



— **MANUAL** **ORIENTATIVO** DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS DO VALE DO ITAJAÍ

1.ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS	3
1.1 NÍVEIS HIDRÁULICOS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS	4
1.1.1 Barragem Sul	4
1.1.2 Barragem Oeste – Taió.....	4
1.1.3 Barragem Norte – José Boiteux.....	5
2.REGISTROS DE OPERAÇÃO	5
3.NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA RESTRIÇÕES OPERATIVAS DE JUSANTE.....	6
3.1 RIO DO SUL	6
3.2 ITUPORANGA.....	7
3.3 TAIÓ	7
3.4 RIO DO OESTE	8
3.5 BLUMENAU	8
3.6 ARROZEIRAS	9
4.PROCEDIMENTO DE ENCHIMENTO DOS RESERVATÓRIOS	10
4.1 BARRAGEM SUL - ITUPORANGA.....	10
4.1.1Taxa de Enchimento do Reservatório	12
4.1.2Operação dos Dispositivos de Descarga.....	13
4.2BARRAGEM OESTE - TAIÓ	14
4.2.1Taxa de Enchimento do Reservatório	17
4.2.2Operação dos Dispositivos de Descarga.....	17
4.3BARRAGEM NORTE - JOSÉ BOITEUX	19
4.3.1Taxa de Enchimento do Reservatório	20
4.3.2Operação dos Dispositivos de Descarga.....	21
4.4RESUMO DOS PROCEDIMENTOS DE ENCHIMENTO DOS RESERVATÓRIOS	
22	
5.PROCEDIMENTO DE Esvaziamento	24
5.1 BARRAGEM SUL - ITUPORANGA.....	24
5.1.1Taxa de Esvaziamento do Reservatório	25
5.1.2Operação das Comportas.....	26
5.2 BARRAGEM OESTE - TAIÓ.....	28

5.2.1Taxa de Esvaziamento do Reservatório.....	29
5.2.2Operação das Comportas.....	30
5.3BARRAGEM NORTE – JOSÉ BOITEUX.....	31
5.3.1Taxa de Esvaziamento do Reservatório.....	32
5.3.2 Operação dos Dispositivos de Descarga.....	33
6.PROCEDIMENTO DE ESVAZIAMENTO EXCEPCIONAL EM EVENTOS ADVERSOS...34	
7.PROCEDIMENTOS EM INTERCORRÊNCIAS OPERACIONAIS.....	35
7.1 BARRAGEM SUL – ITUPORANGA.....	35
7.2BARRAGEM OESTE - TAIÓ.....	35
7.3BARRAGEM NORTE - JOSÉ BOITEUX.....	35
8.LIMITAÇÕES OPERACIONAIS DAS BARRAGENS SUL E OESTE.....	36
8.1 MEDIDAS E AÇÕES EM CASO DE APENAS UM RESERVATÓRIO OPERACIONALMENTE DISPONÍVEL.....	36
8.2CONSIDERAÇÕES.....	38
9.TEMPOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS.....	39
9.1INFLUÊNCIA DA ALTURA INCREMENTAL À JUSANTE NOS PROCEDIMENTOS DE ESVAZIAMENTO – BARRAGENS SUL E OESTE.....	39
10.RESUMO DAS REGRAS DE OPERAÇÃO.....	44
11.FLUXO DE COMUNICAÇÃO.....	45
12.INSPEÇÃO DAS BARRAGENS PÓS-EVENTO.....	47
13.ROTINAS PARA DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE SEGURANÇA.....	47
ANEXO A – Configurações para o caso de uma comporta indisponível na Barragem Sul – Ituporanga.....	48
ANEXO B – Configurações para o caso de uma comporta indisponível na Barragem Oeste - Taió.....	50

1. ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS

As barragens de contenção de cheias do Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, ficam localizadas na região do Alto Vale, e são identificadas como barragens Norte, Sul e Oeste, sendo elas pertencentes aos municípios de José Boiteux, Ituporanga e Taió, respectivamente. Na Figura 1, é apresentada a localização das três barragens, dando destaque à área de contribuição até o eixo dos barramentos.

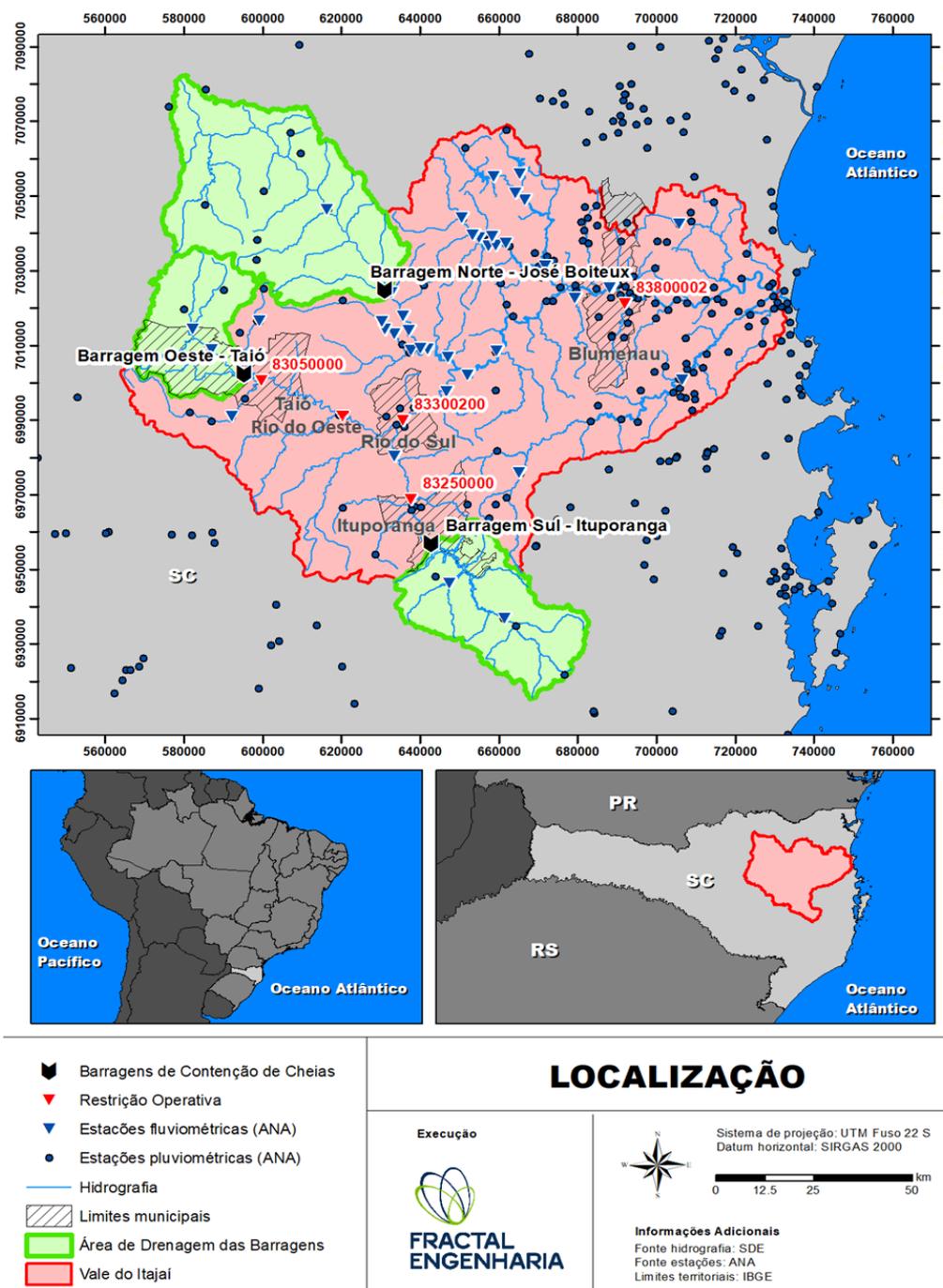


Figura 1. Mapa de localização da bacia do rio Itajaí-Açu, das barragens de contenção de cheia

De acordo com criticidade com que os eventos influenciam nos municípios localizados à jusante das barragens de contenção de cheias, foram definidas restrições operativas de jusante, a fim de controlar as operações dos reservatórios de forma integral e como forma de monitorar os

pontos prioritários. Os limiares definidos para cada restrição operativa e os respectivos pontos de monitoramento estão detalhados no item 3 deste documento e respeitam a seguinte definição:

- **Restrições Operativas de Jusante da Barragem Sul:** Ituporanga e Rio do Sul;
- **Restrições Operativas de Jusante da Barragem Oeste:** Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul;
- **Restrições Operativas de Jusante da Barragem Norte:** Blumenau.

O gerenciamento dos reservatórios deve ser realizado respeitando os níveis de referência associados à cada barragem (vide Fichas Técnicas inclusas no Volume I deste documento), bem como os estados hidráulicos designados para cada referencial. O Item 1.1, apresenta os níveis hidráulicos de operação de cada reservatório de contenção de cheias do Vale do Itajaí, com seus respectivos volumes correspondentes.

1.1 NÍVEIS HIDRÁULICOS DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

Os níveis hidráulicos de operação dos reservatórios auxiliam o monitoramento do estado hidráulico durante os procedimentos operacionais. A partir desses níveis, é possível identificar a capacidade de armazenamento disponível, bem como as condições de vertimento. O estado hidráulico do reservatório é determinado pelas variáveis nível e volume. A seguir, são apresentados os níveis de controle operacional dos reservatórios das barragens Sul, Oeste e Norte, respectivamente.

1.1.1 Barragem Sul

Tabela 1. Níveis Hidráulicos de Operação do Reservatório da Barragem Sul - Ituporanga

Situação	Limite inferior (m-IBGE)	Limite superior (cota m)	Volume (lim. sup. - hm ³)	Volume (%)
Normal	0	385	6,93	6,7
Atenção	385	400	94,10	90,5
Emergência	400	-	-	-

1.1.2 Barragem Oeste – Taió

Tabela 2. Níveis Hidráulicos de Operação do Reservatório da Barragem Oeste - Taió

Situação	Limite inferior (m-IBGE)	Limite superior (cota m)	Volume (lim. sup. hm ³)	% Volume
Normal	0	350,40	13,29	13,29%
Atenção	350,40	361,30	90,89	90,93%
Emergência	361,30	-	-	-

1.1.3 Barragem Norte – José Boiteux

Tabela 3. Níveis Hidráulicos de Operação do Reservatório da Barragem Norte - José Boiteux

Situação	Limite inferior (m-IBGE)	Limite superior (cota m)	Volume (lim. sup. hm ³)	% Volume
Normal	0	272,0	36,78	15,85%
Atenção	272,0	300,7	300,10	92,04%
Emergência	300,7	> 300,7	-	-

2. REGISTROS DE OPERAÇÃO

A escala de leitura das réguas e monitoramento do estado hidráulico dos reservatórios em condições não operacionais, ou seja, quando todas as comportas estão abertas e o estado hidráulico de operação do reservatório está em condição “Normal”, deve-se seguir o padrão de registros às 7 e às 17 horas. Em condições operacionais destinadas à contenção de cheias ou quando o estado operativo se encontra fora da normalidade, deve-se seguir o padrão de registros previsto no Quadro 1.

Quadro 1. Escala de monitoramento do nível d'água dos reservatórios das Barragens de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí.

Nível de segurança do reservatório	Condições de Enchimento	Condições de Esvaziamento
Normal	Registro as 7h e 17h	Registro as 7h e 17h
Atenção	Registro a cada 3 horas	Registro a cada 3 horas
Emergência	Registro hora a hora	Registro hora a hora

Atualmente, para as barragens Sul e Oeste, quando os reservatórios atingem as cotas de 388,00 m e 346,00 m, respectivamente, o registro do nível dos reservatórios passa a ser realizado de hora a hora de forma automática. Os registros são feitos através de automações cadastradas no sistema RESOP e das leituras realizadas nas estações telemétricas de monitoramento da SDC. Dessa forma, os registros de cota (NAR) passam a ser computados automaticamente com base nas medições quando:

- **Barragem Sul:** Estação SDC Barragem Sul Ituporanga – 00038 atinge a cota de 388m;
- **Barragem Oeste:** Estação SDC Barragem Oeste Taió – 00040 atinge a cota de 346m.

A frequência de monitoramento pode ser alterada, tanto para maior como para menor intervalo de tempo, pela Gerência de Monitoramento e Alertas (GEMAL), conforme análises de severidade do evento e/ou quando identificada a necessidade de informações mais detalhadas para o cálculo de Balanço Hídrico.

3. NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA RESTRIÇÕES OPERATIVAS DE JUSANTE

3.1 RIO DO SUL

As Barragens Sul - Ituporanga e Oeste -Taió operam, com prioridade, para os níveis de referência de inundação em Rio do Sul, considerado o ponto mais crítico na bacia do Rio Itajaí. Dessa maneira, a seção de controle principal é Rio do Sul e o monitoramento prioritário deve ser focado nos níveis de referência do município.

Os níveis de referência para inundação do município de Rio do Sul, obtidos por estudos hidráulicos-hidrológicos¹ e validados junto ao município, são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Níveis de Referência para Inundação – Rio do Sul.

SITUAÇÃO PARA INUNDAÇÃO	REFERÊNCIA
Normal	Nível do rio <u>abaixo</u> de 4,50 m
Atenção	Nível do rio <u>acima</u> de 4,50 m
Alerta	Nível do rio <u>acima</u> de 5,50 m
Emergência	Nível do rio <u>acima</u> de 6,50 m

O monitoramento do nível do Rio Itajaí-Açu, em Rio do Sul, e o estabelecimento da situação de inundação devem ser realizados, oficialmente, através da estação fluviométrica SDC Rio do Sul - 00013, sob responsabilidade da SDC e operada pela MKS Sistemas. Como alternativa, a estação Rio do Sul - Novo (83300200), de responsabilidade da ANA e operada pela Epagri, também pode ser consultada.

Os dados podem ser obtidos nos canais de monitoramento: ferramentas de Hidrologia em Tempo Real do SIG²A-SPEHC² ou “Gestor PCD”³ da ANA.

Em caso de falha de monitoramento nas estações citadas, a Defesa Civil de Rio do Sul possui estação fluviométrica própria, localizada na Ponte Dom Tito Buss, cujos dados telemétricos⁴ e convencionais⁵ estão disponíveis no site da prefeitura do município.

Em situações em que não há informação sobre a seção de controle de Rio do Sul OU se a inundação se iniciar nos municípios imediatamente abaixo das barragens de contenção – sendo eles Taió, Rio do Oeste e Ituporanga, a restrição prioritária se torna estes municípios. Sendo assim, as seções de controle devem ser adequadas e monitoradas conforme os níveis de referência destacados nos Itens 3.2, 3.3 e 2.4 a seguir.

1 Documentos: 361-SDC-RT-003.4, 361-SDC-RT-EHI-008.4 e 361-RT-SDC-LCH-009.4

2 <https://siga.fractaleng.com.br/#!/spehc>

3 <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>

4 <http://telemetria.riodosul.sc.gov.br/home>

5 <https://defesacivil.riodosul.sc.gov.br/index.php?r=externo%2Fmetragem>

3.2 ITUPORANGA

Os níveis de referência para inundação do município de Ituporanga, obtidos por estudos hidráulicos-hidrológicos⁶ e validados junto ao município, são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Níveis de Referência para Inundação – Ituporanga.

SITUAÇÃO PARA INUNDAÇÃO	REFERÊNCIA
Normal	Nível do rio <u>abaixo</u> de 1,4 m
Atenção	Nível do rio <u>acima</u> de 1,4 m
Alerta	Nível do rio <u>acima</u> de 1,9 m
Emergência	Nível do rio <u>acima</u> de 2,6 m

O monitoramento do nível do rio em Ituporanga e o estabelecimento da situação de inundação devem ser realizados, oficialmente, através da estação fluviométrica 83250000-Ituporanga, sob responsabilidade da ANA e operada pela EPAGRI.

Os dados podem ser obtidos nos canais de monitoramento: ferramentas de Hidrologia em Tempo Real do SIG²A-SPEHC⁷ ou “Gestor PCD”⁸ da ANA.

3.3 TAIÓ

Os níveis de referência para inundação do município de Taió, obtidos através de estudos hidráulicos-hidrológicos⁹ e validados junto ao município, são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Níveis de Referência para Inundação – Taió.

SITUAÇÃO PARA INUNDAÇÃO	REFERÊNCIA
Normal	Nível do rio <u>abaixo</u> de 5 m
Atenção	Nível do rio <u>acima</u> de 5 m
Alerta	Nível do rio <u>acima</u> de 7 m
Emergência	Nível do rio <u>acima</u> de 8 m

O monitoramento do nível do rio na seção de controle de Taió e o estabelecimento da situação de inundação devem ser realizados, oficialmente, através da estação fluviométrica SDC Taió – 00041, sob responsabilidade da SDC e operada pela MKS Sistemas. Como alternativa, a estação Taió (83050000), sob responsabilidade da ANA e operada pela EPAGRI, também pode ser consultada.

Os dados podem ser obtidos nos canais de monitoramento: ferramentas de Hidrologia em Tempo Real do SIG²A-SPEHC¹⁰ ou “Gestor PCD”¹¹ da ANA.

6 Documentos: 361-SDC-RT-003.5, 361-SDC-RT-EHI-008.5 e 361-RT-SDC-LCH-009.5

7 <https://siga.fractaleng.com.br/#!/spehc>

8 <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>

9 Documentos: 361-SDC-RT-003.6, 361-SDC-RT-EHI-008.6 e 361-RT-SDC-LCH-009.6

10 <https://siga.fractaleng.com.br/#!/spehc>

11 <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>

3.4 RIO DO OESTE

Os níveis de referência para inundação do município de Rio do Oeste foram obtidos junto ao município, e são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5. Níveis de referência para inundação – Rio do Oeste.

SITUAÇÃO PARA INUNDAÇÃO	REFERÊNCIA
Normal	Nível do rio <u>abaixo</u> de 5 m
Atenção	Nível do rio <u>acima</u> de 5 m
Alerta	Nível do rio <u>acima</u> de 6,5 m
Emergência	Nível do rio <u>acima</u> de 7,4 m

O monitoramento do nível em Rio do Oeste e o estabelecimento da situação de inundação devem ser realizados, oficialmente, através da estação fluviométrica SDC Rio do Oeste – 00022, sob responsabilidade da SDC e operada pela MKS Sistemas. Como alternativa, a estação UHE Salto Pilão Rio do Oeste (83059000), sob responsabilidade da ANA e operada pelo Consórcio CESAP, pode ser consultada.

Os dados podem ser obtidos nos canais de monitoramento: ferramentas de Hidrologia em Tempo Real do SIG²A-SPEHC¹² ou “Gestor PCD”¹³ da ANA. Em caso de falha nas estações mencionadas, o município possui régua própria onde são realizadas leituras diárias, cuja informação se encontra no site da Defesa Civil do município¹⁴.

3.5 BLUMENAU

Por ser o segundo ponto de restrição mais sensível na bacia do Rio Itajaí, depois de Rio do Sul, o município de Blumenau é considerado como prioridade de operação da Barragem Norte – José Boiteux. Dessa maneira, os níveis de referência do município de Blumenau que condicionam o momento de abertura e fechamento das comportas.

Os níveis de referência para inundação do município de Blumenau, obtidos através de estudos hidráulicos-hidrológicos¹⁵ e validados junto ao município, são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6. Níveis de Referência para Inundação – Blumenau.

SITUAÇÃO PARA INUNDAÇÃO	REFERÊNCIA
Normal	Nível do rio <u>abaixo</u> de 4 m
Atenção	Nível do rio <u>acima</u> de 4 m
Alerta	Nível do rio <u>acima</u> de 6 m
Emergência	Nível do rio <u>acima</u> de 8 m

12 <https://siga.fractaleng.com.br/#!/spehc>

13 <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>

14 <https://riodoeste.com/compdec/?id=niveis>

15 Documentos: 361-SDC-RT-003.4, 361-SDC-RT-EHI-008.4 e 361-RT-SDC-LCH-009.4

O monitoramento do nível do rio em Blumenau e o estabelecimento da situação de inundação devem ser realizados, oficialmente, através da estação telemétrica DC Blumenau - Ponte Adolfo Konder - DC-BNU-001, sob responsabilidade da DC Blumenau e transmitida pela MKS Sistemas. Adicionalmente, quando houver transmissão de dados, a estação Blumenau (PCD) (83800002), localizada na ponte Adolfo Konder, sob responsabilidade da ANA e operada pela EPAGRI, pode ser utilizada como alternativa para monitoramento do nível do rio Itajaí-Açu.

Os dados podem ser obtidos nos canais de monitoramento: ferramentas de Hidrologia em Tempo Real do SIG²A-SPEHC¹⁶, “Gestor PCD”¹⁷ da ANA ou pelo AlertaBlu¹⁸.

3.6 ARROZEIRAS

Devido ao plantio das arrozeiras no município de Taió e localidades a jusante, há períodos em que a manobra de fechamento das comportas da barragem Oeste é necessária para que seja evitada a inundação desses espaços.

O período de plantio ocorre entre agosto e novembro, a floração entre dezembro e março e a colheita entre janeiro e maio. Nessa condição, a solicitação do fechamento das comportas precisa ser alinhada com o município de Taió quando o nível do rio atingir 5m ($\geq 5m$) ou com o município de Rio do Oeste quando o nível do rio atingir 5,5m ($\geq 5,5m$).

4. PROCEDIMENTO DE ENCHIMENTO DOS RESERVATÓRIOS

4.1 BARRAGEM SUL - ITUPORANGA¹⁹

Em condição “Normal” na seção de controle de Rio do Sul, deve-se manter as 5 comportas abertas para permitir a defluência adequada.

Quando o nível atingir o estado de “Atenção” (nível \geq a 4,50 m), avaliar as seguintes condições:

1. Há tendência de subida do nível do rio nas últimas horas?
2. Acumulado de chuva observada na bacia nas últimas 24 horas é ≥ 30 mm?
3. Previsão de chuva na região para as próximas 24 horas ≥ 30 mm?

Caso mais de uma resposta seja “NÃO”, devem ser mantidas as 5 comportas abertas.

Caso mais de uma resposta seja “SIM”, todas as comportas devem ser fechadas e mantido o monitoramento.

Em situação de “Alerta” ou “Emergência”, todas as 5 comportas devem ser fechadas, independentemente da chuva prevista.

16 <https://siga.fractaleng.com.br/#!/spehc>

17 <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>

18 <http://alertablu.cob.sc.gov.br/d/nivel-do-rio>

19 **Restrições Operativas de Jusante – Barragem Sul: Rio do Sul (prioritária) e Ituporanga**

A Figura 2 apresenta um fluxograma para tomada de decisão para o fechamento das comportas das galerias de descarga²⁰.

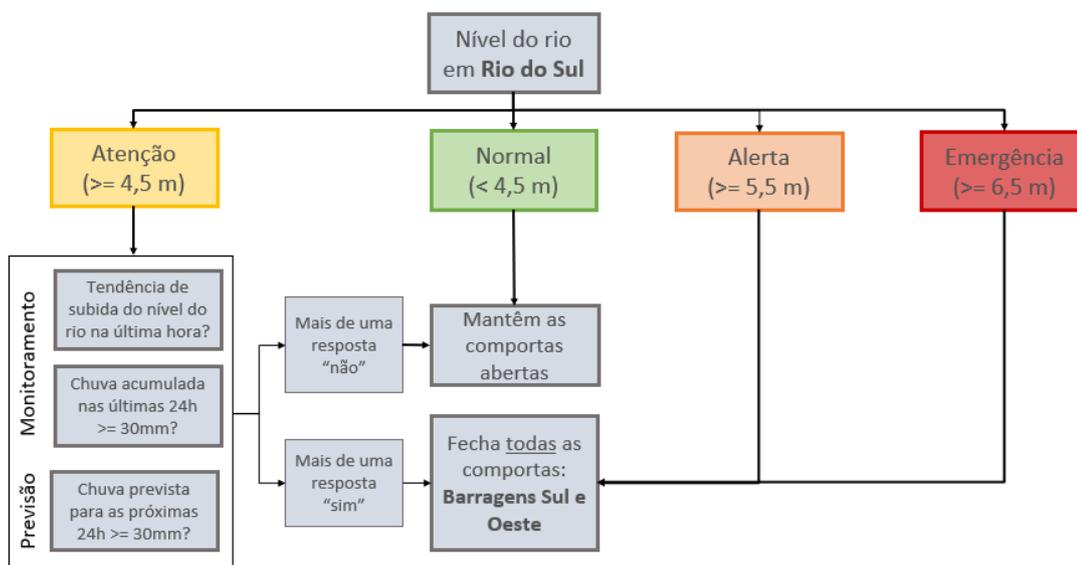


Figura 2. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Sul considerando a restrição operativa em Rio do Sul.

Na ausência de informações da seção de Rio do Sul ou se a inundação ocorrer primeiro em Ituporanga, deve ser seguido o fluxograma para Ituporanga (Figura 3).

Em situação “Normal” ou “Atenção” (Quadro 3) em Ituporanga, as 5 comportas devem permanecer abertas.

Ao atingir a situação de “Alerta” (nível $\geq 1,9$ m), observar:

1. Há tendência de subida do nível do rio nas últimas horas?
2. Acumulado de chuva nas últimas 24 horas ≥ 30 mm?
3. Previsão de chuva para as próximas 24 horas ≥ 30 mm?

Caso mais de uma resposta seja “NÃO”, manter as 5 comportas abertas.

Caso mais de uma resposta seja “SIM”, fechar todas as 5 comportas e continuar o monitoramento.

Em situação de “Emergência”, fechar todas as 5 comportas, independentemente da chuva prevista. Visualize a Figura 3 para orientação visual.

²⁰ A presente versão do manual de operação da Barragem Sul não contempla o acionamento da comporta do túnel lateral. Para consultar as operações técnicas a respeito dos túneis, consultar IT N° 043/DIGR/2024, inclusa no apêndice - 602-SDC-RT-HI-D-APE-003-3.

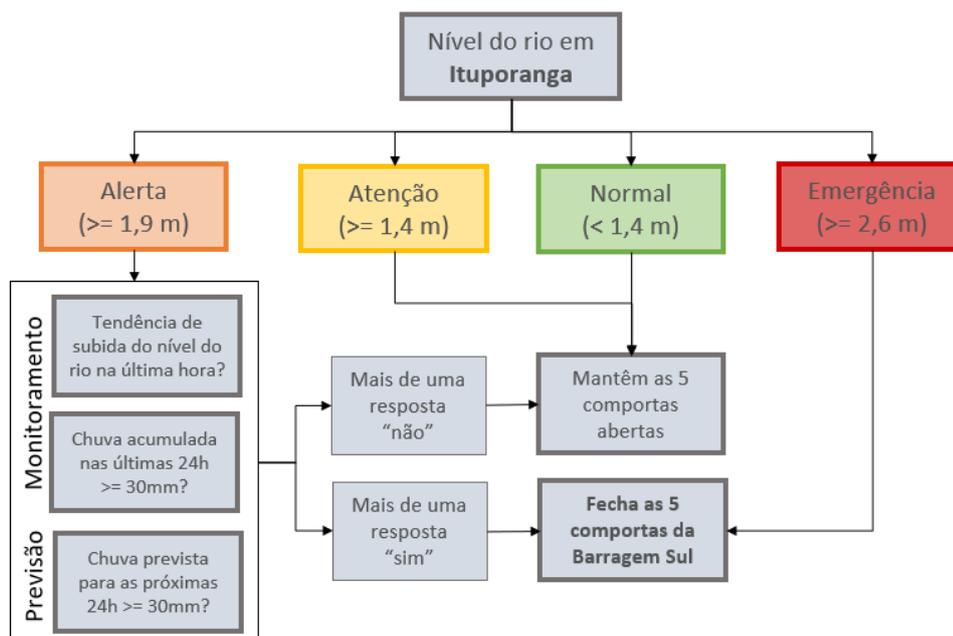


Figura 3. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Sul considerando a restrição operativa em Ituporanga.

Quando identificada a necessidade de operação da barragem para contenção de cheia, considerando como restrição Rio do Sul ou Ituporanga, declara-se “Abertura de Situação” dando início à Operação de Enchimento e ao preenchimento do Formulário de Operação²¹.

O monitoramento nas seções de controle em Rio de Sul e Ituporanga (níveis e vazões) e nas bacias hidrográficas (precipitação) deve ser realizado continuamente. Se o acumulado de chuva persistir e a capacidade de acumulação for superada, o excedente do volume deverá ser vertido apenas pelo vertedouro.

4.1.1 Taxa de Enchimento do Reservatório

Durante o processo de enchimento do reservatório, deve-se acompanhar o acumulado de precipitação dos últimos 4 dias (96 horas) e a taxa de enchimento do reservatório, que é calculada através da chuva de projeto da bacia. Tais informações são indicativas do nível de criticidade do evento e auxiliam na interpretação do comportamento do armazenamento d’água no reservatório.

As análises e monitoramento das condições podem ser acompanhados através do RESOP, software que realiza o balanço hídrico dos reservatórios. Na Tabela 4 estão representadas as taxas máximas de enchimento do reservatório em função da chuva de projeto de 4 dias.

Tabela 4. Variação da taxa de enchimento do reservatório da Barragem Sul em função da chuva de projeto.

Período de retorno (TR) [anos]	Chuva acumulada em 4 dias [mm]	Taxa Máxima [m/h]
2	105	0,17
5	173	0,17
10	208	0,26
20	243	0,33
25	265	0,37
50	293	0,41
80	320	0,44
100	333	0,45
150	357	0,50
200	375	0,51

O acompanhamento da taxa de enchimento em [m/h] é essencial, especialmente durante as fases iniciais do procedimento de enchimento do reservatório da Barragem Sul. Essa medida reflete a intensidade do evento hidrológico em relação afluência no reservatório. Em eventos mais expressivos, observa-se um aumento rápido no nível da água, atingindo até 0,5 m/h no início do enchimento. Acúmulos de precipitação superiores a 265 mm ao longo de 4 dias podem criar condições propícias para o vertimento. Após o término do evento hidrológico, a taxa de enchimento se estabiliza em valores em torno de 0,02 m/h.

4.1.2 Operação dos Dispositivos de Descarga

Ao declarar o início da operação do reservatório para a contenção de inundação, é crucial seguir uma sequência específica para o fechamento das comportas do descarregador de fundo, conforme detalhado abaixo.

A Barragem Sul é composta por 5 (cinco) comportas agrupadas em conjuntos da seguinte maneira:

- **Conjunto 1:** Comporta 1 (C1) e Comporta 5 (C5);
- **Conjunto 2:** Comporta 2 (C2) e Comporta 4 (C4); e,
- **Conjunto 3:** Comporta 3 (C3).

Durante a operação de enchimento, deve ser seguida a ordem de fechamento, conforme:

- **Fechamento do Conjunto 1:** Iniciar o procedimento fechando o Conjunto 1 com o comando correspondente;
- **Fechamento do Conjunto 2:** Prosseguir fechando o Conjunto 2 imediatamente após completar o fechamento do Conjunto 1; e,
- **Fechamento do Conjunto 3:** Executar o fechamento do Conjunto 3 como último procedimento para o fechamento total das comportas da barragem.

Na Figura 4 está ilustrada a dinâmica de fechamento das comportas do descarregador de fundo da Barragem Sul, mantendo a ordem de fechamento das extremidades para o centro.

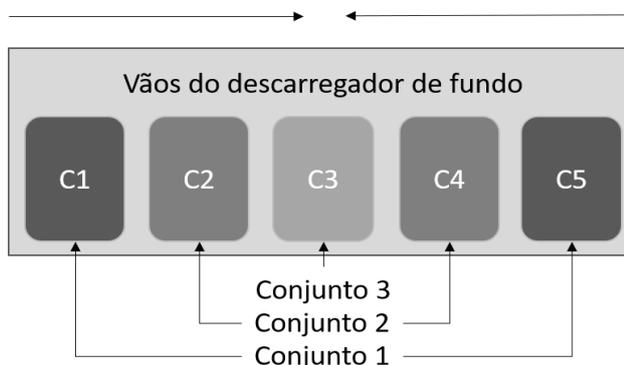


Figura 4. Dinâmica das comportas do descarregador de fundo – Barragem Sul.

Caso uma das comportas esteja indisponível, as configurações a serem usadas estão ilustradas no ANEXO A – Configurações para o caso de uma comporta indisponível na Barragem Sul – Ituporanga. O vão da comporta indisponível deve ser isolado e fechado, de forma que não atue como dispositivo de descarga e possa gerar uma condição hidráulica fora de controle ou vibrações excessivas. Caso mais de uma comporta estiver indisponível, deve ser tratado como situação de anormalidade e a Comissão de Gestão de Cheias deve ser acionada para decidir as ações necessárias.

4.2 BARRAGEM OESTE - TAIÓ²²

Na condição “Normal” na seção de controle em Rio do Sul, as 7 (sete) comportas do descarregador de fundo permanecem abertas para permitir a defluência da vazão.

Quando o nível atinge “Atenção” ($\geq 4,50$ m), devem ser avaliadas as três seguintes condições:

1. Existe tendência de aumento do nível do rio na última hora?
2. O acumulado de chuva observada na bacia nas últimas 24 horas é de 30 mm ou mais?
3. Previsão de chuva na região para as próximas 24 horas é de 30 mm ou mais?

Caso mais de uma resposta seja “NÃO”, as 7 comportas devem ser mantidas abertas.

Caso mais de uma resposta seja “SIM”, todas as comportas devem ser fechadas e o monitoramento às estações deve ser mantido.

Se o evento evoluir para a situação de “Alerta” e/ou “Emergência”, as 7 comportas devem ser fechadas, independentemente da chuva prevista ou observada.

A Figura 5 apresenta um fluxograma de tomada de decisão para o fechamento das comportas das galerias de descarga²³.

²² Restrições Operativas de Jusante – Barragem Oeste: Rio do Sul (prioritária), Taió e Rio do Oeste

²³ A presente versão do manual de operação da Barragem Sul não contempla o acionamento da comporta do túnel lateral. Para consultar as operações técnicas a respeito dos túneis, consultar IT N° 043/DIGR/2024, inclusa no apêndice - 602-SDC-RT-HID-APE-003-3.

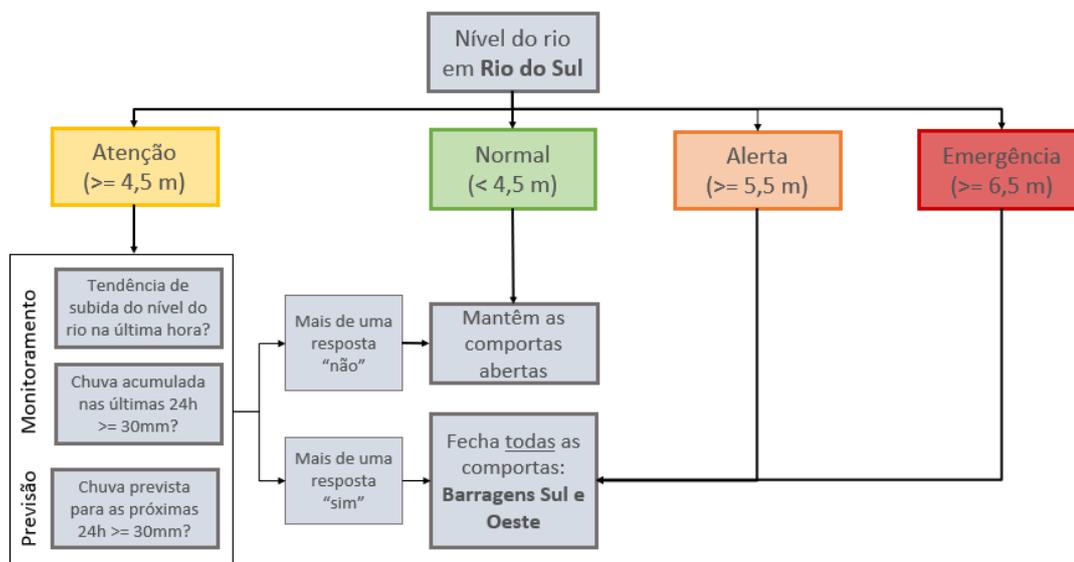


Figura 5. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Oeste considerando a restrição operativa em Rio do Sul.

Frente à ausência de informações da seção de Rio do Sul ou caso a inundação se desenvolva primeiro em Taió, deve-se seguir o fluxograma para Taió, conforme Figura 6.

Dessa forma, em situação “Normal” ou de “Atenção” na seção de controle em Taió, as 7 (sete) comportas do descarregador de fundo devem permanecer abertas.

Quando o nível atingir situação de “Alerta” (≥ 7 m) deve-se observar a três condições seguintes:

- Existe tendência de subida do nível do rio na última hora?
- O acumulado de chuva observada na região nas últimas 24h é de 30 mm ou mais?
- A previsão de chuva na região para as próximas 24 horas é de 30 mm ou mais?

Caso mais de uma resposta seja “não”, deve-se manter as 7 (sete) comportas abertas.

Caso mais de uma resposta for “sim”, deve-se fechar as 7 comportas e continuar o monitoramento.

Se o evento se desenvolver para situação de “Emergência”, deve-se fechar as 7 (sete) comportas, independentemente da chuva observada ou prevista.

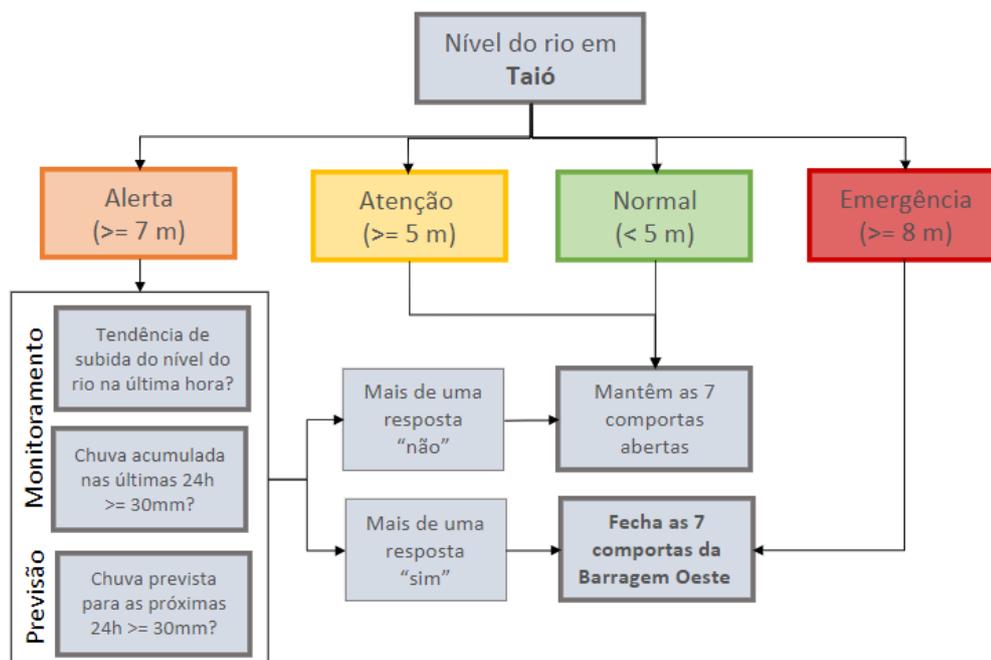


Figura 6. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Oeste considerando a restrição operativa em Taió.

