

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES

PRODUTO 3.2. RELATÓRIO COM AVALIAÇÃO DO IMPACTO ESPERADO DE  
EVENTUAIS INTERVENÇÕES

**RF**  
RELATÓRIO FINAL

Porto Alegre  
Fevereiro/2017

## SUMÁRIO

PRODUTO 3.2. PRELATÓRIO COM AVALIAÇÃO DO IMPACTO ESPERADO DE EVENTUAIS INTERVENÇÕES .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. METODOLOGIA .....	3
2.1. Simulação hidrológica.....	3
2.2. Características dos reservatórios simulados.....	4
2.3. Cenários simulados .....	5
2.4. Metodologia para localização dos 99 reservatórios .....	6
2.4.1. Definição do volume útil e altura das barragens .....	8
2.4.2. Estruturas hidráulicas dos reservatórios simulados .....	10
2.5. Comparação de cenários .....	10
3. RESULTADOS.....	10
3.1.Resultados do Cenário 2 - Implementação apenas do reservatório de Antas-Prata .....	10
3.2.Resultados do Cenário 3 – Implementação dos oito reservatórios .....	12
3.3.Resultados do Cenário 4 – Implementação de 99 reservatórios .....	14
3.3.1. Hidrogramas simulados.....	15
3.3.2. Eficiência dos reservatórios .....	17
3.3.3. Avaliação do tempo de residência .....	18
3.4.Análises conjunta dos cenários 1, 2 e 3 .....	20
3.5.Avaliação de eventos sintéticos extremos .....	22
3.6.Comparação entre cenário com 99 reservatórios e demais cenários estudados no contexto do Projeto Taquari-Antas.....	24
3.7.Considerações finais sobre o Cenário .....	4
.....	26

3.8.Modelo	hidrológico	MGB-IPH
.....		27
3.8.1. Descrição do modelo hidrológico MGB-IPH .....		27
3.8.2. Definição final das URHs .....		38
3.8.3. Discretização do MGB-IPH .....		39
3.8.4. Definição das minibacias .....		39
3.8.5. Definição das sub-bacias.....		40
3.8.6. Extração das características físicas da bacia .....		40
3.8.4. Calibração e verificação do MGB-IPH na bacia do Taquari-Antas.....		41
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		46
REFERÊNCIAS.....		47
5. RESERVATÓRIOS PASSÍVEIS DE IMPLEMENTAÇÃO NA BACIA .....		49
6. METODOLOGIA .....		49
6.1. Localização dos reservatórios e mapeamento das restrições existentes .....		49
6.2. Simulação hidrológica.....		55
6.3. Características dos reservatórios simulados.....		57
6.4. Cenários simulados .....		59
7. RESULTADOS.....		59
7.1. Avaliação de eventos extremos.....		60
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		62
REFERÊNCIAS.....		63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reservatórios propostos no estudo de 1970 .....	2
Figura 2 - Etapas da definição da localização dos 99 reservatórios. (a) Rede de drenagem. (b) Delineamento das minibacias. (c) Alocação de um reservatório para cada exutório de minibacia. (d) Ajuste final e localização dos 99 reservatórios.....	7
Figura 3 – Localização e identificação dos 99 reservatórios. ....	7
Figura 4 - Volume útil total dos 99 reservatórios em Encantado, considerando a mesma altura para todas as barragens.....	9
Figura 5 - Volume útil dos 99 reservatórios, organizados de forma crescente. ....	9
Figura 6 - Localização do reservatório de Antas-Prata, cuja área de drenagem equivale a cerca de 47% da área da bacia do Taquari-Antas. ....	11
Figura 7- Hidrogramas em Encantado, com e sem a barragem de Antas-Prata, durante o evento de 21/07/2011. ....	12
Figura 8 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem Antas-Prata durante o evento de 21/07/2011. ....	12
Figura 9- Localização dos oito empreendimentos propostos para controle de cheias. ....	13
Figura 10- Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, durante o evento de 21/07/2011. ....	13
Figura 11 - Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, para o ano de 2014.....	14
Figura 12 - Hidrogramas em Encantado, com e sem as 99 barragens, durante o ano de 2011.....	16
Figura 13 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem número 1 durante o ano de 2011.....	16
Figura 14 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem número 96 durante o ano de 2011.....	17
Figura 15 - Avaliação da eficiência de redução de pico média dos 99 reservatórios. ....	18
Figura 16 - Tempo de residência para cada reservatório. ....	19
Figura 17 - Relação entre redução do pico e tempo de residência para cada um dos 99 reservatórios. .	19
Figura 18 - Simulação com e sem reservatórios para o evento de 21/07/2011 em Encantado com precipitação multiplicada por um fator de 1,2. ....	23
Figura 19 - Simulação com e sem reservatórios para o evento de 21/07/2011 em Encantado com precipitação multiplicada por um fator de 1,4. ....	23

Figura 20 - Comparação entre os cenários sem reservatórios, com as 99 barragens, com os propostos em 1972 e com os passíveis de implementação hoje .....	25
Figura 21 - Representação do processo de geração de escoamento na minibacia, considerando a existência de dois blocos distintos. ....	28
Figura 22 - Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados no modelo MGB-IPH. ....	31
Figura 23 - Representação esquemática do procedimento de combinação de mapas de uso e tipos de solo para elaboração de Unidades de Resposta Hidrológica - URH .....	33
Figura 24 - Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas.....	35
Figura 25 - Mapa de solos reclassificado para a bacia do Taquari-Antas.....	36
Figura 26 - Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas. ....	36
Figura 27 - Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.....	38
Figura 28 - Mapa final com a discretização do modelo para a bacia do Taquari-Antas.....	40
Figura 29 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011. ....	44
Figura 30 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio Turvo, período de junho/2009 a dezembro/2011. ....	44
Figura 31 - Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.....	45
Figura 32 - Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.....	45
Figura 33 - Resultado final da calibração horária para o posto de Encantado (86720000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.....	46
Figura 34 - Mapa das estradas da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios. ....	51
Figura 35 - Mapa das unidades de conservação da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios.....	51
Figura 36 - Mapa das áreas urbanas da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios.....	52
Figura 37 - Mapa dos aproveitamentos hidrelétricos já existentes na bacia Taquari-Antas e que foram considerados como restrições à implementação de reservatórios.....	52

Figura 38 - Localização do Rio Guaporé na bacia Taquari-Antas considerado como restrições à implementação de reservatórios devido a preservação do seu canal natural. ....	53
Figura 39 - Mapa contendo todas as restrições adotadas na localização dos reservatórios. ....	53
Figura 40 - Localização dos reservatórios passíveis de implementação na bacia Taquari-Antas para uso no controle de cheias. ....	54
Figura 41 - Detalhes dos reservatórios de Alto Antas, Lajeado Grande, Tainhas e Baixo Prata, com as restrições analisadas de barragens existentes, rodovias, unidades de conservação e manchas urbanas. ....	55
Figura 42 - Estratégia para definição do volume útil. ....	57
Figura 43 - Hidrograma simulado para Encantado para o período da cheia de 21/07/2011. ....	59
Figura 44 - Hidrograma simulado em Encantado para evento extremo com multiplicador 1.2. ....	61
Figura 45 - Hidrograma simulado em Encantado para evento extremo com multiplicador 1.4. ....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Reservatórios propostos no estudo de 1970 e respectivos usos; oito empreendimentos atuariam no controle de cheias.....	2
Tabela 2 - Características das barragens simuladas na avaliação das propostas do PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DA REGIÃO TAQUARI-ANTAS DE 1972.....	5
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).....	21
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. ....	21
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). ....	21
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%. ....	21
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.....	22
Tabela 8 - Estimativa das vazões extremas em Encantado, de acordo com o relatório de diagnóstico hidrológico da bacia do Projeto Taquari-Antas .....	23
Tabela 9 - Resumo do volume útil total e área inundada total até Encantado para os quatro cenários de implementação de reservatórios para controle de cheia estudados neste Projeto .....	24
Tabela 10 - Estações telemétricas com envio de dados de precipitação em tempo real, na bacia do rio Taquari-Antas.....	29
Tabela 11 – Código e localização das estações escolhidas.....	30
Tabela 12 - Estações telemétricas com transmissão automática de informação de níveis. ....	32
Tabela 13 - Informações referentes à vazão defluente nas usinas hidrelétricas da CERAN. ....	32
Tabela 14 - Postos fluviométricos com dados de dupla medição de níveis (7:00 e 17:00). ....	33

Tabela 15 - Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas. ....	35
Tabela 16 - Classes de uso e ocupação do solo/cobertura vegetal identificadas na bacia do Taquari-Antas. .....	37
Tabela 17 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.....	42
Tabela 18 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011). ....	42
Tabela 19 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração. .....	43
Tabela 20 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação. .....	46
Tabela 21 - Características das barragens simuladas. ....	58
Tabela 22 - Vazões das cheias nos locais selecionados, para as situações com e sem presença de reservatórios de controle, .....	59
Tabela 23 - Resultados das simulações com e sem reservatórios em Encantado, em termos de vazão e nível, para os principais eventos do período. ....	60
Tabela 24 - Estimativa das vazões extremas em Encantado, de acordo com o relatório de diagnóstico hidrológico da bacia do Projeto Taquari-Antas. ....	61

## PRODUTO 3.2. PRELATÓRIO COM AVALIAÇÃO DO IMPACTO ESPERADO DE EVENTUAIS INTERVENÇÕES

### 1. INTRODUÇÃO

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 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Tabela 1).

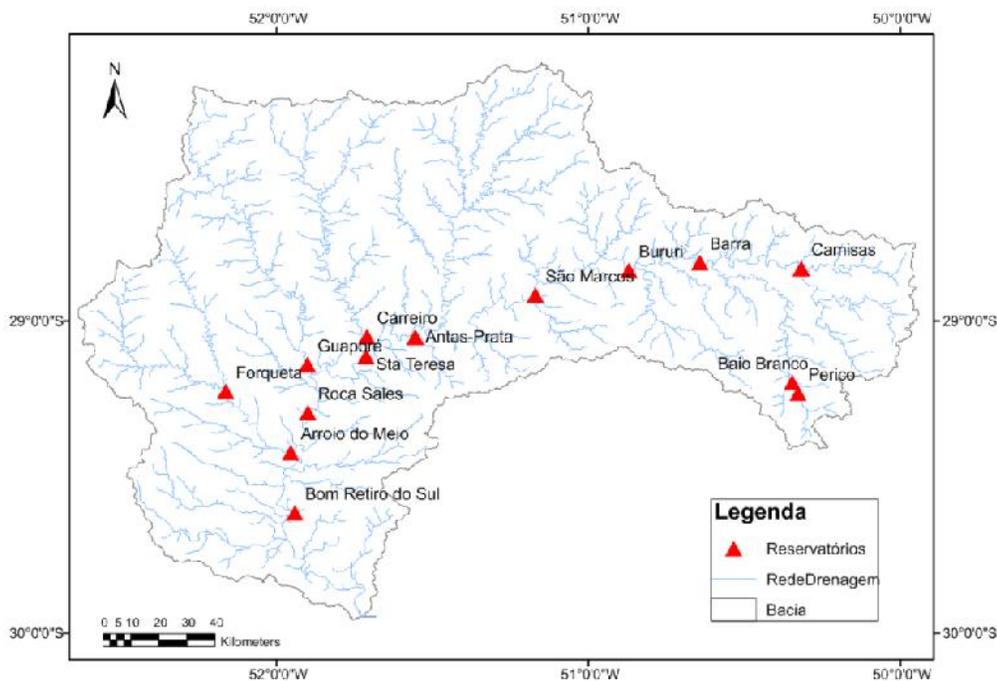
De maneira geral os projetos propostos no final da década de 1960 não foram realizados, com exceção da barragem de Bom Retiro do Sul, que foi construída para permitir a navegação no rio Taquari até o Porto de Estrela. Os demais projetos de barragens não foram realizados, possivelmente em função de novas 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 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 atuam 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

Simulação	Nome	Uso proposto
não	Bom Retiro do Sul	Navegabilidade

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. 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 afluyente 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,  $t$  é o intervalo de tempo,  $Q$  é a vazão defluente e  $I$  a vazão afluyente 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 ( $t=0 \text{ h}$ ), considera-se que  $I_t = I_{t+1}$  e  $Q_t = I_{t+1}$ , sendo  $I_{t+1}$  a vazão afluyente no tempo  $t=1 \text{ h}$ . 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 afluente 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.

## **2.2. 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
Cota fundo (m)	115	79	52	85	274	386	514	656
Cota crista (m)	260	215	100	150	360	510	650	750
Altura da barragem (m)	145	136	48	65	86	124	136	94
Volume útil (hm <sup>3</sup> )	1919	852	99	117	241	288	1605	229
Q TR=2 anos	4899	977	979	1088	2719	2108	1425	556
Cota do descarregador de fundo (m)	193	147,5	76,5	118	317,5	448,5	582,5	703,5
Área do descarregador de fundo (m <sup>2</sup> )	225	45	76	72	157	101	65	31
Coefficiente do descarregador de fundo	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Q TR=100 anos	14298	2851	2858	3178	7935	6154	4160	1625
Cota vertedor (m)	242	197	80	132	337	495	625	732
Comprimento vertedor (m)	74	15	13	16	30	40	14	8
Coefficiente do vertedor livre	2	2	2	2	2	2	2	2

### 2.3. 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.

- **Cenário 4:** Implementação de 99 reservatórios para controle de cheia na bacia Taquari-Antas

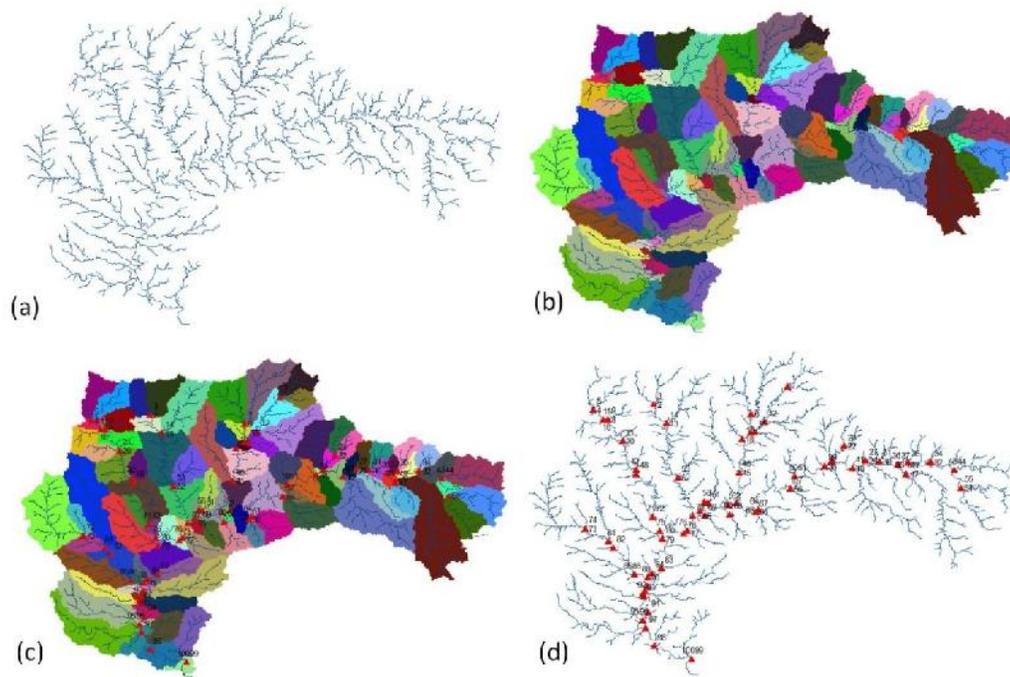
#### 2.4. Metodologia para localização dos 99 reservatórios

Um importante aspecto neste estudo é a definição da localização dos 99 reservatórios. Como mencionado, no modelo MGB-IPH a bacia é discretizada em minibacias. No modelo utilizado para a bacia Taquari-Antas a discretização resultou em um total de 980 minibacias, com 980 trechos de rede de drenagem (Figura 2.a). A alocação dos reservatórios visou distribuir uniformemente ao longo da bacia de cerca de 100 reservatórios. Assim, adotou-se a metodologia desenvolvida envolveu as seguintes etapas:

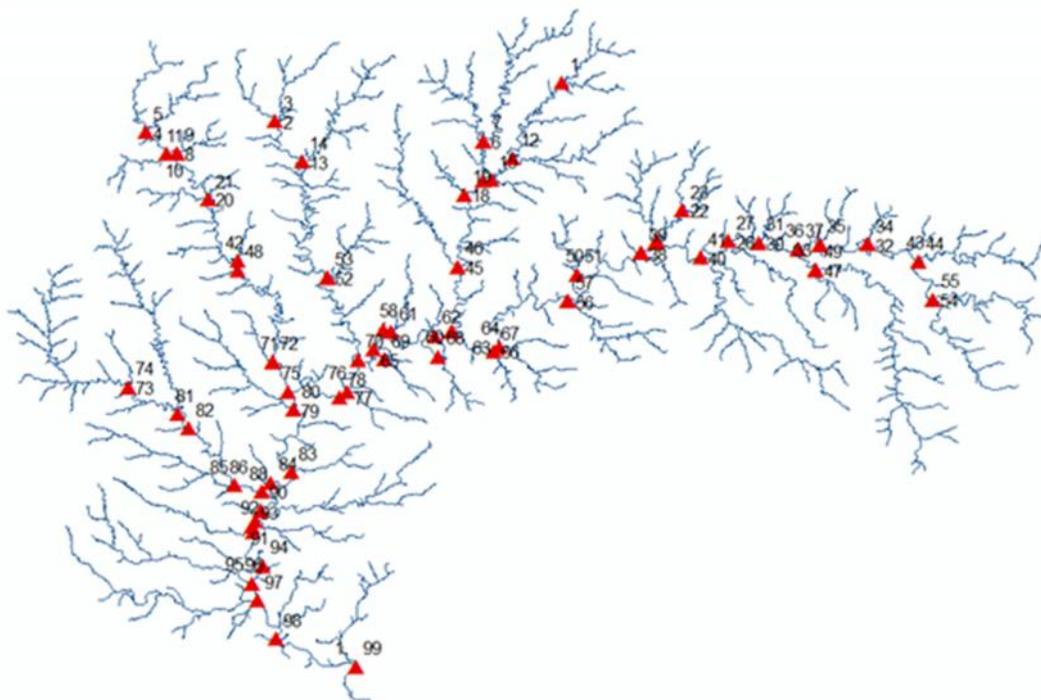
- Rediscretização da bacia em um número de cerca de 100 minibacias. O resultado está apresentado na Figura 2.b, com um total de 104 minibacias delineadas;
- Alocação de um reservatório para cada exutório de cada uma das 104 minibacias (Figura 2.c);
- Como na simulação do MGB-IPH a bacia é discretizada em 980 minibacias, realizou-se a transposição de cada um dos 104 reservatórios para o exutório de uma das 980 minibacias que estivesse mais próxima;
- Ajuste final com remoção de 5 minibacias devido a critérios como localização na mesma minibacia e nenhuma barragem em minibacias de cabeceira, resultando num total de 99 reservatórios (Figura 2.d).

Desta forma, obteve-se um total de 99 reservatórios localizados de forma uniformemente distribuída ao longo da bacia. A localização e identificação destes estão apresentadas na Figura 3.

