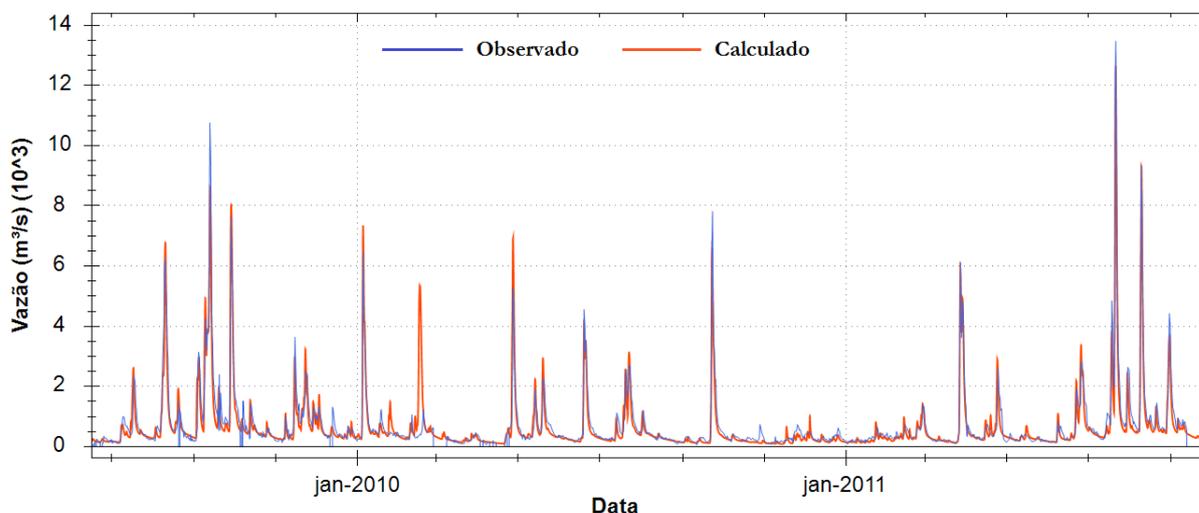


Figura 13. Resultado final da calibração horária para o posto de Encantado (86720000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.

Quanto ao período adotado para a verificação do modelo, entre Janeiro / 2012 e Dezembro / 2013, as medidas estatísticas foram de uma maneira geral melhores em relação ao erro de volume, porém um pouco piores em relação aos índices NS e NS<sub>Log</sub>, conforme pode ser verificado na Tabela 10.

Tabela 10. Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação.

<b>Código</b>	<b>Nome da Estação</b>	<b>Nash-Sutcliffe</b>	<b>Log Nash-Sutcliffe</b>	<b>ΔV</b>
86160000	Passo Tainhas	0,818	0,841	-4,6%
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	0,817	0,855	-10,0%
86580000	Santa Lúcia	0,873	0,752	-6,7%
86510000	Muçum	0,700	0,740	-1,5%
86720000	Encantado	0,854	0,793	-2,1%