Frente à ausência de informações da seção de Rio do Sul ou caso a inundação se desenvolva primeiro em Rio do Oeste, deve-se seguir o fluxograma para Rio do Oeste, conforme Figura 7.

Dessa forma, em situação “Normal” (nível < 5m) ou de “Atenção” (nível \geq 5m) na seção de controle em Rio do Oeste, as 7 (sete) comportas do descarregador de fundo da barragem Oeste devem permanecer abertas.

Quando o nível atingir situação de “Alerta” (\geq 6,5 m) deve-se observar a três condições seguintes:

- Existe tendência de subida do nível do rio na última hora?
- O acumulado de chuva observada na região nas últimas 24h é de 30 mm ou mais?
- A previsão de chuva na região para as próximas 24 horas é de 30 mm ou mais?
- Caso mais de uma resposta seja “não”, deve-se manter as 7 (sete) comportas abertas.

Caso mais de uma resposta for “sim”, deve-se fechar as 7 comportas e continuar o monitoramento.

Se o evento se desenvolver para situação de “Emergência” (nível \geq 7,4m), deve-se fechar as 7 (sete) comportas, independentemente da chuva observada ou prevista.

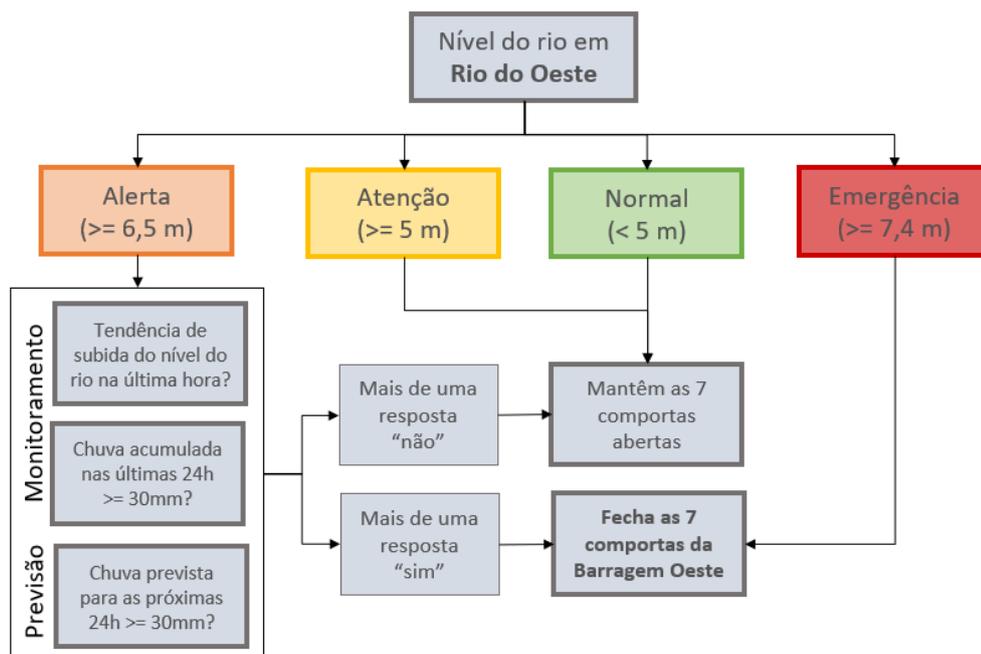


Figura 7. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Oeste considerando a restrição operativa em Rio do Oeste.

Quando identificada a necessidade de operação da barragem para contenção de cheia, considerando como restrição Rio do Sul ou Taió, declara-se “Abertura de Situação” dando início à Operação de Enchimento e ao preenchimento do Formulário de Operação²⁴.

O monitoramento nas seções de controle em Rio de Sul e Taió (níveis e vazões) e nas bacias hidrográficas (precipitação) deve ser realizado continuamente. Se o acumulado de chuva persistir e a capacidade de acumulação for superada, o excedente do volume deverá ser vertido apenas pelo vertedouro.

4.2.1 Taxa de Enchimento do Reservatório

Durante o processo de enchimento do reservatório, deve-se acompanhar o acumulado de precipitação dos últimos 4 dias (96 horas) e a taxa de enchimento do reservatório, que é calculada através da chuva de projeto da bacia. Tais informações são indicativas do nível de criticidade do evento e auxiliam na interpretação do comportamento do armazenamento d’água no reservatório.

As análises e monitoramento das condições podem ser acompanhados através do RESOP, software que realiza o balanço hídrico dos reservatórios. Na Tabela 5 estão representadas as taxas máximas de enchimento do reservatório em função da chuva de projeto de 4 dias.

Tabela 5. Variação da taxa de enchimento do reservatório da Barragem Oeste em função da chuva de projeto.

Período de retorno (TR) [anos]	Chuva acumulada em 4 dias [mm]	Taxa Máxima [m/h]
2	105	0,10
5	173	0,23
10	208	0,29
20	243	0,33
25	265	0,36
50	293	0,38
80	320	0,40
100	333	0,41
150	357	0,43
200	375	0,44

A taxa de enchimento em [m/h] deve ser acompanhada principalmente no início do procedimento de operação de enchimento do reservatório da Barragem Oeste, pois ela indica a intensidade do evento hidrológico quanto à afluência ao reservatório. Maiores eventos tendem a gerar, no início do enchimento, variações rápidas no nível d'água do reservatório de até 0,44 m/h. Acumulados de 4 dias acima de 200 mm podem condicionar situação de vertimento. Com o fim do evento hidrológico, a taxa de enchimento estabiliza em valores da ordem de 0,02 m/h.

4.2.2 Operação dos Dispositivos de Descarga

Quando declarado o início da operação do reservatório, para fins de contenção de inundação, deverá ser seguido o passo-a-passo de fechamento das comportas do descarregador de fundo conforme descrito a seguir.

A Barragem Oeste possui 7 comportas que são agrupadas conforme os conjuntos:

- **Conjunto 1:** Comporta 1 (C1) e Comporta 7 (C7);
- **Conjunto 2:** Comporta 2 (C2) e Comporta 6 (C6);
- **Conjunto 3:** Comporta 3 (C3) e Comporta 5 (C5); e,
- **Conjunto 4:** Comporta 4 (C4).

Quando iniciada a operação de enchimento, a seguinte ordem de fechamento deve ser seguida:

- **Fechamento do Conjunto 1:** A operação inicia-se pela operação do Conjunto 1, com o comando de fechamento;
- **Fechamento do Conjunto 2:** A operação procede com o fechamento do Conjunto 2, logo em seguida da finalização do fechamento do Conjunto 1;
- **Fechamento do Conjunto 3:** A operação procede com o fechamento do Conjunto 3, logo em seguida da finalização do fechamento do Conjunto 2; e,

Fechamento do Conjunto 4: A operação de fechamento do Conjunto 4 ocorre por último, realizando o fechamento total das comportas do barramento.

Na Figura 8 está ilustrada a dinâmica de fechamento das comportas do descarregador de fundo da Barragem Oeste, sendo o fechamento realizado das comportas laterais até a comporta central.

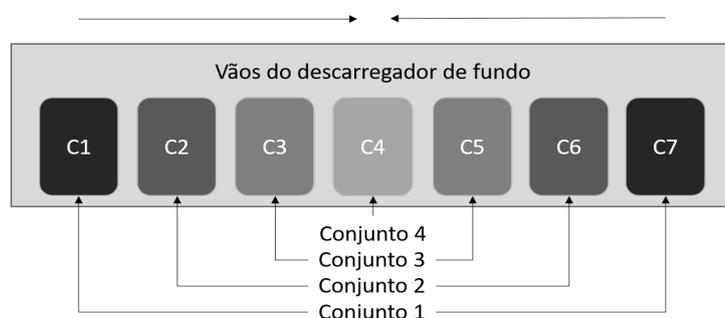


Figura 8. Dinâmica das comportas do descarregador de fundo da Barragem Oeste.

Caso uma das comportas esteja indisponível as configurações que devem ser usadas estão ilustradas no ANEXO B – Configurações para o caso de uma comporta indisponível na Barragem Oeste - Taió. O vão da comporta indisponível deve ser isolado e fechado, de forma que não atue como dispositivos de descarga e possa gerar uma condição hidráulica fora de controle ou vibrações excessivas. O caso de mais de uma comporta estiver indisponível deve ser tratado como situação de anormalidade.

4.3 BARRAGEM NORTE - JOSÉ BOITEUX²⁵

Em situação “Normal” (nível < 4m) ou “Atenção” (nível < 6m) na seção de controle em Blumenau, as comportas das 2 (duas) tulipas e o descarregador de fundo²⁶ devem permanecer abertos, para permitir a defluência da vazão.

Quando o nível atingir situação de “Alerta” (nível \geq 6m) deve-se observar as três condições seguintes:

- Há tendência de subida do nível do rio na última hora?
- O acumulado de chuva observada na bacia nas últimas 24 horas é \geq 30 mm?
- A previsão de chuva na região para as próximas 24 horas é \geq 30 mm?
- Caso mais de uma resposta seja “NÃO”, deve-se manter as 2 (duas) comportas abertas.
- Caso mais de uma resposta for “SIM”, deve-se fechar as 2 (duas) comportas das tulipas.

Se o evento se desenvolver para situação de “Emergência” (nível \geq 8m), deve-se fechar as 2 (duas) comportas das tulipas, independentemente da chuva observada ou prevista.

A Figura 9 apresenta um fluxograma para tomada de decisão para o fechamento das comportas das tulipas²⁷.

²⁵ **Restrição Operativa de Jusante – Barragem Norte: Blumenau**
²⁶ As 3 descargas de fundo não possuem atualmente comportas para operação
²⁷ As 3 descargas de fundo não possuem atualmente comportas para operação.

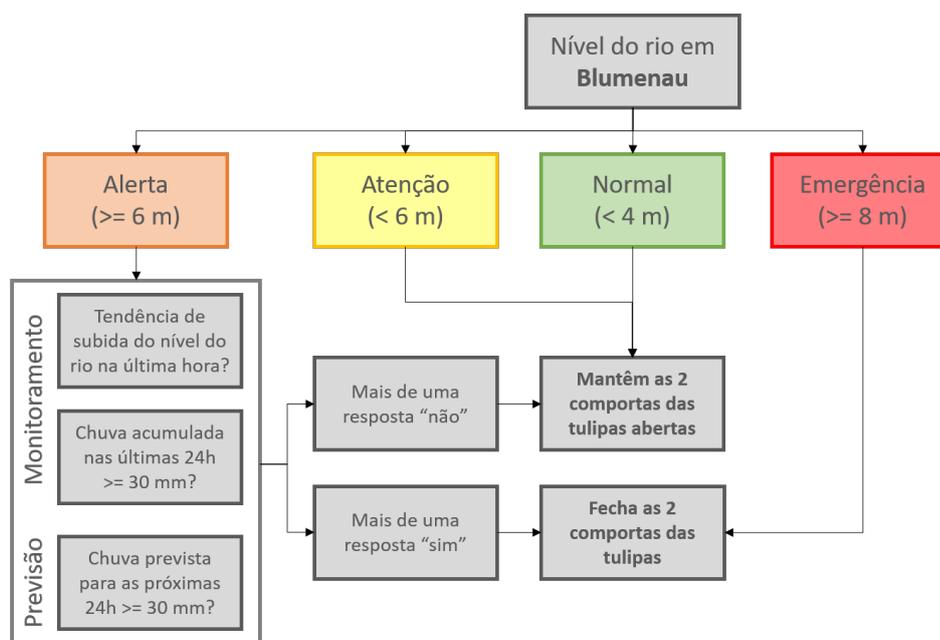


Figura 9. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga da Barragem Norte considerando a restrição operativa em Blumenau.

Quando identificada a necessidade de operação da barragem para contenção de cheia, considerando como restrição Blumenau, declara-se “Abertura de Situação” dando início à Operação de Enchimento e ao preenchimento do Formulário de Operação²⁸.

O monitoramento nas seções de controle em Blumenau (níveis e vazões) e na bacia hidrográfica (precipitação) deve ser realizado continuamente. Se o acumulado de chuva persistir e a capacidade de acumulação for superada, o excedente do volume deverá ser vertido apenas pelo vertedouro.

4.3.1 Taxa de Enchimento do Reservatório

Durante o processo de enchimento do reservatório, deve-se acompanhar o acumulado de precipitação dos últimos 4 dias (96 horas) e a taxa de enchimento do reservatório, que é calculada através da chuva de projeto da bacia. Tais informações são indicativas do nível de criticidade do evento e auxiliam na interpretação do comportamento do armazenamento d’água no reservatório.

As análises e monitoramento das condições podem ser acompanhados através do RESOP, software que realiza o balanço hídrico dos reservatórios. Na Tabela 6 estão representadas as taxas máximas de enchimento do reservatório em função da chuva de projeto de 4 dias.

Tabela 6. Variação da taxa de enchimento do reservatório da Barragem Norte em função da chuva de projeto.

Período de retorno (TR) [anos]	Chuva acumulada em 4 dias [mm]	Taxa Máxima [m/h]
2	105	0,16
5	173	0,25
10	208	0,25
20	243	0,26
25	265	0,29
50	293	0,31
80	320	0,33
100	333	0,34
150	357	0,36
200	375	0,38

A taxa de enchimento em [m/h] deve ser acompanhada, principalmente, no início do procedimento de operação de fechamento das comportas do reservatório da Barragem Norte, pois ela indica a intensidade do evento hidrológico quanto à afluência ao reservatório. Maiores eventos tendem a gerar, no início do enchimento, variações rápidas no nível d'água do reservatório de até 0,38 m/h. Acumulados de 4 dias acima de 265 mm podem condicionar situação de vertimento. Com o fim do evento hidrológico, a taxa de enchimento estabiliza em valores da ordem de 0,15 m/h.

4.3.2 Operação dos Dispositivos de Descarga

Quando declarado o início da operação do reservatório, para fins de contenção de inundação, deverá ser seguido o passo-a-passo de fechamento das comportas/tulipas conforme descrito a seguir.

A Barragem Norte possui 2 (duas) tulipas com comportas cuja operação de enchimento deve seguir a seguinte ordem de fechamento:

- **Fechamento da Tulipa 258:** A operação inicia-se pela operação da Tulipa 258, com o comando de fechamento;
- **Fechamento da Tulipa 264:** A operação procede com o fechamento da Tulipa 264, logo em seguida da finalização do fechamento da Tulipa 258.

Na Figura 10, está ilustrado a sequência operacional em relação ao fluxograma de tomada de decisão de fechamento das comportas das tulipas considerando a restrição operativa em Blumenau.

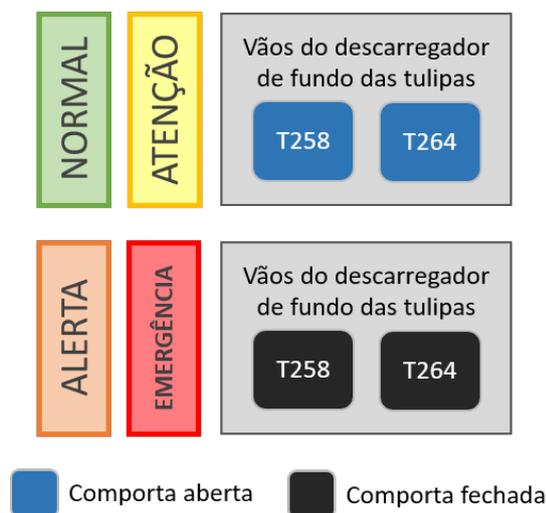


Figura 10. Sequência operacional de fechamento de comportas da Barragem Norte considerando a restrição operativa em Blumenau.

Caso mais de uma comporta esteja indisponível, deve ser tratado como situação de emergência. O vão da comporta indisponível deve ser isolado e fechado, de forma que não atue como dispositivos de descarga e possa gerar uma condição hidráulica fora de controle ou vibrações excessivas.

4.4 RESUMO DOS PROCEDIMENTOS DE ENCHIMENTO DOS RESERVATÓRIOS

Como forma de sintetizar os procedimentos e unificar a visualização de cada etapa do processo de enchimento dos reservatórios de contenção de cheias do Vale do Itajaí, um fluxograma foi elaborado abrangendo as restrições das três estruturas, conforme Figura 11.

Para cada uma das barragens – Sul/Ituporanga, Oeste/Taió, Norte/José Boiteux – foram inseridos os níveis de referência utilizados nas respectivas seções de controle, sendo elas: Rio do Sul, Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Blumenau.

PROTOCOLO DE FECHAMENTO DAS COMPORTAS DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS DO VALE DO ITAJAÍ

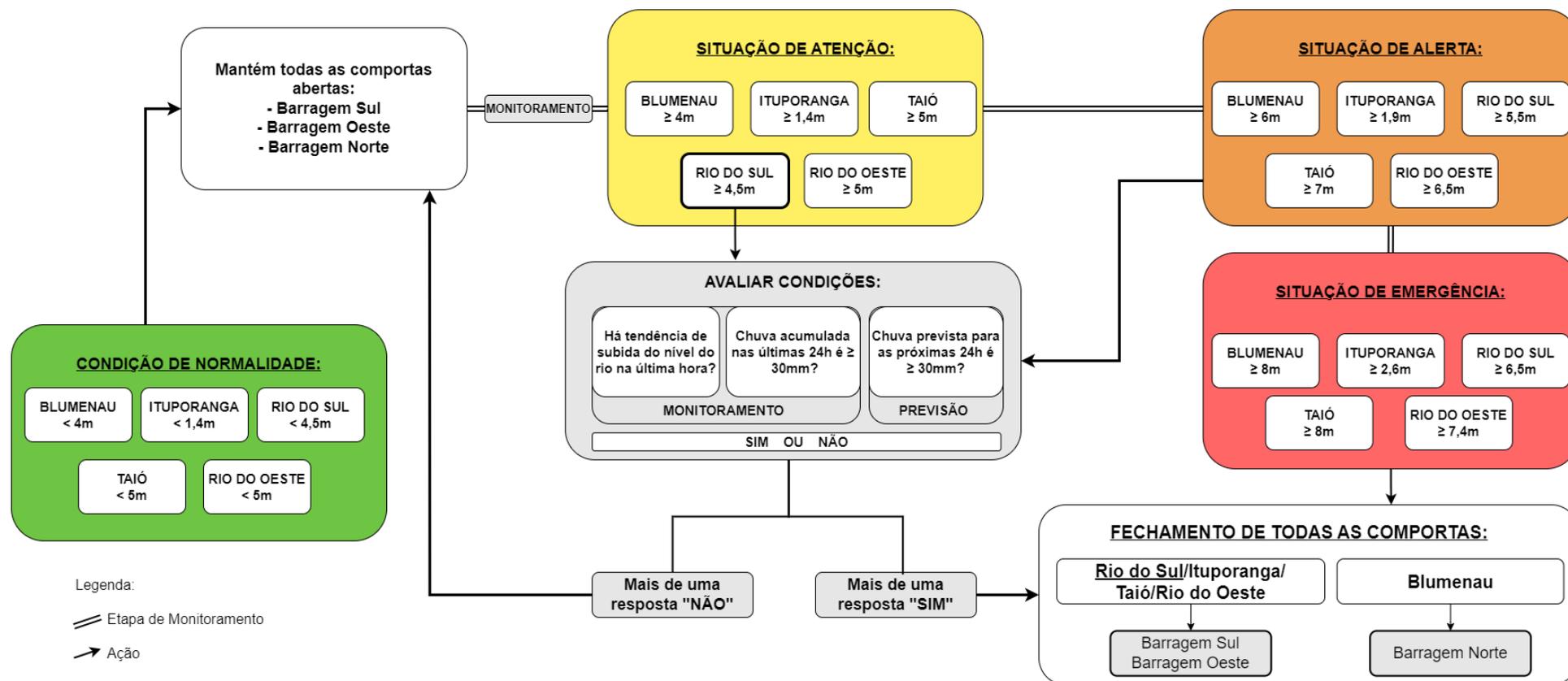


Figura 11. Fluxograma resumo dos protocolos de fechamento de comportas das barragens de contenção de cheias do Vale do Itajaí.

5. PROCEDIMENTO DE ESVAZIAMENTO

5.1 BARRAGEM SUL - ITUPORANGA

Para iniciar o procedimento de esvaziamento do reservatório da barragem Sul, considerando que a operação de enchimento foi realizada, o nível do rio na seção de Ituporanga deve estar abaixo da situação de Alerta ($< 1,9\text{m}$) e as seguintes situações de nível devem ser analisadas em Rio do Sul:

1. Alerta ($> 5,75\text{m}$): comportas devem permanecer fechadas.

2. Atenção ($\leq 5,75\text{m}$) / Normal ($\leq 4,5\text{m}$): deve-se observar as três condições seguintes:

- Há tendência de aumento do nível do rio?
- O acumulado de chuva nas últimas 24 horas é $\geq 30\text{ mm}$?
- A previsão de chuva na região nas próximas 24 horas é $\geq 30\text{ mm}$?

Caso mais de uma resposta seja “sim”, deve-se manter as comportas fechadas.

Caso mais de uma resposta seja “não” e o nível do rio na seção de Rio do Sul for $< 4,5\text{m}$ ou vazão $< 400\text{ m}^3/\text{s}$, pode ser iniciado o esvaziamento do reservatório.

É válido destacar que, em eventos de cheia, a ação de esvaziamento da Barragem Sul represa, parcialmente, a afluência proveniente da contribuição de Rio do Oeste. Esse efeito diminui a eficiência hidráulica de escoamento do rio e gera em torno de $0,3\text{m}$ de remanso.

A Figura 12 apresenta um fluxograma para tomada de decisão para a abertura das comportas do descarregador de fundo.

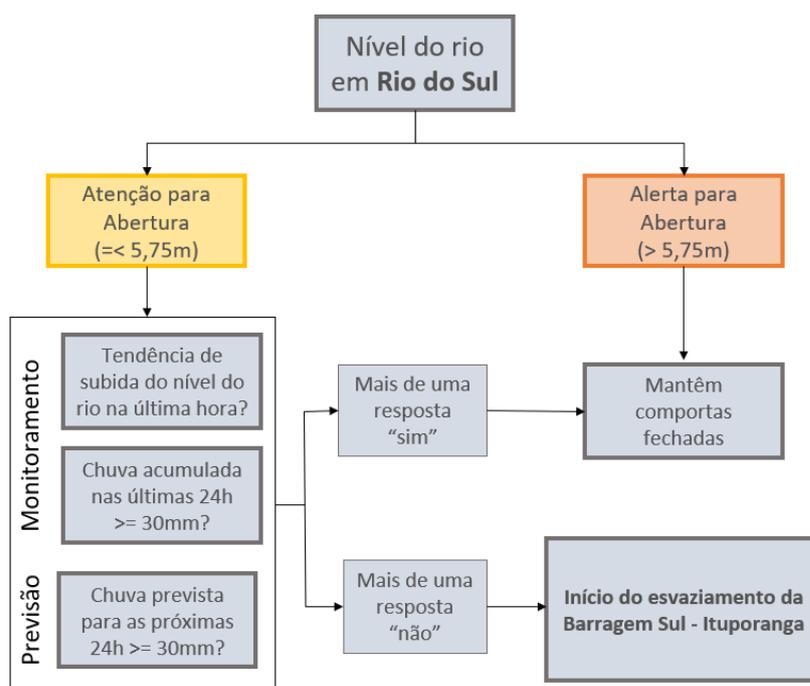


Figura 12. Fluxograma para tomada de decisão de abertura das comportas das galerias de descarga da Barragem Sul em condição de eventos de cheia.

5.1.1 Taxa de Esvaziamento do Reservatório

Na Tabela 7, estão resumidas informações das condições do reservatório em função das chuvas de projeto acumuladas em 4 dias. Vale destacar que os volumes de chuvas determinam a caracterização da situação hidrológica da bacia do Rio Itajaí na seção de Rio do Sul.

Tabela 7. Variação da taxa de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul e tempo total em função da chuva de projeto.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/h]	Máxima[m/h]	Tempo Total [d]
105	389,00	0,04	0,43	10
173	397,00	0,06	1,07	14
208	400,00	0,06	1,24	19
243	401,00	0,06	1,24	19
265	401,00	0,06	1,19	20
293	401,00	0,05	1,24	21
320	401,00	0,06	1,08	21
333	401,00	0,06	1,08	21
357	401,00	0,06	1,08	21
375	401,00	0,06	1,08	21

Em caso de indisponibilidade de uma comporta do descarregador de fundo, por mau funcionamento ou entupimento, a margem de operação deve ser incrementada em 6 (seis) dias para o tempo total esperado de esvaziamento do reservatório. Na Figura 13 é ilustrado a progressão do tempo de esvaziamento em função da chuva de projeto.

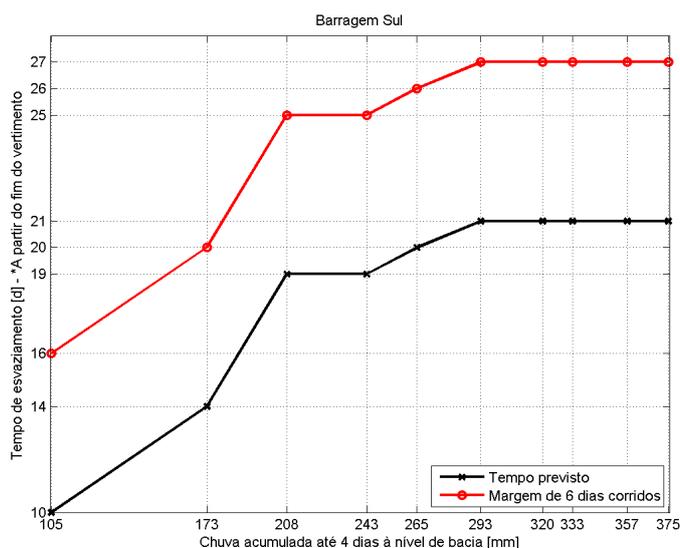


Figura 13. Tempo de esvaziamento da Barragem Sul.

5.1.2 Operação das Comportas

Com o fim do evento hidrológico, o procedimento de abertura do descarregador de fundo da Barragem Sul deve seguir a seguinte ordem:

- **Abertura do Conjunto 3:** A operação inicia-se pela operação do Conjunto 3, com o comando de abertura;
- **Abertura Conjunto 2:** A operação procede com a abertura do Conjunto 2, logo em seguida da finalização da abertura do Conjunto 3; e,
- **Abertura do Conjunto 1:** A operação de abertura do Conjunto 1 ocorre 10 horas após o início de abertura do Conjunto 2 e 3 e durante o turno de trabalho.

Na Figura 14, é ilustrada a sequência operacional por conjunto de comportas em relação ao fluxograma de tomada de decisão do esvaziamento. O horário de abertura do Conjunto 1 não é rigoroso, desde que seja respeitado o intervalo mínimo de 10 horas entre as aberturas, a abertura pode ser realizada dentro do turno de trabalho.

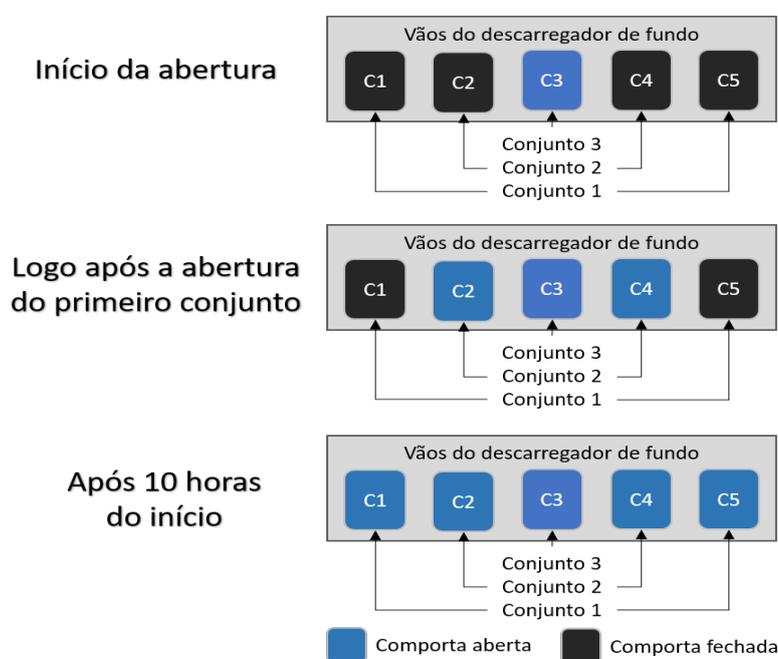


Figura 14. Dinâmica de abertura das comportas para o processo de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul.

Ainda, leva-se em consideração o nível em ambos os reservatórios, podendo intercalar a abertura nas barragens Sul e Oeste, sempre abrindo-se um conjunto por vez, mantendo o nível na seção de Rio do Sul próximo aos 5,5m.

Durante o período de esvaziamento, o Balanço Hídrico do reservatório deve ser acompanhado para o cálculo da taxa de esvaziamento e registro de situação. Para isso, devem ser inseridos os registros das medições, realizadas de hora em hora, no sistema RESOP.

Mesmo com a indisponibilidade de uma comporta, o intervalo entre os conjuntos deve ser respeitado para evitar elevações bruscas do nível do rio nas seções de controle.

Em caso de vertimento, as comportas devem ser abertas somente a partir do momento em que a vazão de afluência no reservatório seja menor que a vazão de defluência ($Q_{af} < Q_{def}$). A situação deve ser acompanhada através do software RESOP e avaliada pelos técnicos responsáveis para a tomada de decisão.

5.2 BARRAGEM OESTE - TAIÓ

Para iniciar o procedimento de esvaziamento do reservatório da barragem Oeste, considerando que a operação de enchimento foi realizada, o nível do rio na seção de Taió deve estar abaixo da situação de Alerta ($< 7m$), bem como o nível do rio na seção de Rio do Oeste deve estar abaixo da situação de Alerta ($< 6,5m$) e as seguintes situações de nível devem ser analisadas em Rio do Sul:

1. Alerta ($> 5,75m$): comportas devem permanecer fechadas.

2. Atenção ($\leq 5,75m$) / Normal ($\leq 4,5m$): deve-se observar as três condições seguintes:

- Há tendência de aumento do nível do rio?
- O acumulado de chuva nas últimas 24 horas é ≥ 30 mm?
- A previsão de chuva na região nas próximas 24 horas é ≥ 30 mm?
- Caso mais de uma resposta seja “sim”, deve-se manter as comportas fechadas.
- Caso mais de uma resposta seja “não” e o nível do rio na seção de Rio do Sul for $< 4,5m$ ou vazão < 400 m³/s, pode ser iniciado o esvaziamento do reservatório.

É válido destacar que, em eventos de cheia, a ação de esvaziamento da Barragem Sul represa, parcialmente, a afluência proveniente da contribuição de Rio do Oeste. Esse efeito diminui a eficiência hidráulica de escoamento do rio e gera em torno de 0,3m de remanso.

A Figura 15 apresenta um fluxograma para tomada de decisão para a abertura das comportas do descarregador de fundo.

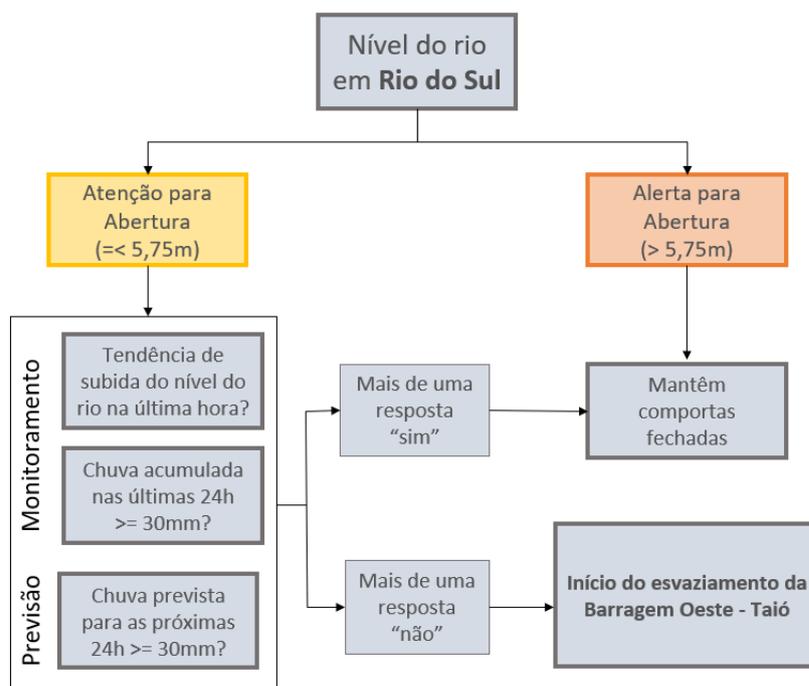


Figura 15. Fluxograma para tomada de decisão de abertura das comportas das galerias de descarga da Barragem Oeste em condição de eventos de cheia.

5.2.1 Taxa de Esvaziamento do Reservatório

Na Tabela 8, são resumidas informações das condições do reservatório em função das chuvas de projeto acumuladas em 4 dias. Vale ressaltar que os volumes de chuvas determinam a caracterização da situação hidrológica da bacia do Rio Itajaí na seção de Rio do Sul.

Tabela 8. Variação da taxa de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste e tempo total em função da chuva de projeto.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/h]	Máxima[m/h]	Tempo Total [d]
105	351,90	0,07	0,80	4
173	357,00	0,03	0,74	11
208	359,60	0,04	0,75	14
243	362,30	0,04	0,73	17
265	362,30	0,04	0,73	17
293	362,30	0,04	0,73	17
320	362,30	0,04	0,63	17
333	362,30	0,04	0,63	17
357	362,30	0,04	0,63	17
375	362,30	0,04	0,63	17

Em caso de indisponibilidade de uma comporta do descarregador de fundo, por mau funcionamento ou entupimento, a margem de operação deve ser incrementada em 3 dias para o tempo total esperado de esvaziamento do reservatório. Na Figura 16 é ilustrada a progressão do tempo de esvaziamento em função da chuva de projeto.

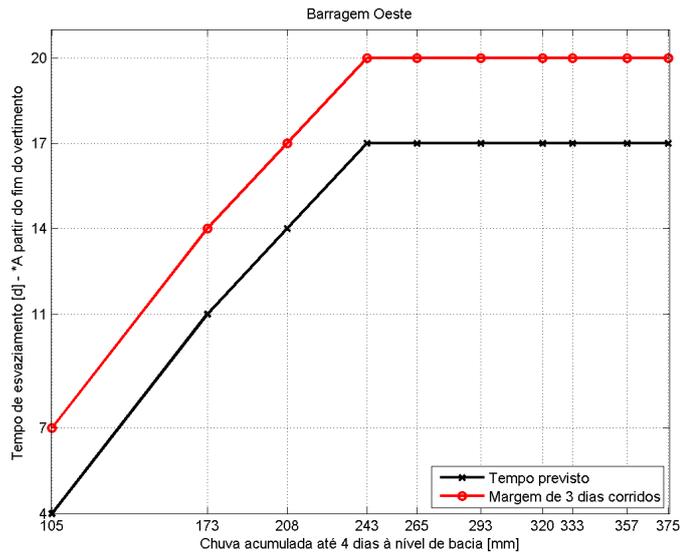


Figura 16. Tempos de esvaziamento da Barragem Oeste.

5.2.2 Operação das Comportas

Com o fim do evento hidrológico, o procedimento de abertura do descarregador de fundo da Barragem Oeste deve seguir a seguinte ordem:

- **Abertura do Conjunto 4:** A operação inicia-se pela operação do Conjunto 4, com o comando de abertura;
- **Abertura Conjunto 3:** A operação procede com a abertura do Conjunto 3, logo em seguida da finalização da abertura do Conjunto 4;
- **Abertura do Conjunto 2:** A operação de abertura Conjunto 2 ocorre 5 horas após ao início de abertura do Conjunto 4 e durante o turno de trabalho; e,
- **Abertura do Conjunto 1:** A operação de abertura do Conjunto 1 ocorre 10 horas após ao início de abertura do Conjunto 4 e durante o turno de trabalho.

Na Figura 17 está ilustrado a sequência operacional por conjunto de comportas em relação ao fluxograma de tomada de decisão de abertura das comportas. O horário de abertura do Conjunto 2 e do Conjunto 1 não é rigoroso, desde que seja respeitado o intervalo mínimo de 5 horas entre as aberturas, a abertura pode ser realizada dentro do turno de trabalho.

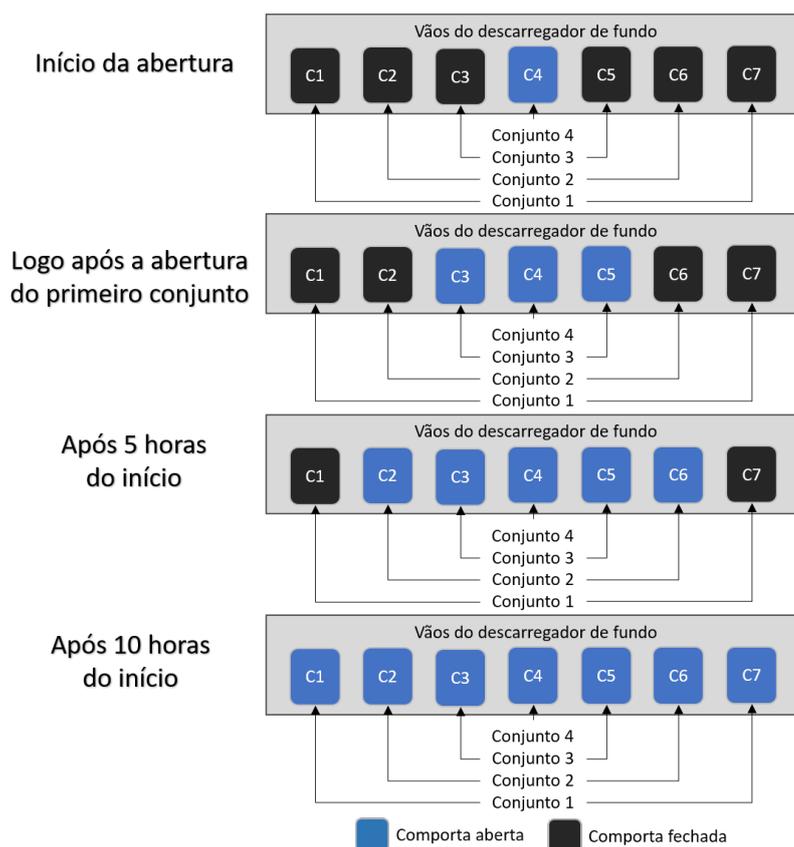


Figura 17. Dinâmica de abertura das comportas para o processo de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste em condição de eventos de normalidade.

Ainda, leva-se em consideração o nível em ambos os reservatórios, podendo intercalar a abertura nas barragens Sul e Oeste, sempre abrindo-se um conjunto por vez, mantendo o nível na seção de Rio do Sul próximo aos 5,5m.

Durante o período de esvaziamento, o Balanço Hídrico do reservatório deve ser acompanhado para o cálculo da taxa de esvaziamento e registro de situação. Para isso, devem ser inseridos os registros das medições, realizadas de hora em hora, no sistema RESOP²⁹.

Mesmo com a indisponibilidade de uma comporta, o intervalo entre os conjuntos deve ser respeitado para evitar elevações bruscas do nível do rio nas seções de controle.