**Figura 2 - Etapas da definição da localização dos 99 reservatórios. (a) Rede de drenagem. (b) Delineamento das minibacias. (c) Alocação de um reservatório para cada exutório de minibacia. (d) Ajuste final e localização dos 99 reservatórios.**



**Figura 3 – Localização e identificação dos 99 reservatórios.**



#### 2.4.1. Definição do volume útil e altura das barragens

Após a definição da localização das barragens, é necessário estabelecer o volume útil de cada reservatório. Esta etapa é fundamental para a obtenção de resultados coerentes, visto que para o controle de cheias o principal requisito de um reservatório é a existência de uma capacidade de armazenamento grande o suficiente para cumprir seu papel. Assim, a estratégia adotada neste trabalho foi a escolha de uma mesma altura para todas as barragens, procurando um cenário em que a soma de todos os volumes úteis das barragens totalize um valor próximo à soma dos volumes úteis dos reservatórios de estudos anteriores (isto é, das barragens propostas em 1972 e dos passíveis de implementação hoje). Isto garantiria a existência de um volume útil total semelhante ao longo da bacia para os diversos estudos realizados, mas com uma alocação diferente da localização destes volumes entre os diversos cenários. Além disso, a adoção de uma mesma altura para todas as 99 barragens leva a uma utilização ineficiente dos volumes úteis, visto que reservatórios em trechos mais a jusante (por exemplo, no canal principal do rio Taquari) necessitam de maior capacidade de armazenamento para atenuar cheias do que aqueles localizados em regiões de cabeceiras. Assim, a implementação dos 99 reservatórios reflete um limite inferior para a capacidade de um sistema com grande número de barragens, sendo interessante em estudos futuros abordar uma alocação mais eficiente destes volumes.

Para obter o volume útil total dos 99 reservatórios, considerando a mesma altura para todas as barragens, inicialmente se obteve as curvas cota-volume de cada unidade. Estas foram geradas através da ferramenta "Stage-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.

A partir da curva cota-volume de cada reservatório, procedeu-se ao cálculo do volume útil total para todas as barragens até a localização de Encantado, que sofre bastante com inundações, para cada altura de barragem. Além disso, considerou-se que todos os reservatórios teriam um orifício de fundo em uma altura de 15 m da barragem, sendo que o volume útil seria computado para cada metro de altura adicional a partir destes 15 m. Assim, a Figura 4 apresenta o volume útil total até Encantado com a altura das barragens variando entre 15 e 50 m. Nota-se que o volume útil total seria nulo caso todas as barragens tivessem uma altura de 15 m (devido ao critério adotado de orifício de fundo nesta altura), cerca de 4.000 hm<sup>3</sup> caso todas tivessem 32 m, e mais de 12.000 hm<sup>3</sup> caso tivessem 50 m.

A partir deste gráfico, adotou-se a altura de 30 m para todas as barragens, resultando em um volume útil total até Encantado de 3.118 hm<sup>3</sup>. Comparando com demais estudos deste projeto, as barragens propostas em 1972 totalizavam 6.317 hm<sup>3</sup>, e os 10 reservatórios propostos poderiam armazenar um volume útil total de 972 hm<sup>3</sup> até Encantado. Assim, os 99 reservatórios simulados estão em uma situação intermediária entre os dois outros cenários. Por fim, a área inundada até Encantando seria de 12.407 ha, em comparação com 17.914 ha para as barragens de 1972 e 4.709 ha para as 10 possíveis hoje.

A Figura 5 apresenta o volume útil de cada um dos 99 reservatórios, ordenado em ordem crescente e considerando a altura adota de 30 m para todos. Assim, nota-se que das 99 barragens, 80 possuem volume útil igual ou inferior a 100 hm<sup>3</sup>, com poucos reservatórios apresentando valores mais elevados, os quais correspondem àqueles localizados nas partes mais baixas e planas da bacia.

Assim, adotou-se uma altura de 30 m para todas as 99 barragens.

**Figura 4 - Volume útil total dos 99 reservatórios em Encantado, considerando a mesma altura para todas as barragens.**

### Volume útil total em Encantado

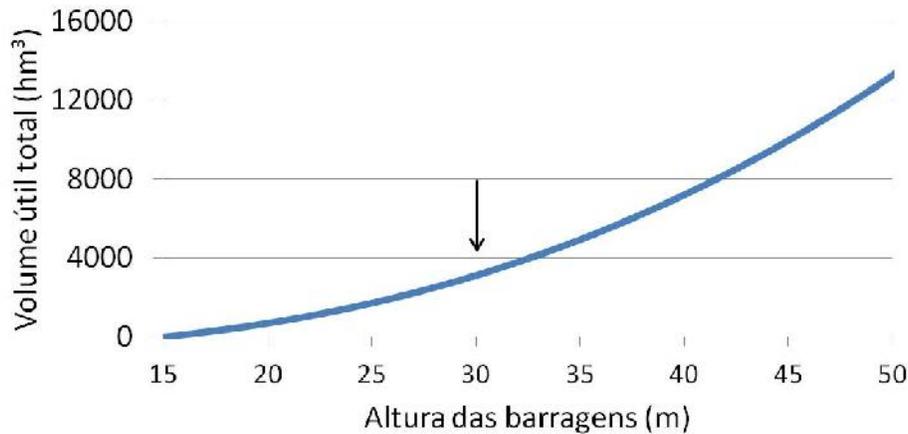
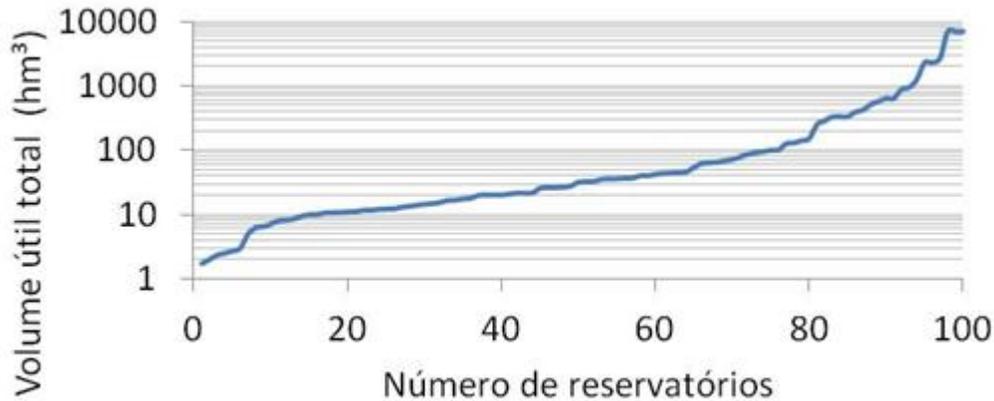


Figura 5 - Volume útil dos 99 reservatórios, organizados de forma crescente.



#### 2.4.2. Estruturas hidráulicas dos reservatórios simulados

Quanto às características estruturais, 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 (15 m), dimensionado para uma  $Q_{TR}=2$  anos;
- Vertedores livres variando dimensionados para uma  $Q_{TR}=100$  anos e localizados na altura 30 m de cada barragem

Foram adotadas as vazões de tempo de retorno de 2 e 100 anos calculadas neste projeto e apresentadas no relatório de caracterização da bacia.

## 2.5. Comparação de cenários

Foram comparados os cenários com e sem barragens. O cenário sem barragens equivale ao cenário atual da bacia, dado que os reservatórios existentes operam a fio d'água e não têm capacidade de amortecimento de cheias.

Além disso, os resultados foram comparados com os demais cenários apresentados em relatórios anteriores deste projeto- (i) empreendimentos propostos em 1970 e (ii) reservatórios possíveis hoje – a fim de elucidar os diferentes efeitos gerados na dinâmica de cheias da bacia.

## 3. RESULTADOS

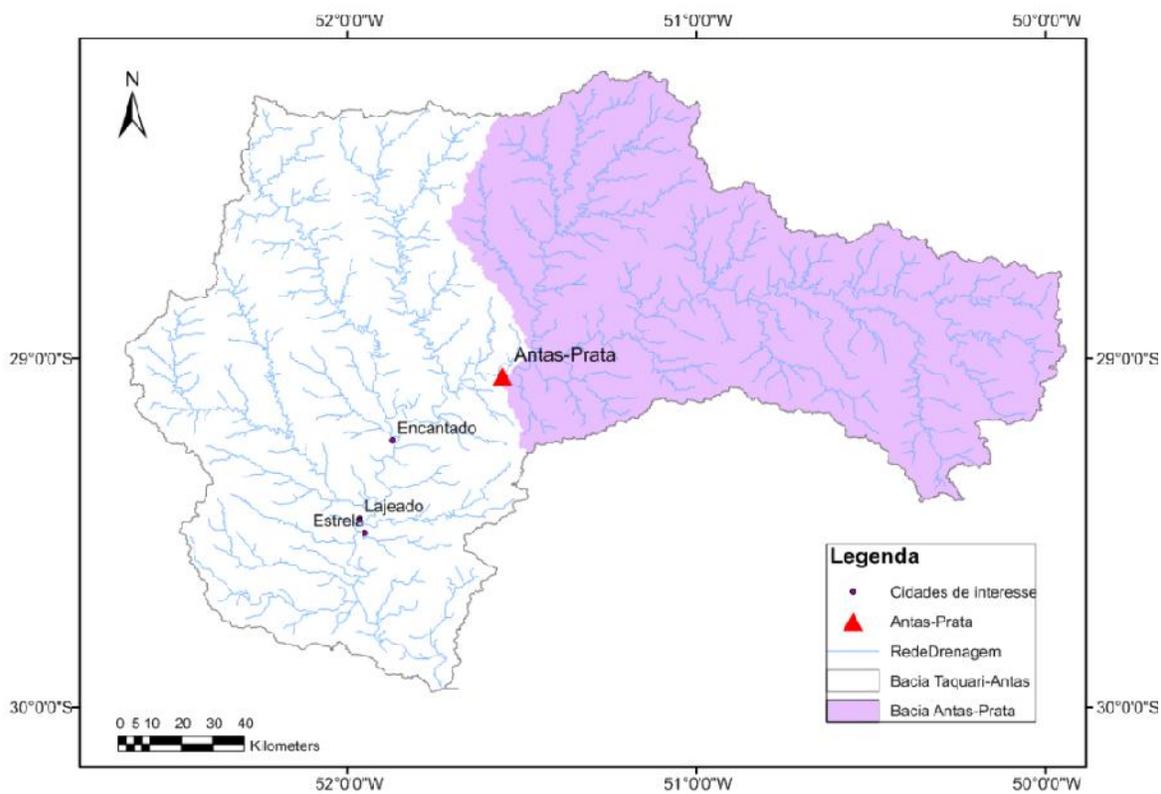
### 3.1. Resultados do Cenário 2 - Implementação apenas do reservatório de Antas-Prata

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 6), seria suficiente para reduzir uma fração relevante dos picos de cheia. O efeito de amortecimento dos picos pode ser visto na Figura 7, 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 aflúências e defluências à barragem durante o evento de 21/07/2011 está apresentada na Figura 8. Observa-se o 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 6 - Localização do reservatório de Antas-Prata, cuja área de drenagem equivale a cerca de 47% da área da bacia do Taquari-Antas.**



**Figura 7- Hidrogramas em Encantado, com e sem a barragem de Antas-Prata, durante o evento de 21/07/2011.**

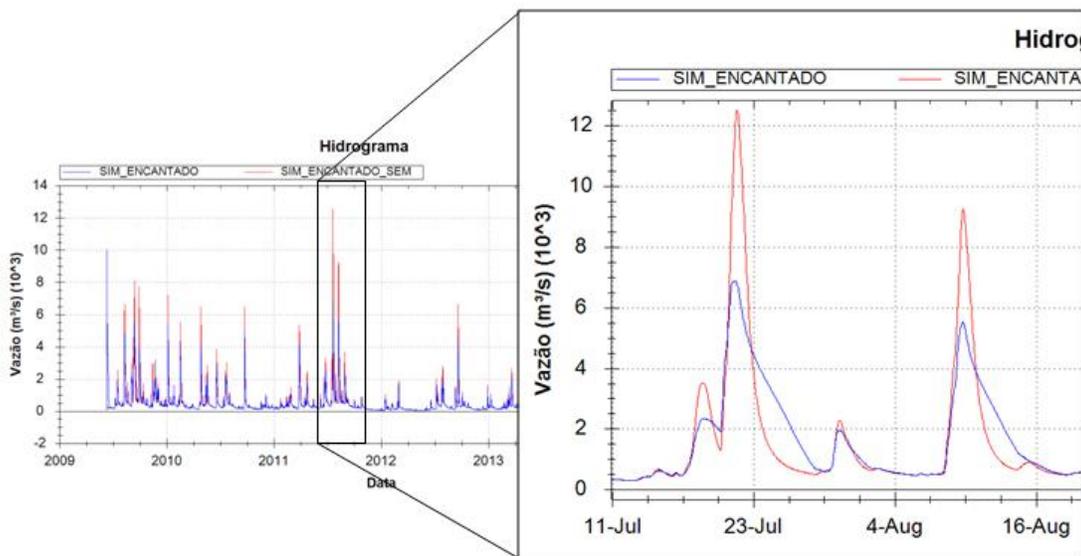
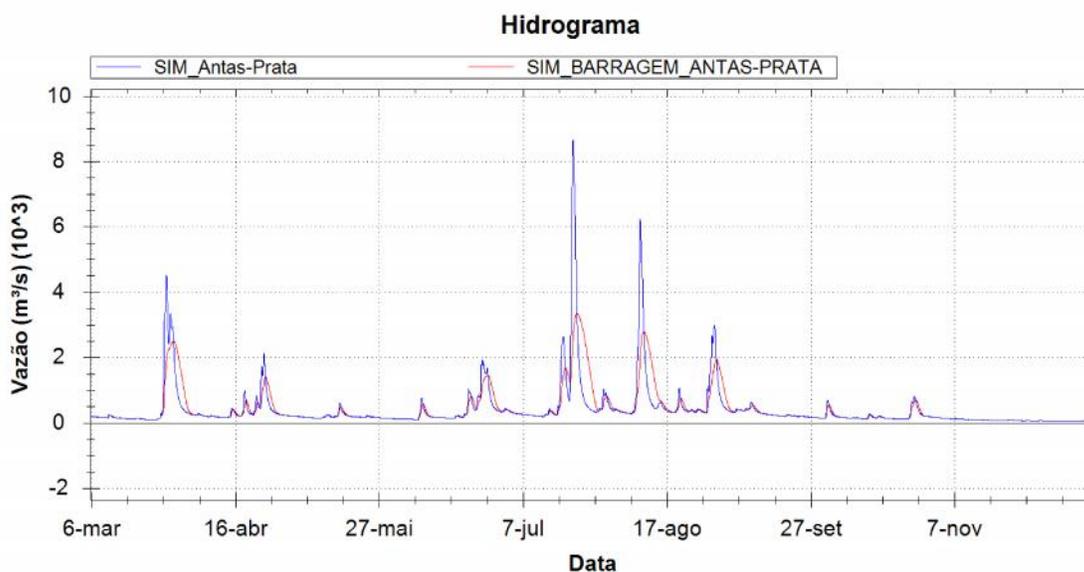


Figura 8 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem Antas-Prata durante o evento de 21/07/2011.



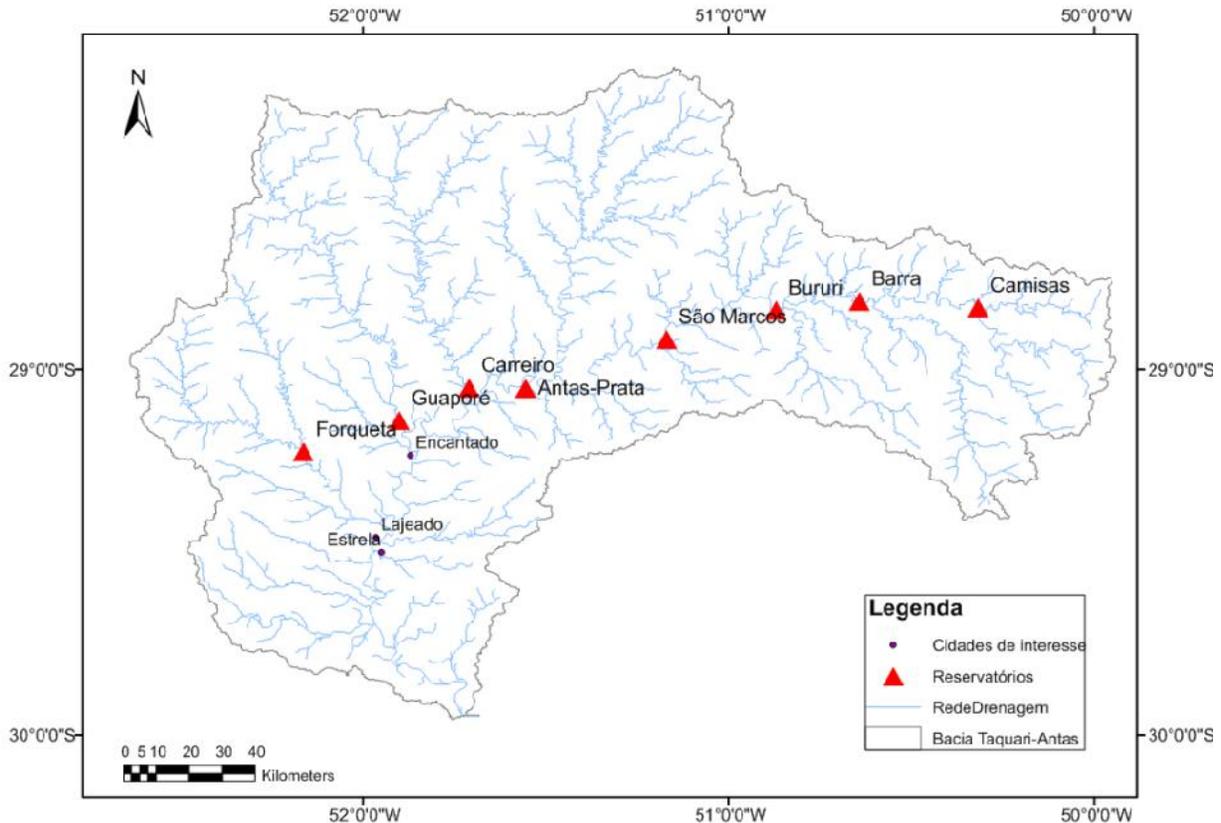
### 3.2. Resultados do Cenário 3 – Implementação dos oito reservatórios

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 9).

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 10). 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 11).

**Figura 9- Localização dos oito empreendimentos propostos para controle de cheias.**



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.