Em caso de vertimento, as comportas devem ser abertas somente a partir do momento em que a vazão de afluência no reservatório seja menor que a vazão de defluência ($Q_{af} < Q_{def}$). A situação deve ser acompanhada através da gestão do reservatório, realizada no software RESOP, e avaliada pelos técnicos responsáveis para a tomada de decisão.

5.3 BARRAGEM NORTE – JOSÉ BOITEUX³⁰

Considerando que a operação de enchimento já teve início, em caso de situação de “Alerta” (nível $\geq 6m$) ou “Emergência” (nível $\geq 8m$) em Blumenau, as comportas devem se manter fechadas.

²⁹ RESOP: SIG²A Fractal (fractaleng.com.br)

³⁰ Restrição Operativa de Jusante – Barragem Norte: Blumenau

Em caso de situação de “Atenção” (nível $\geq 4\text{m}$) ou “Normal” (nível $< 4\text{m}$), deve-se observar as três seguintes condições:

- Há tendência de subida do nível do rio na última hora?
- O acumulado de chuva observada na região nas últimas 24 horas é $\geq 30\text{ mm}$?
- A previsão de chuva na região para as próximas 24 horas é $\geq 30\text{ mm}$?
- Caso mais de uma resposta seja “SIM”, deve-se manter as comportas das tulipas fechadas.
- Caso mais de uma resposta seja “NÃO”, deve-se iniciar o procedimento de esvaziamento do reservatório.

A Figura 18 apresenta um fluxograma para tomada de decisão da abertura das comportas do descarregador de fundo.

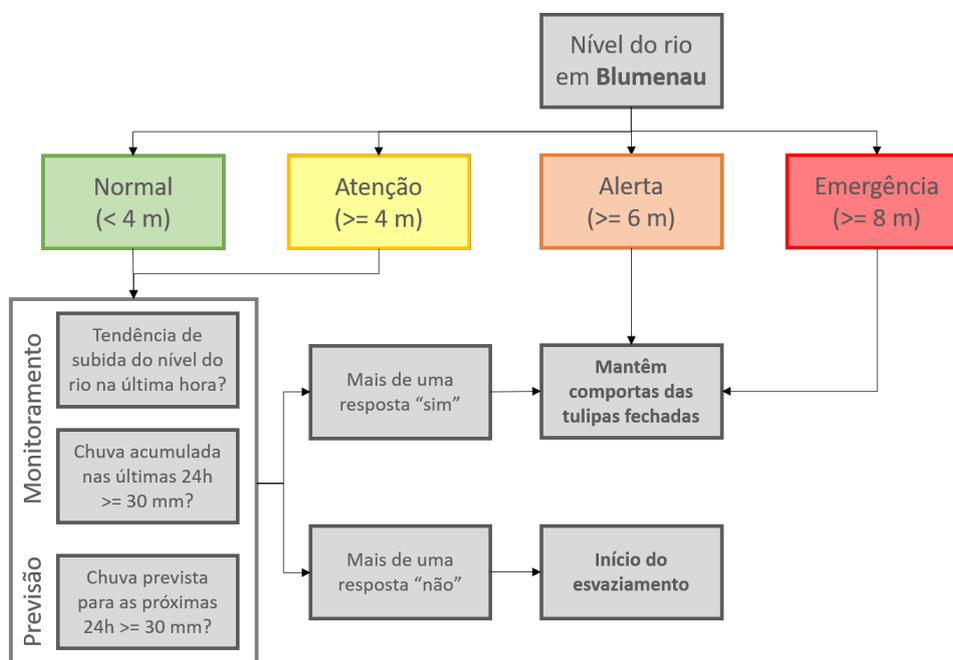


Figura 18. Fluxograma para tomada de decisão de abertura das comportas da Barragem Norte considerando a restrição operativa de Blumenau.

5.3.1 Taxa de Esvaziamento do Reservatório

Na Tabela 9 estão resumidas informações das condições do reservatório em função das chuvas de projeto acumuladas em 4 dias. Vale ressaltar que os volumes de chuvas determinam a caracterização da situação hidrológica da bacia do Rio Itajaí na seção de Blumenau.

Tabela 9. Variação da taxa de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte e tempo total em função da chuva de projeto.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/h]	Máxima[m/h]	Tempo Total [d]
105	271,40	0,01	0,12	5
173	281,40	0,01	0,18	6
208	286,40	0,01	0,16	8
243	291,20	0,01	0,16	8
265	294,15	0,02	0,15	9
293	295,00	0,02	0,13	9
320	295,00	0,02	0,14	9
333	295,00	0,02	0,14	9
357	295,00	0,02	0,13	9
375	295,00	0,02	0,13	9

Em caso de indisponibilidade de uma comporta do descarregador de fundo, por mau funcionamento ou entupimento, a margem de operação deve ser incrementada em 3 dias para o tempo total esperado de esvaziamento do reservatório. Na Figura 19 é ilustrado a progressão do tempo de esvaziamento em função da chuva de projeto.

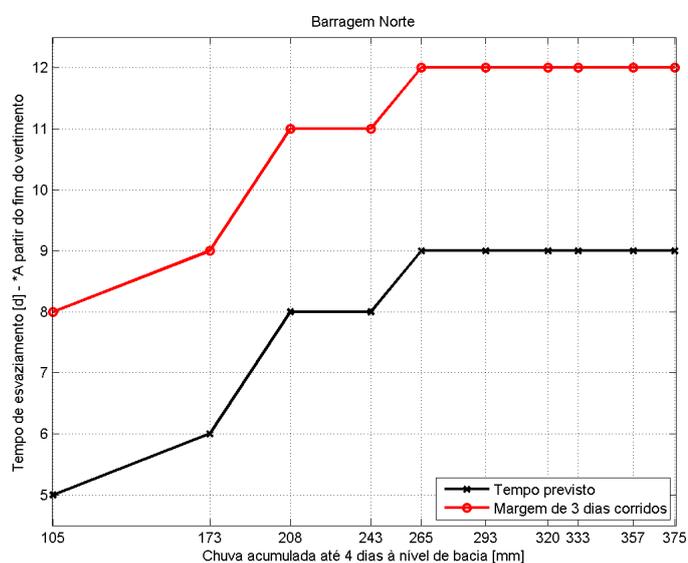


Figura 19. Tempo de esvaziamento da Barragem Norte.

5.3.2 Operação dos Dispositivos de Descarga

Com o fim do evento hidrológico, o procedimento de abertura do descarregador de fundo da Barragem Oeste deve seguir a seguinte ordem:

Abertura Tulipa 264: A operação inicia-se pela operação da Tulipa 264, com o comando de abertura;

Abertura Tulipa 258: A operação procede com a abertura da Tulipa 258, logo em seguida da finalização da abertura da Tulipa 264.

Na Figura 20, é apresentada a dinâmica de abertura das tulipas da Barragem Norte.

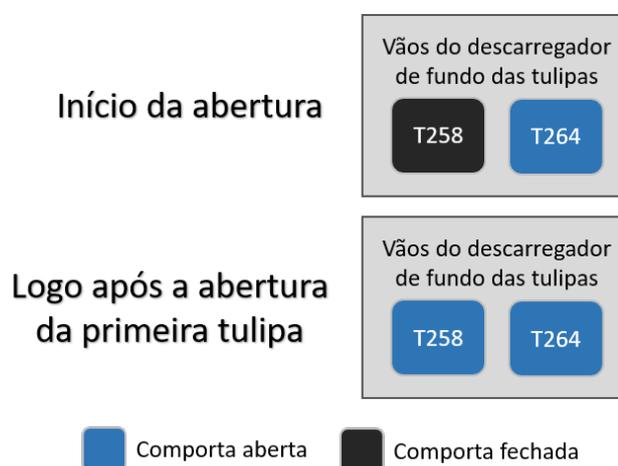


Figura 20. Dinâmica de abertura das comportas das tulipas para o processo de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte.

Durante o período de esvaziamento, o Balanço Hídrico do reservatório deve ser acompanhado para o cálculo da taxa de esvaziamento e registro de situação. Para isso, devem ser inseridos os registros das medições, conforme a situação do reservatório, no sistema RESOP³¹.

No momento, à margem esquerda da Barragem Norte, encontra-se uma galeria de desvio aberta, sem controle operacional. Durante os processos de enchimento e esvaziamento, as diretrizes operacionais contemplam a presença da referida galeria de desvio sem supervisão.

6. PROCEDIMENTO DE ESVAZIAMENTO EXCEPCIONAL EM EVENTOS ADVERSOS

Em eventos de cheia declarados, quando o reservatório se iguala ou ultrapassa 80% da capacidade de armazenamento (volume útil), o cenário hidrológico é de inundação na seção de controle de Rio do Sul e há previsão de chuva significativa (acima de 30mm) para as próximas 24 horas, o procedimento de esvaziamento excepcional pode ser realizado, a fim de atenuar o evento previsto.

Para o início da operação, os seguintes critérios devem ser obedecidos:

- O nível do rio na seção de Rio do Sul deve ser igual ou superior a 8 m;
- O nível do rio na seção de Rio do Sul deve estar apresentando tendência de recessão;
- A abertura das comportas deve ser realizada de forma gradual;
- Que ao realizar esse procedimento, o pico de vazão em Rio do Sul devido a abertura das comportas das barragens, seja inferior ao pico do evento de origem.

31 [RESOP: SIG²A Fractal \(fractaleng.com.br\)](http://RESOP: SIG²A Fractal (fractaleng.com.br))

Como ferramenta auxiliar para tomada de decisão, podem ser avaliados os boletins de previsão hidrometeorológica do SPEHC³², as análises de influência à jusante nos procedimentos de esvaziamento das barragens Sul e Oeste (abordados no item 9.1), e da ferramenta de Pré-Operação³³, que auxilia na projeção das cotas do reservatório através de simulações hidráulicas.

A decisão de qual barragem realizar o procedimento deve ser avaliada tecnicamente pela equipe responsável pela operação, devendo ser considerado o comportamento da chuva prevista nas bacias relacionadas e no nível de cada reservatório.

7. PROCEDIMENTOS EM INTERCORRÊNCIAS OPERACIONAIS

Os procedimentos em condição de intercorrência operacional são caracterizados pela situação em que há indisponibilidade de uma comporta do descarregador de fundo ou evento de precipitação que comprometa a taxa de esvaziamento do procedimento.

7.1 BARRAGEM SUL – ITUPORANGA

No procedimento de enchimento do reservatório quando em intercorrência operacional, o nível na seção de controle de Rio do Sul para o referencial de fechamento das comportas deve ser mantido em 4,5m. Contudo, caso seja avaliado pela equipe técnica responsável pela operação de acordo com as condições hidrometeorológicas observadas e previstas, o procedimento pode ser iniciado antecipadamente.

Quanto ao procedimento de esvaziamento, em caso de indisponibilidade de comporta, a margem de tempo adicional para o esvaziamento do reservatório é incrementada em 6 (seis) dias para a Barragem Sul.

7.2 BARRAGEM OESTE - TAIÓ

No procedimento de enchimento do reservatório quando em intercorrência operacional, o nível na seção de controle de Rio do Sul para o referencial de fechamento das comportas deve ser mantido em 4,5m. Contudo, caso seja avaliado pela equipe técnica responsável pela operação de acordo com as condições hidrometeorológicas observadas e previstas, o procedimento pode ser iniciado antecipadamente.

Quanto ao procedimento de esvaziamento, em caso de indisponibilidade de comporta, a margem de tempo adicional para o esvaziamento do reservatório é incrementada em 3 dias para a Barragem Oeste.

7.3 BARRAGEM NORTE - JOSÉ BOITEUX

No procedimento de esvaziamento, em caso de indisponibilidade de comporta, a margem de tempo adicional para o esvaziamento do reservatório é incrementada em 3 dias para a Barragem Norte.

32 [SPEHC:SIG²A Fractal \(fractaleng.com.br\)](http://fractaleng.com.br)

33 [PRÉ-OPERAÇÃO: SIG²A Fractal \(fractaleng.com.br\)](http://fractaleng.com.br)

8. LIMITAÇÕES OPERACIONAIS DAS BARRAGENS SUL E OESTE

Entende-se como limitações operacionais todos os fatores que impedem o controle de operações de um dos reservatórios, seja para fechamento e/ou abertura das comportas, visando o enchimento ou esvaziamento destes dispositivos. Além disso, situações que comprometem a segurança das estruturas também são entendidas como limitação operacional, ou seja, em situações em que o fechamento das comportas para contenção de cheia implica em um comprometimento da segurança estrutural, há uma limitação operacional.

Em casos de limitações operacionais em mais de um dos reservatórios, ou seja, com apenas um dos três reservatórios disponíveis para serem operados visando conter e mitigar cheias no vale do Itajaí, algumas medidas e ações específicas devem ser tomadas nestas situações. Neste contexto, a equipe técnica da SDC definiu algumas ações para que eventos de cheia venham a ser mitigados através da operação de somente um dos reservatórios. Estas ações estão descritas a seguir nos itens 8.1 e 8.2.

8.1 MEDIDAS E AÇÕES EM CASO DE APENAS UM RESERVATÓRIO OPERACIONALMENTE DISPONÍVEL

Com apenas um dos barramentos podendo ser operado, as regras de operação para fechamento devem utilizar valores de nível de referência mais restritivos. Neste contexto, a utilização de valores de nível menores nos pontos de controle primários (Rio do Sul) e Secundários (Ituporanga e Taió) devem ser considerados, conforme as figuras que seguem.

A Figura 21 apresenta o fluxograma para tomada de decisão para fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa no ponto de controle primário, ou seja, em Rio do Sul, para casos em que há limitações em condições operacionais em mais de uma barragem. Para esta situação específica, o limiar considerado nesta localidade é o de Atenção: nível $\geq 3,75$ metros.

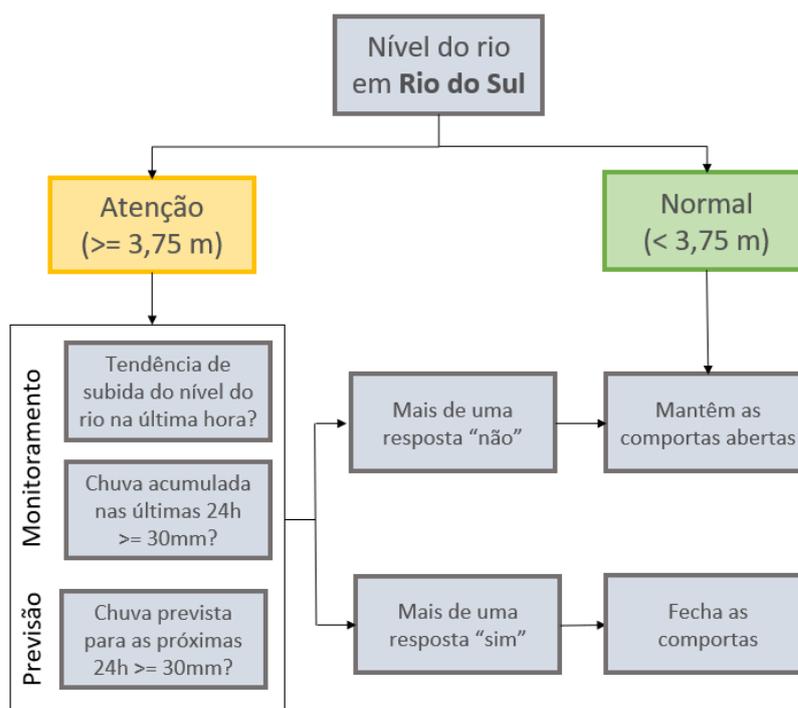


Figura 21. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa em Rio do Sul frente a limitações em condições operacionais.

A Figura 22 apresenta o fluxograma para tomada de decisão para fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa no ponto de controle secundário de Ituporanga, para casos em que há limitações em condições operacionais em mais de uma barragem. Para esta situação específica, o limiar considerado nesta localidade é o de Atenção: nível $\geq 1,4$ metros.

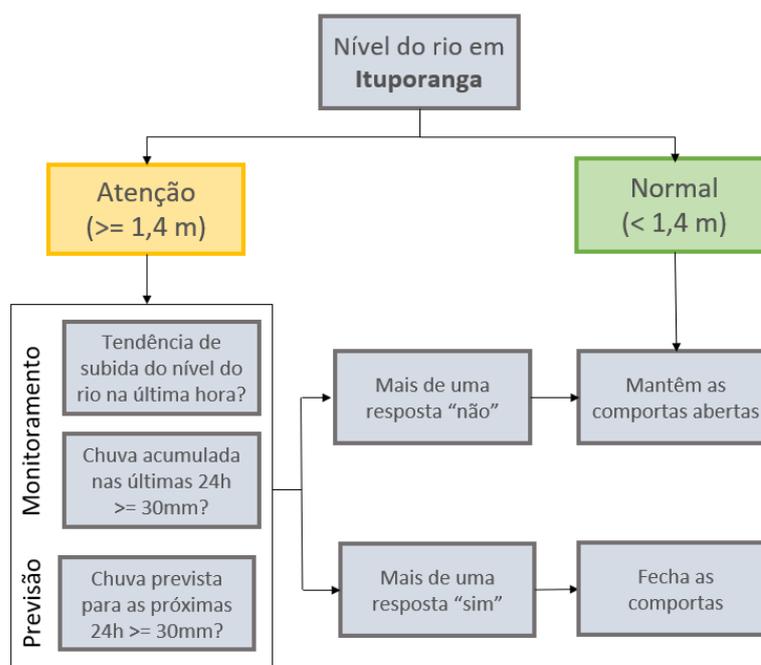


Figura 22. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa em Ituporanga frente a limitações em condições operacionais.

A Figura 23 apresenta o fluxograma para tomada de decisão para fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa no ponto de controle secundário de Taió, para casos em que há limitações em condições operacionais em mais de uma barragem. Para esta situação específica, o limiar considerado nesta localidade é o de Atenção: nível ≥ 5 metros.

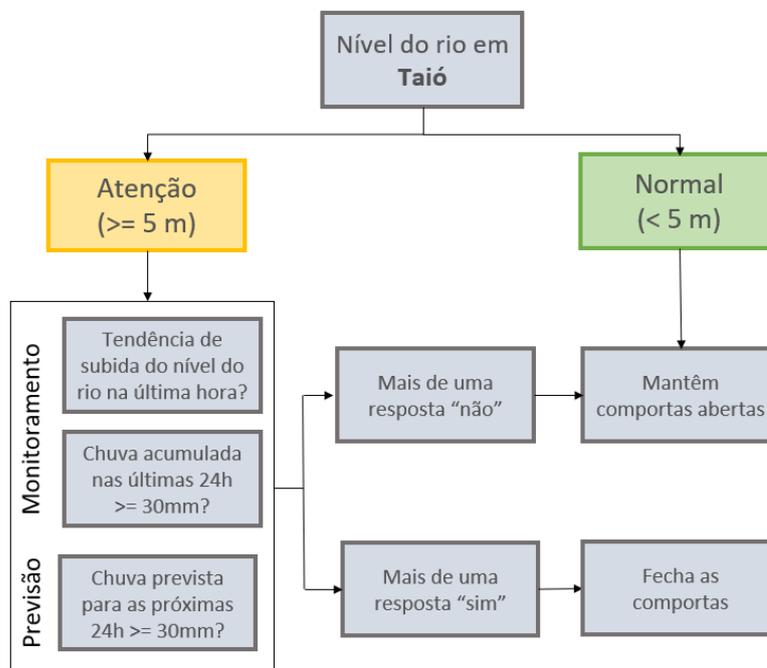


Figura 23. Fluxograma para tomada de decisão de fechamento das comportas das galerias de descarga considerando a restrição operativa em Taió frente a limitações em condições operacionais.

Para as atividades de esvaziamento do reservatório, as condições descritas ao longo dos itens anteriores permanecem inalteradas, ou seja, também devem ser seguidas em situações em que há limitações nas condições operacionais. Além disso, destacam-se algumas considerações a serem observadas em caso de limitações.

8.2 CONSIDERAÇÕES

A diminuição dos valores de referência considerados nos pontos de controle primários e secundários, conseqüentemente resulta em um aumento no número de operações do reservatório a ser operado para contenção de cheia. O referido aumento representa maior exigência em relação à parte estrutural dos reservatórios, que necessitará maior atenção do ponto de vista de inspeções pós operação, bem como de manutenções preventivas.

A disponibilidade operacional de apenas uma barragem para contenção e mitigação das cheias, representa maior demanda no âmbito das previsões e do monitoramento, que requer análises com mais periodicidade e atenção das equipes técnicas envolvidas no processo. Além disso, a indisponibilidade de operação em mais de um reservatório deve ocasionar maior necessidade de elaboração e emissão de boletins, notas e avisos para ocorrência de possíveis eventos de cheia, principalmente nas localidades mais próximas aos reservatórios que não se encontram operacionais, locais em que a população, até antes do momento da indisponibilidade, dependia e confiava nestes dispositivos para contenção de cheias.

9. TEMPOS DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

Tendo como referência o ponto de restrição operativa em Rio do Sul, verificou-se que o tempo de resposta entre a operação dos dispositivos de descarga das barragens e o tempo de chegada do pulso no ponto de jusante de interesse varia de acordo com a condição hidrológica da bacia.

As faixas mínima e máxima de tempo de chegada na propagação das ondas seguem a disposição apresentada conforme as condições apresentadas no item 9.1 a seguir.

9.1 INFLUÊNCIA DA ALTURA INCREMENTAL À JUSANTE NOS PROCEDIMENTOS DE ESVAZIAMENTO – BARRAGENS SUL E OESTE

Diante dos procedimentos de esvaziamento dos reservatórios, a influência das aberturas de comportas das barragens podem ser observadas nos pontos de jusante, representados pelos municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul.

Para cada simulação de tempo de propagação das ondas, foram considerados: 3 cenários hidrológicos; a combinação de barragens operadas e; os níveis d'água dos reservatórios. Para tal, as seguintes condições hidrológicas foram consideradas de forma a determinar as condicionantes do modelo hidráulico:

- **Cenário hidrológico 1:** vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 200 m³/s (nível ≥ 2,2m)
- **Cenário hidrológico 2:** vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 450 m³/s (nível ≥ 5,40m)
- **Cenário hidrológico 3:** vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 700 m³/s (nível ≥ 6,75m)

Em relação aos reservatórios das barragens Oeste e Sul, os seguintes níveis de reservação foram considerados:

- **NAR 100%:** Reservatório cheio prestes a verter;
- **NAR 90%:** Reservatório cheio no limite da condição de emergência;
- **NAR 50%:** Reservatório parcialmente cheio;
- **NAR 10%:** Reservatório vazio.

Para a determinação do tempo de chega de um pulso na operação das barragens, tanto em conjunto como separadamente, um limite de altura incremental foi usado para avaliar o tempo de chegada nas localidades de interesse, utilizando como base 0,30 m para os resultados apresentados neste manual de operação. Entende-se que uma sobre elevação de 0,30 m é mais acurada e visível diante do monitoramento manual realizado pela leitura de réguas.

Os gráficos a seguir, apresentam o tempo de chegada do pulso de operação de uma ou mais barragens, de acordo com o ponto de interesse de jusante, considerando a altura incremental (dH) de 0,30m. Além disso, estão apresentadas as alturas incrementais máximas (H_{máx}) simuladas em cada condição hidrológica (cenários 1, 2 e 3). A análise

completa das simulações e tempos de resposta pode ser encontrada na Estudo Hidráulico Operacional³⁴

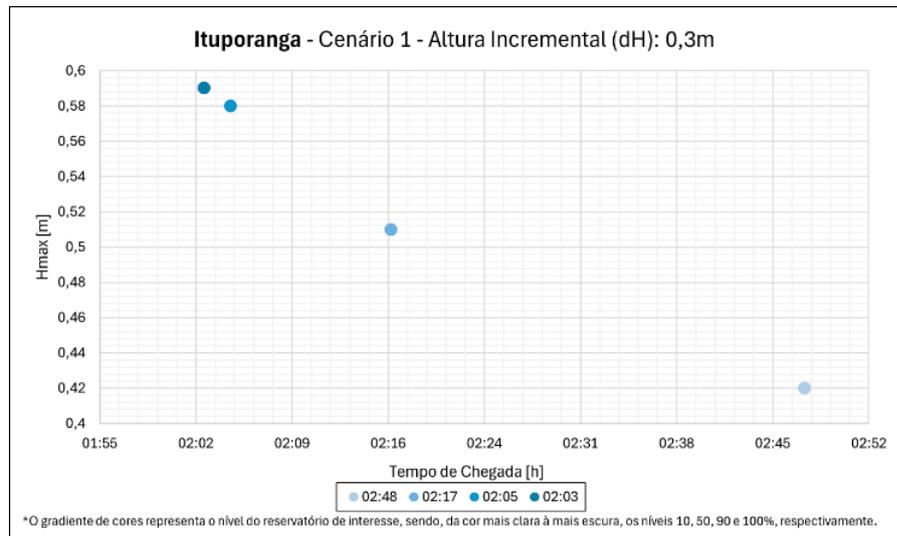


Figura 24. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Ituporanga.

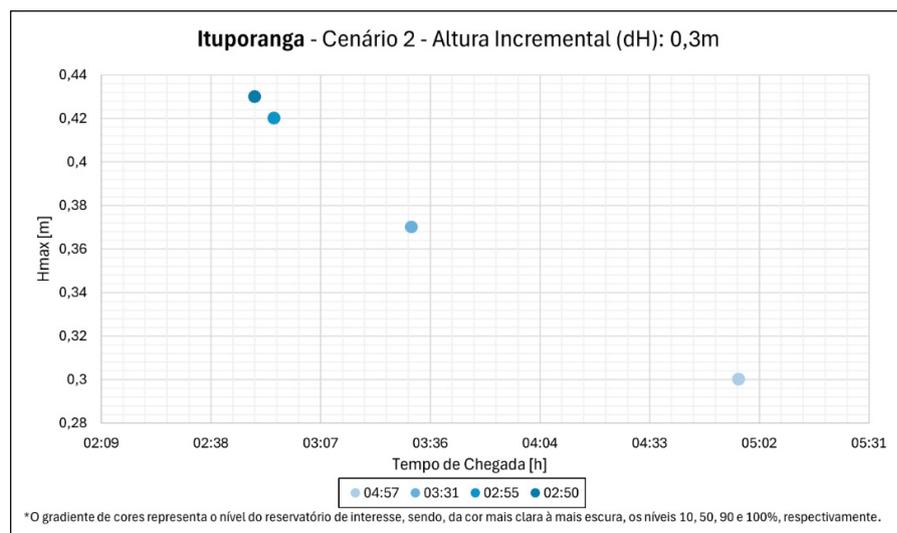


Figura 25. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Ituporanga.

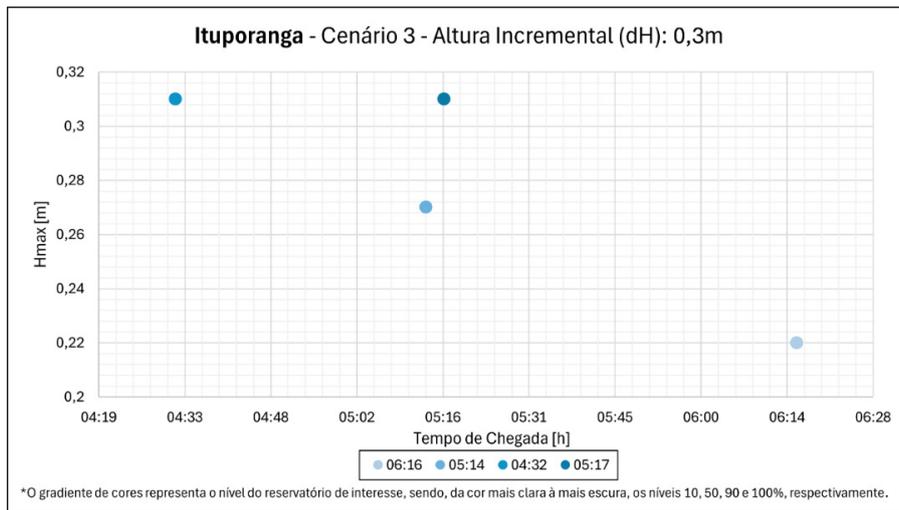


Figura 26. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Ituporanga.

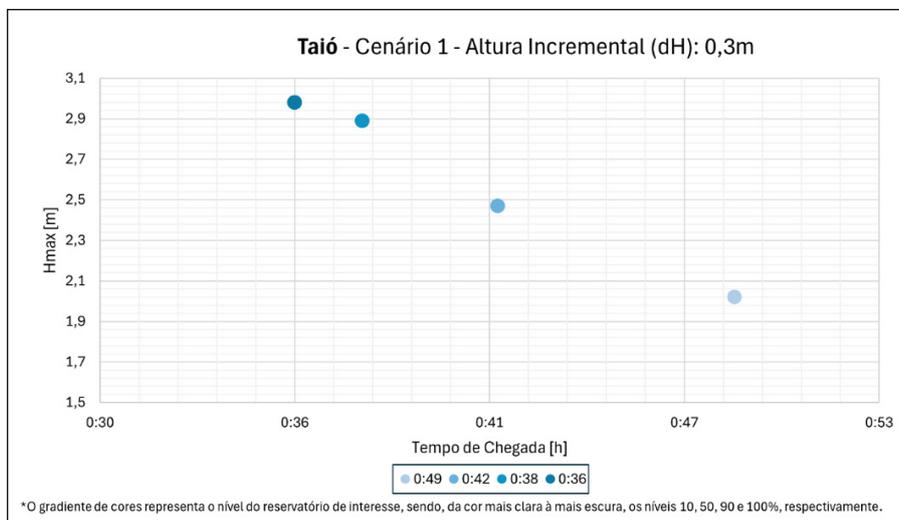


Figura 27. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Taió.

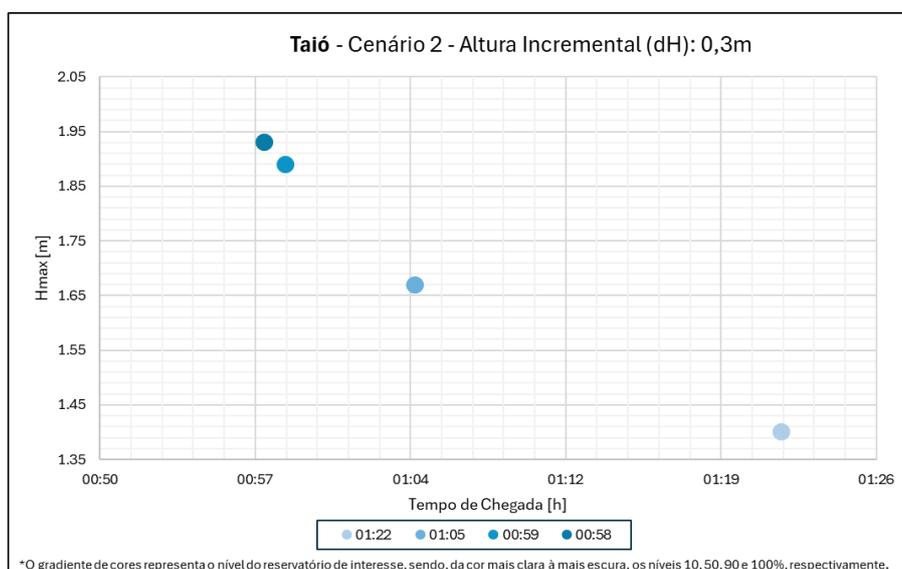


Figura 28. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Taió.

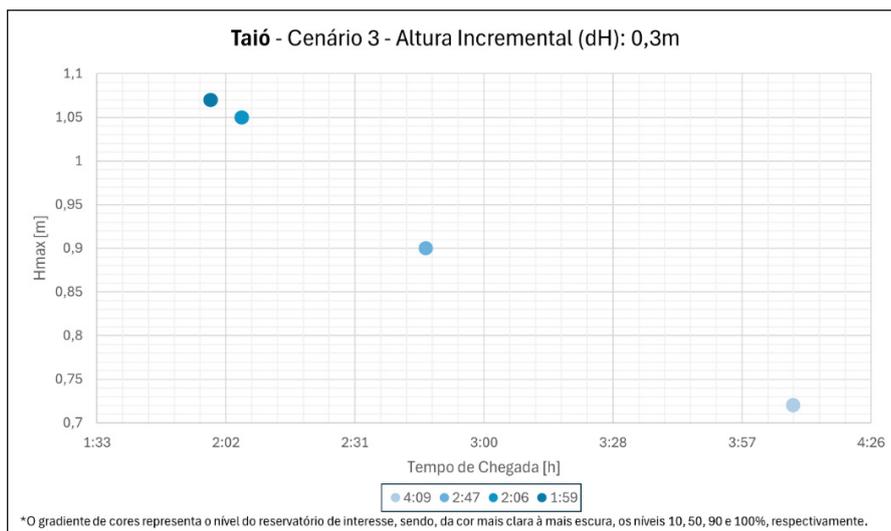


Figura 29. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Taió.

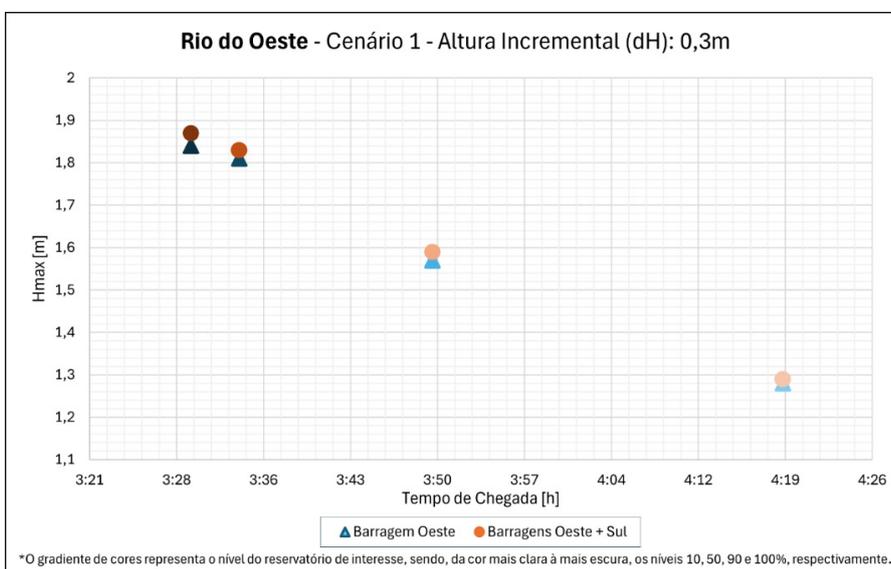


Figura 30. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Oeste.

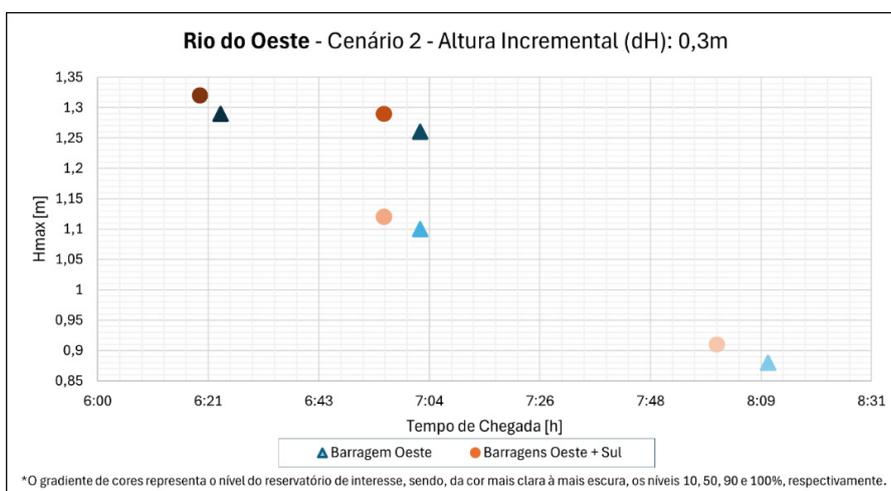


Figura 31. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Oeste.

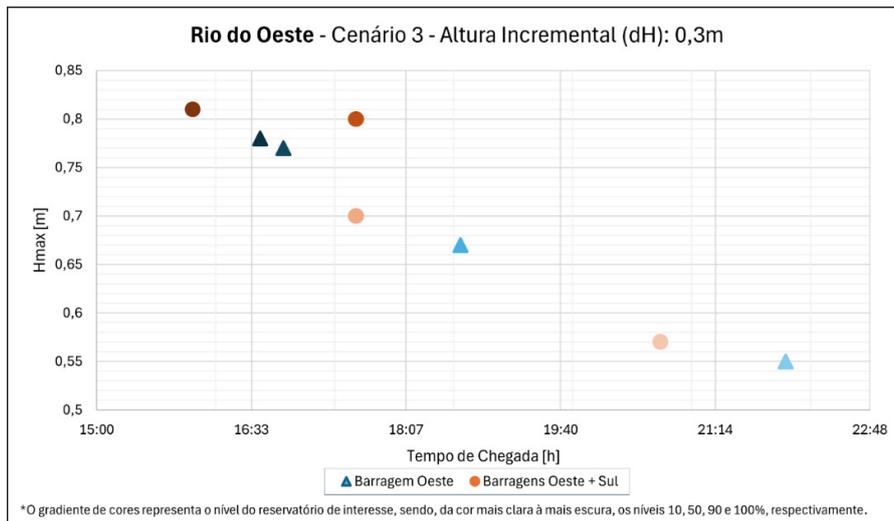


Figura 32. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Oeste.

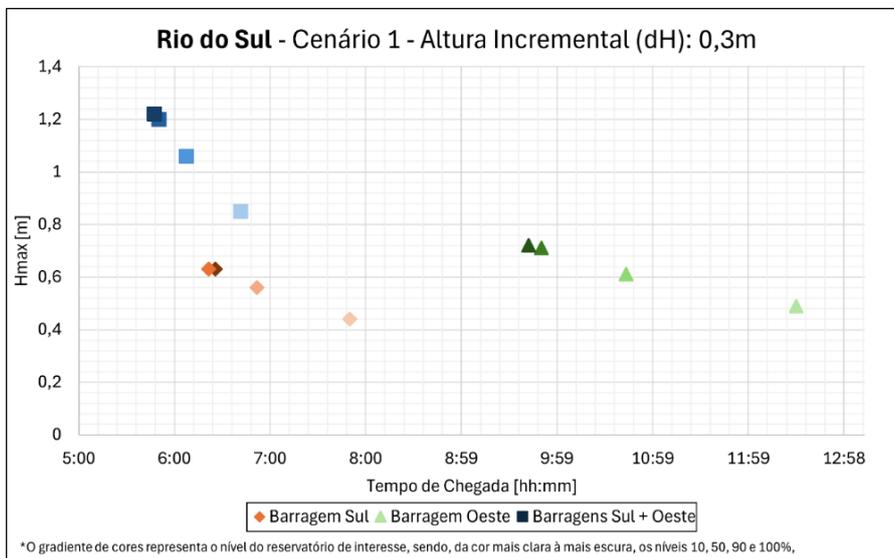


Figura 33. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Sul.

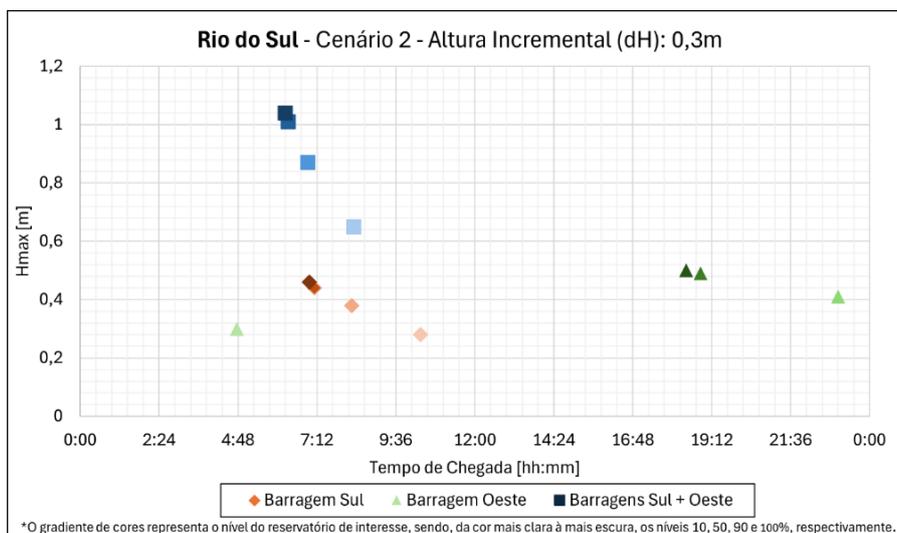


Figura 34. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Sul.

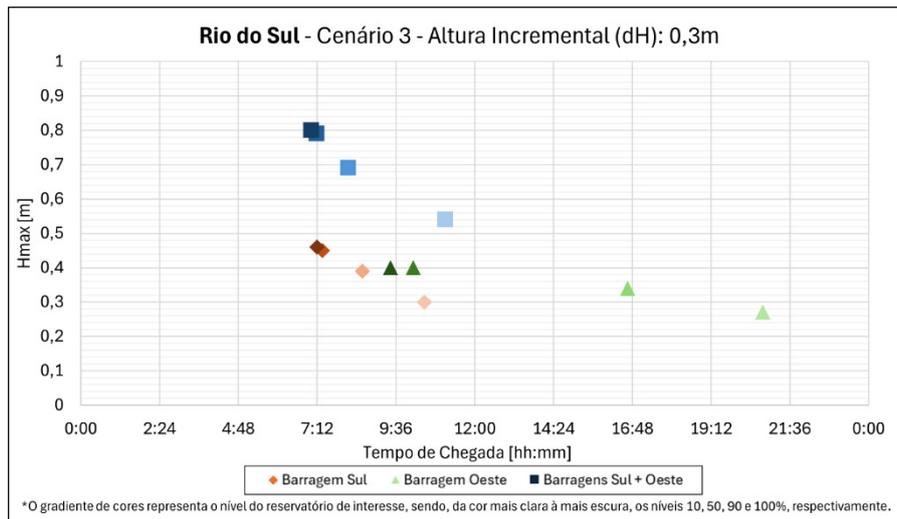


Figura 35. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Sul.

10. RESUMO DAS REGRAS DE OPERAÇÃO

Na Figura 36 está representado o fluxograma resumo da regra de operação das Barragem de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí, considerando os processos, os documentos envolvidos e os momentos para declaração de Abertura ou Fechamento de Situação.

Através da etapa inicial “Monitoramento Hidrometeorológico”, é definida a situação de inundação nas seções de controle de restrição operativa. Caso se identifique situação de “Atenção” em Rio do Sul ou “Alerta” em Taió e/ou Ituporanga e as condições de chuva, tanto observada como prevista, são significativas, deverá ser declarado “Abertura de Situação” para operação da barragem. Nesse momento, a equipe responsável pela operação deve ser mobilizada e o “Formulário de Operação”³⁵ preparado.

Em seguida, iniciam-se as manobras nas comportas, como descritas nos itens “Operação das Comportas/Dispositivos de Descarga” para o procedimento “Manobras de Comporta para Enchimento” do reservatório. A partir de então, o “Balanço Hídrico” do reservatório deve ser acompanhado até o fim do evento hidrológico, para avaliar a situação de segurança da barragem. O sistema operacional RESOP³⁶ pode ser utilizada como apoio para acompanhamento do balanço hídrico. Os cálculos de “Balanço Hídrico” deverão estar presentes no “Formulário de Operação”.

Também com base no monitoramento hidrometeorológico, decide-se sobre o início das “Manobras de Comporta para Esvaziamento” do reservatório, conforme descritos nos itens de “Procedimento de Esvaziamento”, de acordo com as características do evento. Finalizado o evento hidrológico, é necessário realizar a “Inspeção da Barragem” com o preenchimento do “Checklist de Inspeção”³⁷, que também deverá constar no “Formulário de Operação”. A “Declaração de Fechamento de Situação” se dá apenas com a entrega do “Formulário de Operação” assinado pelos responsáveis.

Todas as informações e registros da operação devem ser organizados e arquivados para consultas futuras.

35 602-FM-EHR-OP

36 [SIG²A Fractal \(fractaleng.com.br\)](http://fractaleng.com.br)

37 361-CL-EHR-OP-002-REV_A

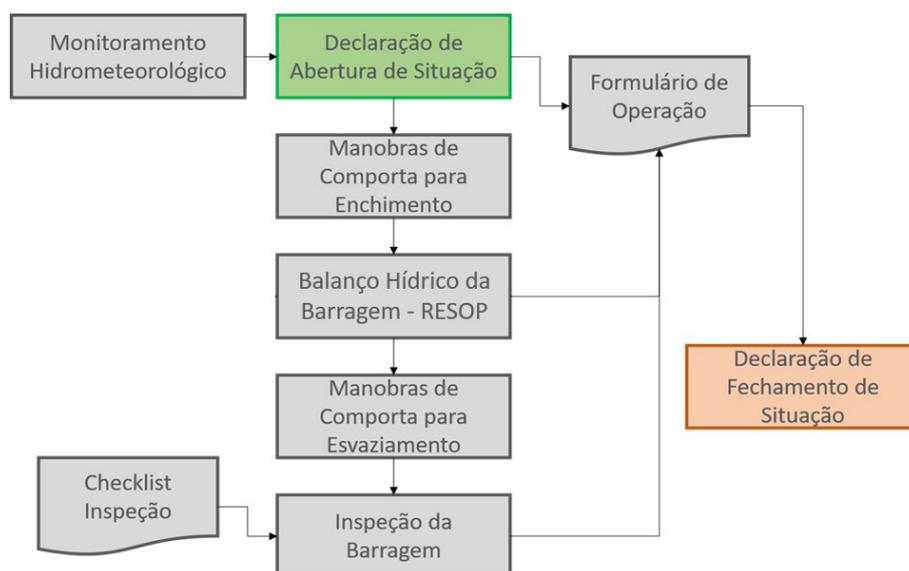


Figura 36. Resumo da regra de operação.

Para melhor acompanhamento durante a operação dos reservatórios, um documento resumo³⁸ com os fluxogramas de decisão e a dinâmica de abertura e fechamento das comportas acompanha este manual.

11. FLUXO DE COMUNICAÇÃO

O meio de comunicação usual utilizado pela SDC é por mensagens instantâneas em aparelhos celulares ou via web (aplicativo “WhatsApp”). Atualmente existe um grupo de mensagem “Operação Barragem”, conforme Figura 37.

Neste grupo, estão inclusos todos os envolvidos relacionados às operações das barragens, sendo eles: Secretário da Defesa Civil, Diretor de Gestão de Desastres, Diretor de Gestão de Riscos a Adaptação Climática, Diretor de Obras e Projetos Especiais, Gerente de Monitoramento e Alerta, Gerente de Manutenção e Operação de Equipamentos Especiais, Gerente de Operações, Operadores das Barragens, Hidrólogos, Coordenadores Regionais de Defesa Civil e Consultores. A responsabilidade e atribuições de cada integrante está descrita no documento anexo – 602-MOPH-CC-SDC-002-3.

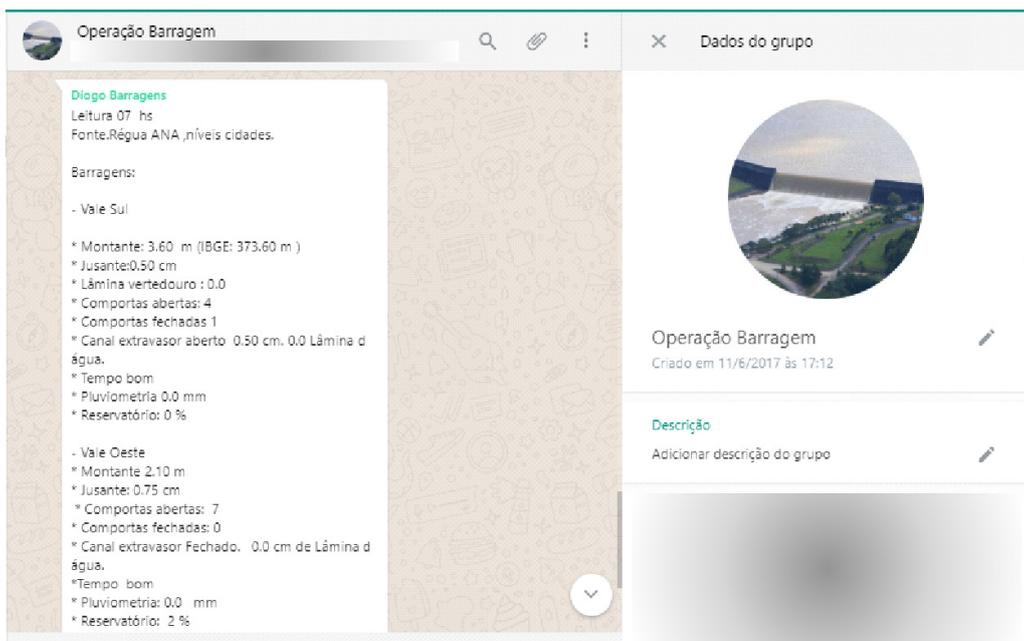


Figura 37. Ilustração do aplicativo de mensagens instantâneas do grupo “Operação Barragem” da SDC.

As vantagens nesse tipo de comunicação são: rapidez no envio e recebimento de informações (desde que as pessoas estejam conectadas), uma única mensagem pode ser transmitida ao mesmo tempo a todos os membros do grupo. Entre as desvantagens são a dependência de acesso à internet e energia elétrica, organização e arquivamento de assuntos tratados, formalização (documento em papel timbrando com assinatura).

Continuamente o monitoramento hidrometeorológico da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu se dá na Coordenação de Monitoramento e Alerta, onde é transmitida a situação de risco hidrológico às demais diretorias e gerências, principalmente por grupos de mensagens instantâneas.

Já o monitoramento hidráulico das barragens (níveis d'água de montante e jusante, número de comportas abertas e fechadas) é realizado pelo Operador (in loco) e repassadas ao grupo de mensagens instantâneas “Operação Barragem” e registrado no sistema RESOP, que calcula automaticamente o balanço hídrico das estruturas. As informações de nível nas barragens e número de comportas das descargas de fundo abertas e/ou fechadas são utilizadas para realizar o balanço hídrico dos reservatórios (cálculos das vazões afluentes e defluentes) e determinação do nível de segurança do reservatório (normal, observação, atenção ou emergência), que é transmitido às diretorias e gerências também no grupo de mensagens instantâneas “Operação Barragem”.

Nas situações em que o meio de comunicação utilizado seja o de mensagens instantâneas (grupo “Operação Barragens”), recomenda-se que na determinação de nível de segurança “Atenção” na seção de controle pelo Gerente de Monitoramento e Alerta, será declarado como ciência quando o aplicativo marcar como lida a mensagem enviada aos participantes do grupo, e logo após se conduza a operação de fechamento das comportas (enchimento do reservatório). Da mesma forma, quando forem constatadas as condições para o esvaziamento por parte da Gerência de Monitoramento e Alerta. O objetivo dessa recomendação é a objetividade na execução das ações necessárias de contenção de cheias. Vale ressaltar que a formalização de toda operação será registrada no Formulário de Operação.

Em caso de falha no contato com o operador via grupo “Operação Barragens”, o contato deverá ser feito diretamente com o Operador da Barragem via ligação. Deve-se garantir a comunicação do Secretário da Proteção e Defesa Civil sobre o início da operação, partindo tal comunicado da Gerência de Monitoramento e Alerta para a Diretoria de Gestão de Desastres, que é responsável

por se comunicar diretamente com o Secretário.

12. INSPEÇÃO DAS BARRAGENS PÓS-EVENTO

Com o fim do evento hidrológico e finalizado o esvaziamento dos reservatórios, após a estabilização das condições meteorológicas, a Inspeção nas Barragens deverá ser realizada. O planejamento da Inspeção é de responsabilidade da Gerência de Manutenção e Operação de Equipamentos Especiais conforme descrito no documento anexo – 602-MOPH-CC-SDC-001-A.

Na inspeção, um técnico especializado deverá ir presencialmente na barragem e percorrer as devidas estruturas buscando identificar e registrar, com fotos e anotações, quaisquer problemas consequentes do respectivo evento de cheia. Um modelo de Checklist³⁹ foi disponibilizado para ser utilizado como base da Inspeção. Finalizado procedimento, o Checklist e as informações coletadas deverão fazer parte do Formulário de Operação⁴⁰.

13. ROTINAS PARA DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE SEGURANÇA

Neste item estão formulados e detalhados os procedimentos de rotina para a leitura e o registro de níveis, aberturas/fechamento de comportas e cálculos de afluência e defluências dos reservatórios de contenção de cheias do Vale do Itajaí e nas seções de controle (Rio do Sul, Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Blumenau) necessários à determinação dos seus níveis de segurança e balanço hídrico.

Cabe a cada um dos envolvidos na operação, na área de sua competência, adequar a equipe:

Designando profissionais com atribuições e responsabilidades inerentes a todas as ações previstas nesta rotina, com identificação de seus substitutos em caso de ausências ou impedimentos de qualquer natureza;

Definindo os encaminhamentos internos dos documentos e o fluxo das informações, de forma que as ações possam ser executadas prontamente e na periodicidade fixada nesta rotina;

Estabelecendo os locais para arquivamento dos documentos, bem como os procedimentos para sua consulta e devolução.

39 361-CL-EHR-OP-002

40 602-FM-EHR-OP

ANEXO A – CONFIGURAÇÕES PARA O CASO DE UMA COMPORTA INDISPONÍVEL NA BARRAGEM SUL – ITUPORANGA

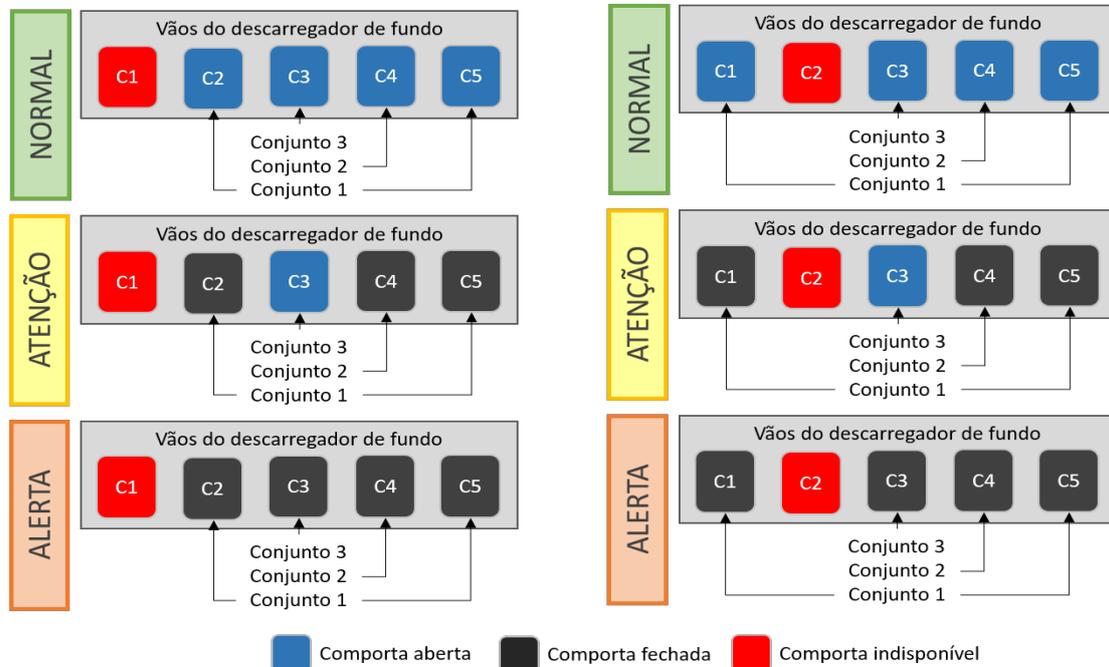


Figura 38. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Sul em caso de indisponibilidade das comportas C1 ou C2.

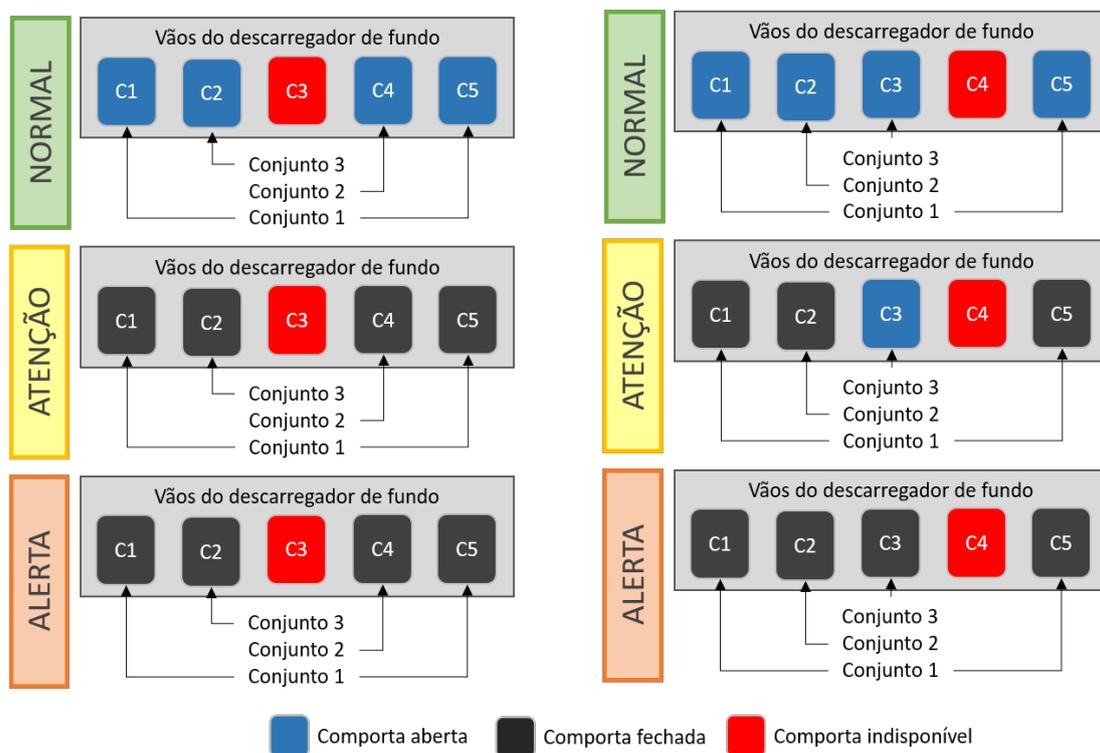


Figura 39. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Sul em caso de indisponibilidade das comportas C3 ou C4.

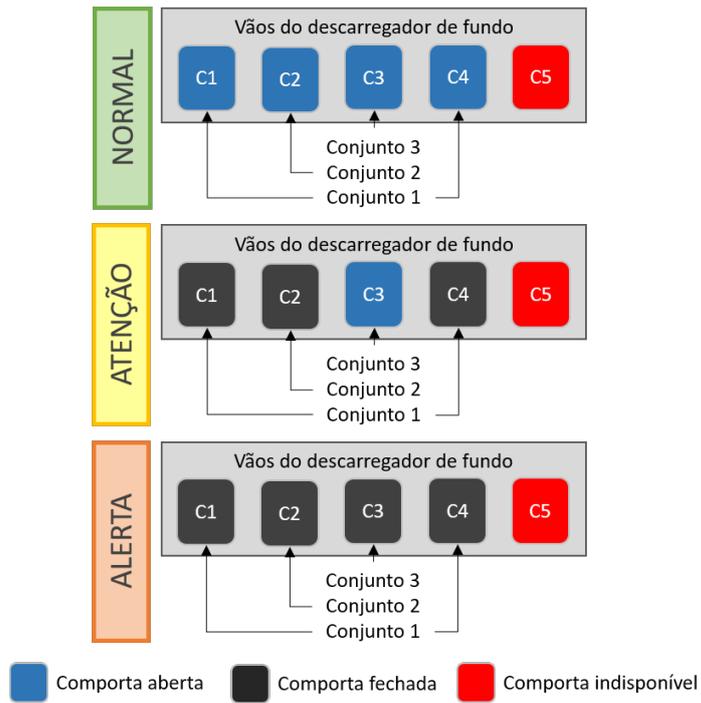


Figura 40. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Sul em caso de indisponibilidade da comporta C5.

ANEXO B – CONFIGURAÇÕES PARA O CASO DE UMA COMPORTA INDISPONÍVEL NA BARRAGEM OESTE - TAIÓ

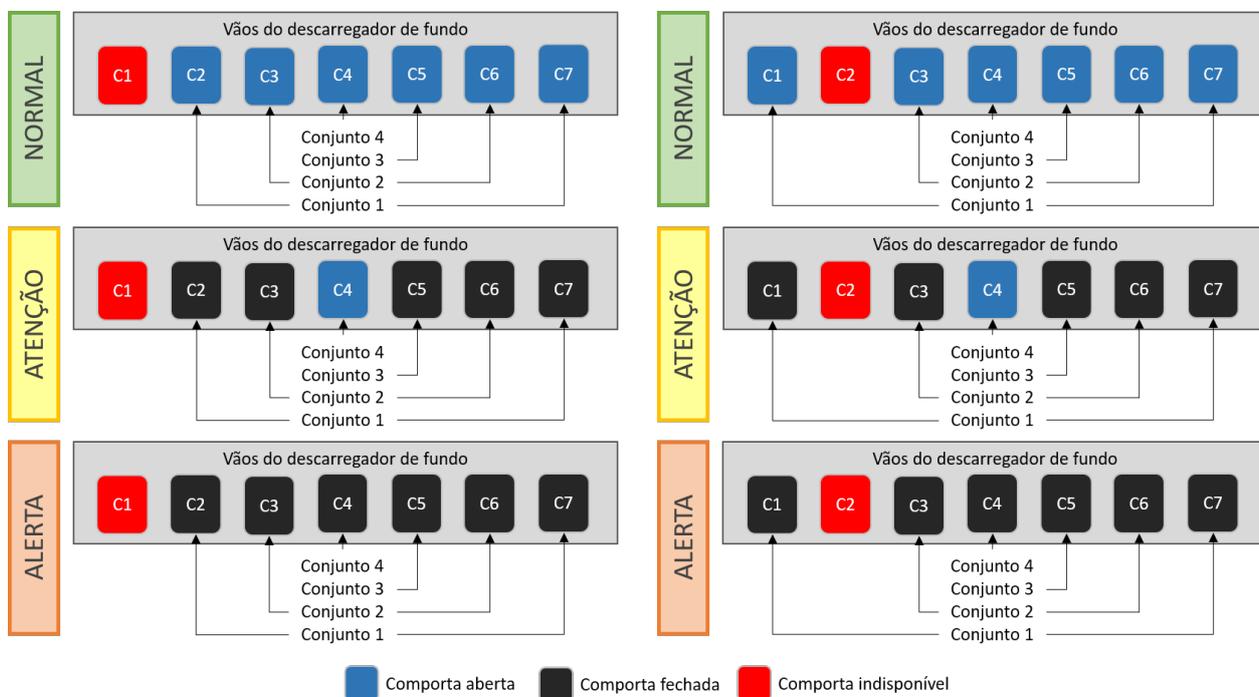


Figura 41. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Oeste em caso de indisponibilidade das comportas C1 ou C2.

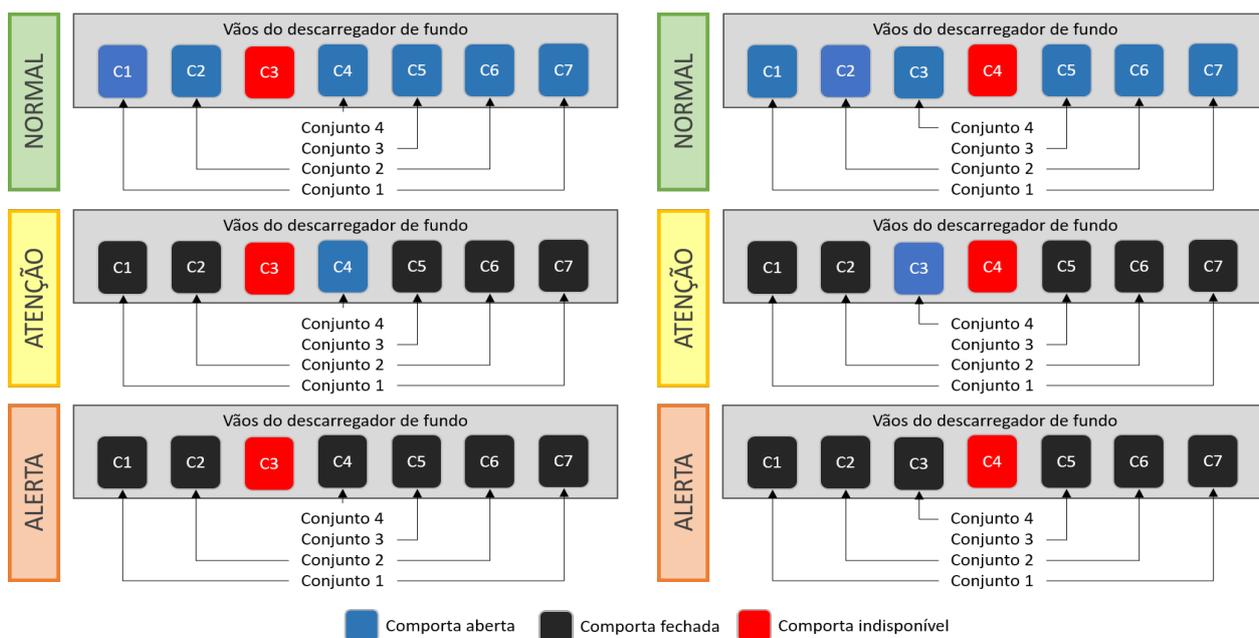


Figura 42. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Oeste em caso de indisponibilidade das comportas C3 ou C4.

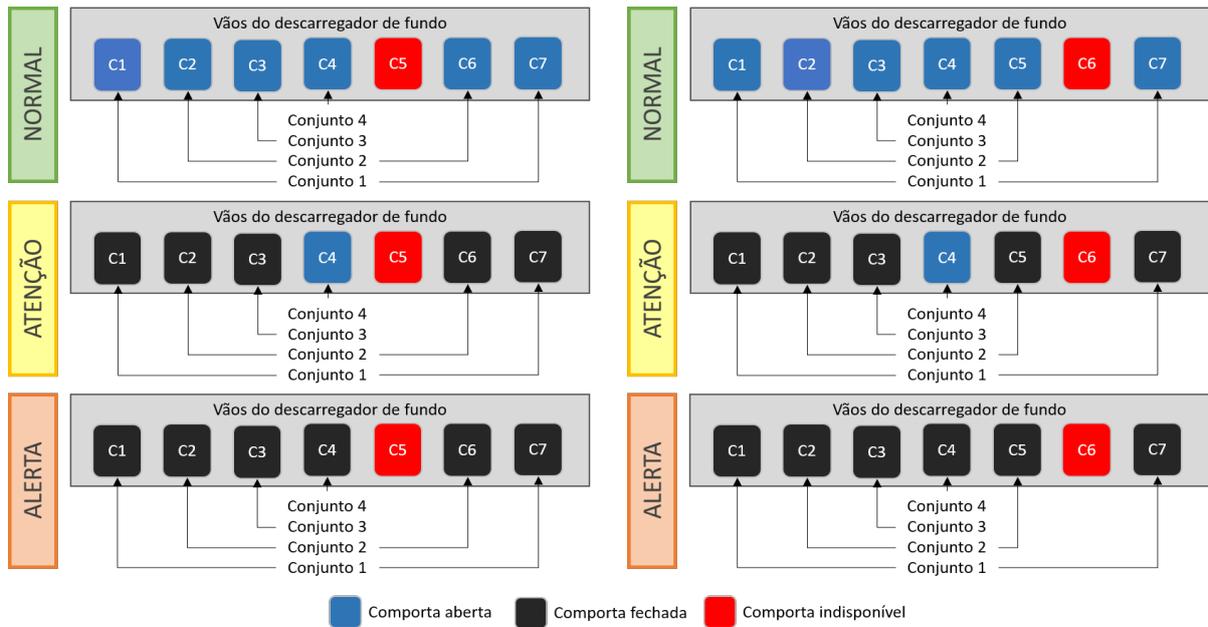


Figura 43. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Oeste em caso de indisponibilidade das comportas C5 ou C6.

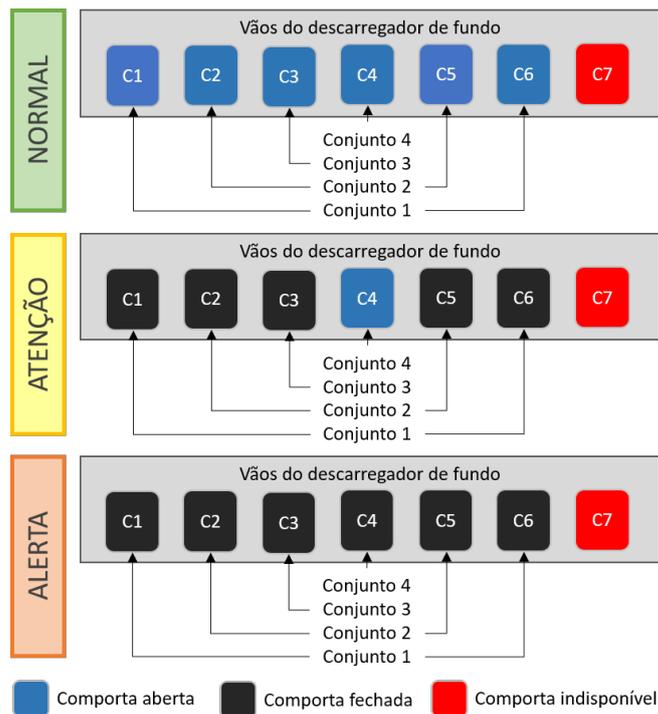


Figura 44. Dinâmica de fechamento das comportas da barragem Oeste em caso de indisponibilidade da comporta C7.





	 FRACTAL ENGENHARIA	Secretaria da Proteção e Defesa Civil de Santa Catarina		
TÍTULO Apêndices – Manual de Operação Hidráulica das Barragens de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí		Nº FORNECEDOR 602-SDC-RT-HID-APE-002	REV. 3	FOLHA 1/219
		Nº CONTRANTE:		REV.

REVISÕES - FORNECEDOR				
TE: TIPO DE EMISSÃO	A - PRELIMINAR B - PARA APROVAÇÃO C - P/ CONHECIMENTO	D - PARA COTAÇÃO E - PARA CONSTRUÇÃO F - CONFORME COMPRADO	G - CONFORME CONSTRUÍDO H - CANCELADO L - APROVADO	M - APROVADO C COMENTÁRIOS N - NÃO APROVADO O - CERTIFICADO

Rev.	TE	Descrição	Por	Ver.	Apr.	Data
A	B	Emissão	ACN	PGL	-	24/11/2020
0	B	Aprovação	ACN	PGL	FMR	05/01/2021
1	B	Aprovação	ACN	-	-	28/01/2021
2	B	Aprovação	LVZG	DP e GVP	FMR	18/02/2022
3	B	Aprovação	PDL	GHM	GCM	29/08/2024

EQUIPE DO PROJETO		
Profissional	Assinatura	Data
Preparado por PGL		29/08/2024
Revisado por		-
Verificado por GHM		29/08/2024
Aprovado por GCM		29/08/2024

APRESENTAÇÃO

Esse documento de apêndice apresenta as simulações complementares que subsidiaram, junto às análises históricas, na definição dos procedimentos operacionais contidos neste Manual de Operação das Barragens de Contenção de Cheias do Vale do Itajaí, referentes às barragens Sul - Ituporanga, Norte – José Boiteux e Oeste - Taió.

Os resultados das análises hidráulicas determinam uma referência técnica para o processo de tomada de decisão quanto às operações de controle de cheias no vale do Itajaí. Os estudos hidráulicos foram realizados a fim de buscar maior entendimento e consolidação da dinâmica de propagação dos pulsos das operações ao longo do vale de jusante até os municípios considerados restrição operativa nos processos de operação das barragens, especialmente Rio do Sul, ponto mais sensível da bacia do Rio Itajaí.

Nesta sessão, estão relacionadas as análises representativas realizadas na revisão 3 (ano 2024) do Manual de Operação, sendo esta a versão atual, e apresentadas no APÊNDICE A - Análise Operacional Hidráulica Complementar das Barragens Sul e Oeste. Além disso, o documento contempla as análises realizadas na primeira versão do Manual de Operação, realizadas em 2018, apresentadas nos Apêndices APÊNDICE B - Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Sul, APÊNDICE C – Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Oeste e APÊNDICE D – Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Norte, para as barragens Sul, Oeste e Norte, respectivamente. Previamente, os apêndices citados eram identificados pelos documentos codificados como:

361-RT-EHR-EHO-001-REV_A (Estudo Hidráulico Barragem Sul);

361-RT-EHR-EHO-002-REV_A (Estudo Hidráulico Barragem Oeste);

361-RT-EHR-EHO-003-REV_A (Estudo Hidráulico Barragem Norte).

SUMÁRIO

APÊNDICE A - ANÁLISE OPERACIONAL HIDRÁULICA COMPLEMENTAR DAS BARRAGENS SUL E OESTE	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS	12
1.3 MODELO HIDRÁULICO.....	13
1.4 RESULTADOS.....	15
1.4.1 Taió.....	16
1.4.2 Rio do Oeste	20
1.4.3 Ituporanga.....	27
1.4.4 Rio do Sul	31
1.5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	43
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE B - ESTUDO HIDRÁULICO OPERACIONAL – BARRAGEM SUL.....	51
2.1 INTRODUÇÃO	51
2.2 MODELO HIDROLÓGICO	51
2.3 MODELO HIDRÁULICO.....	52
2.4 DADOS DE ENTRADA	53
2.4.1 CHUVA DE PROJETO.....	54
2.4.2 CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA	56
2.5 RESULTADOS.....	61
2.5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	62
2.5.2 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO	63
2.5.3 SIMULAÇÃO DE Esvaziamento	84
2.5.4 SIMULAÇÃO OTIMIZADA DO VERTEDOURO	92
2.5.5 ANÁLISE COMPARATIVA – NATURAL E ATUAL.....	94
APÊNDICE C – ESTUDO HIDRÁULICO OPERACIONAL – BARRAGEM OESTE .	107
3.1 INTRODUÇÃO	107
3.2 MODELO HIDROLÓGICO	107
3.3 MODELO HIDRÁULICO.....	108
3.4 DADOS DE ENTRADA	109
3.4.1 CHUVA DE PROJETO.....	110
3.4.2 CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA	112
3.5 RESULTADOS.....	117
3.5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	117
3.5.2 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO	119
3.5.3 SIMULAÇÃO DE Esvaziamento	139
3.5.4 SIMULAÇÃO OTIMIZADA DO VERTEDOURO	146

3.5.5	ANÁLISE COMPARATIVA – NATURAL E ATUAL	148
APÊNDICE D – ESTUDO HIDRÁULICO OPERACIONAL – BARRAGEM NORTE.		162
4.1	INTRODUÇÃO	162
4.2	MODELO HIDROLÓGICO	163
4.3	MODELO HIDRÁULICO.....	163
4.4	DADOS DE ENTRADA	165
4.4.1	CHUVA DE PROJETO.....	165
4.4.2	CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA	167
4.5	RESULTADOS.....	169
4.5.1	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	170
4.5.2	SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO	171
4.5.3	SIMULAÇÃO DE ESVAZIAMENTO	193
REFERÊNCIAS		201
INFORMAÇÃO TÉCNICA Nº 043/DIGR/2024		213

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rede hidrometeorológicos da bacia do Rio Itajaí.	12
Figura 2. Domínio da simulação hidráulica.	13
Figura 3. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.	19
Figura 4. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.	27
Figura 5. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.	31
Figura 6. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.	42
Figura 7. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Ituporanga.	44
Figura 8. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Ituporanga.	44
Figura 9. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Ituporanga.	45
Figura 10. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Taió.	45
Figura 11. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Taió.	46
Figura 12. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Taió.	46
Figura 13. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Oeste.	47
Figura 14. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Oeste.	47
Figura 15. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Oeste.	48
Figura 16. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Sul.	48
Figura 17. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Sul.	49
Figura 18. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Sul.	49
Figura 19. Modelo conceitual de operação da Barragem Sul.	53
Figura 20. Chuva de projeto.	56
Figura 21. Modelo hidrológico conceitual.	57
Figura 22. Calibração do evento de setembro de 2018.	58
Figura 23. Quantificação do efeito das Barragens Sul e Oeste na inundação de Rio do Sul.	60
Figura 24. Cheia de setembro de 2018.	61
Figura 25. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Sul.	62
Figura 26. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Sul.	63

Figura 27. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 75%.....	64
Figura 28. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 90%.....	65
Figura 29. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 96 %.....	66
Figura 30. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 85%.....	67
Figura 31. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 76%.....	68
Figura 32. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 66 %.....	69
Figura 33. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 58%.....	70
Figura 34. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 55%.....	71
Figura 35. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 50%.....	72
Figura 36. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 47%.....	73
Figura 37. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.	74
Figura 38. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.	75
Figura 39. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.	76
Figura 40. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.	77
Figura 41. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.	78
Figura 42. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.	79
Figura 43. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.	80
Figura 44. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.	81
Figura 45. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.	82
Figura 46. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.	83
Figura 47. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul.	85
Figura 48. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 105 mm..	86
Figura 49. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 173 mm..	87
Figura 50. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 208 mm..	88
Figura 51. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 265 mm..	89
Figura 52. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 293 mm..	90
Figura 53. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 375 mm..	91
Figura 54. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 293 mm.	93
Figura 55. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 320 mm.	94
Figura 56. Comparativo de inundação – Chuva 105 mm.	95
Figura 57. Comparativo de inundação – Chuva 173 mm.	96
Figura 58. Comparativo de inundação – Chuva 208 mm.	97
Figura 59. Comparativo de inundação – Chuva 265 mm.	98
Figura 60. Comparativo de inundação – Chuva 293 mm.	99
Figura 61. Comparativo de inundação – Chuva 375 mm.	100

Figura 62. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 105 mm.....	101
Figura 63. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 173 mm.....	102
Figura 64. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 208 mm.....	103
Figura 65. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 265 mm.....	104
Figura 66. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 293 mm.....	105
Figura 67. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 375 mm.....	106
Figura 68. Modelo conceitual de operação da Barragem Oeste.....	109
Figura 69. Chuva de projeto.....	112
Figura 70. Modelo hidrológico conceitual.....	113
Figura 71. Calibração do evento de setembro de 2018.....	114
Figura 72. Quantificação do efeito das Barragens Sul e Oeste na inundação de Rio do Sul.	115
Figura 73. Cheia de setembro de 2018.....	116
Figura 74. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Sul.....	117
Figura 75. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Oeste.....	118
Figura 76. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 90%.....	120
Figura 77. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 95%.....	121
Figura 78. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 96 %.....	122
Figura 79. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 96%.....	123
Figura 80. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 86 %.....	124
Figura 81. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 74 %.....	125
Figura 82. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 65 %.....	126
Figura 83. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 60 %.....	127
Figura 84. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 54 %.....	128
Figura 85. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 49 %.....	129
Figura 86. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.	130
Figura 87. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.	131
Figura 88. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.	132
Figura 89. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.	133
Figura 90. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.	134
Figura 91. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.	135
Figura 92. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.	136
Figura 93. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.	137
Figura 94. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.	138
Figura 95. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.	139
Figura 96. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste.	140

Figura 97. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 105 mm.	141
Figura 98. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 173 mm.	142
Figura 99. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 208 mm.	143
Figura 100. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 265 mm.	144
Figura 101. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 293 mm.	145
Figura 102. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 375 mm.	146
Figura 103. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 293 mm.	147
Figura 104. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 320 mm.	148
Figura 105. Comparativo de inundação – Chuva 105 mm.	150
Figura 106. Comparativo de inundação – Chuva 173 mm.	151
Figura 107. Comparativo de inundação – Chuva 208 mm.	152
Figura 108. Comparativo de inundação – Chuva 265 mm.	153
Figura 109. Comparativo de inundação – Chuva 293 mm.	154
Figura 110. Comparativo de inundação – Chuva 375 mm.	155
Figura 111. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 105 mm.	156
Figura 112. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 173 mm.	157
Figura 113. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 208 mm.	158
Figura 114. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 265 mm.	159
Figura 115. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 293 mm.	160
Figura 116. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 375 mm.	161
Figura 117. Modelo conceitual de operação da Barragem Norte.	164
Figura 118. Chuva de projeto.	167
Figura 119. Modelo hidrológico conceitual.	168
Figura 120. Calibração do evento de setembro de 2018.	168
Figura 121. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Norte.	170
Figura 122. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Norte.	171
Figura 123. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 36%.	172
Figura 124. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 54 %.	173
Figura 125. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 59 %.	174
Figura 126. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 63 %.	175
Figura 127. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 65 %.	176

Figura 128. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 49 %.....	177
Figura 129. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 36 %.....	178
Figura 130. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 31 %.....	179
Figura 131. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 24 %.....	180
Figura 132. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 20 %.....	181
Figura 133. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.	183
Figura 134. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.	184
Figura 135. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.	185
Figura 136. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.	186
Figura 137. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.	187
Figura 138. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.	188
Figura 139. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.	189
Figura 140. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.	190
Figura 141. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.	191
Figura 142. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.	192
Figura 143. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte.	194
Figura 144. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 105 mm.	195
Figura 145. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 173 mm.	196
Figura 146. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 208 mm.	197
Figura 147. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 265 mm.	198
Figura 148. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 293 mm.	199
Figura 149. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 375 mm	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de resultados em Taió.....	16
Tabela 2. Resumo de resultados em Rio do Oeste.....	20
Tabela 3. Resumo de resultados em Ituporanga.....	27
Tabela 4. Resumo de resultados em Rio do Sul.	31
Tabela 5. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.	54
Tabela 6. Esvaziamento do reservatório da Barragem Sul.	84
Tabela 7. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.	110
Tabela 8. Esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste.	140



Código: 602-SDC-RT-HID-APE-0001

Título: Apêndices – Manual de Operação
Hidráulica das Barragens de Contenção
de Cheias do Vale do Itajaí



Revisão: 3

Emissão: 18/10/2024

Tabela 9. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.....	165
Tabela 10. Esvaziamento do reservatório da Barragem Norte.....	193

APÊNDICE A - Análise Operacional Hidráulica Complementar das Barragens Sul e Oeste

1.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo, realizado no ano de 2024, é uma análise hidráulica operacional dos reservatórios das barragens Oeste e Sul, a fim de determinar como os pulsos de abertura das comportas de fundo podem impactar nos níveis d'água a jusante e qual deverá ser o tempo de chegada desses pulsos. Além disso, as interações hidrodinâmicas entre os braços dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul são analisadas em termos de formação de remanso.