**Figura 10- Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, durante o evento de 21/07/2011.**

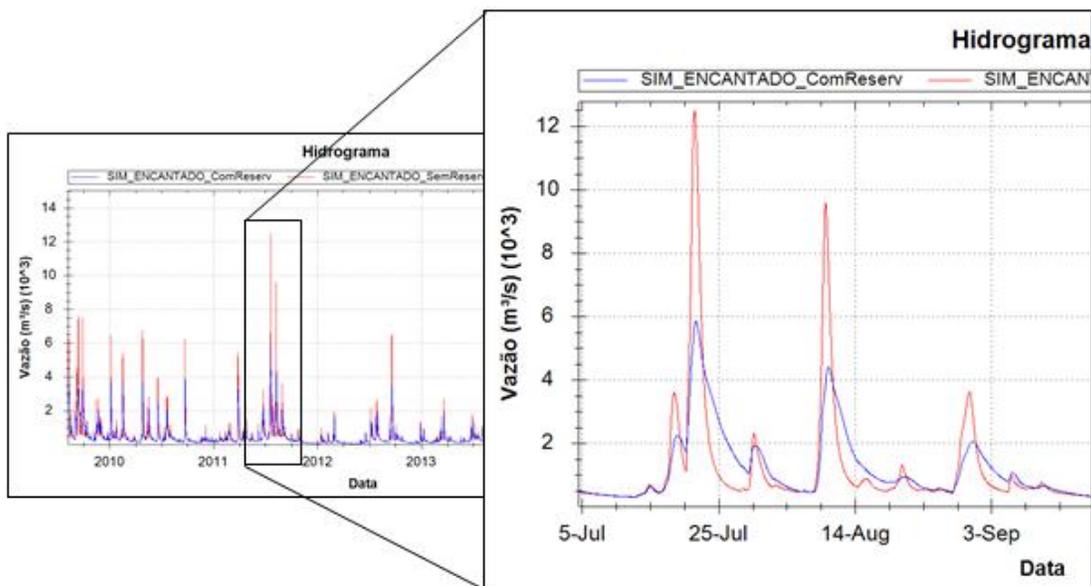
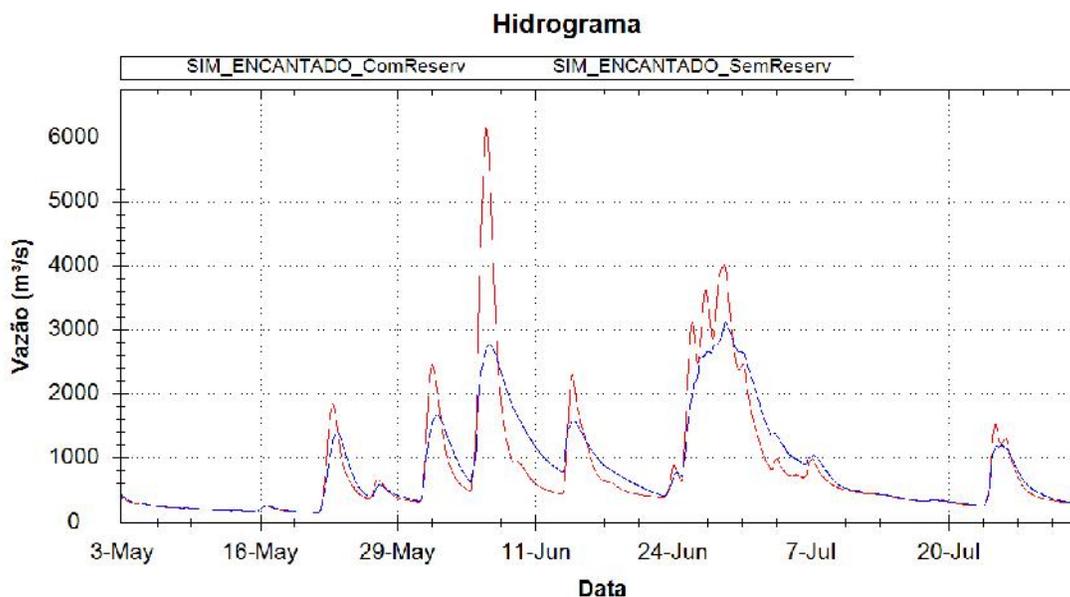


Figura 11 - Hidrogramas em Encantado, com e sem as oito barragens, para o ano de 2014.



### 3.3. Resultados do Cenário 4 – Implementação de 99 reservatórios

A implementação de 99 reservatórios seria suficiente para reduzir uma fração relevante dos picos de cheia. Além disso, o comportamento hidrológico da bacia seria bastante alterado, em relação aos cenários sem ou com poucas barragens de grande porte. Nas próximas seções, os resultados das simulações são analisados nos seguintes aspectos:

- Hidrogramas simulados, em termos de afluições e defluências de algumas barragens e do resultado para regiões do baixo Taquari;
- Eficiência dos 99 reservatórios em atenuar as cheias, avaliando o papel relativo entre as diversas barragens na atenuação;
- Avaliação do tempo de residência das barragens, usando esta métrica como descritora de barragens a fio d'água;
- Comparação entre os cenários com 99 reservatórios, os propostos em 1972, os 10 possíveis de implementação hoje e a situação sem barragens para controle de cheias (cenário atual).

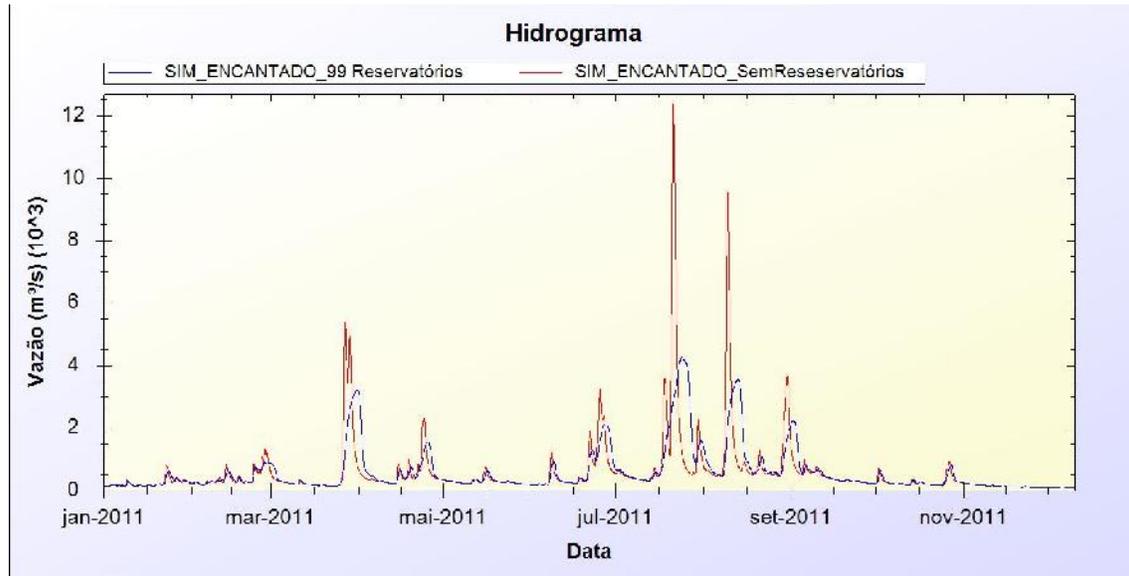
### 3.3.1. Hidrogramas simulados

O efeito de amortecimento dos picos pode ser visto na Figura 12 que apresenta o hidrograma em Encantado para os cenários com e sem barragens para o ano de 2011. O conjunto dos reservatórios foi capaz de reduzir satisfatoriamente as cheias, reduzindo, por exemplo, a cheia de 21/07/2011 de mais de 12000 m<sup>3</sup>/s para cerca de 4000 m<sup>3</sup>/s. Esta é uma das maiores cheias já registradas na bacia.

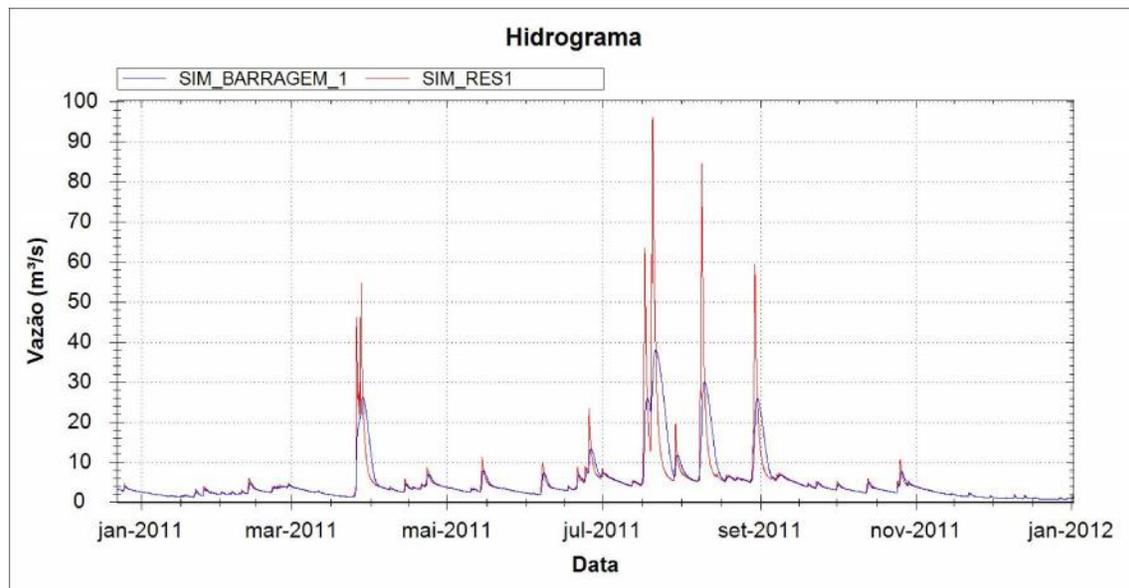
A Figura 13 apresenta a série de afluições e defluências da barragem de número 1, localizada nas cabeceiras do Rio da Prata (ver Figura 3) durante o ano de 2011. Observa-se o elevado amortecimento das cheias promovido pelos 99 reservatórios. Também se pode notar que os picos de defluências ocorrem no momento de interseção das vazões afluentes e defluentes (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). A Figura 14 apresenta a série de afluições e defluências à barragem de número 96, localizada no baixo Taquari. Nota-se a diferença na forma dos hidrogramas entre trechos mais de jusante e de cabeceira, mostrando a alteração na dinâmica hidrológica da bacia.

A implementação dos 99 reservatórios acarretou em uma alteração expressiva do comportamento hidrológico da bacia, conforme o hidrograma simulado para Encantado. Como nos demais cenários com reservatórios, os picos foram atenuados de forma a reduzir bastante as cheias nos trechos de jusante. No entanto, os picos decorrentes do cenário com 99 barragens passaram a ocorrer vários dias após os picos no cenário sem barragens. Além disso, o formato do hidrograma também foi alterado, sendo que as causas destes efeitos serão discutidas na seção de “Comparação entre cenário com 99 reservatórios e demais cenários estudados no contexto do Projeto Taquari-Antas”.

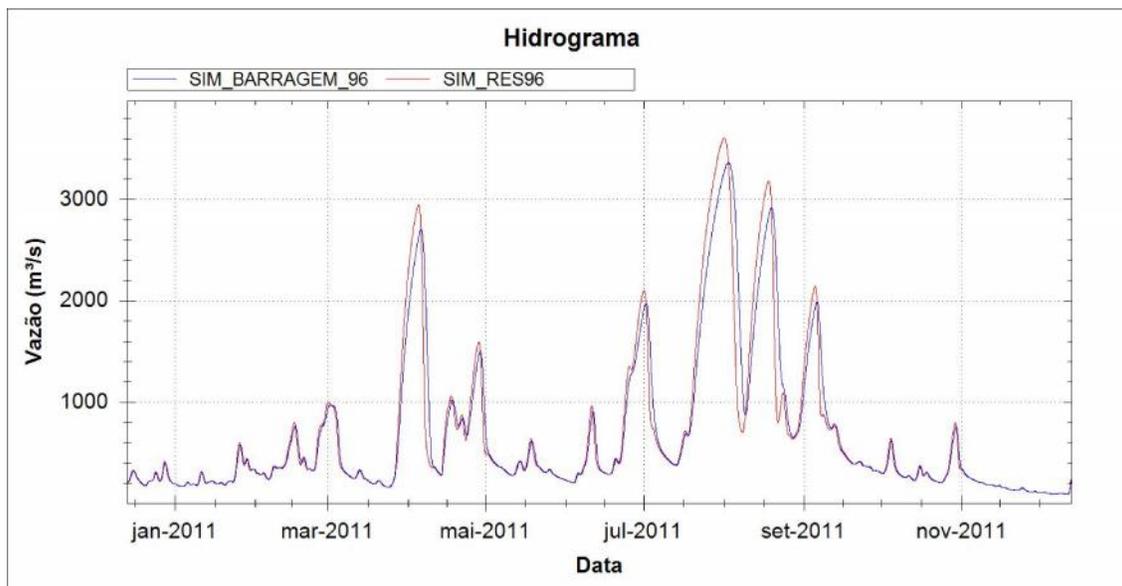
**Figura 12 - Hidrogramas em Encantado, com e sem as 99 barragens, durante o ano de 2011.**



**Figura 13 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem número 1 durante o ano de 2011.**



**Figura 14 - Hidrogramas afluente e defluente da barragem número 96 durante o ano de 2011.**



### 3.3.2. Eficiência dos reservatórios

Neste estudo, foi adotado uma mesma altura de 30 m para todos os reservatórios, e a principal consequência disto é que algumas barragens localizadas no trecho do baixo Rio Taquari apresentam uma pequena eficiência na redução de picos, em comparação com outras existentes nas regiões de cabeceiras. Isto ocorre pois o volume útil das barragens de trechos de jusante tenderão a apresentar pequenos volumes úteis frente ao volume que escoia nesses trechos, em comparação com aquelas de montante, que terão grande capacidade de armazenar os pequenos volumes de cheia gerados nestas regiões de cabeceira. Assim, foi calculada a eficiência de redução de picos média para cada um dos 99 reservatórios. As etapas de cálculo desta métrica foram:

- 1) Para cada reservatório, obteve-se os 10 maiores picos da série de vazões defluentes;
- 2) A partir do intervalo de tempo em que ocorreu cada um dos 10 picos, obteve-se o maior pico da série de vazões afluentes ocorrido numa janela de três dias anteriores a este intervalo;
- 3) Como resultado, obteve-se a vazão de pico afluente e defluente dos 10 maiores eventos da série simulada de cada reservatório, sendo que para cada evento foi calculada a fração de redução de pico:

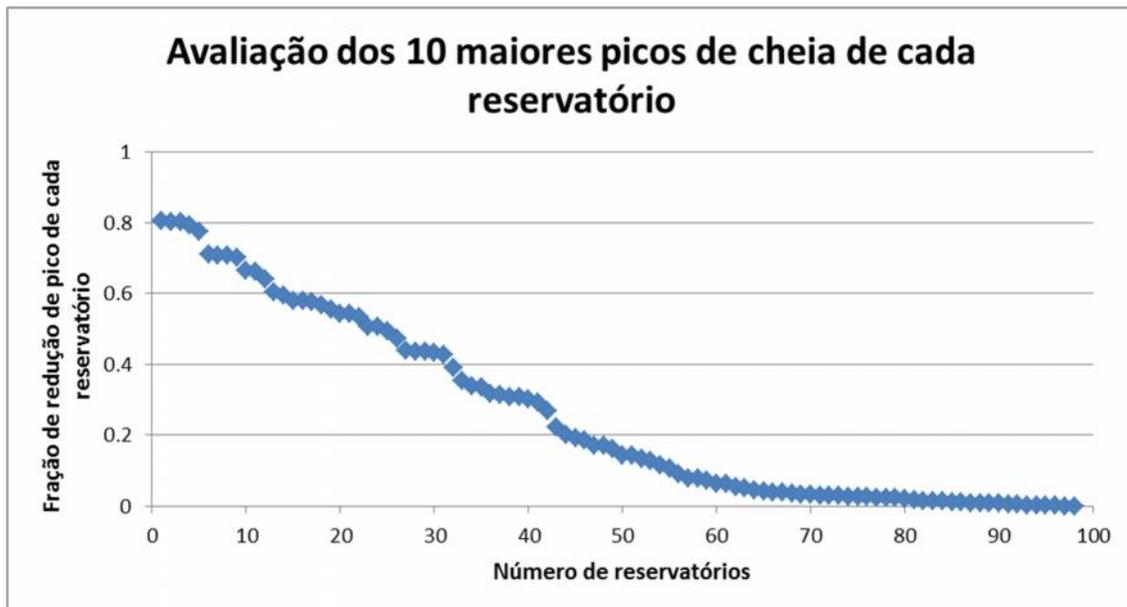
$$F_{res,i,j} = \frac{(Q_{af,i,j} - Q_{def,i,j})}{Q_{af,i,j}}$$

Sendo  $F_{res}$  a fração de redução de pico,  $Q_{af}$  a vazão afluente e  $Q_{def}$  a vazão defluente do  $j$ -ésimo reservatório ( $j$  indo de 1 a 99), para o  $i$ -ésimo maior pico ( $i$  indo de 1 a 10 eventos).

- 4) Computação da eficiência de redução de picos média, pelo cálculo da média dos 10 valores de eficiência de redução de pico de cada reservatório.

A Figura 15 apresenta os valores de eficiência média para cada reservatório em ordem decrescente. Assim, observa-se que as maiores eficiências atingidas foram da ordem de 0.8, ou seja, em média os picos foram reduzidos em 80 %. Além disso, nota-se que 45 reservatórios (cerca da metade dos 99) apresentaram eficiências superiores a 0.2, que pode ser considerado um limiar abaixo do qual a eficiência é insatisfatória para reservatórios de controle de cheias.

**Figura 15 - Avaliação da eficiência de redução de pico média dos 99 reservatórios.**



### 3.3.3. Avaliação do tempo de residência

A capacidade de amortecimento de cheias por reservatórios está diretamente relacionada com o volume útil destes. Assim, um critério interessante para classificar barragens que operam a fio d'água, e que portanto possuam baixa capacidade de atenuação de cheias, é o de tempo de residência médio do reservatório, o qual pode ser calculado pela equação abaixo:

$$T_{res} = Vol / Q_{média}$$

Sendo  $T_{res}$  o tempo de residência,  $Vol$  o volume útil e  $Q_{média}$  a vazão média afluente à barragem.

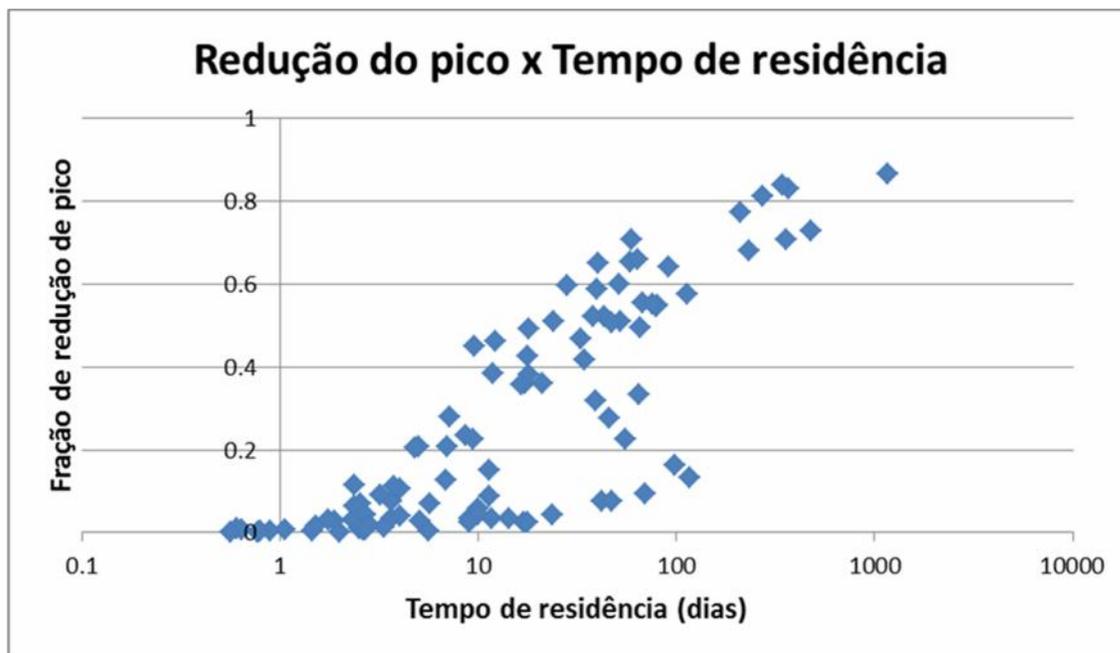
Desta forma, foi calculado para cada um dos 99 reservatórios o tempo de residência destes, a fim de avaliar a capacidade dos mesmos de atenuar cheias. A Figura 16 apresenta o resultado para cada barragem, com as eficiências classificadas em ordem crescente. Observa-se que dos 99, cerca de 60 reservatórios possuem tempo de residência inferior a 20 dias. Para comparação, pode-se considerar os valores para os reservatórios do CERAN, que operam a fio d'água e possuem capacidade de amortecimento de cheias muito baixo - 0.4 d (UHE Monte Claro), 2.0 d (UHE 14 de Julho) e 5.3 d (UHE Castro Alves). A Usina de Itaipu, que também opera a fio d'água, possui um  $T_{res}$  de 20 d.