Tais operações são avaliadas por meio de uma combinação de cenários que cruzam diferentes condições de nível d'água dos reservatórios nas barragens com diferentes condições hidrológicas ao longo do vale de jusante para os municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul.

Os resultados da análise hidráulica determinam uma referência técnica para o processo de tomada de decisão quanto às operações de controle de cheias no vale do Itajaí. As simulações hidráulicas foram desenvolvidas de forma integrada dos rios Itajaí Oeste, Sul e Açu, onde mais de 100 km de trechos de rio foram analisados a partir de mais de 70 condições ou combinações hidráulicas distintas, determinado 168 condições analisadas. Os resultados das simulações foram avaliados na perspectiva do efeito incremental da operação sobre os níveis a jusante e a avaliação dos tempos de chegada dos pulsos para diferentes condições hidrológicas naturais.

Os ábacos apresentados nas conclusões do presente relatório estão considerados no documento principal do Manual de Operação Hidráulica dos reservatórios.

1.2 ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

A área de estudo contempla a bacia do Rio Itajaí na sua totalidade, porém os trechos entre os eixos das barragens Oeste e Sul até o município de Rio do Sul são foco da análise hidráulica. Na Figura 1 estão ilustradas a delimitação da área de contribuição da bacia hidrográfica e a rede hidrometeorológicas disponível com dados históricos.

BACIA HIDROGRÁFICA VALE DO ITAJAÍ: Estações fluviométricas e pluviométricas

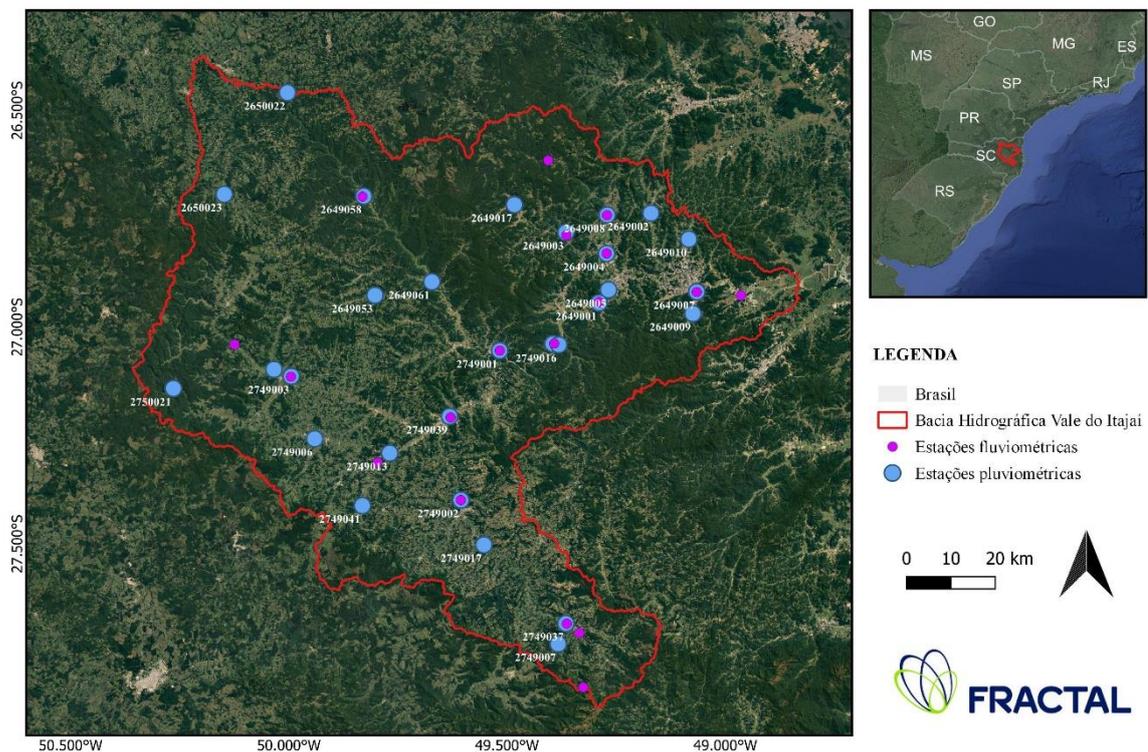


Figura 1. Rede hidrometeorológica da bacia do Rio Itajaí.

Portanto, o domínio da modelagem numérica hidráulica contempla os eixos das barragens de Oeste e Sul até Rio do Sul, com mais de 100 km de extensão. Na Figura 2 está ilustrado o domínio da simulação numérica hidráulica, onde toda a região de interesse das operações das barragens Oeste e Sul está representada.

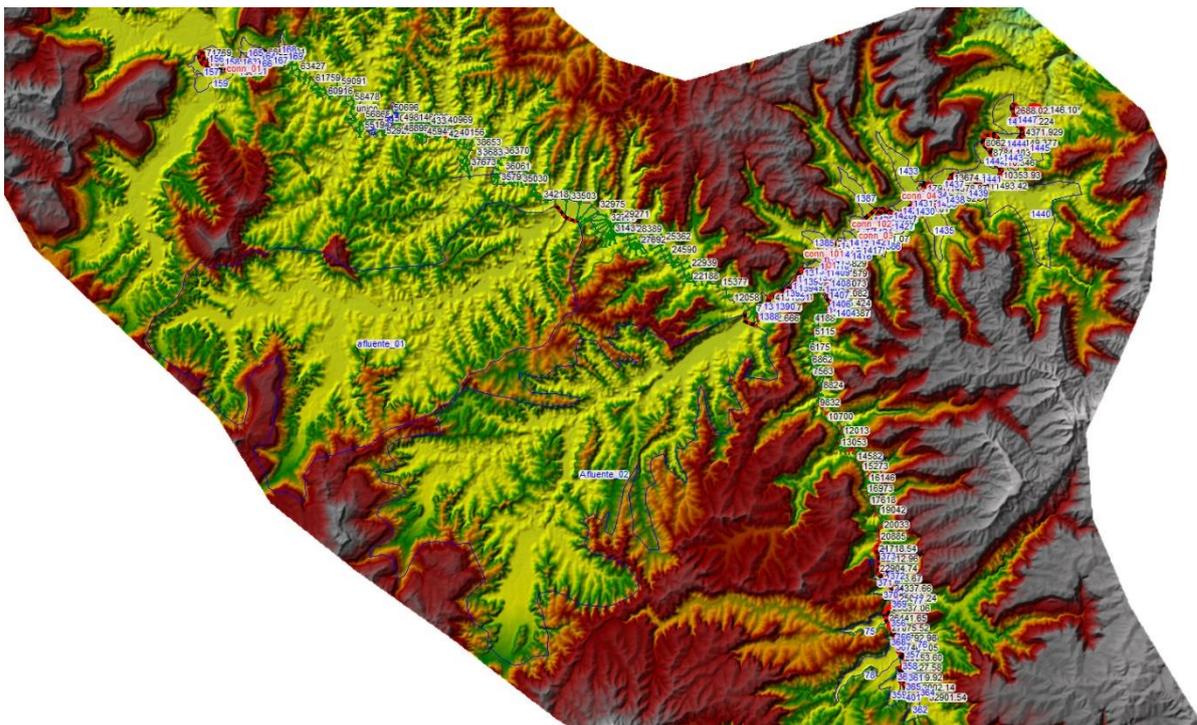


Figura 2. Domínio da simulação hidráulica.

1.3 MODELO HIDRÁULICO

O desenvolvimento do estudo hidráulico do vale de jusante das barragens Oeste e Sul foi realizado seguindo o estado da arte da engenharia hidráulica e as recomendações de boas práticas de FEMA (2013). Esse tipo de estudo é realizado com o uso de modelos numéricos específicos, e neste caso empregou-se o modelo HEC-RAS 5.0.6, em sua última versão disponível para o ano de 2018.

O HEC-RAS (HEC, 2016) é um modelo unidimensional e bidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície d'água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, podendo ocorrer mudanças de um regime para outro. O regime está atrelado à geomorfologia do vale de jusante, no caso a calha do rio, com rios de planície escoando em regime subcrítico e rios de corredeira escoando entre os regimes críticos e supercríticos.

O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações em que o perfil da superfície d'água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite, ainda, a avaliação do efeito de estruturas hidráulicas (pontes, galerias, barragens, etc).

A formulação matemática unidimensional do HEC-RAS é baseada nas equações da conservação do momento de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{|Q|Q}{K^2} + q \frac{Q}{A} = 0 \quad (1)$$
$$L \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Onde Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície d'água [m]; K é capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o fluxo lateral [m³/s/m]; β é o fator de distribuição do fluxo [adim]. O primeiro conjunto de equações representa a conservação de momento, onde a energia específica do escoamento é determinada, e o segundo conjunto representa a conservação da massa.

O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na Eq.(1) para obtenção de sua solução hidráulica. A capacidade de transporte das formulações hidráulicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional e bidimensional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Onde V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; S é a declividade do escoamento [m/m]; R_h raio hidráulico [m].

No modelo unidirecional a representação do rio se dá por um eixo e a geometria do canal é definida a partir de seções transversais, ou seções hidráulicas. Estas seções devem ser posicionadas ao longo do comprimento do rio em espaçamentos condizentes com as singularidades hidráulicas existentes no curso d'água e com os critérios de estabilidade numérica do modelo. O posicionamento das seções deve ser feito de forma tal que represente o canal inteiro uniformemente e as singularidades hidráulicas, como pontos de mudança brusca de declividade, afunilamentos, ilhas e fluxo por estruturas hidráulicas existentes no curso do rio.

Desta forma, o modelo é fundamentado nas equações supracitadas, as quais possuem não linearidade e são capazes de representar os fenômenos de aceleração de um fluido de forma local e heterogênea em acordo das características físicas condicionadas à variabilidade geomorfológico da calha do rio e da planície de inundação e da rugosidade relativa da

superfície. Portanto, a modelagem numérica hidráulica fornece um conjunto de resultados de alta complexidade para fundamentar planos de ação e processos de tomada de decisão.

1.4 RESULTADOS

As simulações hidráulicas foram desenvolvidas em forma de cenarização, onde mais de 70 simulações foram desenvolvidas numa análise combinatório entre as condições de armazenamento dos reservatórios e da condição hidrológica do vale de jusante. Com isso, o comportamento dos pulsos gerados pelas operações pôde ser analisado em termos de incremento de altura da lâmina d'água e do tempo de chegada nos municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul.

Os resultados são apresentados e analisados por ponto de interesse representados pelos municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul. São apresentados os cenários hidrológicos, a combinação de barragens operadas e os níveis d'água dos reservatórios.

Portanto, as seguintes condições hidrológicas foram consideradas para determinar as condicionantes do modelo hidráulico:

- Condição hidrológica 1: vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 200 m³/s/
- Condição hidrológica 2: vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 450 m³/s;
- Condição hidrológica 3: vazão total em Rio do Sul igual ou maior do que 700 m³/s.

Em relação aos reservatórios das barragens Oeste e Sul, os seguintes níveis de reservação foram considerados:

- NAR 100%: Reservatório cheio prestes a verter;
- NAR 90%: Reservatório cheio no limite da condição de emergência;
- NAR 50%: Reservatório parcialmente cheio;
- NAR 10%: Reservatório vazio.

Além disso, é analisado como os pulsos das operações propagam até as cidades de interesse combinando as barragens operando em conjunto ou não. Isso para avaliar as diferenças nos tempos de chega dos pulsos em cada localidade.

Um limite de altura incremental atrelado ao pulso da operação das barragens foi usado para avaliar o tempo de chegada nas localidades de interesse, usando 0,15 m e 0,30 m. Para

fins de uso no manual de operação, os resultados do tempo de chegada com base em 0,30 m serão aplicados para terminar conclusões sobre decisões operacionais. Entende-se que uma sobre elevação de 0,30 m é mais prática de ser observada e percebida pelo monitoramento manual por leitura de réguas.

1.4.1 Taió

Na Tabela 1 está o resumo dos resultados das simulações com os elementos das combinações.

Tabela 1. Resumo de resultados em Taió.

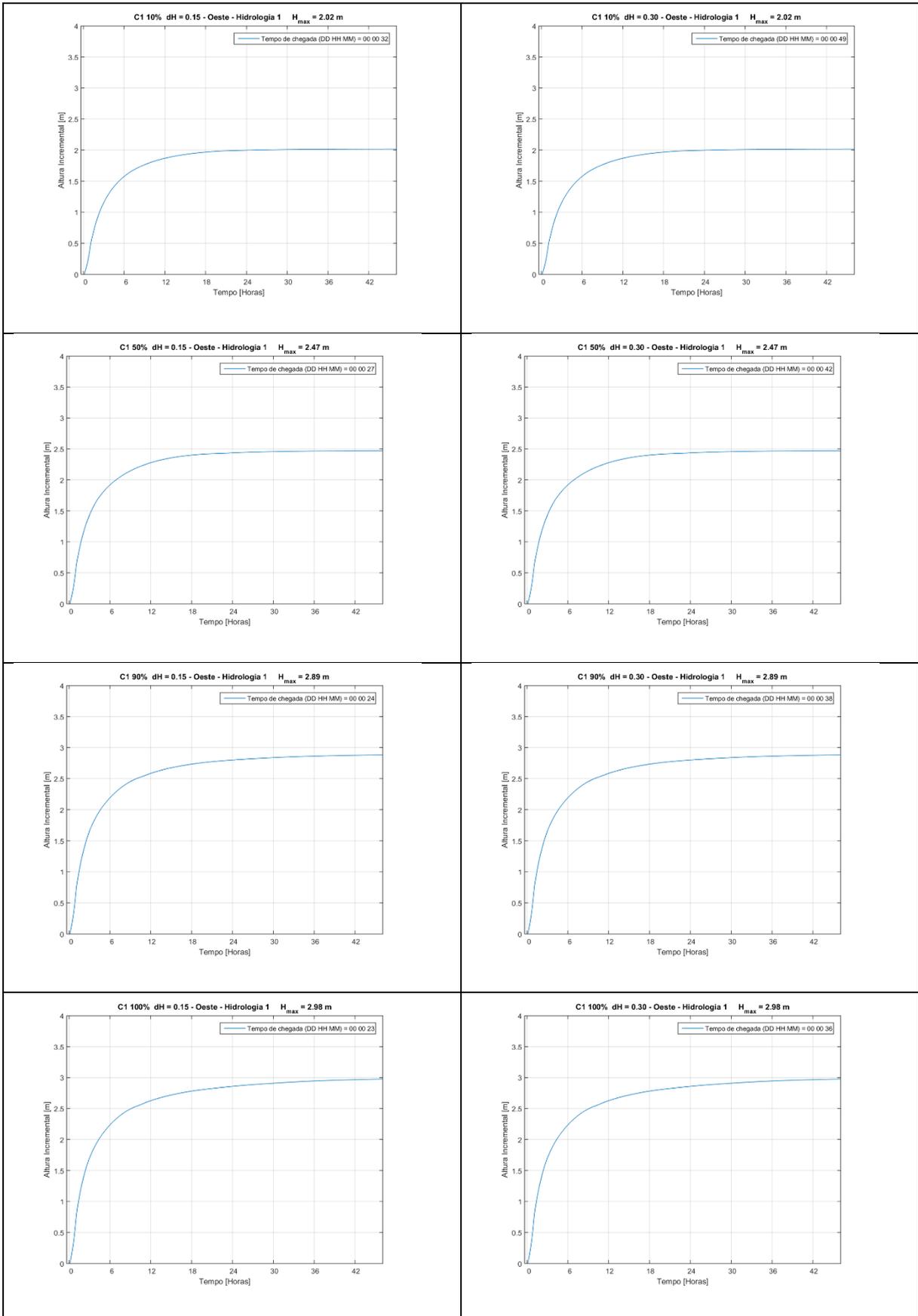
Simulação	Cenário hidrológico	Barragens operadas	% V	dH [m]	T _{ch} [DD:HH:MM]	Hmax [m]
1	Cenário 1	Taio	10	0,15	00 00 32	2,02
2	Cenário 1	Taio	10	0,30	00 00 49	2,02
3	Cenário 1	Taio	50	0,15	00 00 27	2,47
4	Cenário 1	Taio	50	0,30	00 00 42	2,47
5	Cenário 1	Taio	90	0,15	00 00 24	2,89
6	Cenário 1	Taio	90	0,30	00 00 38	2,89
7	Cenário 1	Taio	100	0,15	00 00 23	2,98
8	Cenário 1	Taio	100	0,30	00 00 36	2,98
9	Cenário 2	Taio	10	0,15	00 00 51	1,40
10	Cenário 2	Taio	10	0,30	00 01 22	1,40
11	Cenário 2	Taio	50	0,15	00 00 44	1,67
12	Cenário 2	Taio	50	0,30	00 01 05	1,67
13	Cenário 2	Taio	90	0,15	00 00 39	1,89
14	Cenário 2	Taio	90	0,30	00 00 59	1,89
15	Cenário 2	Taio	100	0,15	00 00 38	1,93
16	Cenário 2	Taio	100	0,30	00 00 58	1,93
17	Cenário 3	Taio	10	0,15	00 01 11	0,72
18	Cenário 3	Taio	10	0,30	00 04 09	0,72
19	Cenário 3	Taio	50	0,15	00 00 44	0,90
20	Cenário 3	Taio	50	0,30	00 02 47	0,90
21	Cenário 3	Taio	90	0,15	00 00 30	1,05
22	Cenário 3	Taio	90	0,30	00 02 06	1,05
23	Cenário 3	Taio	100	0,15	00 00 27	1,07
24	Cenário 3	Taio	100	0,30	00 01 59	1,07

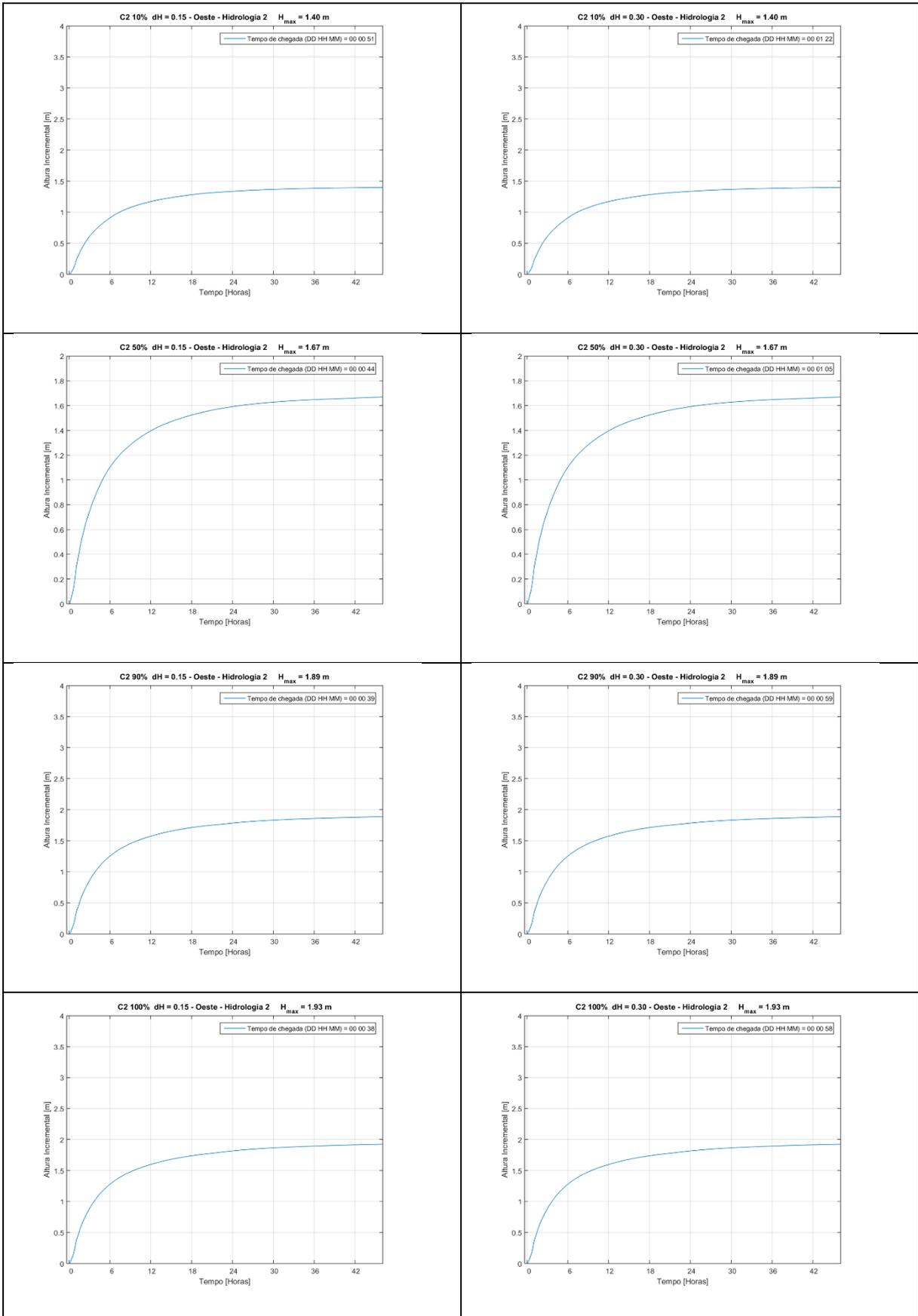
%V é o volume do reservatório, onde o nível 100% representa o nível d'água no nível da soleira do vertedouro quando a barragem está prestes a verter.

dH é a elevação do nível d'água na seção de interesse para determinar o tempo de chegada da onda induzida pelo pulso da operação de abertura das barragens.

T_{ch} é o tempo de chegada do pulso da operação.

Os gráficos abaixo representam os pós processamentos das simulações numéricas hidráulicas realizadas para cada cenário da tabela acima.





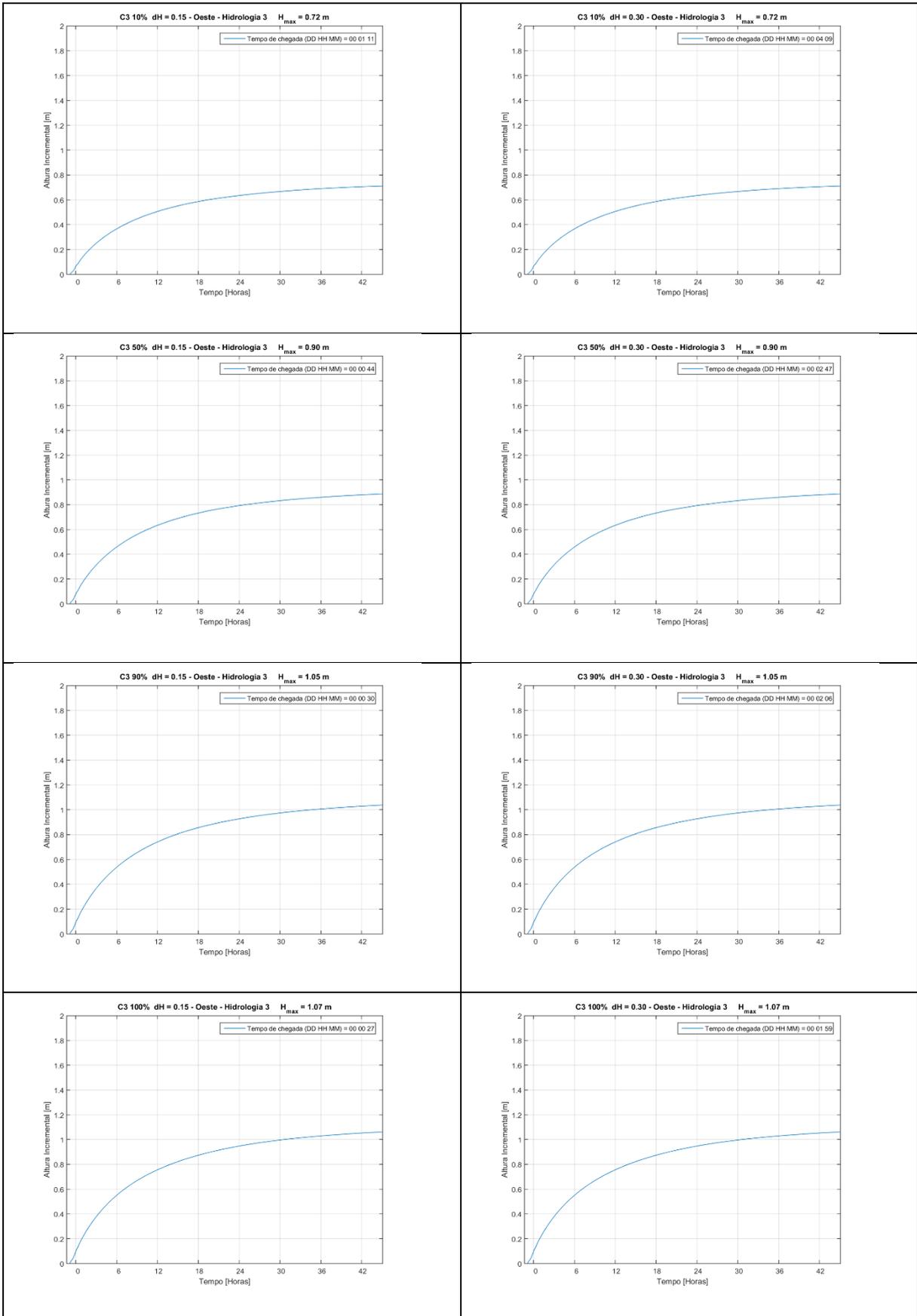


Figura 3. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.

1.4.2 Rio do Oeste

Na Tabela 2 está o resumo dos resultados das simulações com os elementos das combinações.

Tabela 2. Resumo de resultados em Rio do Oeste.

Simulação	Cenário hidrológico	Barragens operadas	% V	dH [m]	T _{ch} [DD:HH:MM]	Hmax [m]
1	Cenário 1	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 03 13	1,29
2	Cenário 1	Taio	10	0,15	00 03 13	1,28
3	Cenário 1	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 04 19	1,29
4	Cenário 1	Taio	10	0,30	00 04 19	1,28
5	Cenário 1	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 02 56	1,59
6	Cenário 1	Taio	50	0,15	00 02 56	1,57
7	Cenário 1	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 03 50	1,59
8	Cenário 1	Taio	50	0,30	00 03 50	1,57
9	Cenário 1	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 02 46	1,83
10	Cenário 1	Taio	90	0,15	00 02 46	1,81
11	Cenário 1	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 03 34	1,83
12	Cenário 1	Taio	90	0,30	00 03 34	1,81
13	Cenário 1	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 02 43	1,87
14	Cenário 1	Taio	100	0,15	00 02 43	1,84
15	Cenário 1	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 03 30	1,87
16	Cenário 1	Taio	100	0,30	00 03 30	1,84
17	Cenário 2	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 05 00	0,91
18	Cenário 2	Taio	10	0,15	00 05 00	0,88
19	Cenário 2	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 08 01	0,91
20	Cenário 2	Taio	10	0,30	00 08 11	0,88
21	Cenário 2	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 04 29	1,12
22	Cenário 2	Taio	50	0,15	00 04 29	1,10
23	Cenário 2	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 06 56	1,12
24	Cenário 2	Taio	50	0,30	00 07 03	1,10
25	Cenário 2	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 04 10	1,29
26	Cenário 2	Taio	90	0,15	00 04 11	1,26
27	Cenário 2	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 06 20	1,29
28	Cenário 2	Taio	90	0,30	00 06 24	1,26
29	Cenário 2	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 04 06	1,32
30	Cenário 2	Taio	100	0,15	00 04 07	1,29
31	Cenário 2	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 06 13	1,32
32	Cenário 2	Taio	100	0,30	00 06 17	1,29
33	Cenário 3	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 13 21	0,57
34	Cenário 3	Taio	10	0,15	00 14 08	0,55
35	Cenário 3	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 20 41	0,57
36	Cenário 3	Taio	10	0,30	00 21 57	0,55
37	Cenário 3	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 11 52	0,70

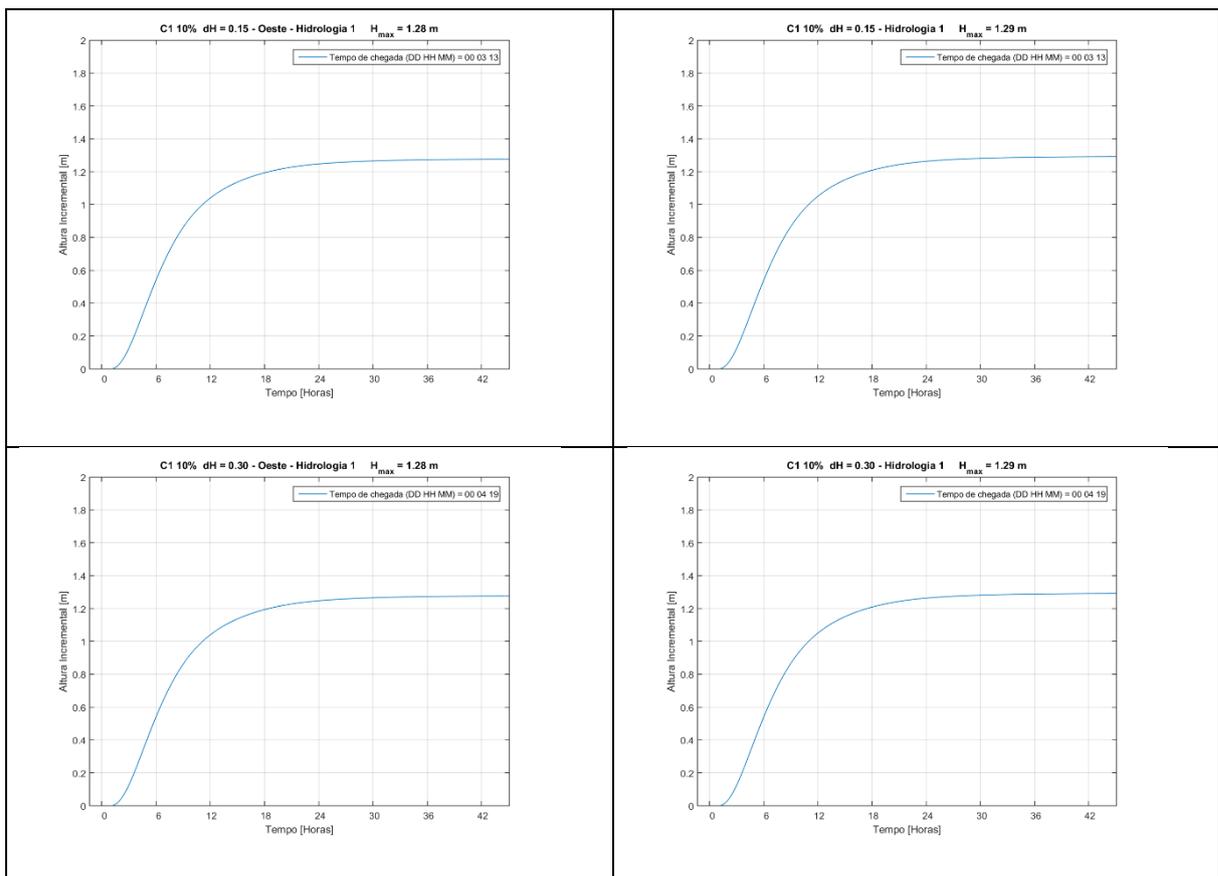
38	Cenário 3	Taio	50	0,15	00 12 32	0,67
39	Cenário 3	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 17 37	0,70
40	Cenário 3	Taio	50	0,30	00 18 40	0,67
41	Cenário 3	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 11 01	0,80
42	Cenário 3	Taio	90	0,15	00 11 36	0,77
43	Cenário 3	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 15 58	0,80
44	Cenário 3	Taio	90	0,30	00 16 53	0,77
45	Cenário 3	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 10 53	0,81
46	Cenário 3	Taio	100	0,15	00 11 27	0,78
47	Cenário 3	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 15 44	0,81
48	Cenário 3	Taio	100	0,30	00 16 39	0,78

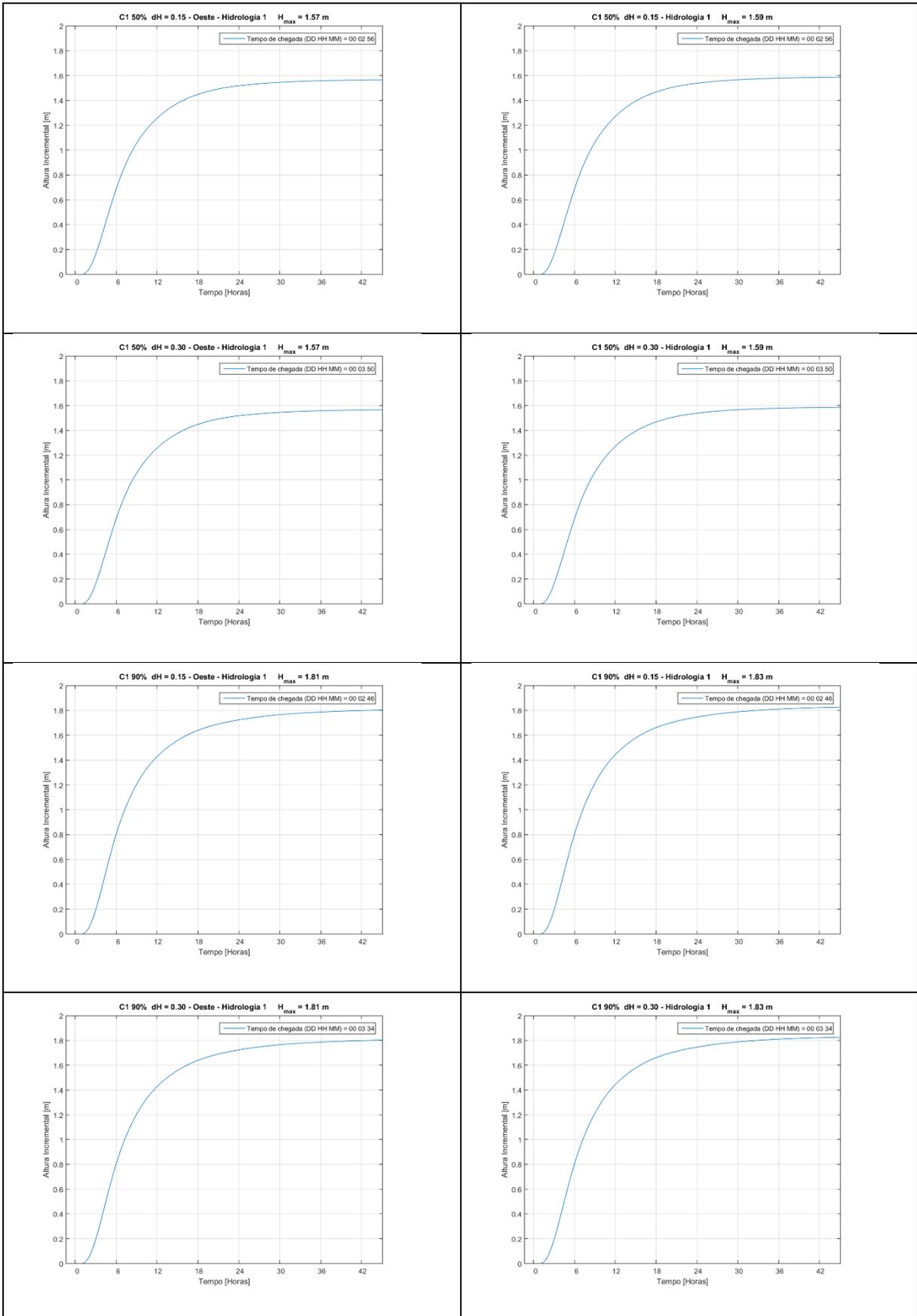
%V é o volume do reservatório, onde o nível 100% representa o nível d'água no nível da soleira do vertedouro quando a barragem está prestes a verter.