A Figura 17 apresenta a relação entre tempo de residência e fração de redução do pico média para cada reservatório (calculada na seção anterior). Como mencionado, as barragens com menor tempo de residência tendem a apresentar uma menor capacidade de amortecimento das cheias. A partir deste resultado, pode-se estimar que, nesta bacia, um reservatório para controle de cheias tende a reduzir cerca de 60% dos picos afluentes se este tiver um tempo de residência da ordem de 100 dias.

**Figura 16 - Tempo de residência para cada reservatório.**



**Figura 17 - Relação entre redução do pico e tempo de residência para cada um dos 99 reservatórios.**



### 3.4. 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 Tabela 3 e Tabela 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 Tabela 5 e Tabela 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%	-

### 3.5. 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).

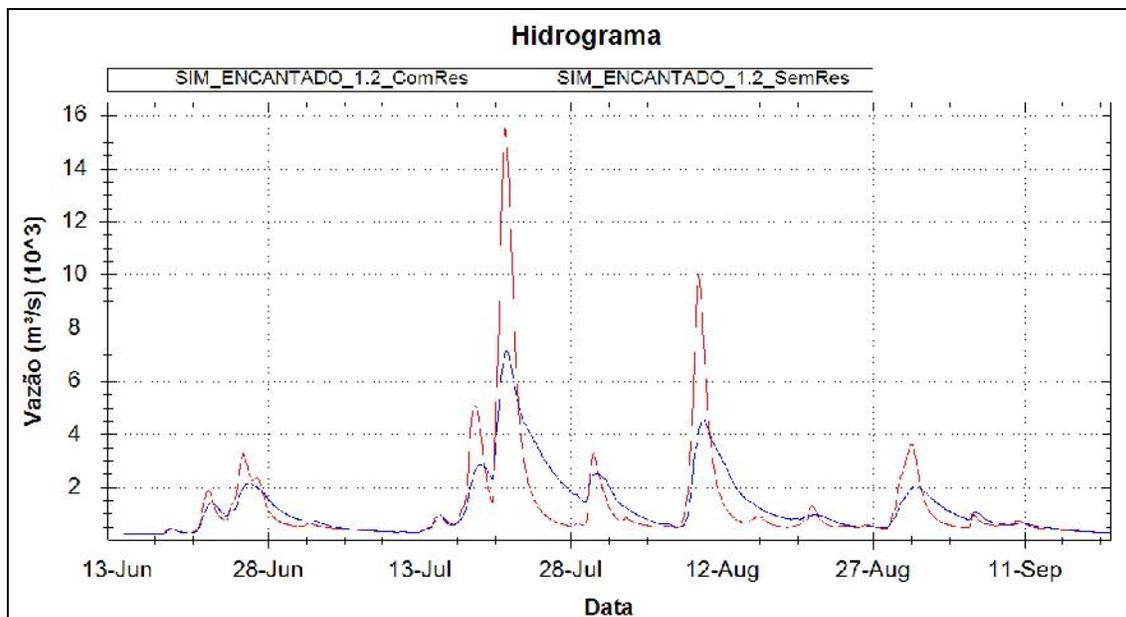
Para analisar a capacidade dos reservatórios em atenuar cheias maiores, foi adotada uma metodologia de geração de eventos sintéticos, em que a chuva observada no período do principal evento de 2011 (entre 07/07/2011 e 07/08/2011) foi majorada adotando diferentes fatores multiplicadores, de modo a gerar 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 Figura 18 e Figura 19 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%.

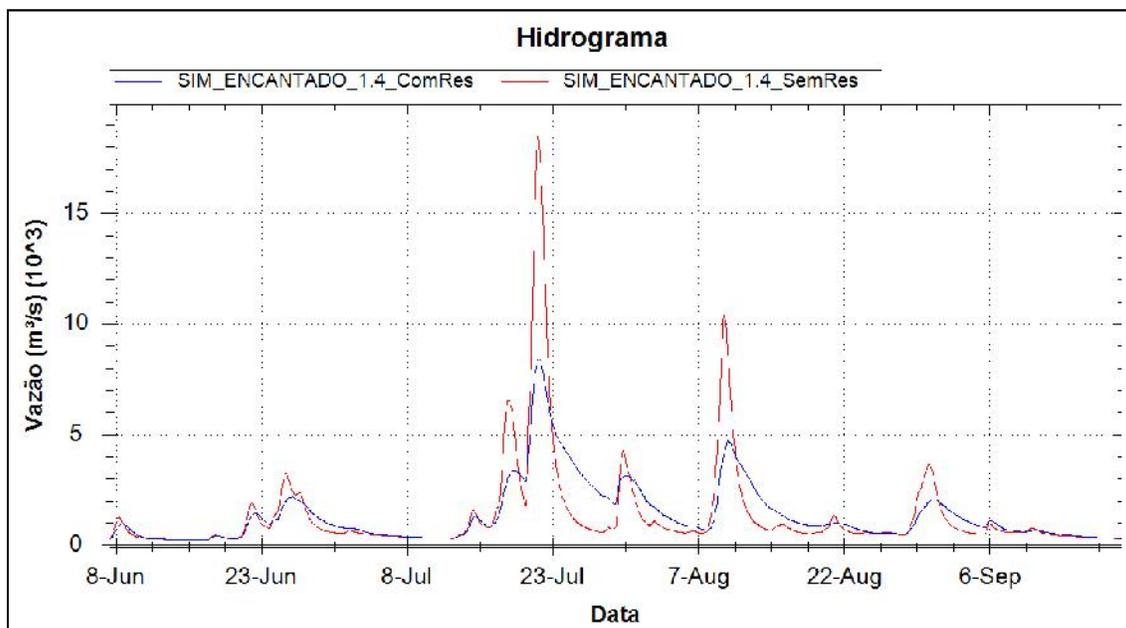
**Tabela 8 - Estimativa das vazões extremas em Encantado, de acordo com o relatório de diagnóstico hidrológico da bacia do Projeto Taquari-Antas**

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



**Figura 19 - Simulação com e sem reservatórios para o evento de 21/07/2011 em Encantado com precipitação multiplicada por um fator de 1,4.**



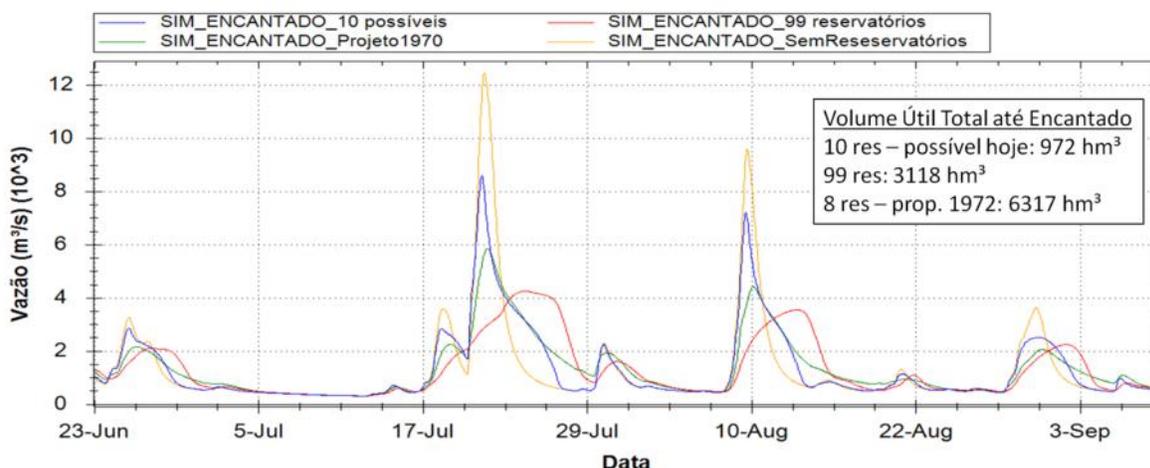
### 3.6. Comparação entre cenário com 99 reservatórios e demais cenários estudados no contexto do Projeto Taquari-Antas.

Por fim, é comparado o cenário de 99 reservatórios com os demais estudados neste projeto: (i) cenário natural (sem barragens), (ii) 8 propostos em 1972 e (iii) 10 possíveis hoje. A Tabela 9 compara os diversos cenários em termos de volume útil total das barragens (soma de todos os volumes úteis) e área inundada total até o município de Encantado, onde a ocorrência de inundações é frequente. Nota-se que o cenário com 99 reservatórios apresenta valores intermediários de volume útil total e área inundada, sendo que o estudo com a implementação das 10 barragens possíveis hoje possui os menores valores, e os propostos em 1972 os maiores valores. Na prática, isto significa que a implementação dos 10 reservatórios possíveis forneceria uma menor capacidade de atenuação de cheias na bacia Taquari-Antas. Por outro lado, os empreendimentos propostos em 1972, dado as suas dimensões (por exemplo, a barragem proposta de Antas-Prata, que possuía mais de 100 m de altura), seriam capazes de controlar de forma bem mais expressiva as cheias. A Figura 20 apresenta os hidrogramas simulados para o evento de 21/07/2011 para os quatro cenários de implementação de reservatórios estudados no projeto. A discussão acima é corroborada por este resultado, onde a onda de cheia foi mais atenuada no cenário de 1972 que no de 10 reservatórios possíveis, dados os maiores volumes úteis daqueles. Por outro lado, o resultado dos 99 reservatórios é diferente do esperado. Por ter um volume útil total intermediário aos demais cenários, poderia-se esperar que a atenuação da onda de cheia também seria intermediária. No entanto, não é isto que ocorre: a existência de um grande número de barragens faz com que haja um melhor aproveitamento do volume útil destes, gerando uma vazão simulada em Encantado inferior aos demais cenários. Isto ocorreu porque nestes outros casos os reservatórios foram dimensionados para conter cheias de tempo de retorno superior ao de 2011, e portanto o volume útil total existente na bacia foi sub-aproveitado neste evento. É importante lembrar que não foram consideradas comportas nas simulações dos reservatórios, e que portanto a capacidade das 99 barragens para reduzir cheias foi sub-dimensionada.

**Tabela 9 - Resumo do volume útil total e área inundada total até Encantado para os quatro cenários de implementação de reservatórios para controle de cheia estudados neste Projeto**

	SEM BARRAGENS	99 RESERVATÓRIOS	PROJETO 1972	10 POSSÍVEIS HOJE
<b>VOLUME ÚTIL TOTAL ATÉ ENCANTADO (HM³)</b>	0	3.117	6.317	972
<b>ÁREA INUNDADA TOTAL ATÉ ENCANTADO (HA)</b>	0	12.407	17.914	4.772

**Figura 20 - Comparação entre os cenários sem reservatórios, com as 99 barragens, com os propostos em 1972 e com os passíveis de implementação hoje**



Além disso, na comparação entre cenários pode-se notar que a forma do hidrograma foi bastante alterado nas simulações com 99 reservatórios. A ascensão passou a ser mais lenta que a recessão, ao passo que nos demais cenários estudados a recessão do hidrograma foi mais lenta. Este fenômeno ocorreu devido à adoção de orifícios de fundo como estruturas hidráulicas de saída dos reservatórios, e o efeito produzido por estes na celeridade das ondas de cheia após estas serem propagadas por um número grande de reservatórios. A função que descreve a vazão que passa por estes orifícios possui a forma:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - h_{orif})}$$

Onde Q é a vazão defluente, C um coeficiente de orifício, A a área da seção transversal do orifício, g a aceleração da gravidade, h o nível da água e  $h_{orif}$  o nível do orifício.

Esta equação relaciona a vazão defluente da barragem com a raiz quadrada do nível. Por sua vez, a celeridade das ondas de cheia, que equivale à velocidade com que estas ondas são propagadas no rio, pode ser calculada pela derivada da vazão em relação à área da seção molhada do rio. Considerando que a largura do rio varia pouco, em comparação à variação do nível, pode-se estimar a celeridade pela derivada da vazão em relação ao nível do rio. No caso em que a vazão varia com a raiz quadrada do nível, esta derivada será inversamente proporcional à vazão. Como consequência, um aumento da vazão (como a subida de um hidrograma) acarreta uma diminuição da celeridade da onda de cheia, gerando uma ascensão mais lenta que a recessão. Este fenômeno só foi observado com a avaliação de um grande número de reservatórios, onde uma dada onda de cheia passou por diversas zonas de armazenamento cuja vazão de saída estava definida pela equação do orifício de fundo, e teve seu formato alterado até apresentar uma ascensão mais lenta que a recessão.

Por fim, qualquer um dos três cenários de implementação de reservatórios seria capaz de atenuar as cheias na bacia, de modo a diminuir os danos causados na região do Baixo Taquari. No entanto, deve-se considerar que apenas o cenário das 10 barragens possíveis hoje seria capaz de real uso na bacia, dadas as restrições existentes ao cenário de 1972 (estradas, barragens existentes, manchas urbanas, etc.) e à total inviabilidade do cenário com 99 reservatórios. O resultado das simulações deste último mostrou que um grande número de reservatórios é mais eficaz na redução de cheias na bacia, pois os volumes úteis são melhor aproveitados. É importante lembrar, no entanto, que não foram consideradas comportas nas simulações dos reservatórios, e que portanto a capacidade destes em reduzir cheias foi sub-dimensionada. Por outro lado, pode-se argumentar que o uso de reservatórios sem comportas é uma situação mais simples de implementação na bacia, pois a operação de reservatórios para controle de cheias é um processo complexo, que dificilmente seria eficiente em um contexto com um número elevado de barragens distribuídas pela bacia.

### **3.7. Considerações finais sobre o Cenário 4**

Neste relatório foi avaliado o efeito na atenuação de cheias da implementação de um número elevado de reservatórios para controle de cheias (99 barragens). Para todas estas barragens considerou-se uma altura de 30 m, de maneira que o volume total dos reservatórios ficasse em uma posição intermediária entre os propostos no Plano de Desenvolvimento de 1972 e os 10 possíveis de implementação atual.

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 que haveria um grande controle de cheias na bacia do Taquari-Antas com a implantação destas estruturas, sendo que cheias críticas como a de julho/2011 seriam reduzidas para uma situação de não inundação. Além disso, o comportamento hidrológico da bacia seria alterado de forma expressiva, apresentando um tempo de subida do pico bem mais longo que no cenário atual. Entretanto, este cenário é totalmente impraticável na região, uma vez que nenhuma restrição física foi levada em consideração para o posicionamento dos reservatórios.

Por fim, mesmo se tratando de um cenário hipotético para a bacia, onde os eventos de cheia seriam fortemente controlados, é importante destacar que um estudo de rompimento de barragens não poderia ser descartado. Desta forma, caso houvesse uma situação de rompimento em cascata devido a um evento muito crítico, o impacto provavelmente seria muito maior, já que o nível dos rios aumentaria muito rapidamente e limitaria a capacidade de resposta dos agentes envolvidos com a emissão de alertas e remoção da população nas áreas de risco.

### 3.8. Modelo hidrológico MGB-IPH

#### 3.8.1. 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.

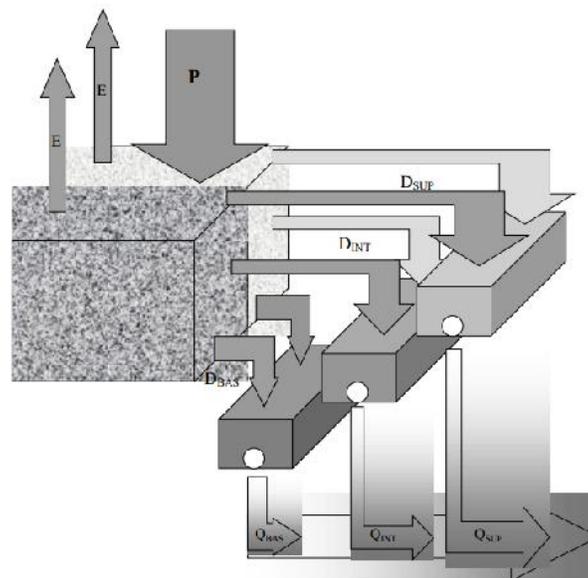
Além da variabilidade espacial da chuva, que pode ser representada por meio de séries distintas em cada uma das minibacias, há também a variabilidade espacial das características físicas da bacia que deve ser considerada. O tratamento desta variabilidade dentro do modelo é feito através da discriminação 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 21 - 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 10) 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 10 - 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

Nº	Nome da Estação Telemétrica	Responsável	Latitude (°)	Longitude (°)	Período de dados
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.

**Tabela 11 – Código e localização das estações escolhidas.**

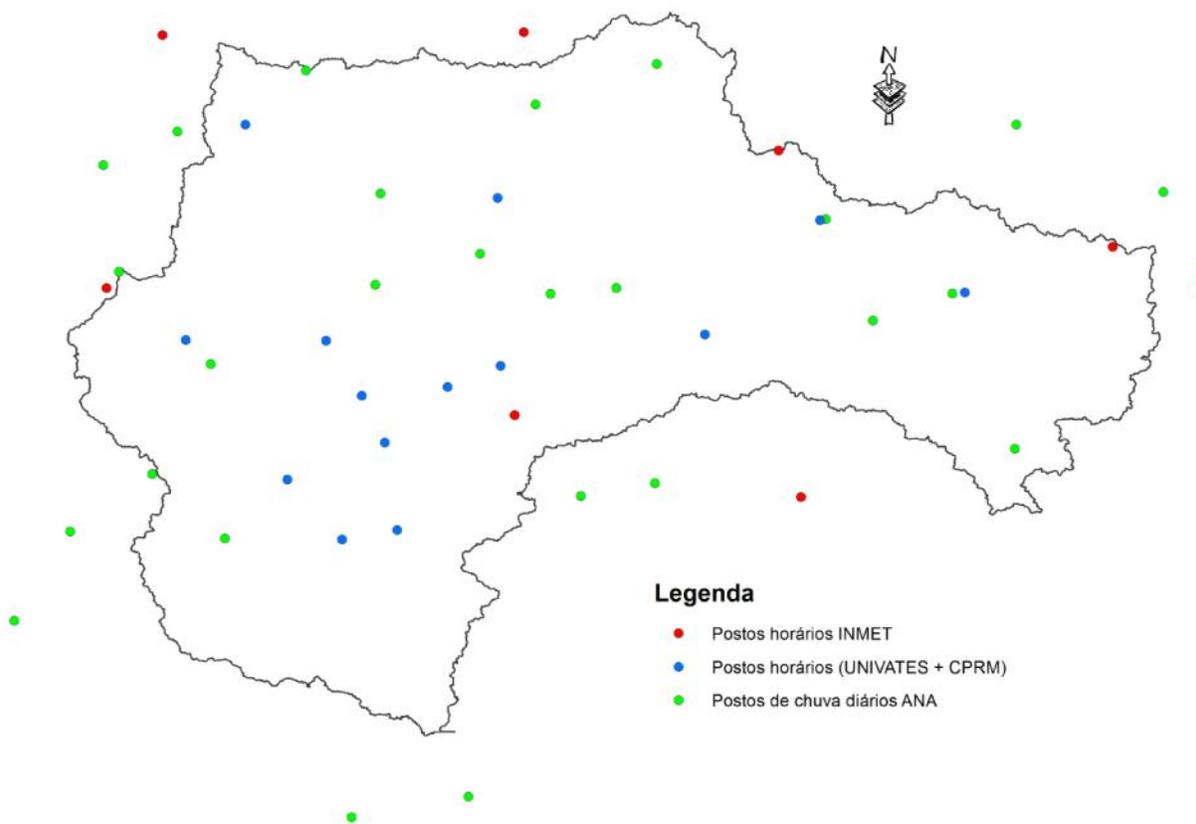
Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
1	02849019	-28,8350	-49,8377
2	02849035	-28,6263	-49,9333
3	02850006	-28,4494	-50,2963
4	02850009	-28,8675	-50,4561
5	02850016	-28,9375	-50,6540
6	02850020	-28,6833	-50,7808
7	02851003	-28,8533	-51,2844
8	02851021	-28,8677	-51,4483
9	02851022	-28,6194	-51,8666
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

Nº	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
23	02952036	-29,3125	-52,4225
24	02952037	-29,4702	-52,2497
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 22 a seguir apresenta a distribuição geográfica dos postos de chuva utilizados.

As estações pluviométricas 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 12), 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 13) - 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.

**Figura 22 - Distribuição espacial dos postos horários e diários utilizados no modelo MGB-IPH.**



**Legenda**

- Postos horários INMET
- Postos horários (UNIVATES + CPRM)
- Postos de chuva diários ANA

**Tabela 12 - 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 13 - 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 14) 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 14 - 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

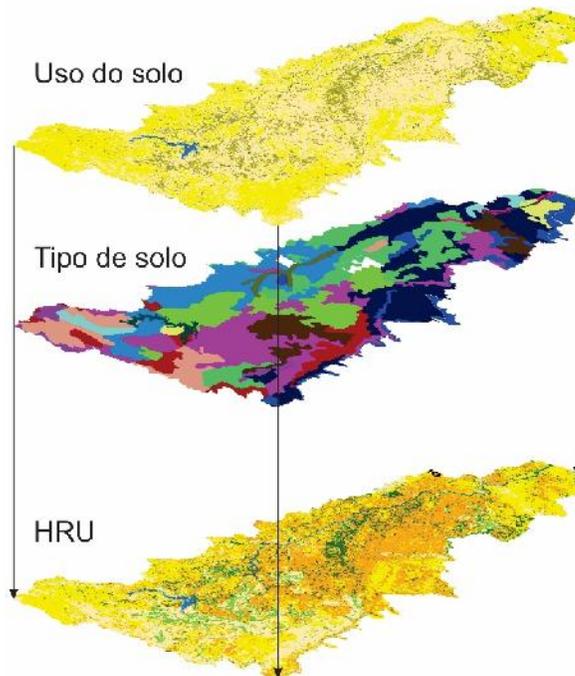
Quanto às variáveis climáticas na bacia do Taquari-Antas, também necessárias para a aplicação do modelo, as mesmas foram obtidas a partir das Normais Climatológicas associadas a cada uma das estações representativa da bacia, conforme já identificado no relatório de caracterização hidrológica.

#### 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 23.

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 23 - 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

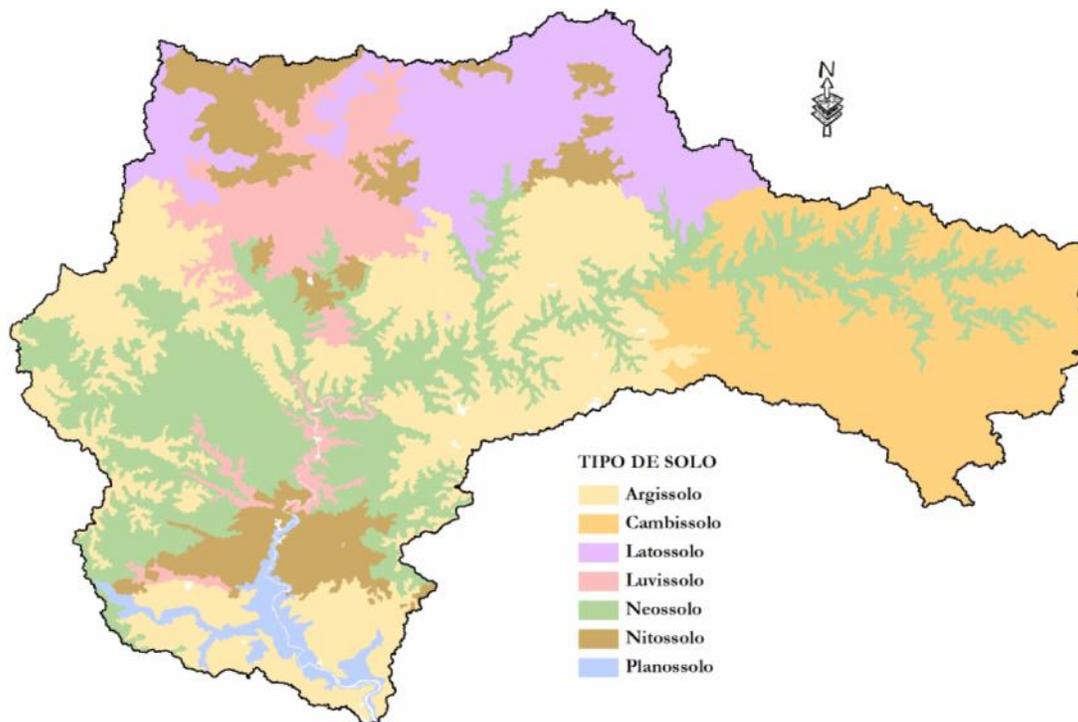
O mapa de solos utilizado para a bacia do Rio Taquari-Antas foi obtido a partir da base de dados geográfica do Plano de Bacia Hidrográfica (DRH/SEMA, 2011). Este mapa teve como base os levantamentos exploratórios do projeto RADAMBrasil desenvolvido ao longo dos anos de 1970 e 1980, sendo posteriormente complementado por estudos mais detalhados produzidos pela Embrapa Solos e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Através da Figura 24, 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.

No entanto, as classificações tradicionais dos mapas de tipos de solos têm, 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 (Figura 25). 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 15.

**Figura 24 - Mapa de solos para a bacia do Taquari-Antas.**



Fonte: IBGE/Embrapa Solos - DRH/SEMA (2011)

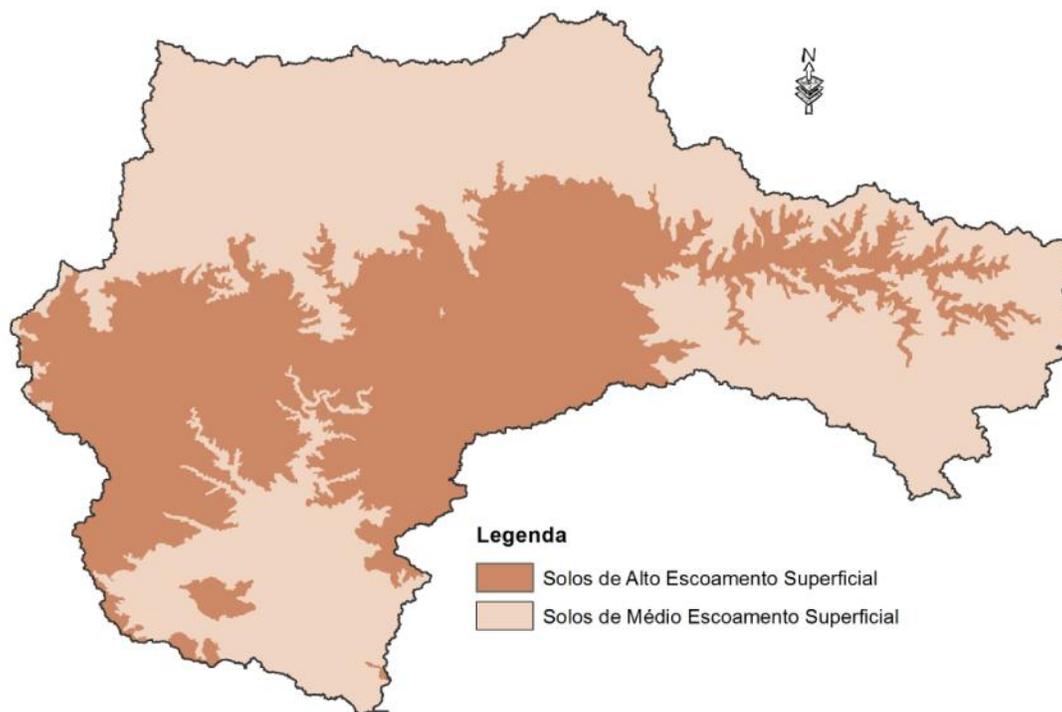
**Tabela 15 - Reclassificação do tipo de solo de acordo com as profundidades associadas.**

<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

Tipo do solo reclassificado (quanto à produção de escoamento superficial)	Profundidade	Tipos de solo que se enquadram na classificação de profundidade
	> 250 cm	- Latossolo - Nitossolo Vermelho Alumínico

Fonte: RADAMBrasil

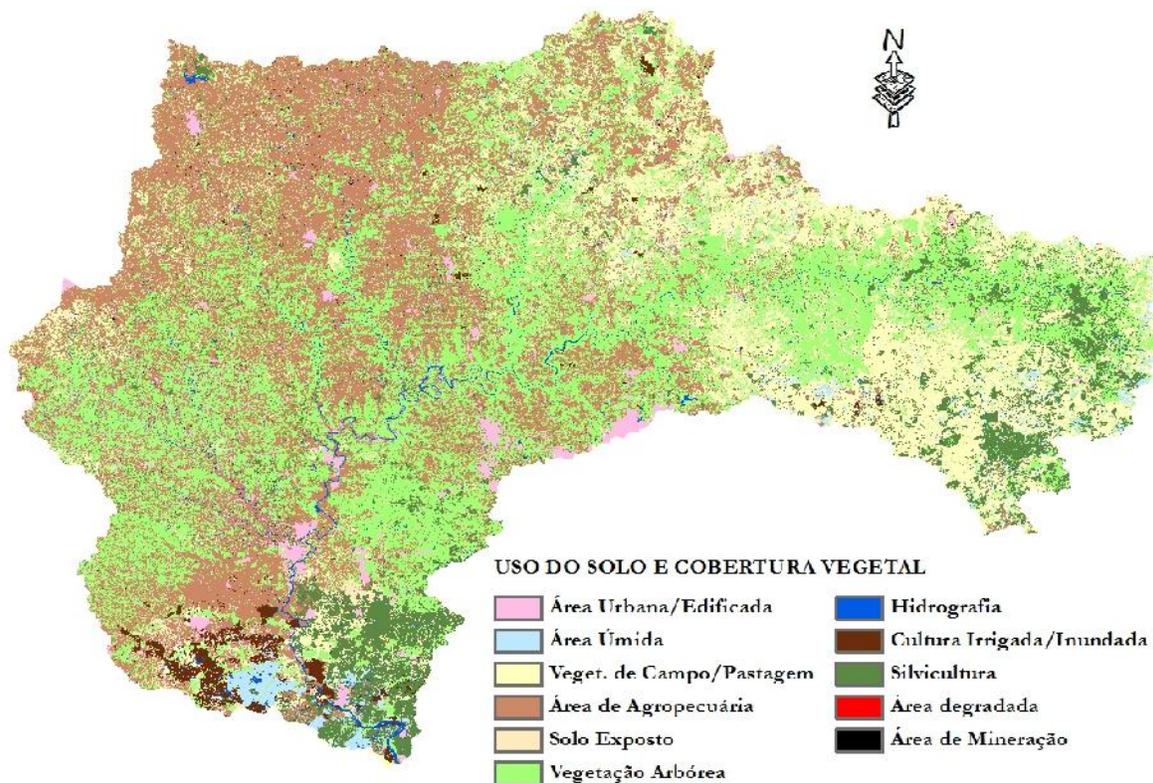
**Figura 25 - Mapa de solos reclassificado para a bacia do Taquari-Antas.**



### 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 16), conforme apresentado na Figura 26 a seguir.

**Figura 26 - Mapa de uso do solo e cobertura vegetal para a bacia do Taquari-Antas.**



Fonte: DRH/SEMA

**Tabela 16 - 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
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

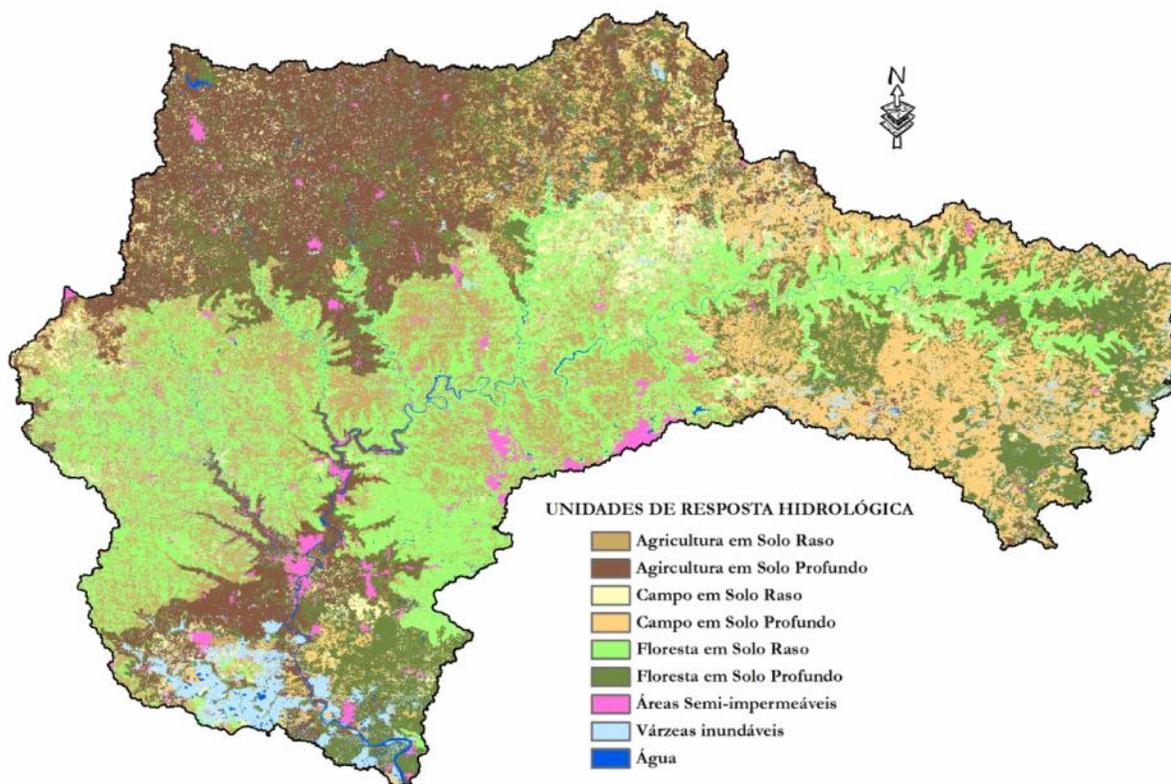
arbórea e silvicultura foram agrupadas na classe "Floresta", enquanto que áreas de Cultura Irrigada / Inundada e áreas úmidas foram classificadas como "Várzeas Inundáveis".

### 3.8.2. 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 27.

**Figura 27 - Mapa final com a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para a bacia do Taquari-Antas.**



### 3.8.3. Discretização do MGB-IPH

### 3.8.4. Definição das minibacias

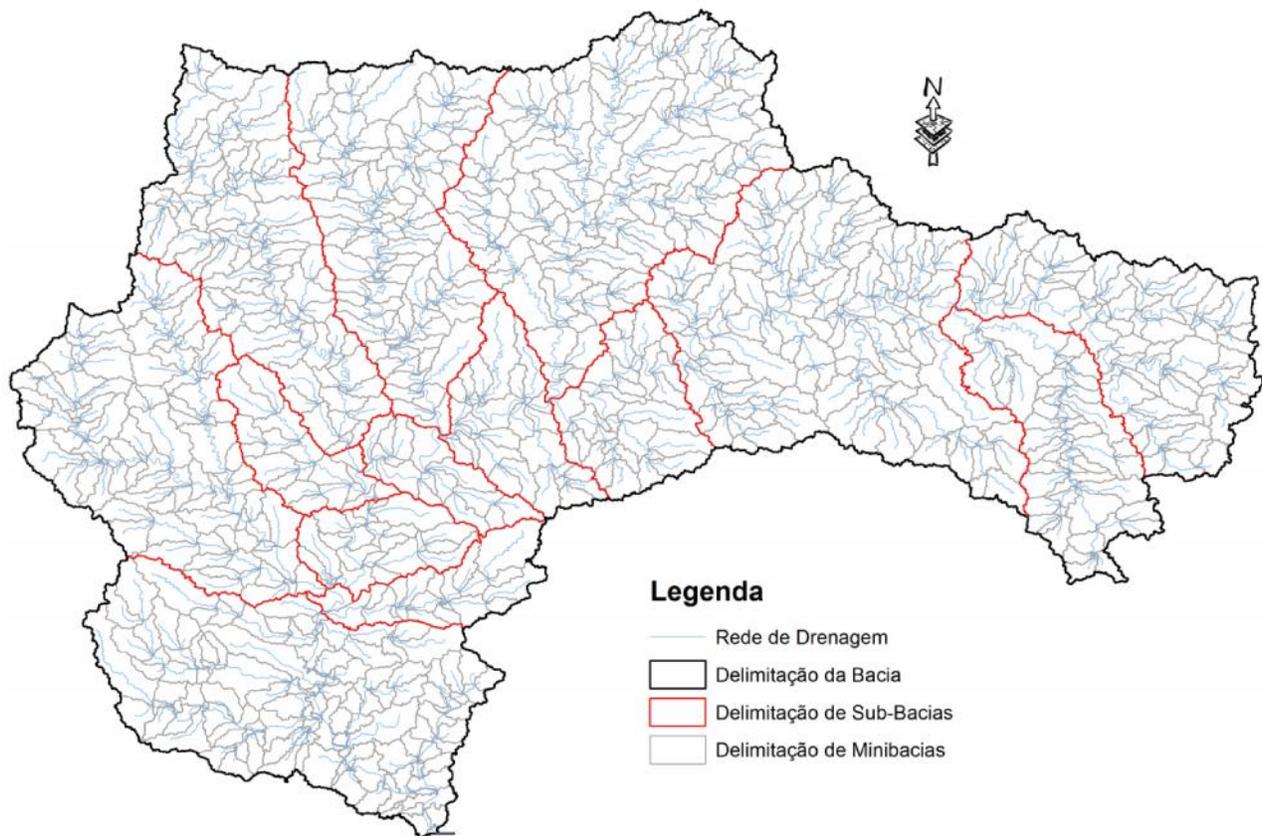
A discretização da bacia em minibacias é efetuada a partir de uma divisão nos pontos de confluência entre dois trechos de rio ou em pontos de controle como reservatórios, tomadas d'água e estações de medições de vazão. A inserção de uma minibacia com exutório sobre o ponto de controle é particularmente 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.