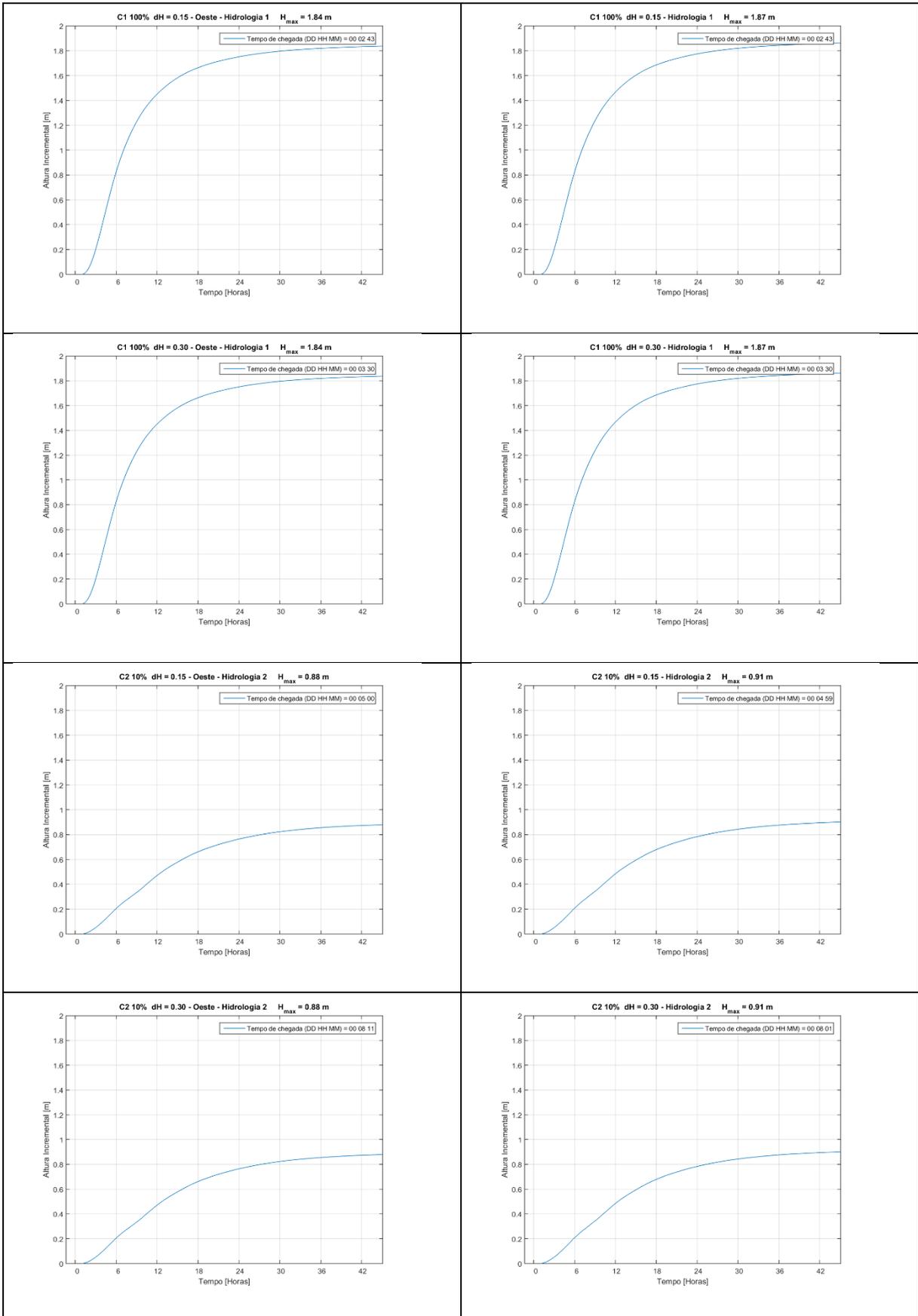
dH é a elevação do nível d'água na seção de interesse para determinar o tempo de chegada da onda induzida pelo pulso da operação de abertura das barragens.

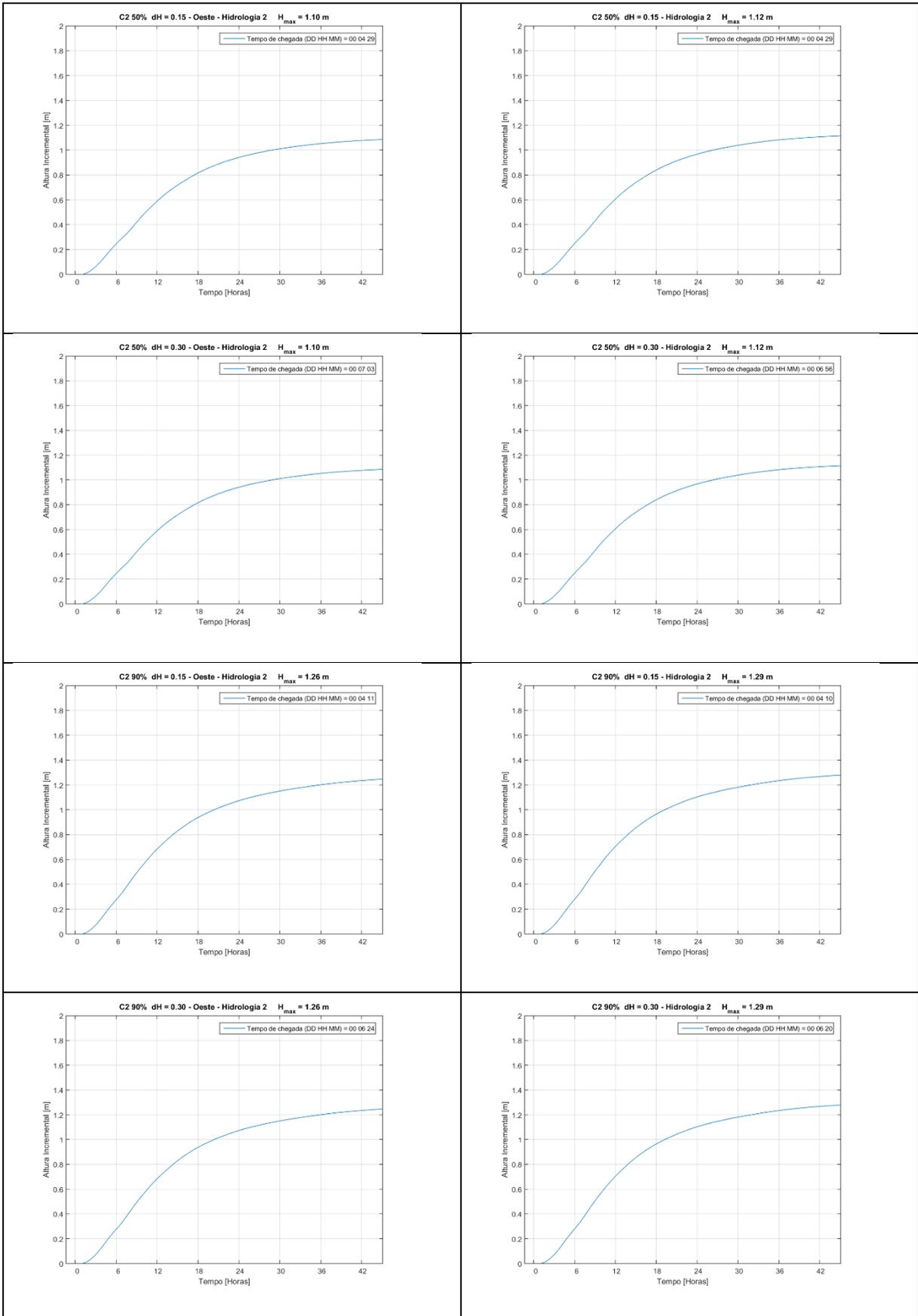
T_{ch} é o tempo de chegada do pulso da operação.

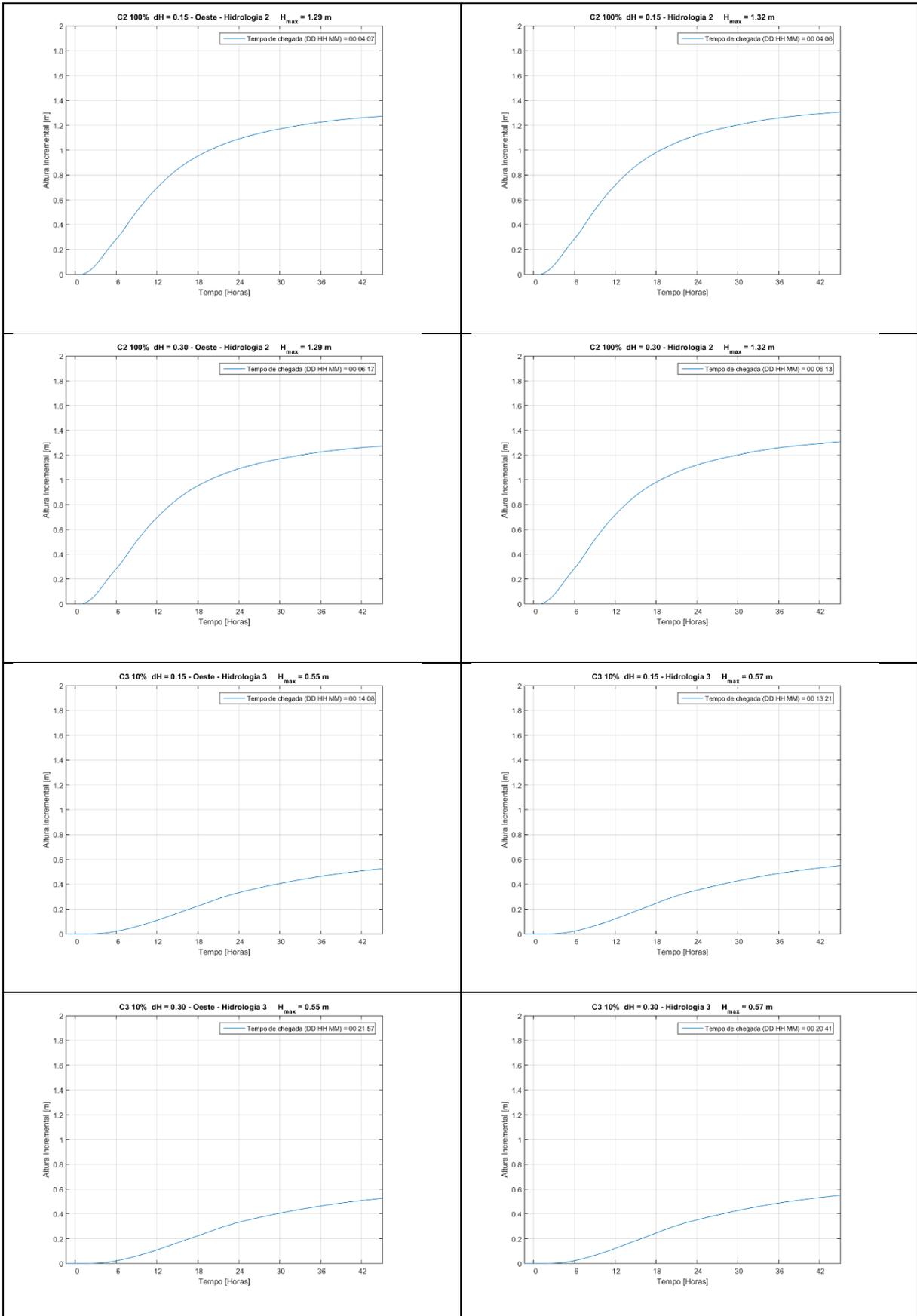
Os gráficos abaixo representam os pós processamentos das simulações numéricas hidráulicas realizadas para cada cenário da tabela acima.

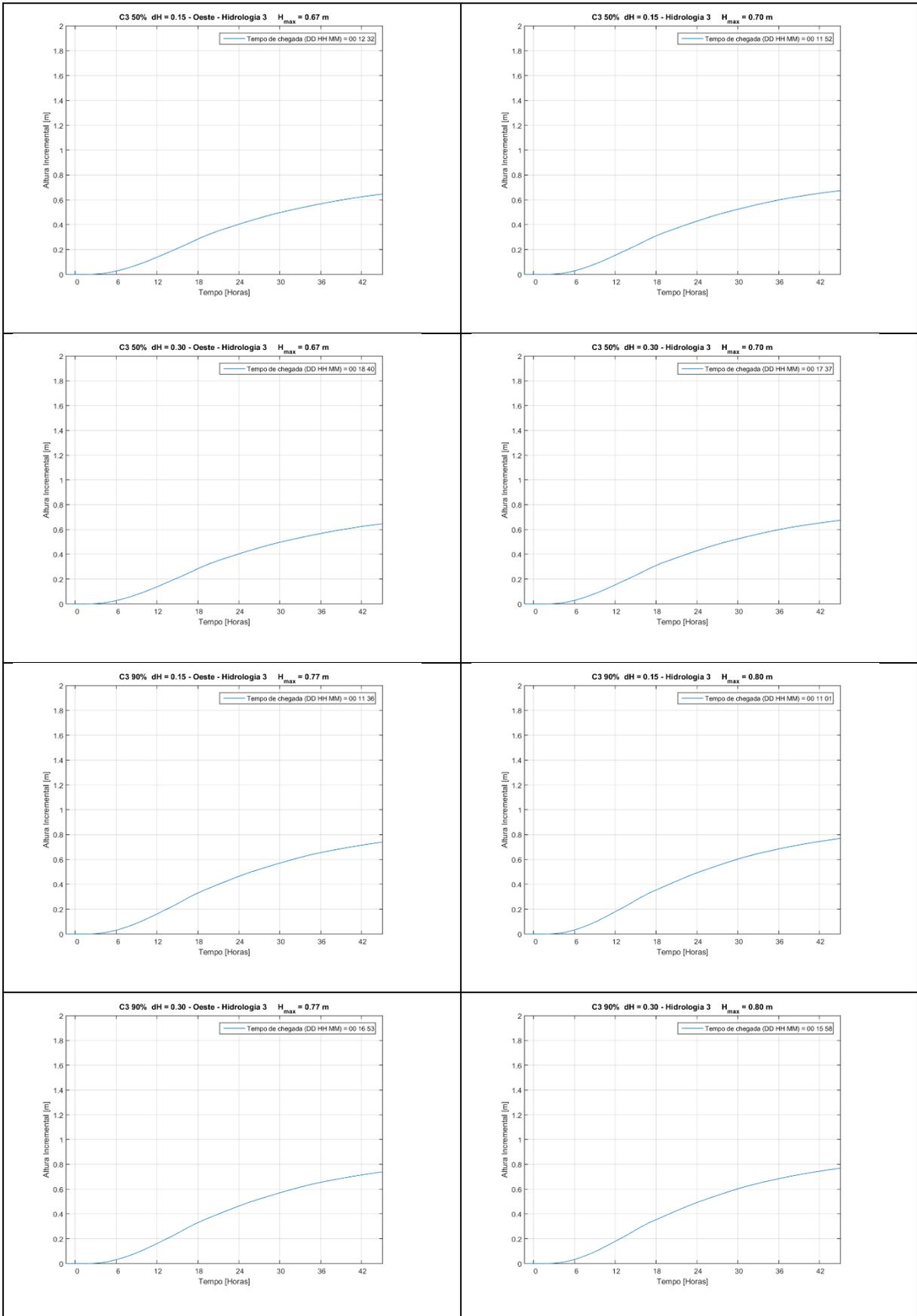












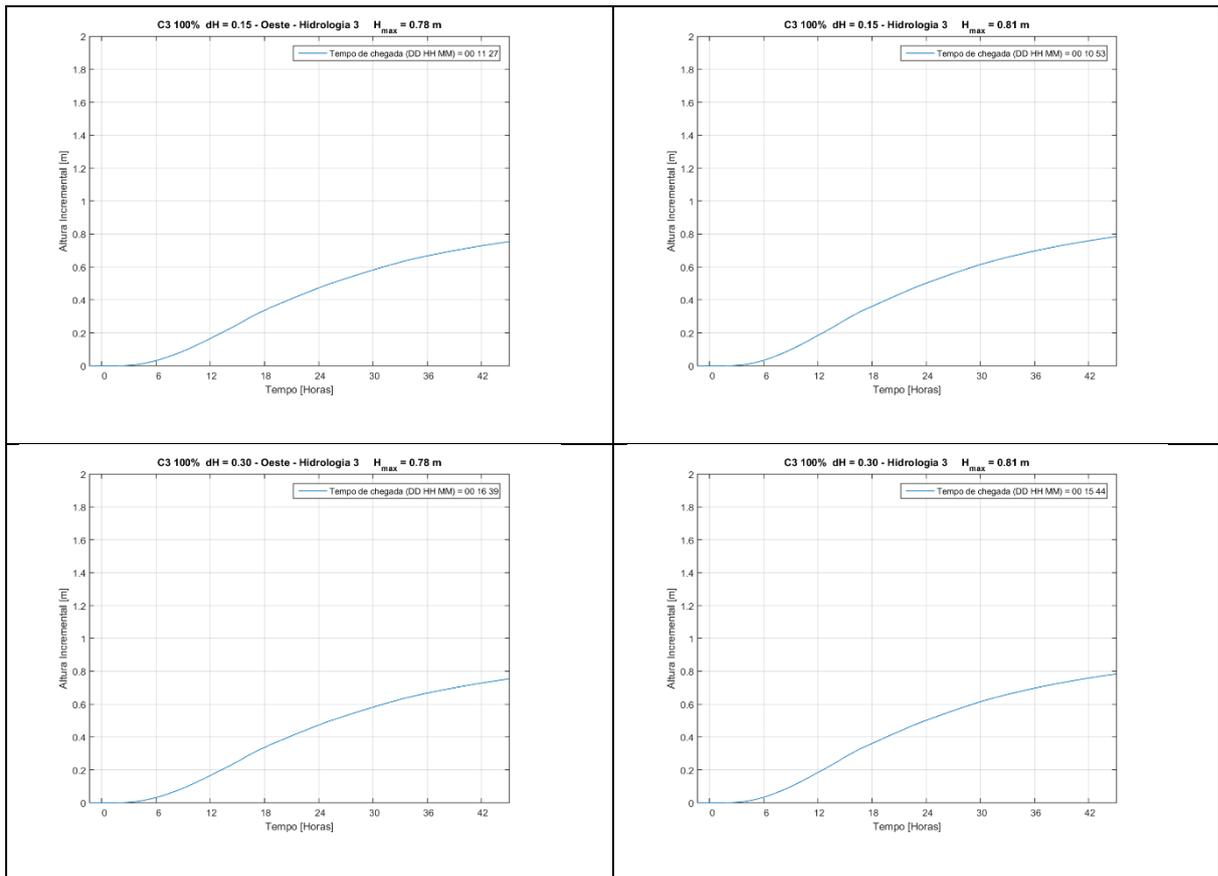


Figura 4. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.

1.4.3 Ituporanga

Na Tabela 3 está o resumo dos resultados das simulações com os elementos das combinações.

Tabela 3. Resumo de resultados em Ituporanga.

Simulação	Cenário hidrológico	Barragens operadas	% V	dH [m]	T _{ch} [DD:HH:MM]	Hmax [m]
1	Cenário 1	Ituporanga	10	0,15	00 01 39	0,42
2	Cenário 1	Ituporanga	10	0,30	00 02 48	0,42
3	Cenário 1	Ituporanga	50	0,15	00 01 29	0,51
4	Cenário 1	Ituporanga	50	0,30	00 02 17	0,51
5	Cenário 1	Ituporanga	90	0,15	00 01 25	0,58
6	Cenário 1	Ituporanga	90	0,30	00 02 05	0,58
7	Cenário 1	Ituporanga	100	0,15	00 01 24	0,59
8	Cenário 1	Ituporanga	100	0,30	00 02 03	0,59
9	Cenário 2	Ituporanga	10	0,15	00 02 01	0,30
10	Cenário 2	Ituporanga	10	0,30	00 04 57	0,30
11	Cenário 2	Ituporanga	50	0,15	00 01 45	0,37
12	Cenário 2	Ituporanga	50	0,30	00 03 31	0,37
13	Cenário 2	Ituporanga	90	0,15	00 01 38	0,42
14	Cenário 2	Ituporanga	90	0,30	00 02 55	0,42

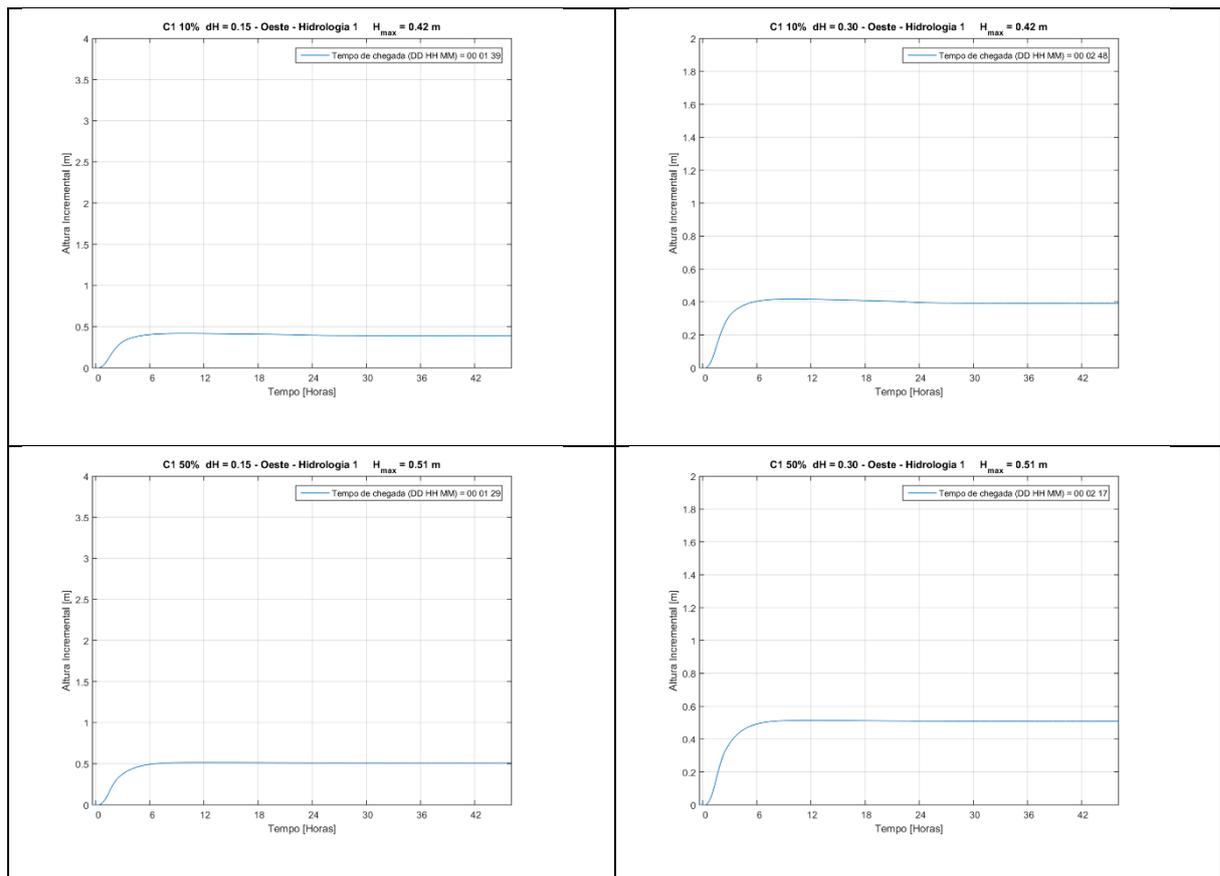
15	Cenário 2	Ituporanga	100	0,15	00 01 37	0,43
16	Cenário 2	Ituporanga	100	0,30	00 02 50	0,43
17	Cenário 3	Ituporanga	10	0,15	00 02 54	0,22
18	Cenário 3	Ituporanga	10	0,30	00 06 16	0,22
19	Cenário 3	Ituporanga	50	0,15	00 02 19	0,27
20	Cenário 3	Ituporanga	50	0,30	00 05 14	0,27
21	Cenário 3	Ituporanga	90	0,15	00 02 04	0,31
22	Cenário 3	Ituporanga	90	0,30	00 04 32	0,31
23	Cenário 3	Ituporanga	100	0,15	00 02 02	0,31
24	Cenário 3	Ituporanga	100	0,30	00 05 17	0,31

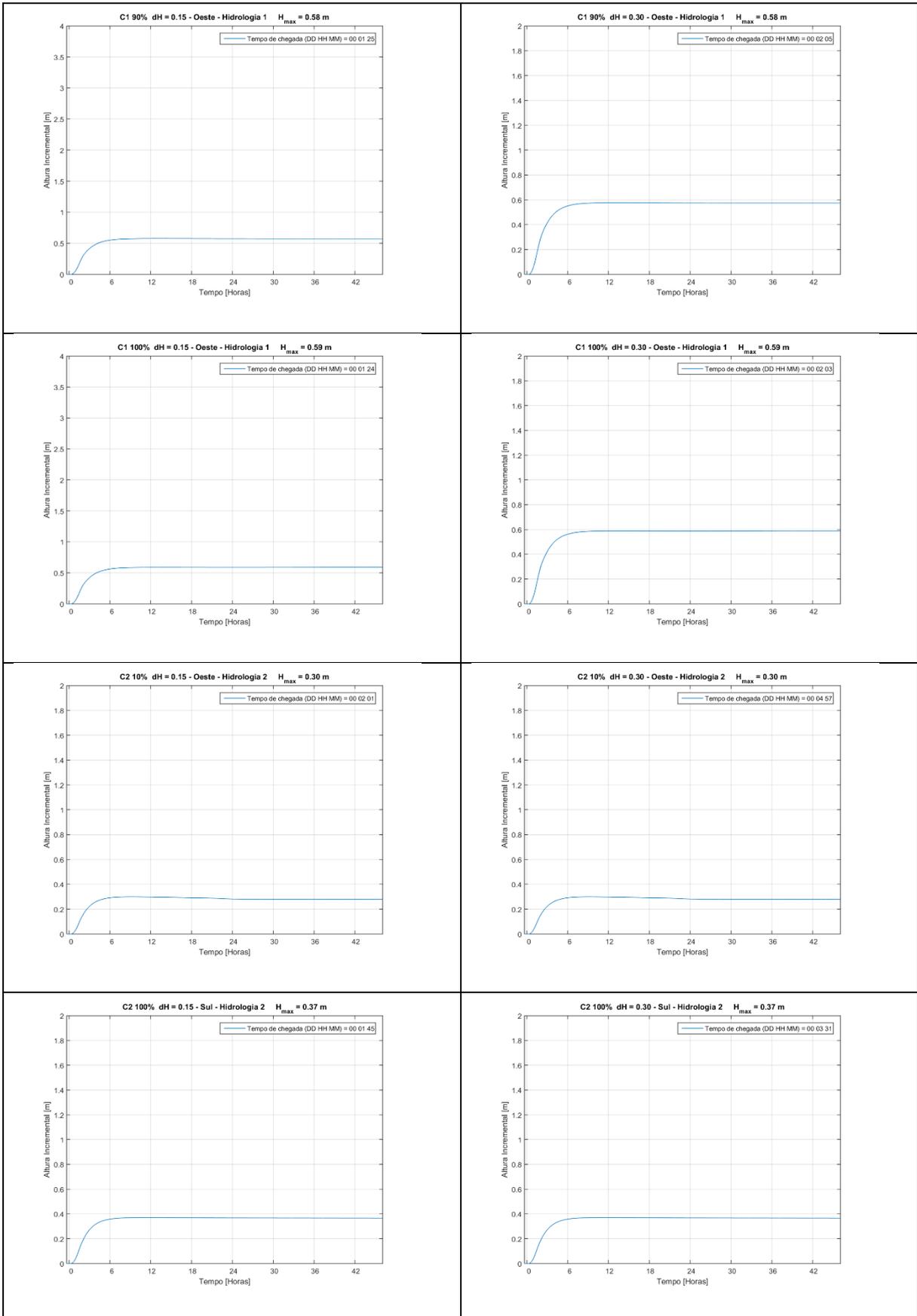
%V é o volume do reservatório, onde o nível 100% representa o nível d'água no nível da soleira do vertedouro quando a barragem está prestes a verter.

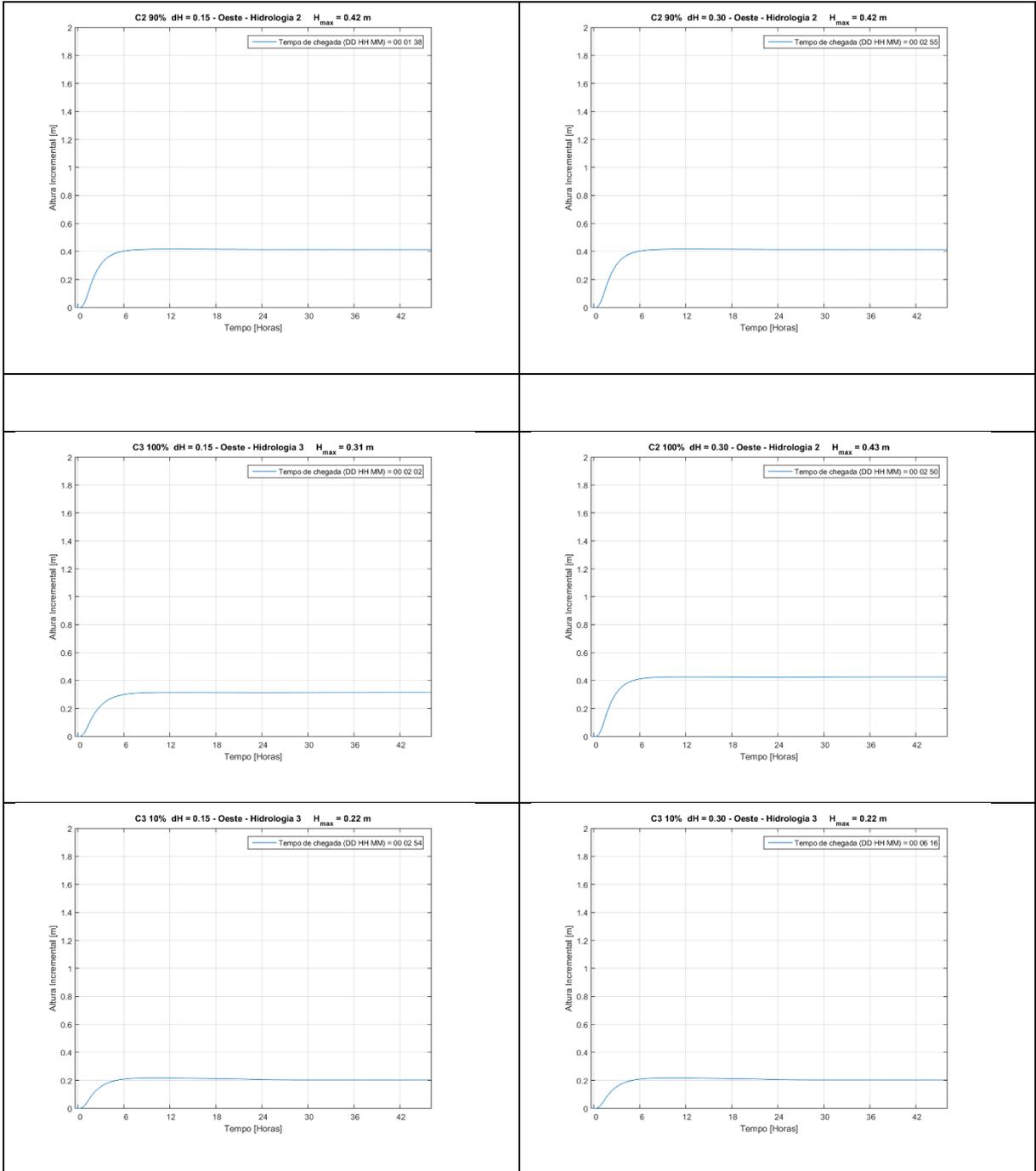
dH é a elevação do nível d'água na seção de interesse para determinar o tempo de chegada da onda induzida pelo pulso da operação de abertura das barragens.

T_{ch} é o tempo de chegada do pulso da operação.

Os gráficos abaixo representam os pós processamentos das simulações numéricas hidráulicas realizadas para cada cenário da tabela acima.







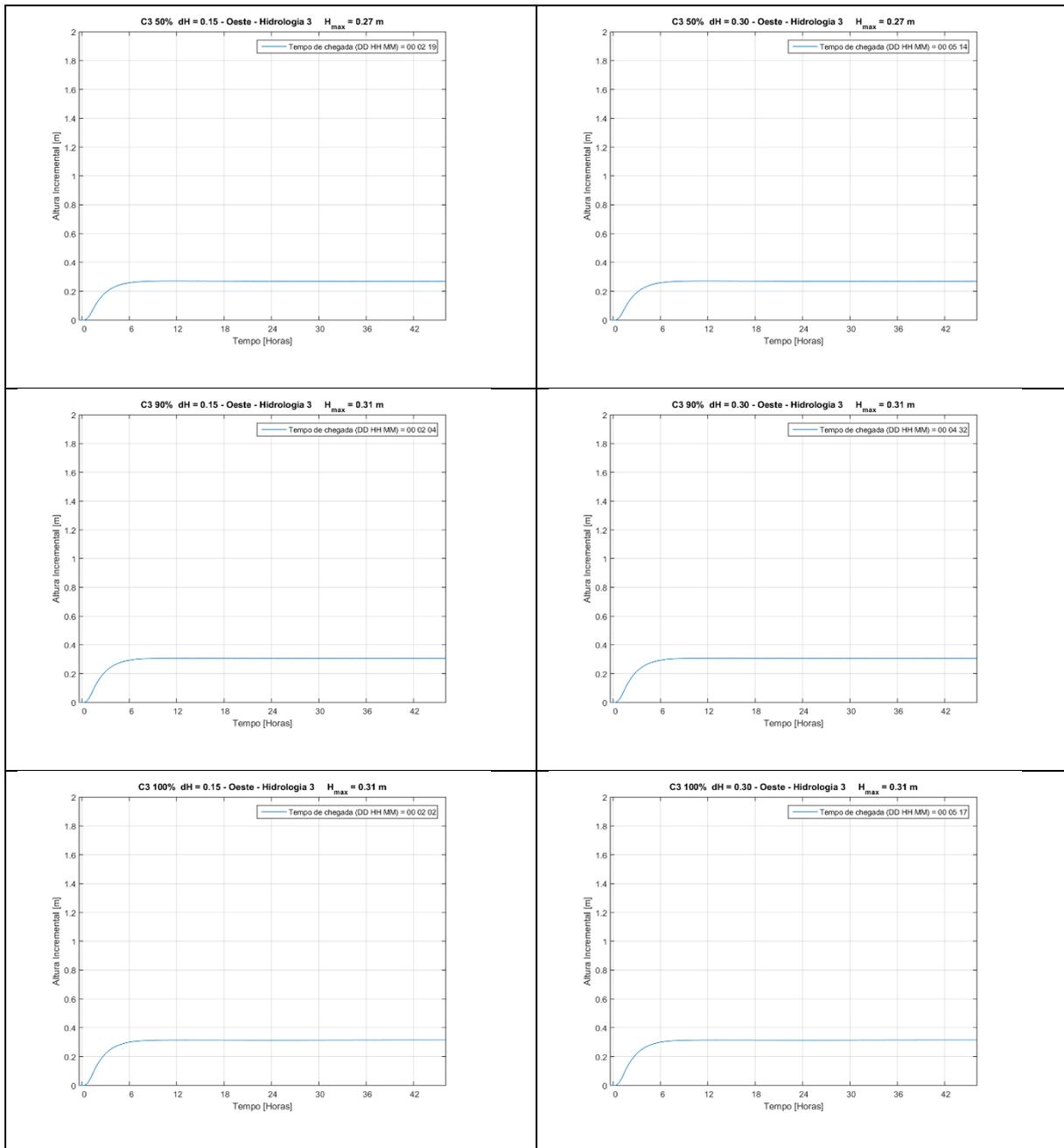


Figura 5. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.

1.4.4 Rio do Sul

Na Tabela 4 está o resumo dos resultados das simulações com os elementos das combinações.

Tabela 4. Resumo de resultados em Rio do Sul.

Simulação	Cenário hidrológico	Barragens operadas	% V	dH [m]	T _{ch} [DD:HH:MM]	H _{max} [m]
1	Cenário 1	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 05 19	0,85
2	Cenário 1	Taio	10	0,15	00 08 43	0,49
3	Cenário 1	Ituporanga	10	0,15	00 05 38	0,44
4	Cenário 1	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 06 42	0,85

5	Cenário 1	Taio	10	0,30	00 12 29	0,49
6	Cenário 1	Ituporanga	10	0,30	00 07 50	0,44
7	Cenário 1	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 05 00	1,06
8	Cenário 1	Taio	50	0,15	00 07 55	0,61
9	Cenário 1	Ituporanga	50	0,15	00 05 16	0,56
10	Cenário 1	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 06 08	1,06
11	Cenário 1	Taio	50	0,30	00 10 43	0,61
12	Cenário 1	Ituporanga	50	0,30	00 06 52	0,56
13	Cenário 1	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 04 50	1,20
14	Cenário 1	Taio	90	0,15	00 07 27	0,71
15	Cenário 1	Ituporanga	90	0,15	00 05 05	0,63
16	Cenário 1	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 05 51	1,20
17	Cenário 1	Taio	90	0,30	00 09 50	0,71
18	Cenário 1	Ituporanga	90	0,30	00 06 26	0,63
19	Cenário 1	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 04 49	1,22
20	Cenário 1	Taio	100	0,15	00 07 22	0,72
21	Cenário 1	Ituporanga	100	0,15	00 05 03	0,65
22	Cenário 1	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 05 48	1,22
23	Cenário 1	Taio	100	0,30	00 09 42	0,72
24	Cenário 1	Ituporanga	100	0,30	00 06 22	0,65
25	Cenário 2	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 05 20	0,65
26	Cenário 2	Taio	10	0,15	00 14 09	0,30
27	Cenário 2	Ituporanga	10	0,15	00 05 40	0,28
28	Cenário 2	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 08 19	0,65
29	Cenário 2	Taio	10	0,30	01 04 46	0,30
30	Cenário 2	Ituporanga	10	0,30	00 10 21	0,28
31	Cenário 2	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 04 53	0,87
32	Cenário 2	Taio	50	0,15	00 12 08	0,41
33	Cenário 2	Ituporanga	50	0,15	00 05 06	0,38
34	Cenário 2	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 06 55	0,87
35	Cenário 2	Taio	50	0,30	00 23 03	0,41
36	Cenário 2	Ituporanga	50	0,30	00 08 15	0,38
37	Cenário 2	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 04 39	1,01
38	Cenário 2	Taio	90	0,15	00 11 04	0,49
39	Cenário 2	Ituporanga	90	0,15	00 04 50	0,44
40	Cenário 2	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 06 20	1,01
41	Cenário 2	Taio	90	0,30	00 18 52	0,49
42	Cenário 2	Ituporanga	90	0,30	00 07 07	0,44
43	Cenário 2	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 04 37	1,04
44	Cenário 2	Taio	100	0,15	00 10 55	0,50
45	Cenário 2	Ituporanga	100	0,15	00 04 47	0,46
46	Cenário 2	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 06 14	1,04
47	Cenário 2	Taio	100	0,30	00 18 26	0,50

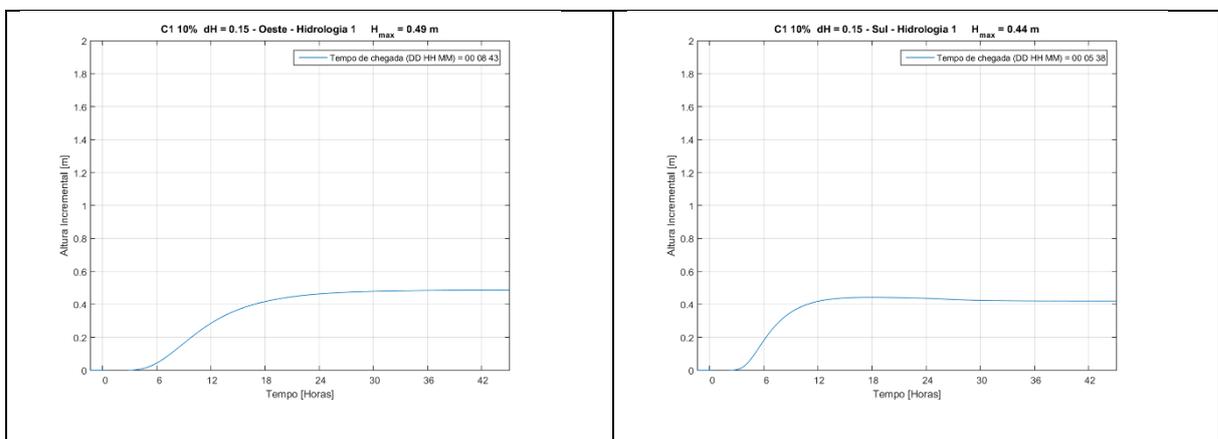
48	Cenário 2	Ituporanga	100	0,30	00 06 58	0,46
49	Cenário 3	Taio/Ituporanga	10	0,15	00 05 38	0,54
50	Cenário 3	Taio	10	0,15	01 01 22	0,27
51	Cenário 3	Ituporanga	10	0,15	00 05 40	0,30
52	Cenário 3	Taio/Ituporanga	10	0,30	00 11 06	0,54
53	Cenário 3	Taio	10	0,30	01 20 47	0,27
54	Cenário 3	Ituporanga	10	0,30	00 10 28	0,30
55	Cenário 3	Taio/Ituporanga	50	0,15	00 04 59	0,69
56	Cenário 3	Taio	50	0,15	00 21 59	0,34
57	Cenário 3	Ituporanga	50	0,15	00 05 01	0,39
58	Cenário 3	Taio/Ituporanga	50	0,30	00 08 09	0,69
59	Cenário 3	Taio	50	0,30	01 16 40	0,34
60	Cenário 3	Ituporanga	50	0,30	00 08 35	0,39
61	Cenário 3	Taio/Ituporanga	90	0,15	00 04 41	0,79
62	Cenário 3	Taio	90	0,15	00 20 07	0,40
63	Cenário 3	Ituporanga	90	0,15	00 04 42	0,45
64	Cenário 3	Taio/Ituporanga	90	0,30	00 07 11	0,79
65	Cenário 3	Taio	90	0,30	01 10 08	0,40
66	Cenário 3	Ituporanga	90	0,30	00 07 22	0,45
67	Cenário 3	Taio/Ituporanga	100	0,15	00 04 38	0,80
68	Cenário 3	Taio	100	0,15	00 19 52	0,40
69	Cenário 3	Ituporanga	100	0,15	00 04 38	0,46
70	Cenário 3	Taio/Ituporanga	100	0,30	00 07 01	0,80
71	Cenário 3	Taio	100	0,30	01 09 26	0,40
72	Cenário 3	Ituporanga	100	0,30	00 07 12	0,46

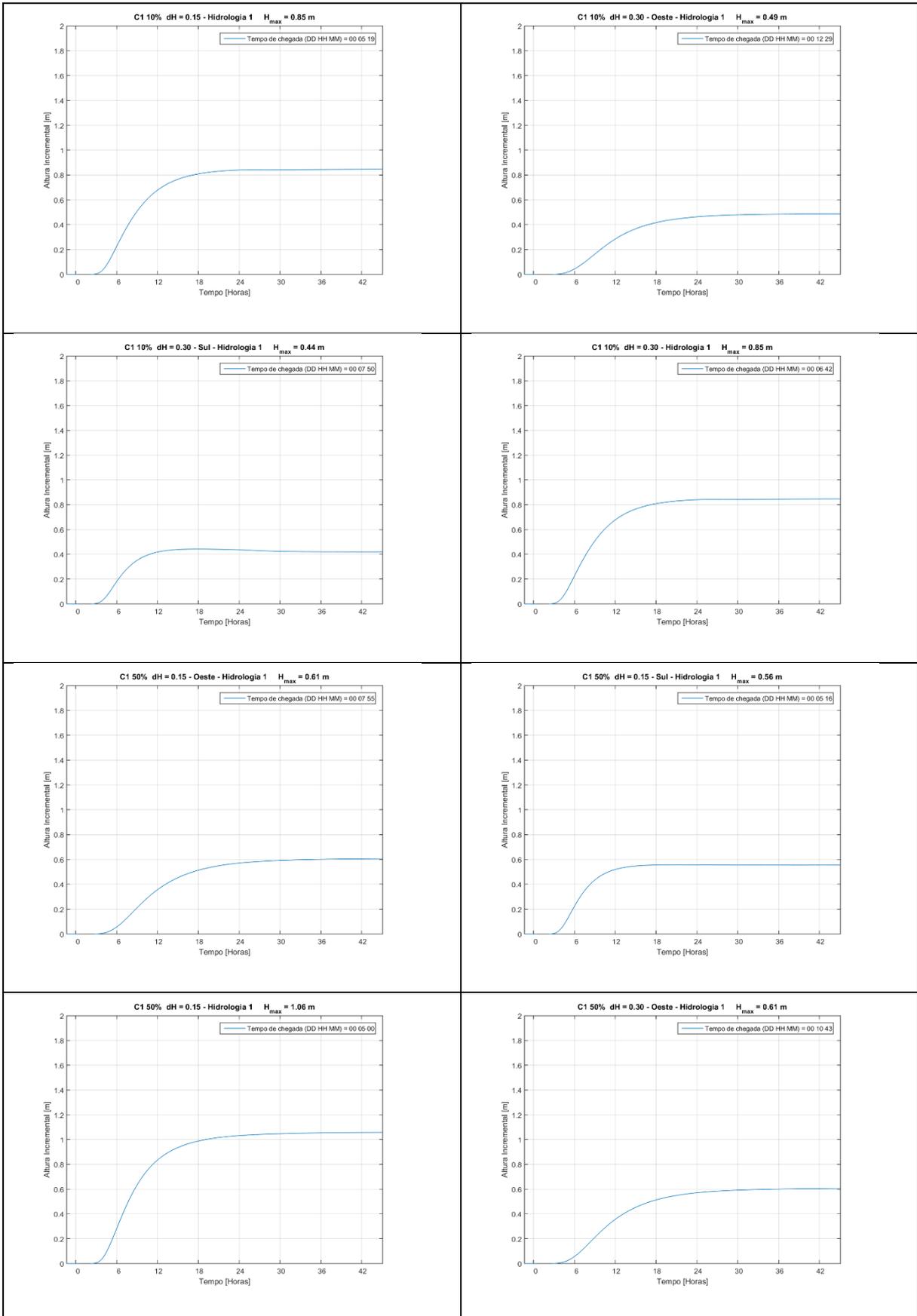
%V é o volume do reservatório, onde o nível 100% representa o nível d'água no nível da soleira do vertedouro quando a barragem está prestes a verter.

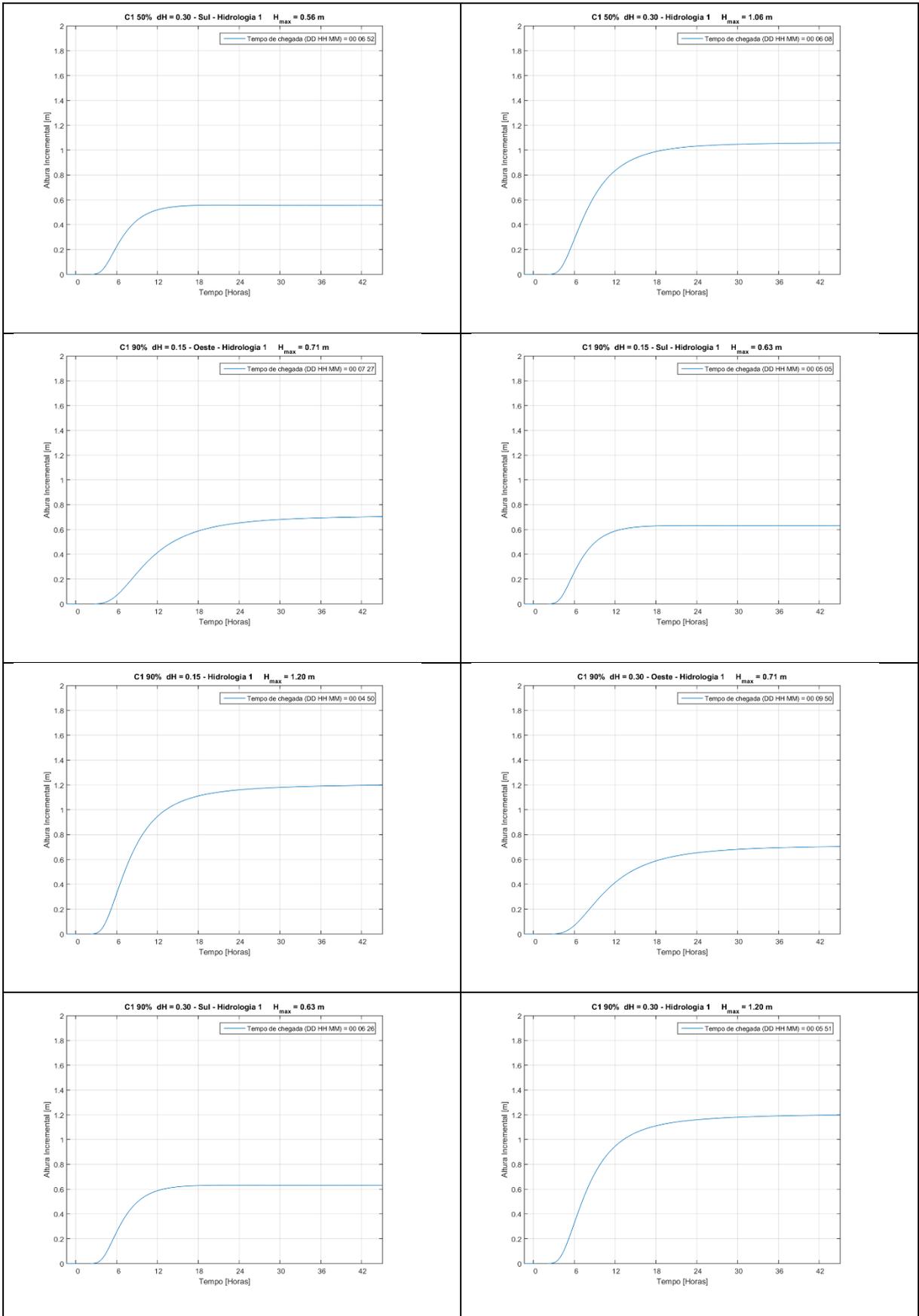
dH é a elevação do nível d'água na seção de interesse para determinar o tempo de chegada da onda induzida pelo pulso da operação de abertura das barragens.

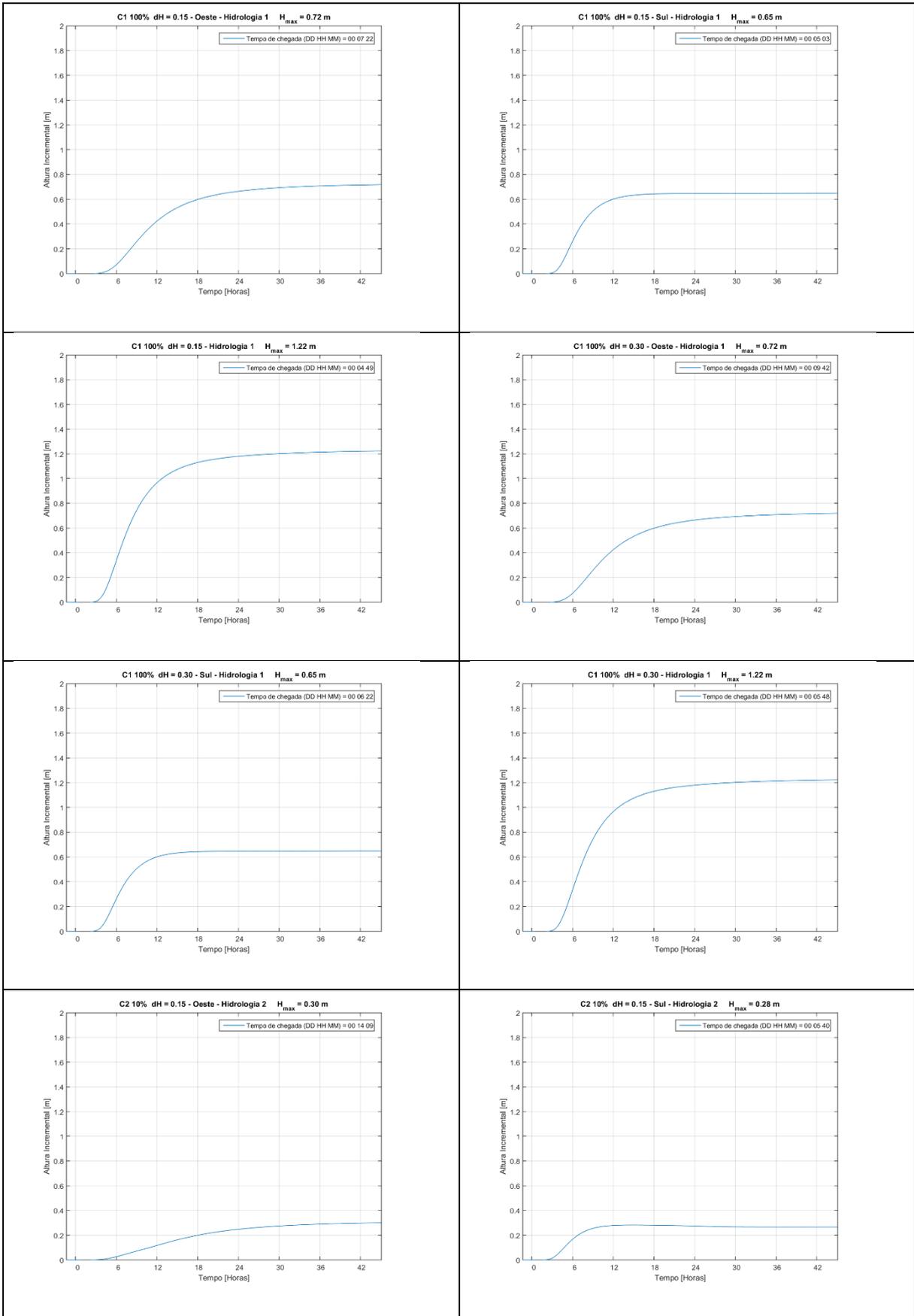
T_{ch} é o tempo de chegada do pulso da operação.

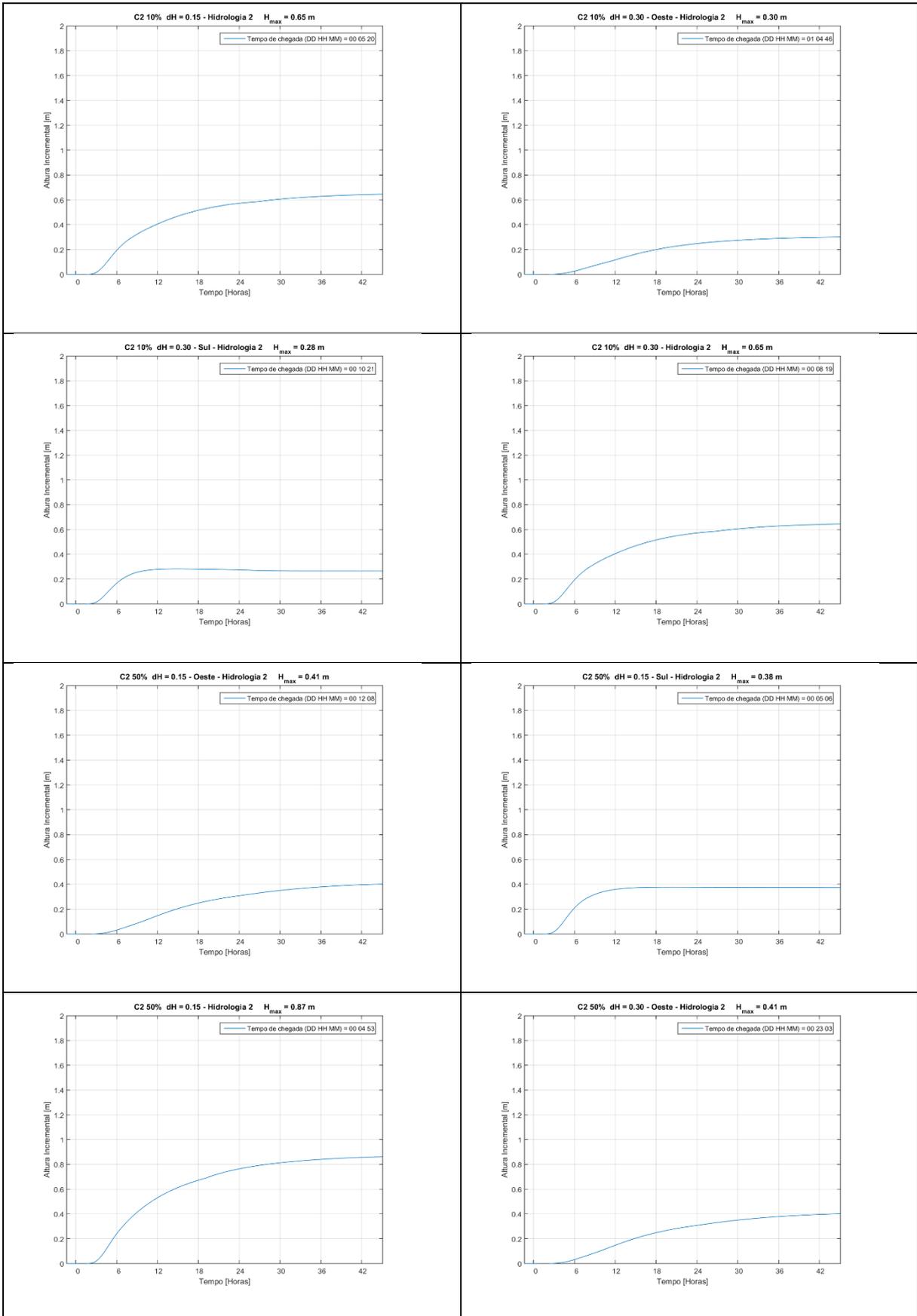
Os gráficos abaixo representam os pós processamentos das simulações numéricas hidráulicas realizadas para cada cenário da tabela acima.

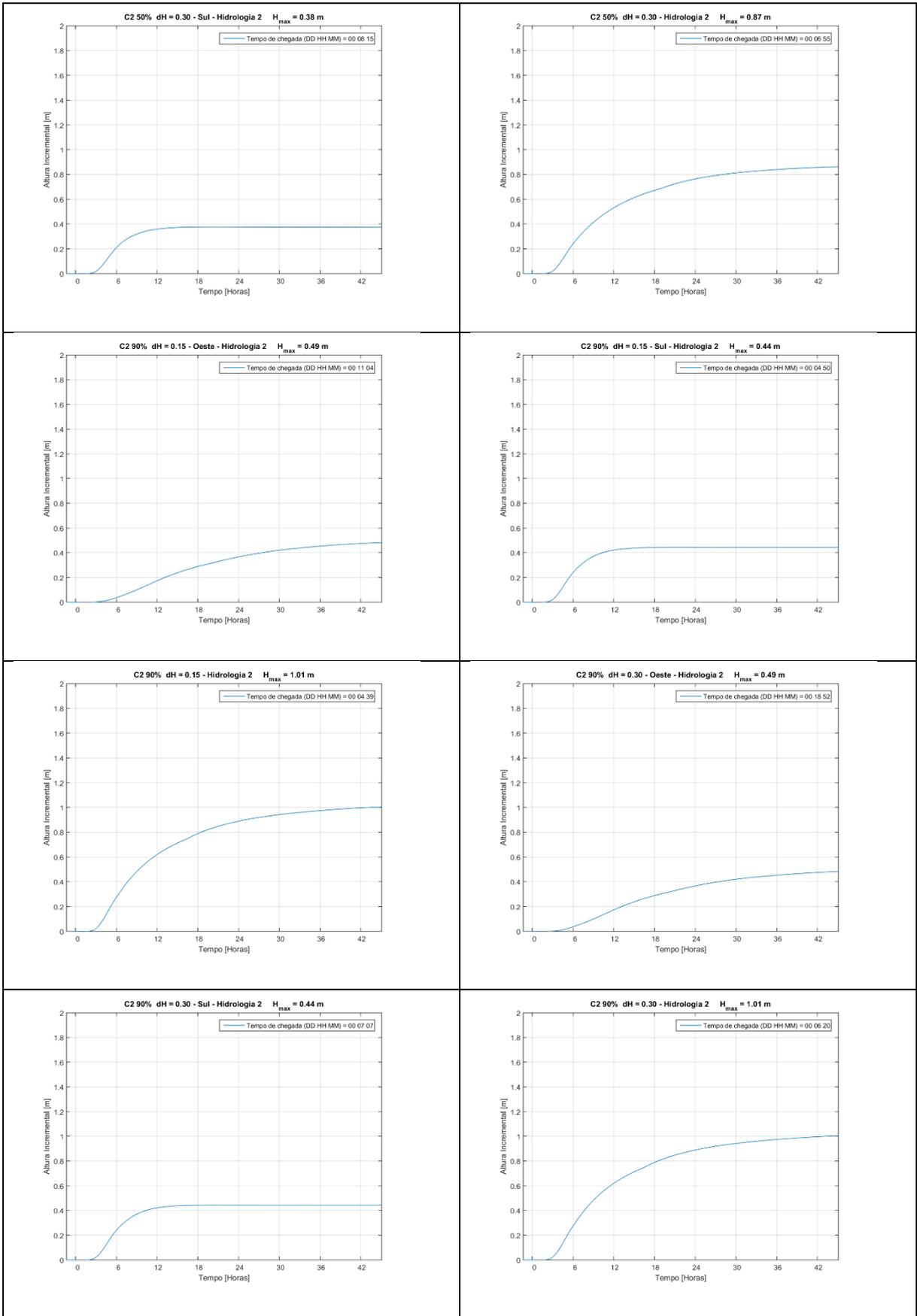


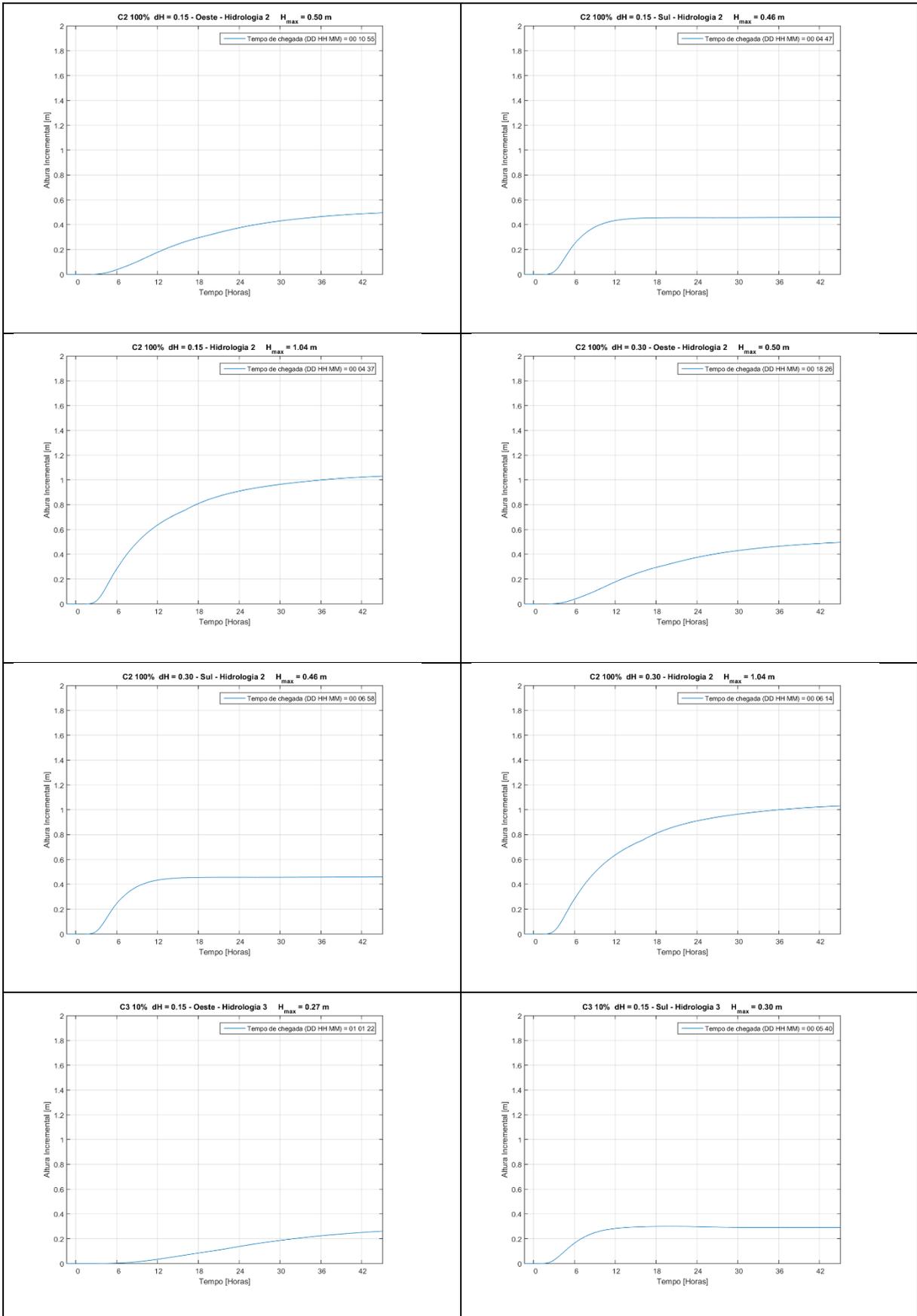


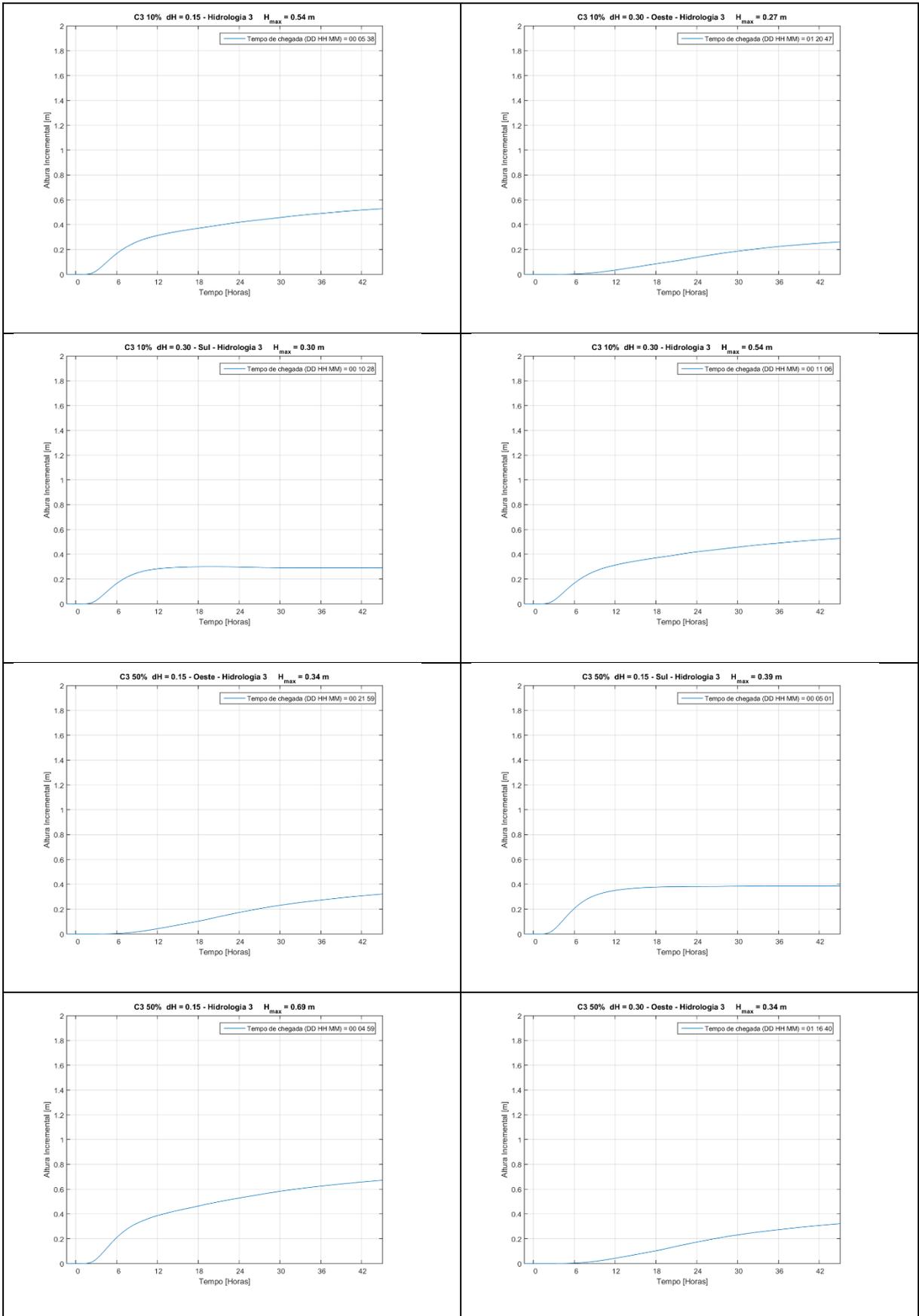


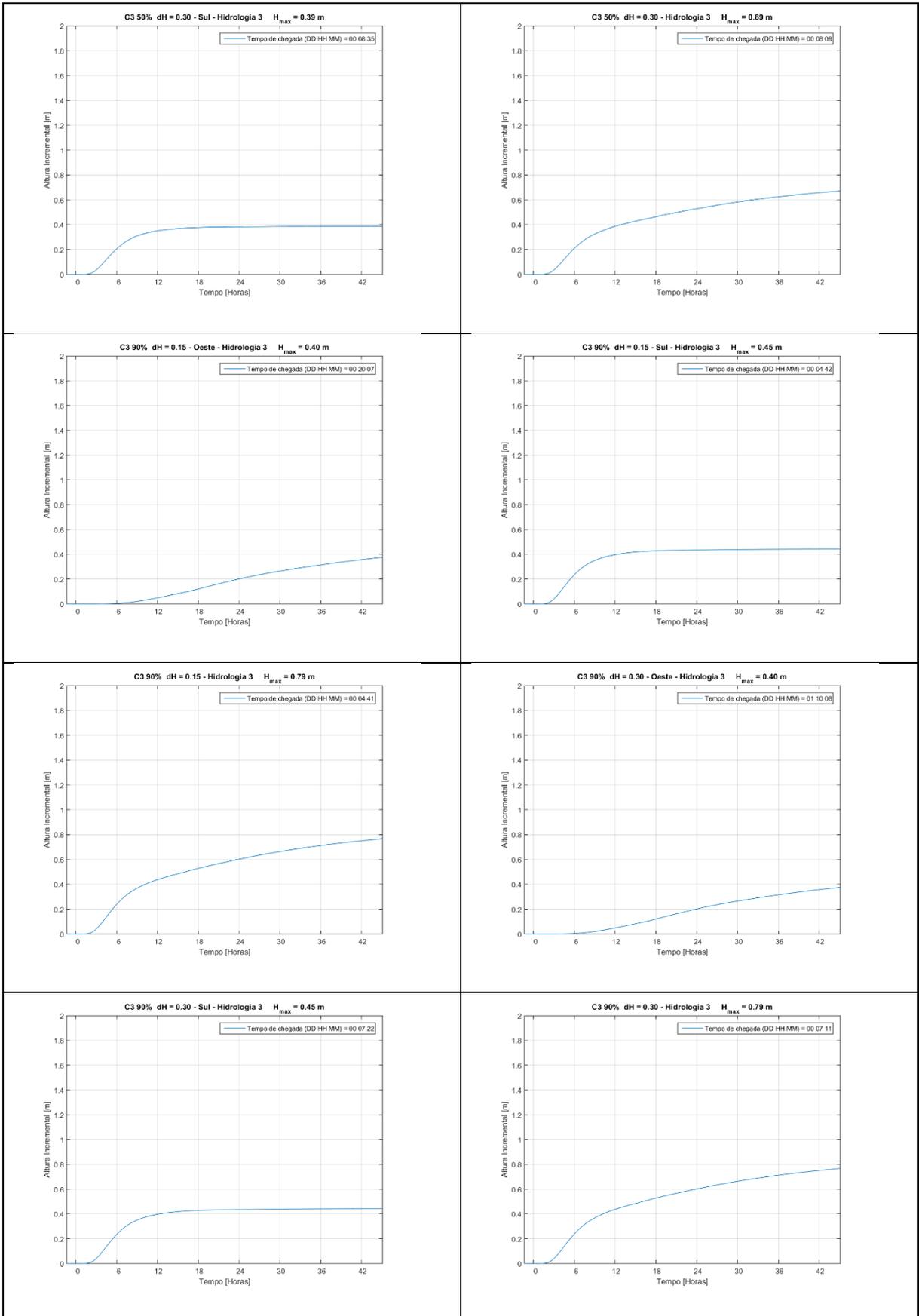












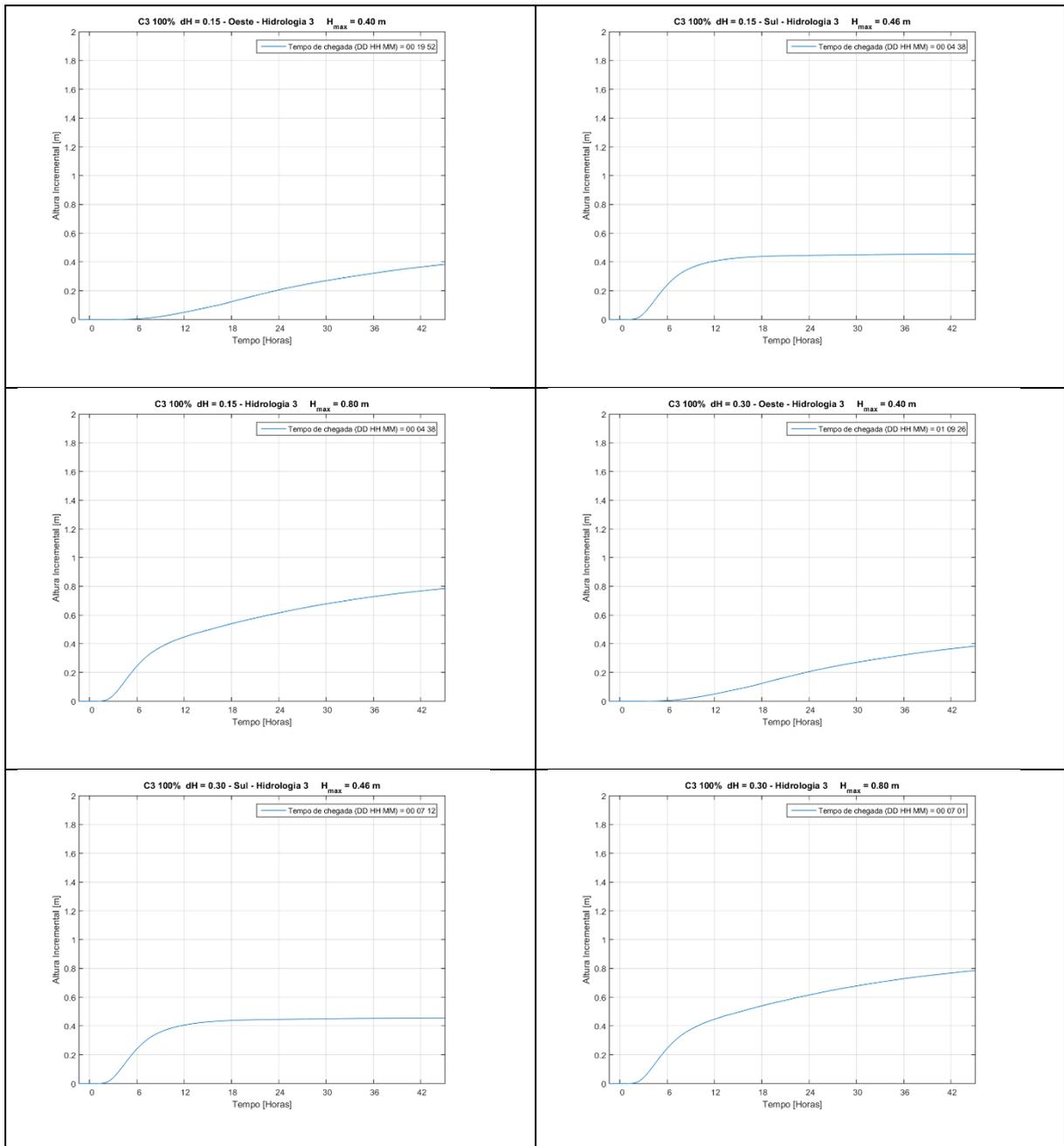


Figura 6. Gráficos com a síntese das simulações numéricas.

1.5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Portanto, o presente estudo serve como base conceitual para entendimento da repercussão das operações de abertura das barragens Sul e Oeste nos municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul. Tais resultados trazem subsídios para as tomadas de decisão e estruturação de procedimentos operacionais para os manuais de operação dos reservatórios na perspectiva de abertura das comportas.