### 3.8.5. 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 28).

**Figura 28 - Mapa final com a discretização do modelo para a bacia do Taquari-Antas.**



### 3.8.6. 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.

#### 3.8.4. 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 17 e Fonte: Adaptado de Fan (2011)

Tabela 18 sumarizam os parâmetros utilizados pelo MGB-IPH.

**Tabela 17 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.**

Parâmetro Fixo	Descrição
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.

Fonte: Adaptado de Fan (2011)

**Tabela 18 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).**

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	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 $W_{max}$ .
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento durante a estiagem.
Quantidade de água que escoo subsuperficialmente (Kint)	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que escoo 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.

Parâmetro Calibrável	Descrição
Armazenamento Residual (Wc)	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.

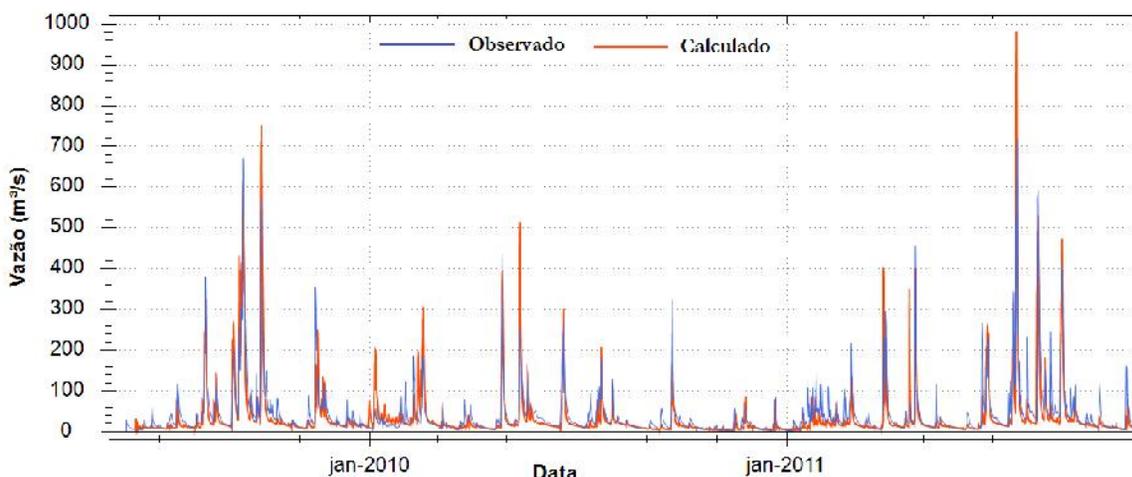
O período de calibração do MGB-IPH ocorreu entre junho/2009 a dezembro/2011, sendo o período seguinte (2012-2013) adotado para a verificação do modelo. De uma maneira geral, as medidas estatísticas tiveram um bom resultado na bacia do Taquari-Antas durante a calibração, conforme pode ser verificado na Tabela 19. Apesar do erro de volume ser significativo, os coeficientes de Nash-Sutcliffe podem ser considerados bons para o período, sendo em sua maioria superiores a 0,8.

**Tabela 19 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de calibração.**

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	V
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%

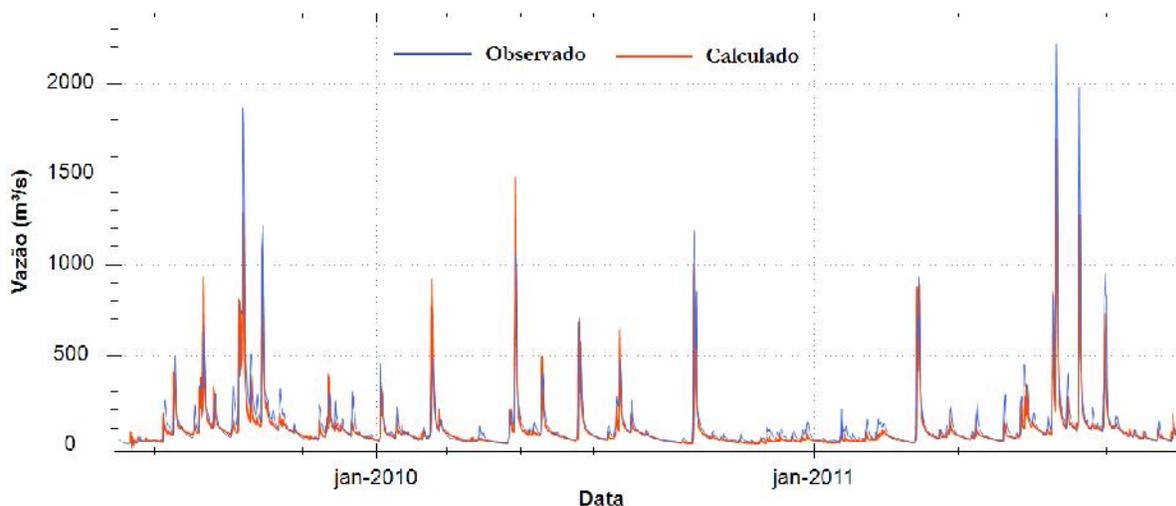
A Figura 29 mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Tainhas no posto fluviométrico de Passo Tainhas, próximo às cabeceiras do Rio das Antas, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 1.120 km<sup>2</sup>. A concordância dos hidrogramas para este posto foi razoável no período de 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 29 - Resultado final da calibração horária para o posto de Passo Tainhas (86410000), no Rio Tainhas, período de junho/2009 a dezembro/2011.**



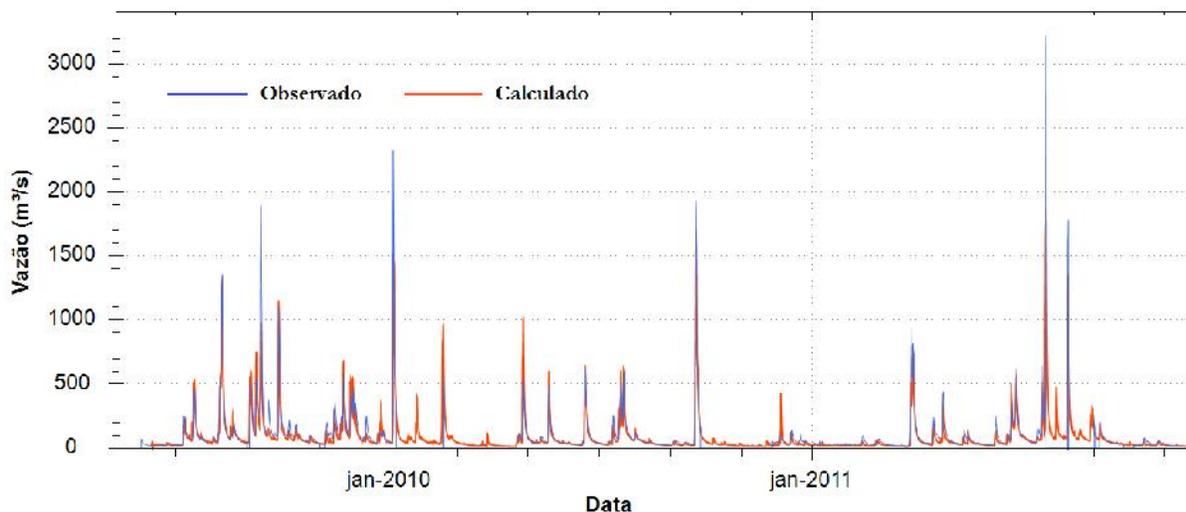
A Figura 30 mostra os hidrogramas no posto fluviométrico de Barra do Guaiaveira, situado no rio Turvo - afluente do rio da Prata, cuja área de drenagem é de 2.820 km<sup>2</sup>. Neste caso, os resultados podem ser considerados bons apesar do erro de volume ter sido o de maior magnitude entre os demais postos analisados.

**Figura 30 - Resultado final da calibração horária para o posto de Barra do Guaiaveira (86410000), no Rio Turvo, período de junho/2009 a dezembro/2011.**



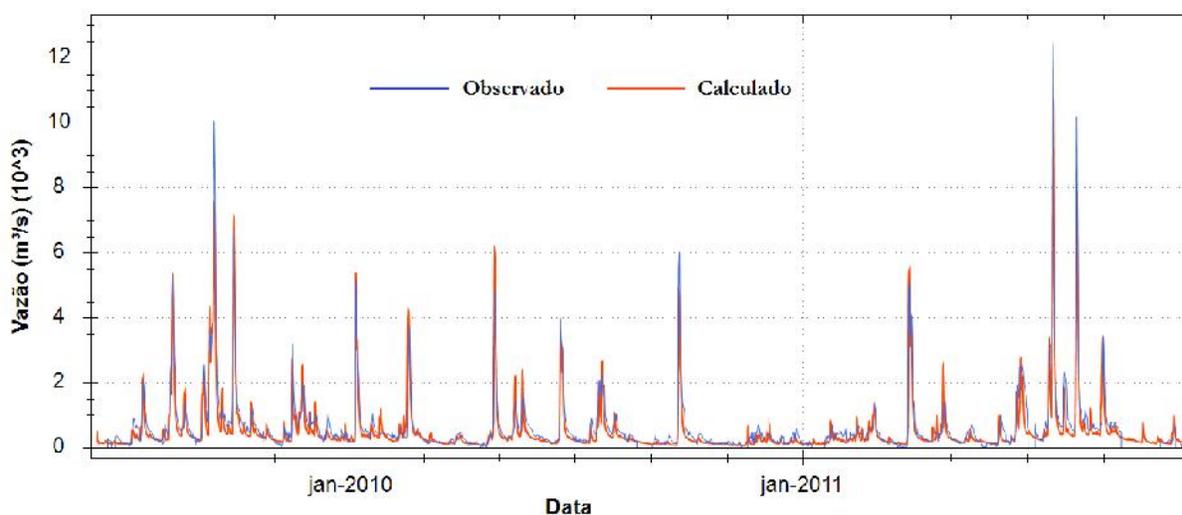
A Figura 31 mostra os hidrogramas observado e calculado do rio Guaporé no posto fluviométrico de Santa Lúcia, cuja área de drenagem deste posto fluviométrico é de 2.470 km<sup>2</sup>. Observa-se que as vazões mais baixas são geralmente intensificadas pelo modelo, enquanto que as vazões mais altas são 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 31 - Resultado final da calibração horária para o posto de Santa Lúcia (86580000), no rio Guaporé, período de junho/2009 a dezembro/2011.**

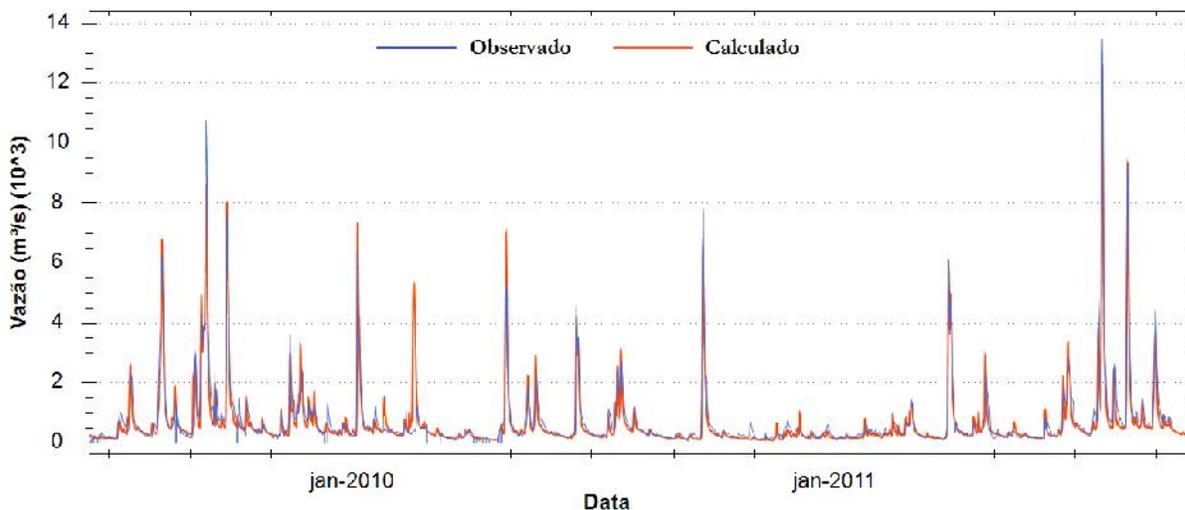


As Figura 32 e Figura 33 apresentam os hidrogramas observado e calculado do rio Taquari nos postos fluviométricos de Muçum e Encantado. A área de drenagem destes postos fluviométricos são de, respectivamente, 16.000 e 19.100 km<sup>2</sup>, cujos valores correspondem por cerca de 60 e 70% da área de 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 32 - Resultado final da calibração horária para o posto de Muçum (86510000), no período de junho/2009 a dezembro/2011.**



**Figura 33 - 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 20.

**Tabela 20 - Índices de eficiência do MGB-IPH para a bacia do Taquari-Antas - período de verificação.**

Código	Nome da Estação	Nash-Sutcliffe	Log Nash-Sutcliffe	V
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%

#### 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.

## **ANÁLISE DE CENÁRIOS**

# **AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE 10 RESERVATÓRIOS PARA CONTROLE DE CHEIA NA BACIA TAQUARI-ANTAS CONSIDERANDO RESTRICÇÕES DA OCUPAÇÃO DA BACIA**

## **PROJETO TAQUARI-ANTAS**

## 5. RESERVATÓRIOS PASSÍVEIS DE IMPLEMENTAÇÃO NA BACIA

Em estudos anteriores do Projeto Taquari-Antas (“Desenvolvimento e apoio à implantação de uma estratégia integrada de prevenção de riscos associados a regimes hidrológicos na Bacia do Taquari-Antas – RS”), foi explorada a ineficiência dos reservatórios existentes hoje na bacia para o controle de cheias. Analisou-se o efeito das usinas do Complexo Energético Rio das Antas (CERAN) instaladas no alto Rio Taquari-Antas, mostrando que estas operam em regime de fio d’água, possuindo pouca capacidade de armazenamento frente aos grandes volumes propagados em grandes cheias.

Assim, os estudos seguintes abordaram cenários em que fossem implementados reservatórios na região com tamanho suficiente para evitar inundações nas regiões de montante. Por exemplo, no plano de desenvolvimento da região de 1972, 14 reservatórios foram propostos, sendo oito destes destinados, entre outros fins, para o controle de cheias. A simulação destes empreendimentos (ver relatório “reservatórios propostos no Programa de Desenvolvimento Integrado da Região Taquari-Antas de 1972”) mostrou que seria possível conter as cheias na bacia, desde que se construísse reservatórios de grande porte. Entretanto, devido à interferência com áreas críticas de preservação, estradas, aglomerados urbanos e outros empreendimentos já existentes, a construção das barragens previstas no Plano de Desenvolvimento de 1972, considerando o cenário atual da bacia, torna-se inviável.

No presente relatório, foram avaliadas as diversas restrições existentes na bacia hoje - barragens existentes, rodovias, unidades de conservação e manchas urbanas -, resultando na alocação de 10 reservatórios cuja atual implementação é possível. Após o posicionamento destes reservatórios, foi realizada a simulação hidrológica a fim de investigar se a construção dos mesmos seria eficiente na redução dos eventos extremos de cheia que ocorrem nas regiões mais baixas da bacia.

## 6. METODOLOGIA

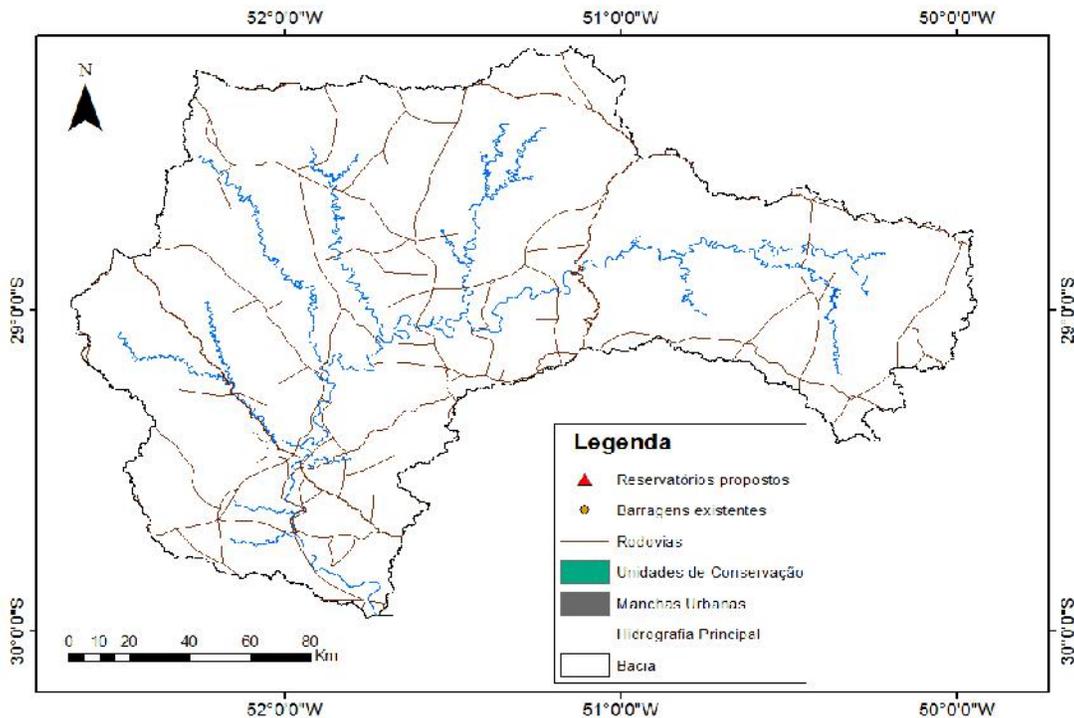
### 6.1. Localização dos reservatórios e mapeamento das restrições existentes

A definição de pontos possíveis de localização de reservatórios normalmente deve obedecer um conjunto de restrições de natureza física. Algumas destas se referem a critérios como infiltração no solo, uso do solo, relação entre volume armazenado e área inundada, bem como altura dos reservatórios, enquanto que outras são chamadas de "restrições absolutas" pois impedem a posicionamento do reservatório em uma área específica. Sendo assim, de acordo com os objetivos do presente estudo, foram selecionadas apenas restrições absolutas, as quais são descritas a seguir:

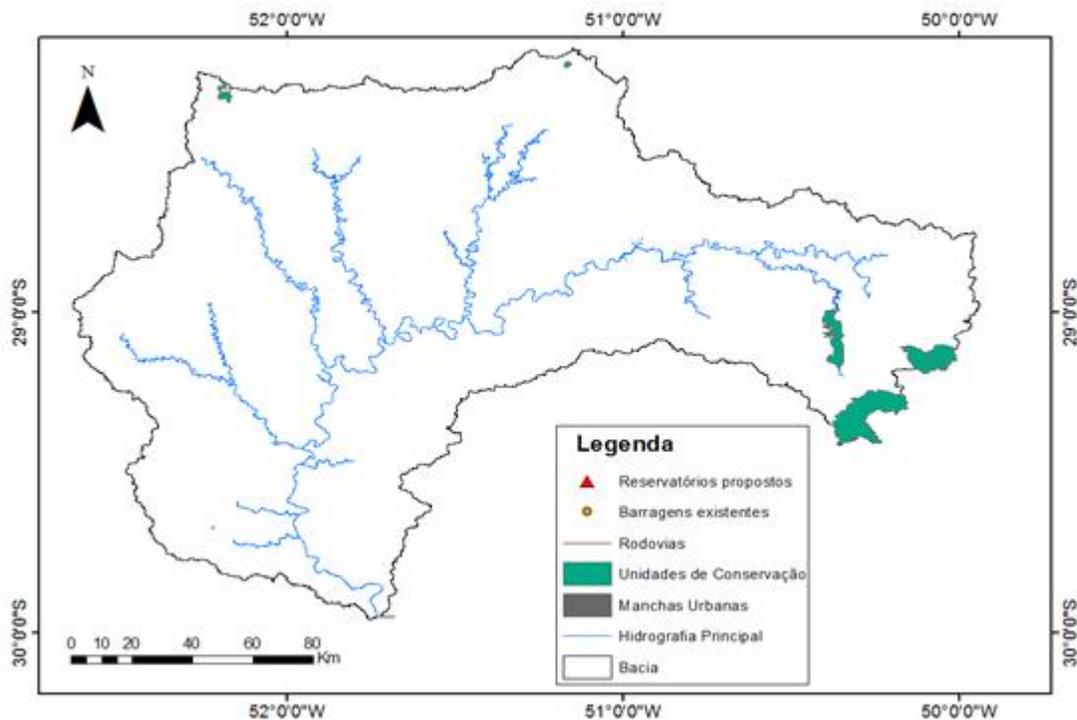
- Rodovias (
  - 
  -
- Figura 34): as estradas compreenderam apenas as rodovias de maior porte, ou seja, Federais (BRs) e Estaduais (RST), não sendo consideradas as pequenas vias municipais sem pavimentação;
- Unidades de conservação (Figura 35): apenas as áreas de conservação pertencentes às esferas Estadual e Federal, dentre as quais estão o Parque Estadual do Tainhas, Parque Nacional Aparados da Serra, Parque Nacional da Serra Geral, Estação Ecológica de Aracuri-Esmeralda e Estação Ecológica Aratinga;
- Manchas urbanas (Figura 36): compreendendo as áreas de concentração urbana nos municípios;
- Barragens existentes (
  - Figura 37): estas incluem as áreas dos reservatórios formados pelas usinas hidrelétricas do CERAN, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e centros de geração hidrelétrica (CGH's);
  - Rios com elevada criticidade ambiental (Figura 38). De acordo com o documento da FEPAM intitulado "Avaliação Ambiental Regional na bacia hidrográfica na bacia do Taquari-Antas, para fins de licenciamento de Empreendimentos Hidrelétricos", as sub-bacias do Guaporé e do Tainhas são representativas de regiões "de Planalto" e "de Encosta", as quais devem ser preservadas como estratégia de conservação da biota aquática e comportamento dos recursos hídricos. Entretanto, assumindo que os descarregadores hidráulicos dos reservatórios para controle de cheias (usualmente dimensionados para passagem de vazões de cerca de TR = 2 anos) são muito maiores do que os de aproveitamento hidrelétrico, ou seja, pouco alteram o regime hídrico, considerou-se para este estudo apenas a restrição do rio Guaporé. Sendo assim, de acordo

com a própria nota técnica, ficaria garantida a manutenção da população dos peixes migradores provenientes da região do Baixo Taquari e que utilizam a rota do rio Guaporé.

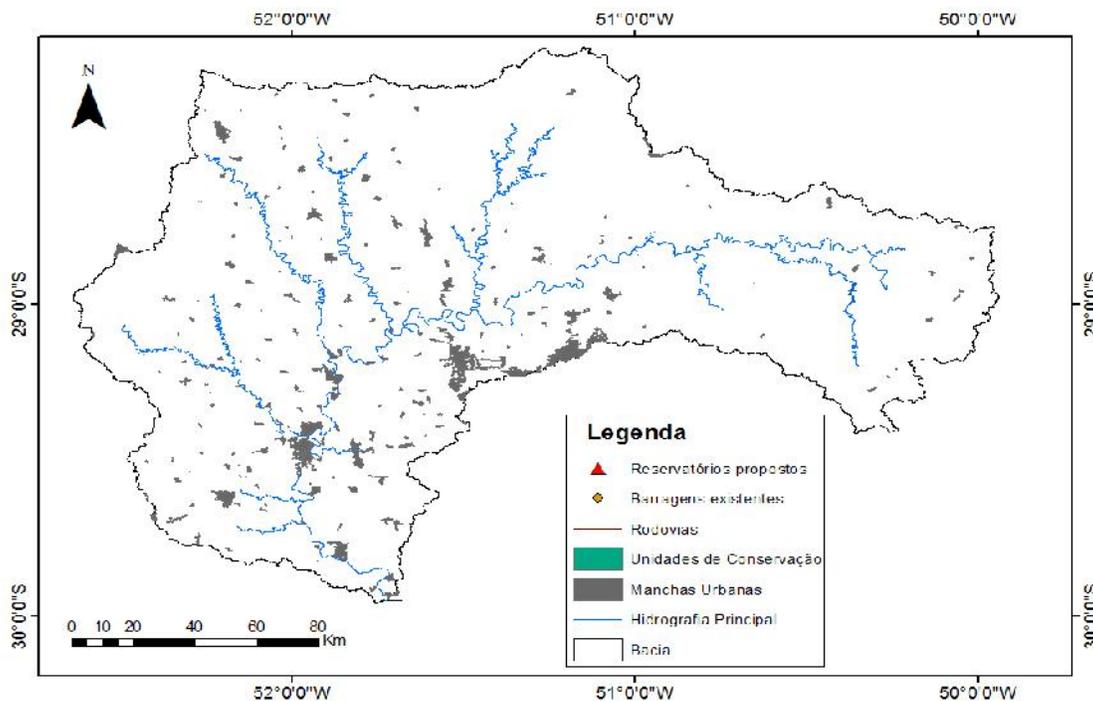
**Figura 34 - Mapa das estradas da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios.**



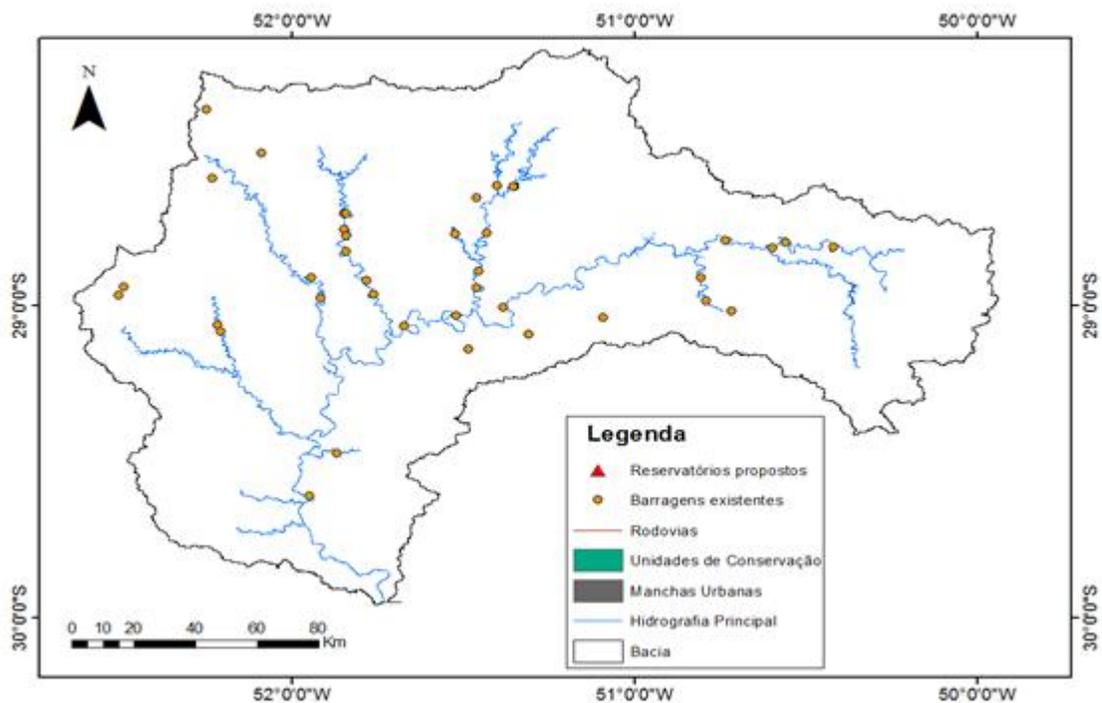
**Figura 35 - Mapa das unidades de conservação da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios.**



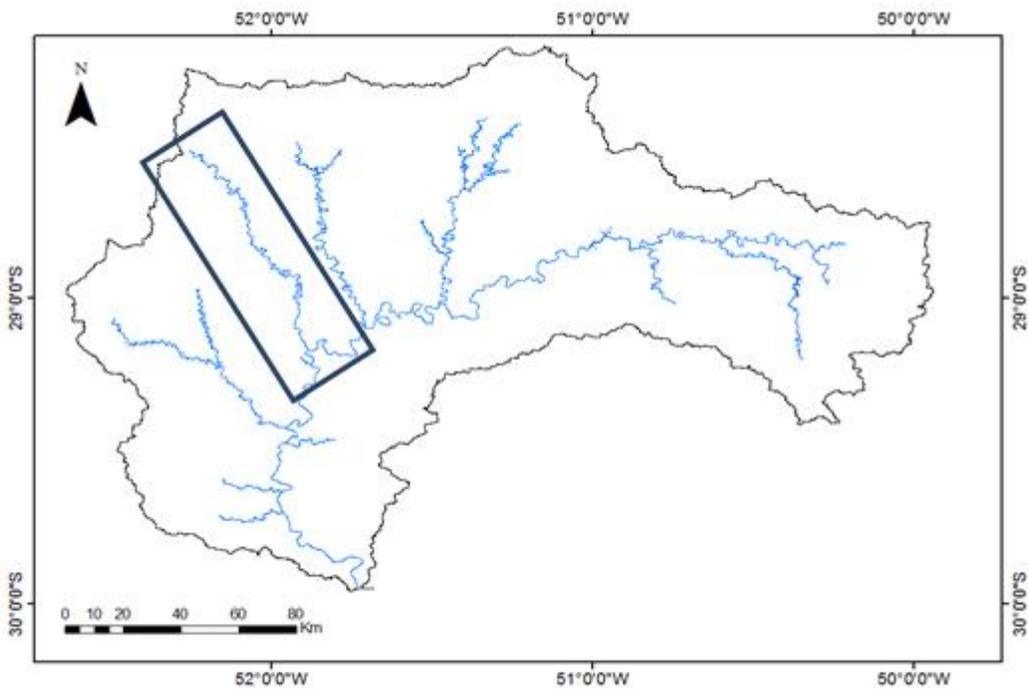
**Figura 36 - Mapa das áreas urbanas da bacia Taquari-Antas consideradas como restrições à implementação de reservatórios.**



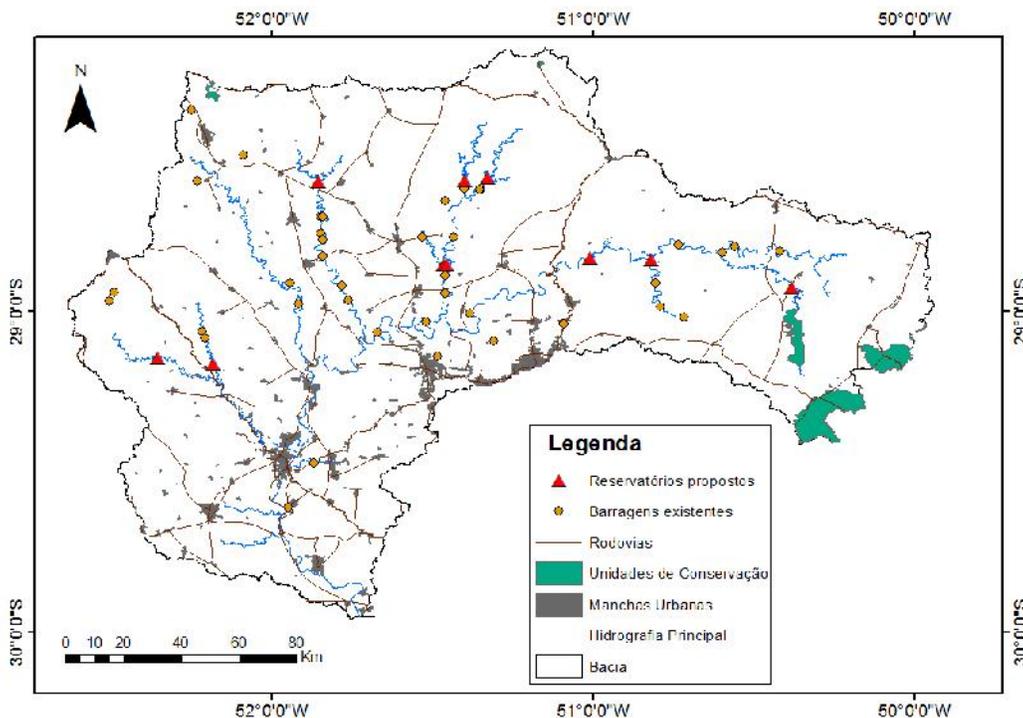
**Figura 37 - Mapa dos aproveitamentos hidrelétricos já existentes na bacia Taquari-Antas e que foram considerados como restrições à implementação de reservatórios.**



**Figura 38 - Localização do Rio Guaporé na bacia Taquari-Antas considerado como restrições à implementação de reservatórios devido a preservação do seu canal natural.**

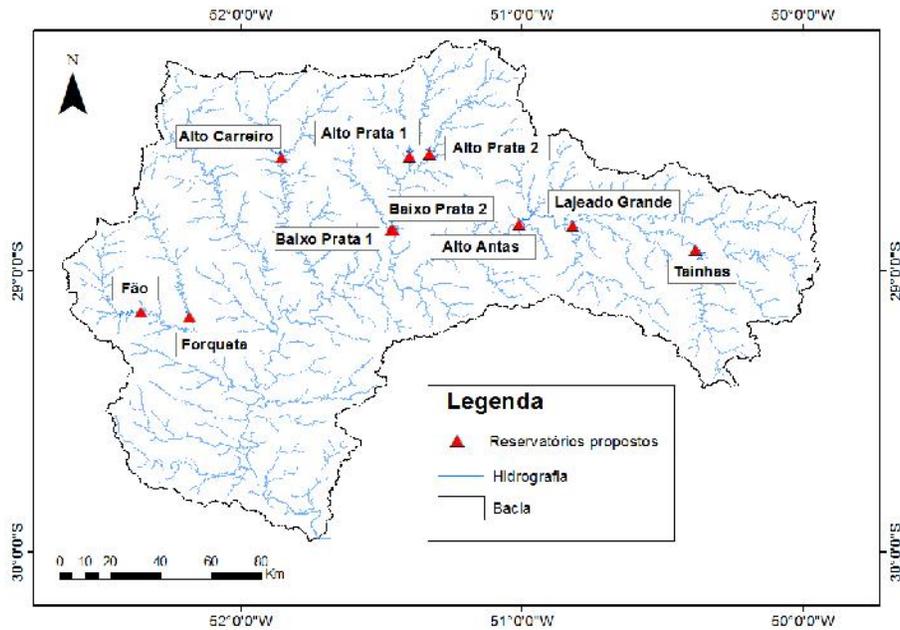


**Figura 39 - Mapa contendo todas as restrições adotadas na localização dos reservatórios.**

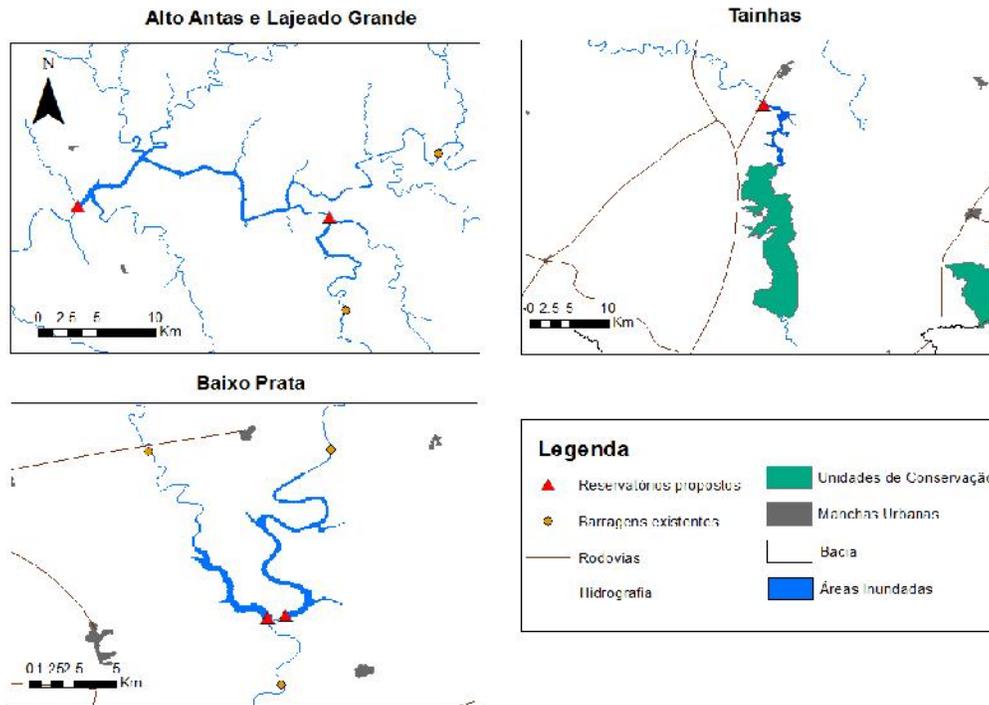


Como resultado da avaliação de todas as restrições adotadas, foi identificada a localização dos 10 reservatórios cuja implementação é possível no cenário atual da bacia (Figura 40). Os empreendimentos propostos estão localizados nos principais afluentes do rio Taquari-Antas, sendo um no rio Fão, um no Forqueta, um no Alto Carreiro, um no Lajeado Grande, um no Tainhas, dois no Baixo Prata e dois no Alto Prata. A Figura 41 apresenta com melhor detalhamento os reservatórios Alto Antas, Lajeado Grande, Baixo Prata e Tainhas, mostrando um exemplo do atendimento das "restrições absolutas". O reservatório no rio Tainhas foi posicionado a montante da RS-439, sendo que a área inundada pelo mesmo praticamente tangencia a unidade de conservação no local. A barragem no rio Lajeado Grande não é afetada pelo reservatório do Alto Antas, enquanto que os lagos dos reservatórios do Baixo Prata não interferem nas barragens existentes nesta sub-bacia.

**Figura 40 - Localização dos reservatórios passíveis de implementação na bacia Taquari-Antas para uso no controle de cheias.**



**Figura 41 - Detalhes dos reservatórios de Alto Antas, Lajeado Grande, Tainhas e Baixo Prata, com as restrições analisadas de barragens existentes, rodovias, unidades de conservação e manchas urbanas.**



## 6.2. Simulação hidrológica

A simulação envolveu a implementação dos 10 reservatórios no modelo hidrológico de simulação contínua MGB-IPH (descrito no Anexo I), seguindo a mesma metodologia apresentada em relatórios anteriores do projeto.

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,  $t$  é o intervalo de tempo (definido em 3600 s),  $Q$  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 evaporação.

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 1 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 ( $t=0 \text{ h}$ ), considera-se que  $I_t = I_{t+1}$  e  $Q_t = I_{t+1}$ , sendo  $I_{t+1}$  a vazão afluente no tempo  $t=1 \text{ h}$ . 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 afluente 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.

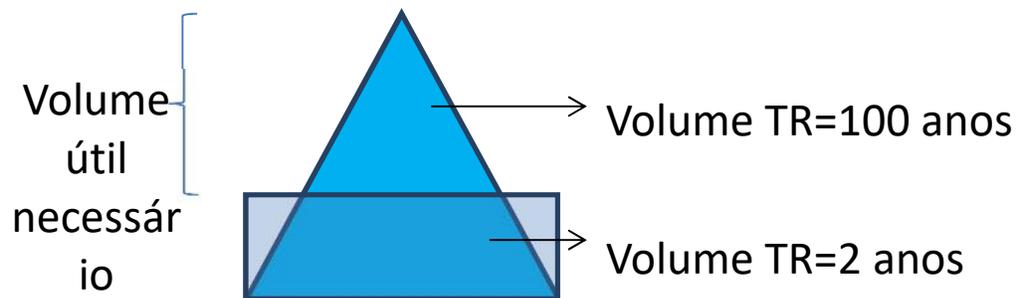
O período simulado foi de Junho/2009 a Dezembro/2014, para o qual se dispunha de dados horários de precipitação observados. Os resultados de vazão foram avaliados (1) para cada barragem, de modo a explorar a capacidade de amortecimento de cheias de cada barragem, e (2) em locais de interesse da bacia, 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.

### 6.3. Características dos reservatórios simulados

No dimensionamento de reservatórios de controle de cheia, um aspecto fundamental é a definição do volume útil que será utilizado para atenuar as cheias da bacia. Para os 10 reservatórios propostos neste projeto, calculou-se o volume que um reservatório deve ter a fim de armazenar o volume de uma cheia de 100 anos de tempo de retorno enquanto libera uma vazão equivalente à cheia com  $TR = 2$  anos. A estratégia adotada seguiu a seguinte metodologia (Figura 42):

- Definição do volume de uma cheia de tempo de retorno de 100 anos para a localização da barragem. O hidrograma de projeto foi estabelecido tendo como pico a vazão máxima de tempo de retorno de 100 anos, um tempo de duração de 7 dias e um formato triangular.
- Definição do volume equivalente à liberação constante de uma cheia de tempo de retorno de 2 anos durante um tempo de 7 dias.
- O volume útil necessário para a barragem foi calculado pela diferença entre os volumes obtidos nos itens 1 e 2.

**Figura 42 - Estratégia para definição do volume útil.**



De posse dos volumes definidos na etapa anterior, obteve-se a curva cota-volume de cada localização e obteve-se a altura necessária da barragem para contemplar o volume necessário para conter uma cheia de 100 anos. As curvas cota-volume foram obtidas através da ferramenta "Stage-Area-Volume" do software IPH-Hydro Tools (disponível em <http://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/iph-hydro-tools/>), a partir do Modelo Digital de Elevação STRM 90 m.

Quanto às estruturas hidráulicas dos reservatórios, adotou-se as seguintes características para cada barragem:

- Descarregador do fundo no fundo da barragem, dimensionado para uma  $Q_{TR=2 \text{ anos}}$ ;
- Vertedor livre na crista da barragem, dimensionado para uma  $Q_{TR=100 \text{ anos}}$ .

Foram adotadas as vazões de tempo de retorno de dois e 100 anos calculadas no presente projeto (ver relatório de caracterização da bacia). A Tabela 21 apresenta as características adotadas para os 10 reservatórios propostos.

**Tabela 21 - Características das barragens simuladas.**

<b>Característica</b>	<b>Fão</b>	<b>Forqueta</b>	<b>Alto Carreiro</b>	<b>Lajeado Grande</b>	<b>Tainhas</b>	<b>Alto Antas</b>	<b>Baixo Prata 1</b>	<b>Baixo Prata 2</b>	<b>Alto Prata 1</b>	<b>Alto Prata 2</b>
Cota fundo (m)	199	115	481	421	691	340	300	514	294	567
Cota crista (m)	241	172	510	494	730	420	363	587	350	612
Altura da barragem (m)	42	57	29	73	39	80	63	73	56	45
Largura da crista da barragem (m)	209	432	369	324	401	452	555	697	479	570
Volume útil (hm <sup>3</sup> )	91	67	84	77	89	325	54	96	89	67
Área inundada (ha)	482	303	768	265	655	1.054	266	451	415	423
Q TR=2 anos	330	280	454	353	374	1.872	218	395	988	270
Cota do descarregador de fundo (m)	201	117	483	423	693	342	302	516	296	569
Área do descarregador de fundo (m <sup>2</sup> )	19	14	32	16	23	79	10	17	50	15
Coefficiente do descarregador de fundo	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Q TR=100 anos	964	818	1.325	1.031	1.092	5.465	635	1.151	2.883	789
Cota vertedor livre (m)	238	169	507	491	727	417	360	584	347	609
Comprimento do vertedor livre (m)	93	79	128	99	105	400	61	111	277	76
Coefficiente do vertedor livre	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

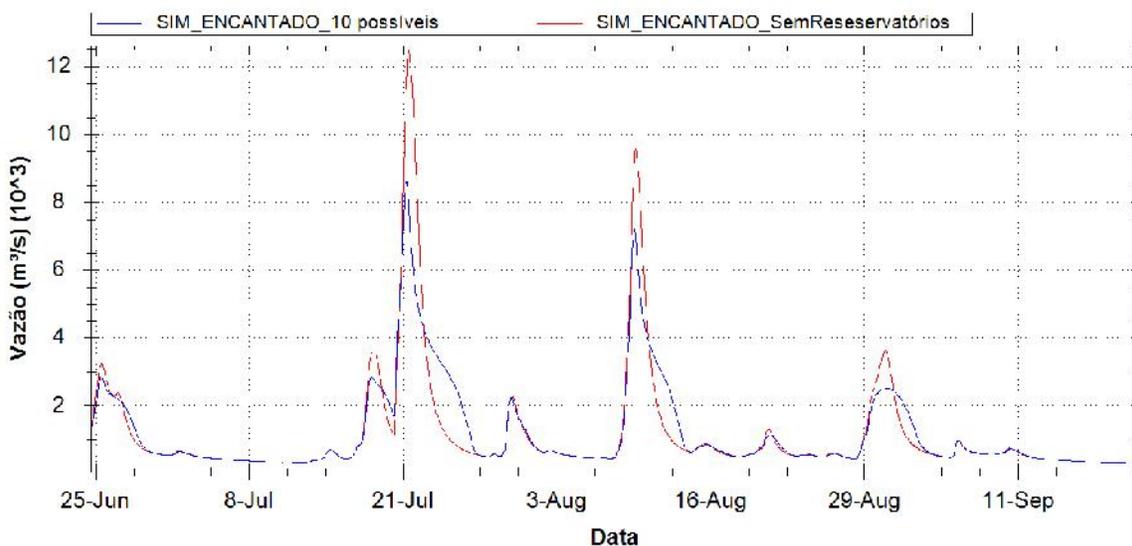
## 6.4. Cenários simulados

Para fins de avaliação dos resultados, foram comparados os cenários com e sem as 10 barragens propostas. O cenário sem as barragens equivale ao cenário atual da bacia, dado que os reservatórios existentes operam a fio d'água e não têm capacidade de amortecimento de cheias.

## 7. RESULTADOS

A Tabela 22, apresenta os resultados referentes à eficiência dos 10 reservatórios para atenuação de algumas cheias ocorridas no período de simulação, considerando a redução dos picos e seu percentual de redução em comparação ao cenário sem reservatórios. A Figura 43 apresenta um exemplo gráfico da eficiência dos reservatórios para Encantado, destacando o hidrograma simulado no período entre julho e agosto de 2011. A partir da introdução dos reservatórios propostos, nota-se uma redução de ~12.000 m<sup>3</sup>/s para 8.500 m<sup>3</sup>/s no evento crítico do dia 21/07, enquanto para o evento de 09/08 esta diminuição foi de 9.000 m<sup>3</sup>/s para cerca de 7.000 m<sup>3</sup>/s. Já nas pequenas elevações a influência começa a ser menor devido ao descarregador de fundo permitir a passagem de uma cheia com TR = 2 anos, o que demonstra pouca alteração do comportamento hidráulico do rio durante o período de estiagem.

**Figura 43 - Hidrograma simulado para Encantado para o período da cheia de 21/07/2011.**



**Tabela 22 - Vazões das cheias nos locais selecionados, para as situações com e sem presença de reservatórios de controle,**

	06/06/2014			09/08/2011			21/07/2011			19/09/2012		
	Afl.	Defl.	Red.									
Fão	205	134	35%	447	204	54%	546	227	58%	677	246	64%
Forqueta	334	176	47%	131	107	18%	210	149	29%	555	217	61%

	06/06/2014			09/08/2011			21/07/2011			19/09/2012		
	Afl.	Defl.	Red.									
Alto Carreiro	249	186	25%	864	352	59%	1049	404	61%	648	315	51%
Baixo Prata1	45	15	67%	347	45	87%	409	42	90%	240	25	90%
Baixo Prata2	92	64	30%	433	102	76%	668	139	79%	284	64	77%
Alto Prata1	465	427	8%	1.022	732	28%	1.278	831	35%	457	430	6%
Alto Prata2	240	44	82%	332	60	82%	422	62	85%	145	26	82%
Alto Antas	2.798	1.500	46%	2.605	1.524	41%	3.741	1.701	55%	1.456	1.136	22%
Lajeado Grande	576	90	84%	466	88	81%	1077	117	89%	235	60	74%
Tainhas	380	112	71%	413	140	66%	814	176	78%	475	134	72%

A Tabela 23 a seguir mostra os resultados em termos de vazão e nível para Encantado, sendo estes últimos obtidos a partir da conversão dos valores de vazão através da curva-chave no local. As cores indicam as cotas de interesse que seriam alcançadas em cada evento, tendo como referência os limiares de atenção, alerta e inundação do Sistema de Alerta Contra Enchentes (SACE) da CPRM.

É possível perceber que não existe uma relação linear da redução do nível entre os eventos de cheia, o que pode ser atribuído à variabilidade espacial da precipitação na bacia aliada ao posicionamento dos reservatórios, cuja eficiência acaba dependendo dos locais onde ocorrem os maiores volumes de chuva. Na ocasião do evento de 19/09/2012, a presença das barragens resultou na menor redução do nível do rio Taquari em Encantado, passando de 11,9 m para 10,8 m. Nos eventos de julho/2014 e agosto/2011 os resultados foram similares, com reduções de nível um pouco acima de 2 m, enquanto que no maior evento, de julho/2011, a redução foi bastante significativa, com diferenças de 4 m em relação ao cenário atual da bacia.

**Tabela 23 - Resultados das simulações com e sem reservatórios em Encantado, em termos de vazão e nível, para os principais eventos do período.**

	06/06/2014		09/08/2011		21/07/2011		19/09/2012	
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
Encantado-Vazão (m <sup>3</sup> /s)	4.349	6.335	7.194	9.297	8.546	12.493	5.674	6.589
Encantado-Nível (m)	9,1	11,6	12,6	14,9	14,1	18,1	10,8	11,9

\*Limiares de referência do Sistema de Alerta Contra Enchentes da CPRM para o posto de Encantado: **Atenção: 5,6; Alerta: 8,7; Inundação: 9,5.**

### 7.1. Avaliação de eventos extremos

As simulações apresentadas nas seções anteriores analisaram o efeito dos reservatórios possíveis de implementação na atenuação das cheias ocorridas no período de Junho/2009 a Dezembro/2014. Neste

intervalo, a maior cheia observada foi a de 21/07/2011, cujo tempo de retorno associado está entre 25 e 50 anos (Tabela 24, 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, multiplicou-se a chuva observada no período do evento de 2011 (entre 07/07/2011 e 07/08/2011) por diferentes fatores, 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 15.492 m<sup>3</sup>/s e 18.457 m<sup>3</sup>/s em 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 Figura 44 e Figura 45 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 10 reservatórios propostos teriam um forte efeito de atenuação das cheias, mesmo durante eventos extremos. Os picos nos cenários com barragens foram 10.537 m<sup>3</sup>/s (1,2) e 12.433 m<sup>3</sup>/s (1,4), e ambos as simulações de vazões extremas (1,2 e 1,4) resultaram em uma redução de cerca de 32 % em relação às simulações sem reservatórios.

**Tabela 24 - 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)	4.954	7.950	9.447	10.945	13.134	14.459	16.015

**Figura 44 - Hidrograma simulado em Encantado para evento extremo com multiplicador 1.2.**

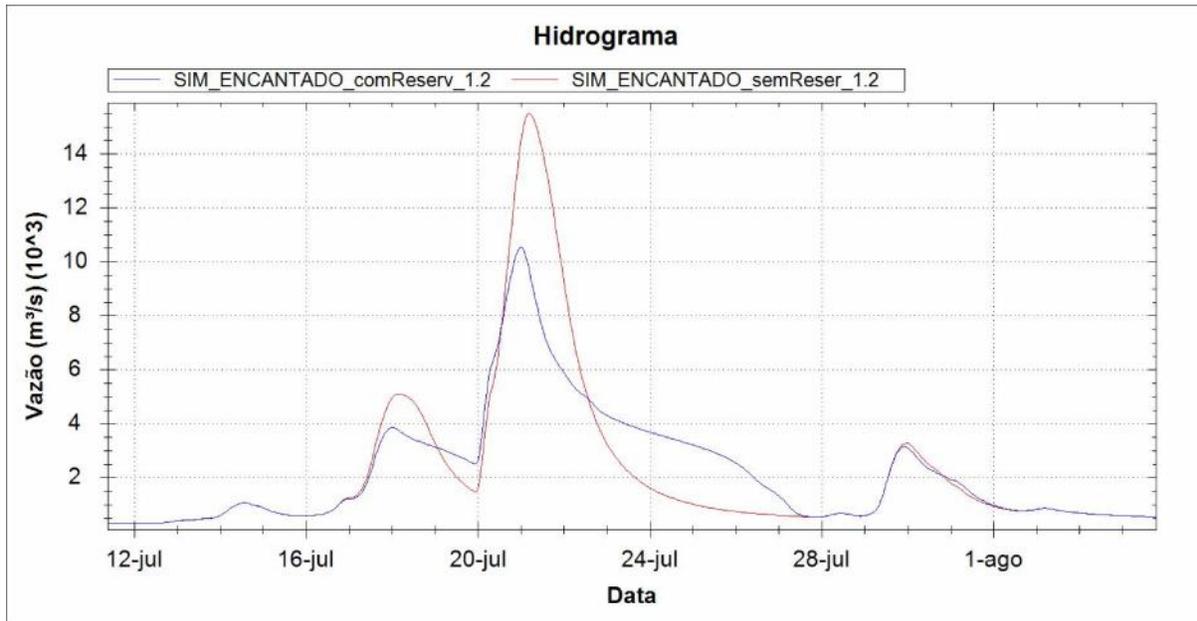
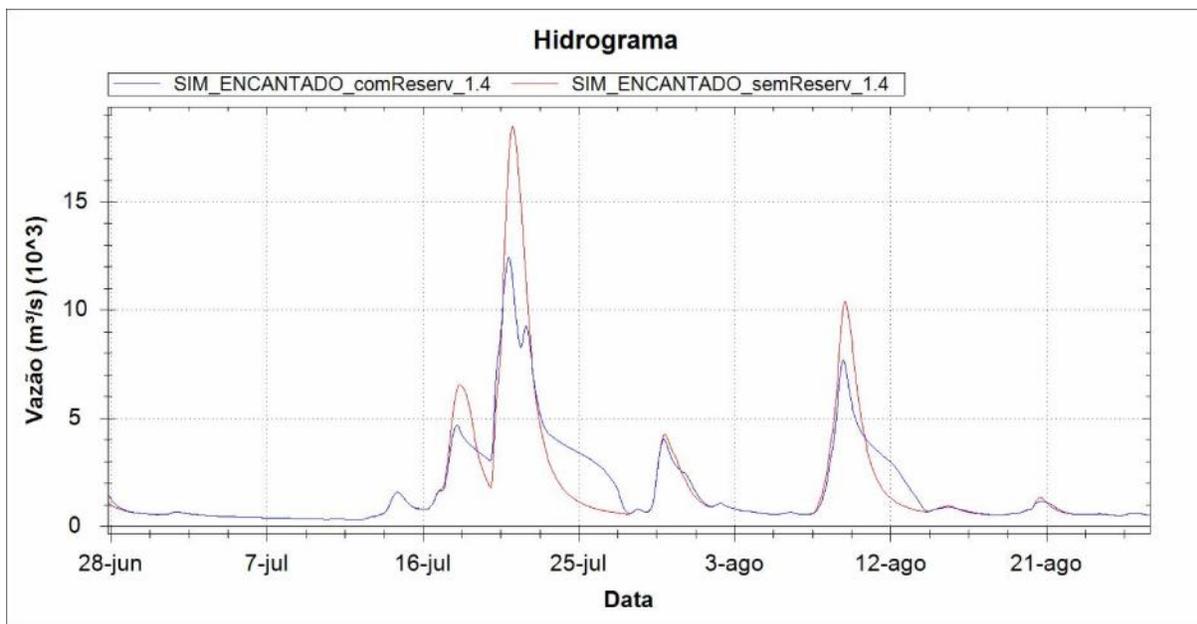


Figura 45 - Hidrograma simulado em Encantado para evento extremo com multiplicador 1.4.



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório foi avaliada a proposta de implementação de 10 reservatórios na bacia do Taquari-Antas, respeitando as restrições físicas para o seu posicionamento. Os resultados foram obtidos a partir da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH, com análise da afluência e defluência em cada barramento proposto.

Foi verificado que os 10 barramentos poderiam reduzir o nível do rio Taquari, em Encantado, entre 1 e 4 m para as cheias ocorridas entre 2011 e 2014. Entretanto, estes resultados estão sujeitos a incertezas, já que a curva-chave do posto de Encantado é extrapolada para as vazões mais altas.

Além disso, cabe salientar ainda que estes reservatórios para controle de cheias não ocasionam inundação permanente da área à montante dos mesmos, já que as estruturas hidráulicas são dimensionadas para permitir a passagem de uma pequena cheia. Desta forma, estas áreas, que devem ser desapropriadas, estão sujeitas à ocupação irregular e podem oferecer um elevado risco aos ocupantes, se não forem devidamente fiscalizadas.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO, F. S. (2006) **Localização de reservatórios através de técnicas de geoprocessamento: estudo de caso na bacia do rio Coruripe, em Alagoas.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.