Para ações sobre o procedimento de fechamento das comportas não foi indicada a mudança para níveis superiores, uma vez que os estudos de implantação dos manuais de operação dos reservatórios já indicam o nível ótimo de 4,5 m em Rio do Sul para a operação de fechamento. Foi confirmada nas simulações numéricas e com base nas observações da operação dos reservatórios a existência de um remanso sobre o braço do rio Itajaí Oeste determinado pela influência ou nível do braço do rio Itajaí Sul, na junção para formação do rio Itajaí-açu em Rio do Sul. Desta forma, a operação da barragem Sul gera remanso no rio Itajaí do Oeste na região de Agrônômica e Rio do Oeste. Neste caso, a operação antecipada, em caso de uma das barragens indisponível ou inoperante, pode considerar o nível de referência em Rio do Sul abaixo de 4 m.

O remanso do rio Itajaí Sul sobre o rio Itajaí do Oeste varia entre 0,20 até 0,50 m em função das combinações de afluência. Independente do cenário hidrológico, o remanso é determinado pela geomorfologia da região, portanto, a eficiência hidráulica da planície de inundação pelo braço do rio Itajaí do Oeste estará sempre comprometida.

Em relação ao tempo de abertura, há possibilidade de flexibilização, onde as aberturas podem ser realizadas ao longo de um 1 dia. Além disso, o efeito das aberturas é atenuado em função da severidade da cheia do vale de jusante. O pulso da abertura é diluído pela cheia natural ao longo do vale a jusante. Tais resultados da simulação numérica trazem subsídio para o entendimento dos impactos das manobras em momentos de cheia severa no vale de jusante, quando é necessário proceder para o esvaziamento dos reservatórios durante eventos de inundação diante de previsões de volume adicionais de chuva.

Dada a grande quantidade de resultados apresentados, segue o resumo da análise dos pulsos operacionais em termos de tempo de chegada e elevação incremental máxima esperada das barragens Oeste e Sul para os municípios de Ituporanga, Taió, Rio do Oeste e Rio do Sul para as distintas condições hidrológicas de jusantes e níveis operacionais dos reservatórios. As figuras abaixo serão usadas diretamente nos manuais para ábacos de apoio para interpretação hidrológico e hidráulica de reservatório e vale de jusante.

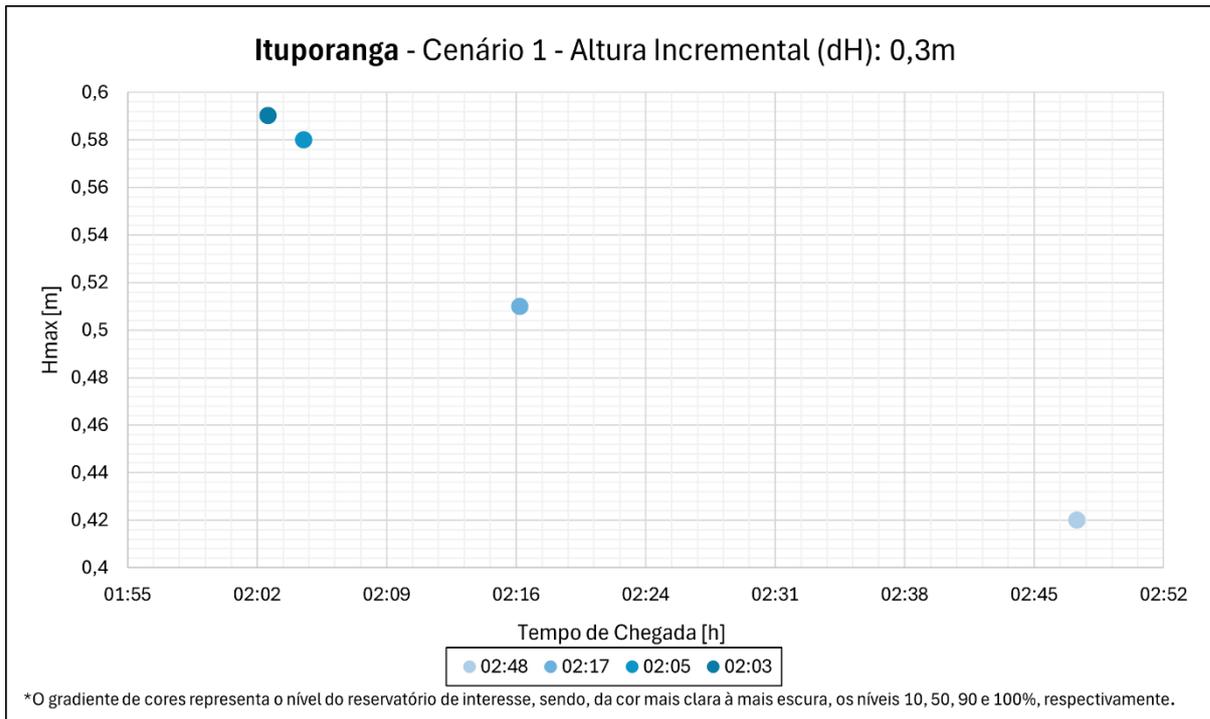


Figura 7. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Ituporanga.

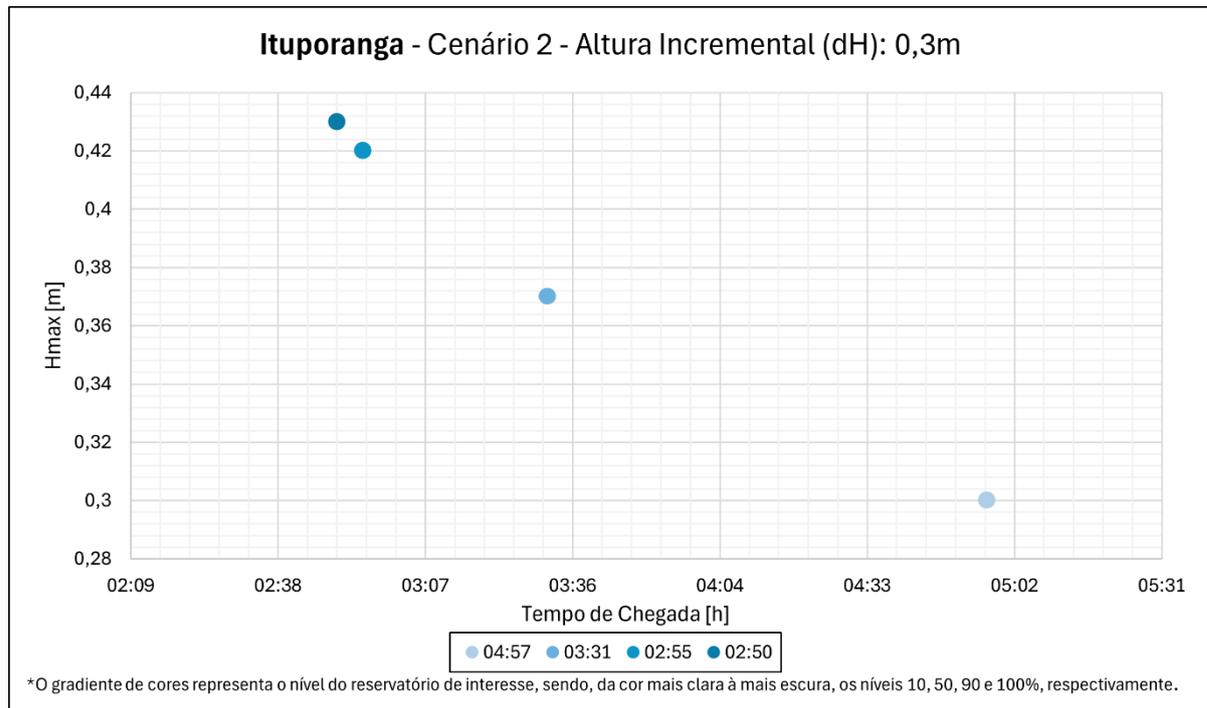


Figura 8. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Ituporanga.

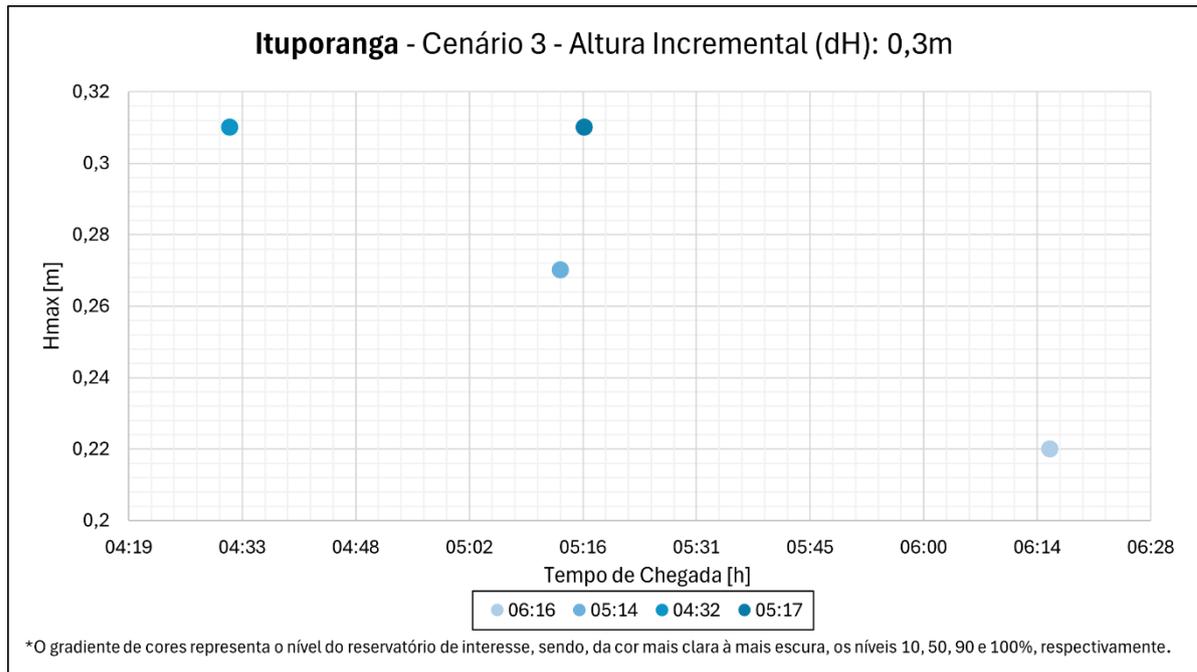


Figura 9. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Ituporanga.

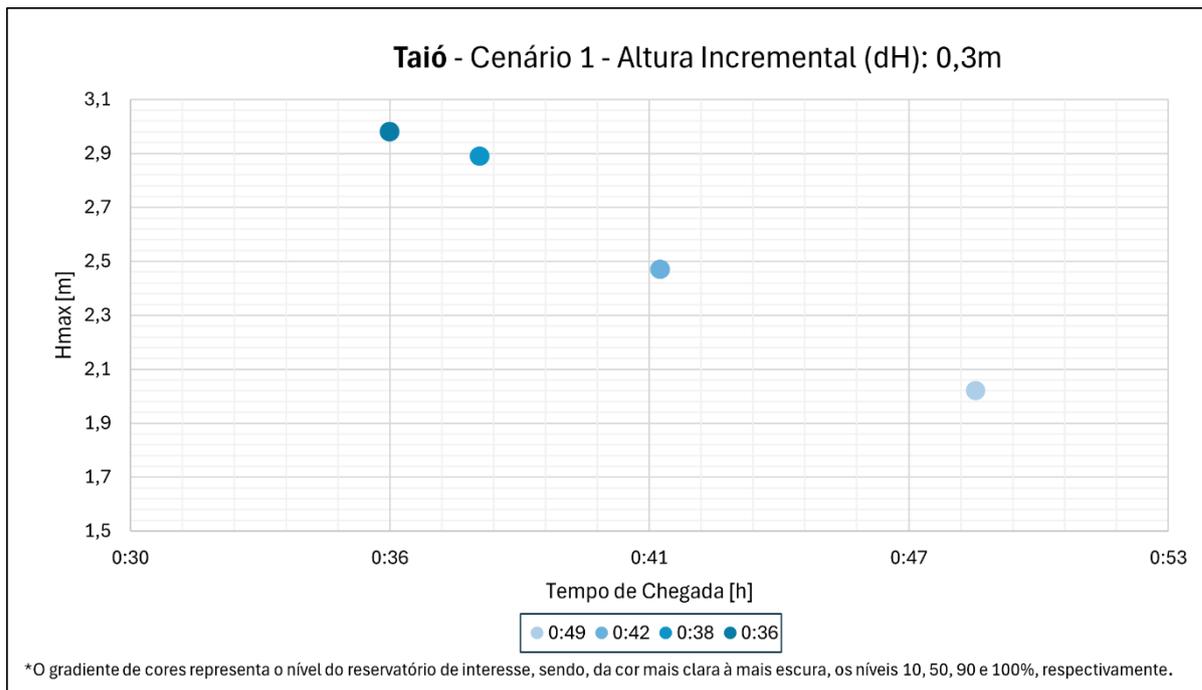


Figura 10. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Taió.

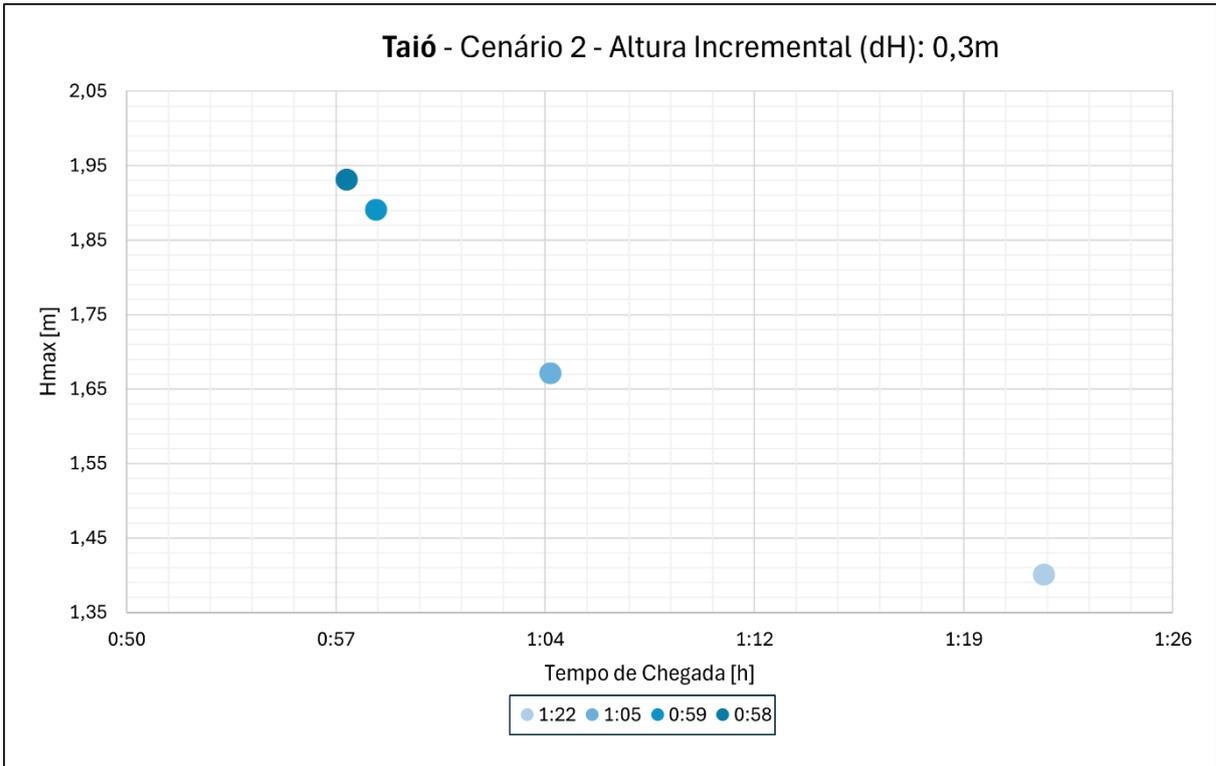


Figura 11. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Taió.

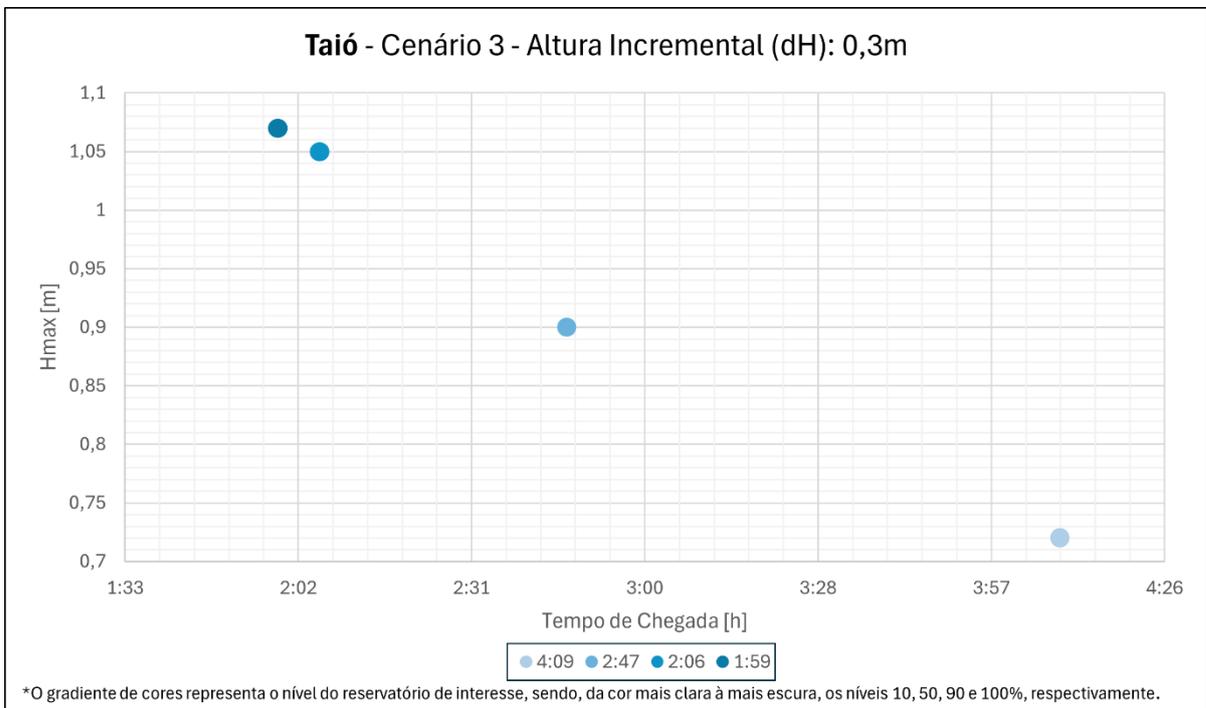


Figura 12. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Taió.

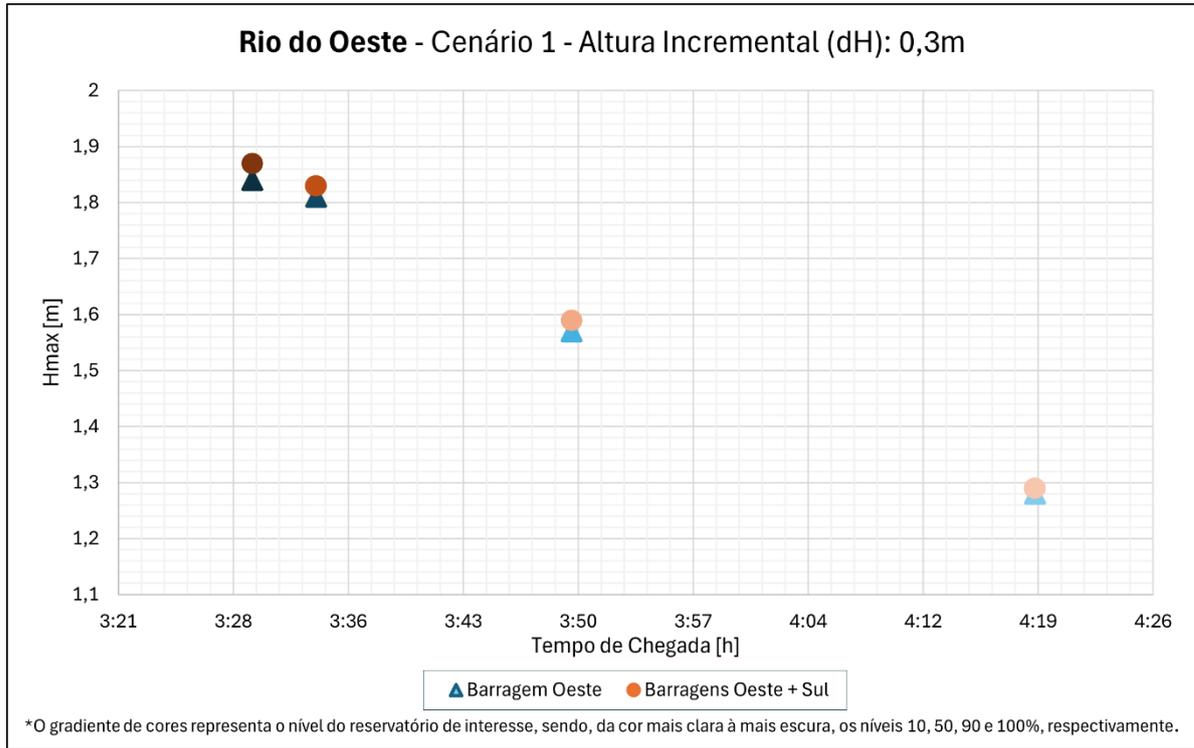


Figura 13. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Oeste.

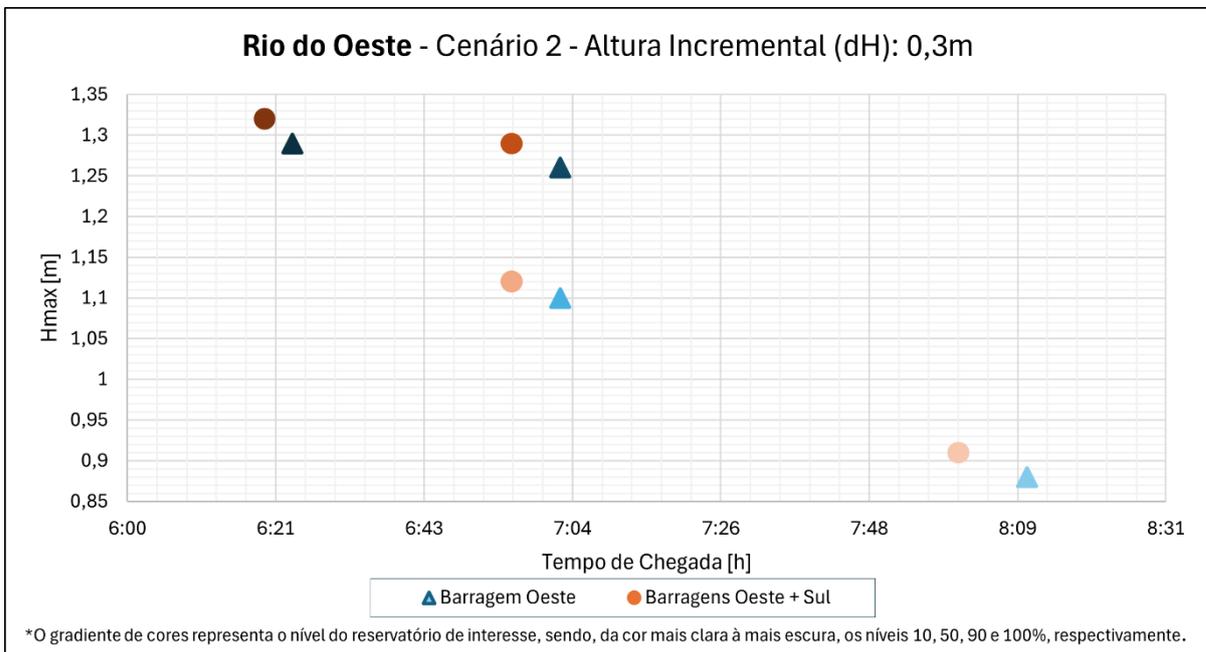


Figura 14. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Oeste.

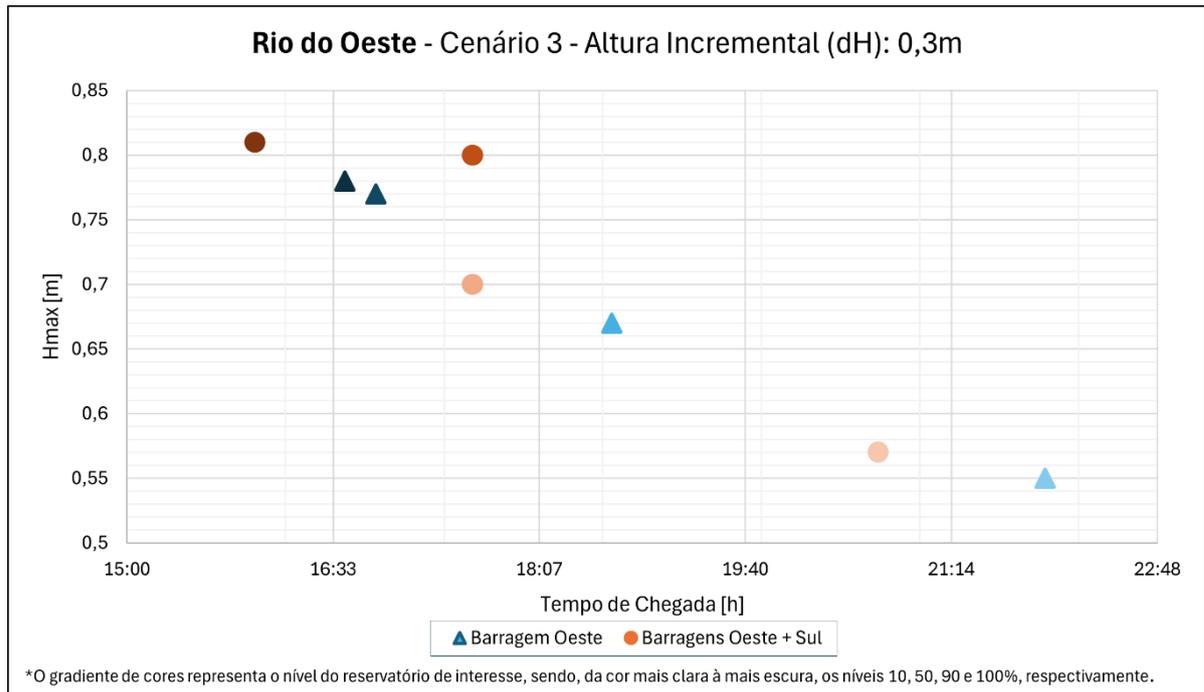


Figura 15. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Oeste.

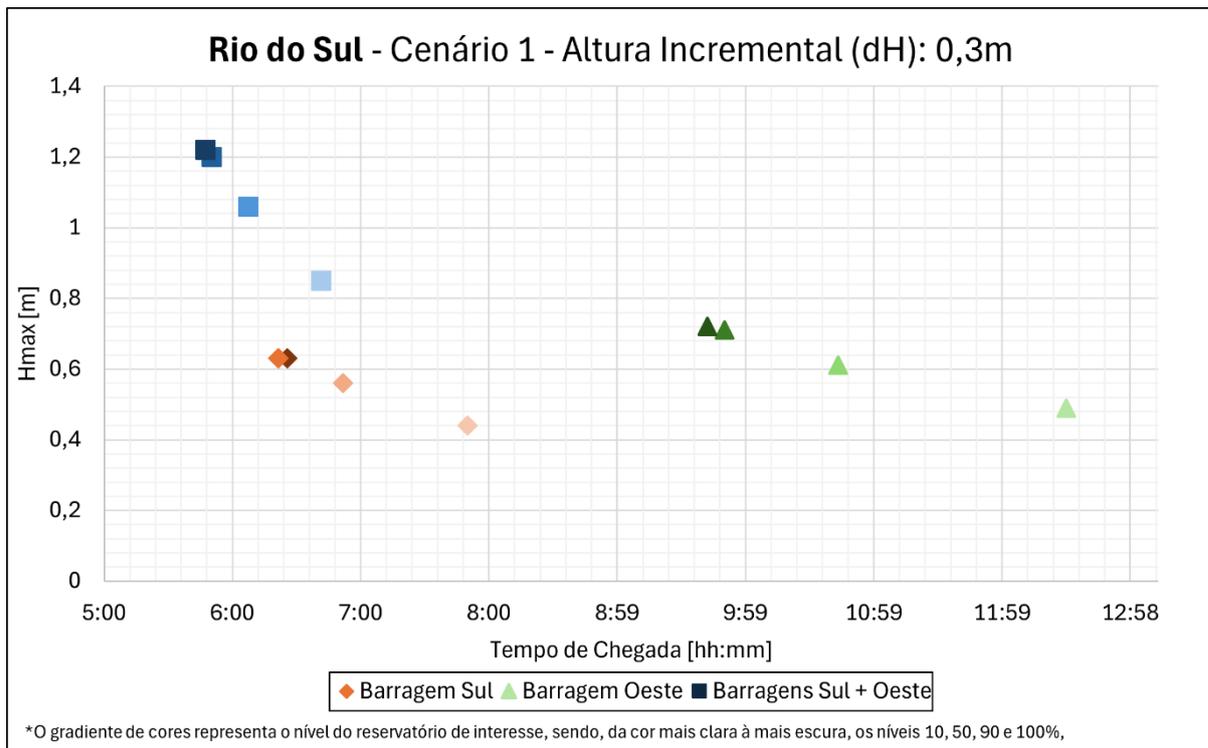


Figura 16. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 1 – Rio do Sul.

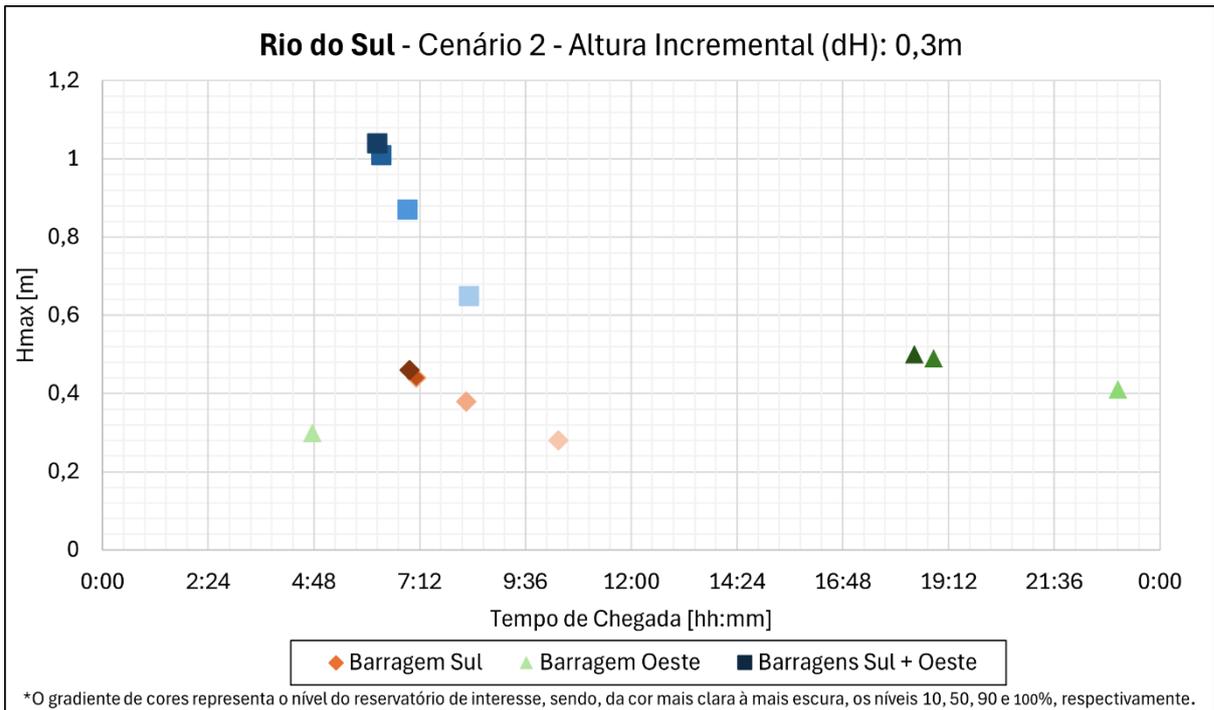


Figura 17. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 2 – Rio do Sul.

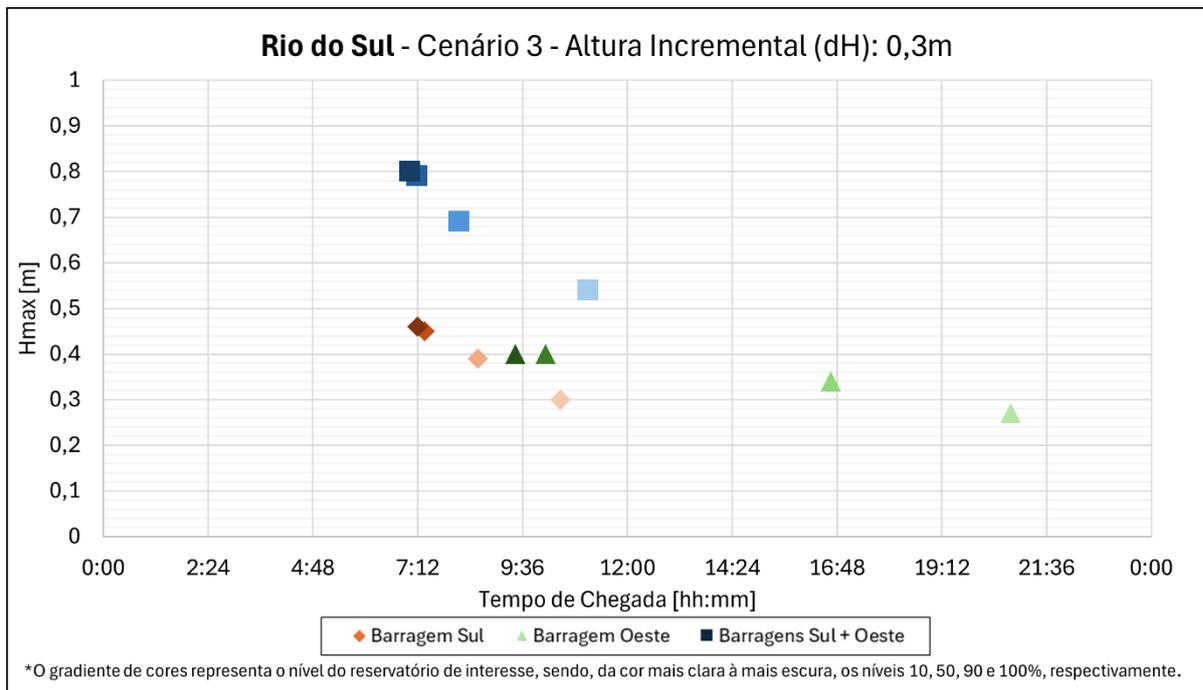


Figura 18. Análise do tempo de chegada e altura incremental para o cenário hidrológico 3 – Rio do Sul.

REFERÊNCIAS

DINGMAN, S. L. Physical Hydrology. Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois, 2008, 646p.

GUPTA, R. S. Hydrology and Hydraulic Systems. Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois, 2008, 896p. 2008.

HDC – Hydraulic Design Criteria. Corps Engineers. Waterways Experiment Station. U.S. Army Engineer. Vicksburg, Mississippi. 1959.

MENEZES P. H. B. J. et al – Análise da Evolução do Padrão de Uso e Ocupação do Solo na Bacia de Contribuição do Lago Paranoá – DF.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr 1970.

SIVAPALAN, M.; VINEY, N. R.; ZAMMIT, C. LASCAM: Large scale catchment model. In: Mathematical models of large watershed hydrology, V.P. Singh and D.K. Frevert (eds.), Water Resources Publications, Colorado, United States, p. 579-648, 2002

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review, v. 39, n.7, p. 1082-1089, 1911.

U.S. Bureau of Reclamation. Design of Small Dams, 3rd Edition, 1987, 860 pp.

U.S. Bureau of Reclamation. Design Standards No. 13: Embankment Bams. DS-13(6)-2. 2012, 60 pp.

APÊNDICE B - Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Sul

2.1 INTRODUÇÃO

O presente documento, realizado no ano de 2018, é o resumo do estudo hidráulico para determinação da regra de operação da Barragem Sul. Neste documento estão descritos os modelos numéricos empregados nas análises, a metodologia de calibração e concepção dos modelos numéricos na representação da Barragem Sul e os resultados obtidos para confecção das regras de operação e curvas hidráulicas dos dispositivos de descarga da barragem.

Parte dos resultados desse estudo aparecem de forma redundante no documento principal do manual de operação da Barragem Sul. As simulações tiveram embasamento dos dados observados no evento de cheia de setembro de 2018. O referido evento hidrológico de setembro de 2018 foi observado e acompanhado pela equipe técnica do presente projeto. Os registros de chuva, vazão e operação da Barragem Sul e Oeste serviram para estudar e aferir o comportamento das barragens, bem como reconstituir a contribuição hidrológica da área incremental entre as barragens até a estação Rio do Sul Novo – 83300200.

A ocorrência de um evento real durante a fase de estudos do manual de operação da Barragem Sul contribuiu para agregar robustez e aferir a qualidade dos resultados obtidos e dos cenários operacionais analisados.

2.2 MODELO HIDROLÓGICO

O balanço hídrico para o evento hidrológico foi realizado com o uso do modelo hidrológico HEC-HMS. Este modelo foi projetado para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, em diferentes escalas temporais e espaciais. O modelo foi usado por permitir fazer a análise integrada da bacia hidrográfica com os reservatórios. O uso do modelo propiciou o entendimento do modelo conceitual da bacia do Rio Itajaí na seção de Rio do Sul. Com os resultados obtidos, os reservatórios serão implementados no SPEHC, sistema responsável pela geração de boletins de previsão hidrológica nas barragens e para Rio do Sul.

De acordo com HEC (2009), este modelo opera em módulos separados para os cálculos do ciclo hidrológico. Desta forma, o usuário pode estabelecer o método mais conveniente para

caracterização do escoamento superficial, infiltração e perdas, escoamento básico, evapotranspiração e efeito de armazenamento por reservatórios¹.

2.3 MODELO HIDRÁULICO

O HEC-RAS (HEC, 2016) é um modelo unidimensional e bidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície d'água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, podendo ocorrer mudanças de um regime para outro. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações em que o perfil da superfície d'água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite a análise e cálculo de regras operacionais de dispositivos hidráulicos, tais como barragens.

A formulação matemática unidimensional do HEC-RAS é baseada nas equações da conservação do momento de St. Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{|Q|Q}{K^2} + q \frac{Q}{A} = 0 \quad (1)$$
$$L \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Onde Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície d'água [m]; K é capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o fluxo lateral [m³/s/m]; β é o fator de distribuição do fluxo [adim].

O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na Eq.(2) para obtenção de sua solução hidráulica. A capacidade de transporte das formulações hidráulicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional e bidimensional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Onde V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; S é a declividade do escoamento [m/m]; Rh raio hidráulico [m].

¹ Regras de operação não são calculadas ou analisadas no modelo hidrológico HEC-HMS.

O reservatório e os dispositivos da barragem são simulados hidraulicamente por meio da equação de momento, assim o deslocamento da onda no reservatório é adequadamente representado. As regras de operação dos dispositivos de descarga, para controle do reservatório, são igualmente representadas.

Na Figura 19 está ilustrado o modelo hidráulico conceitual da Barragem Sul na interface HEC-RAS.

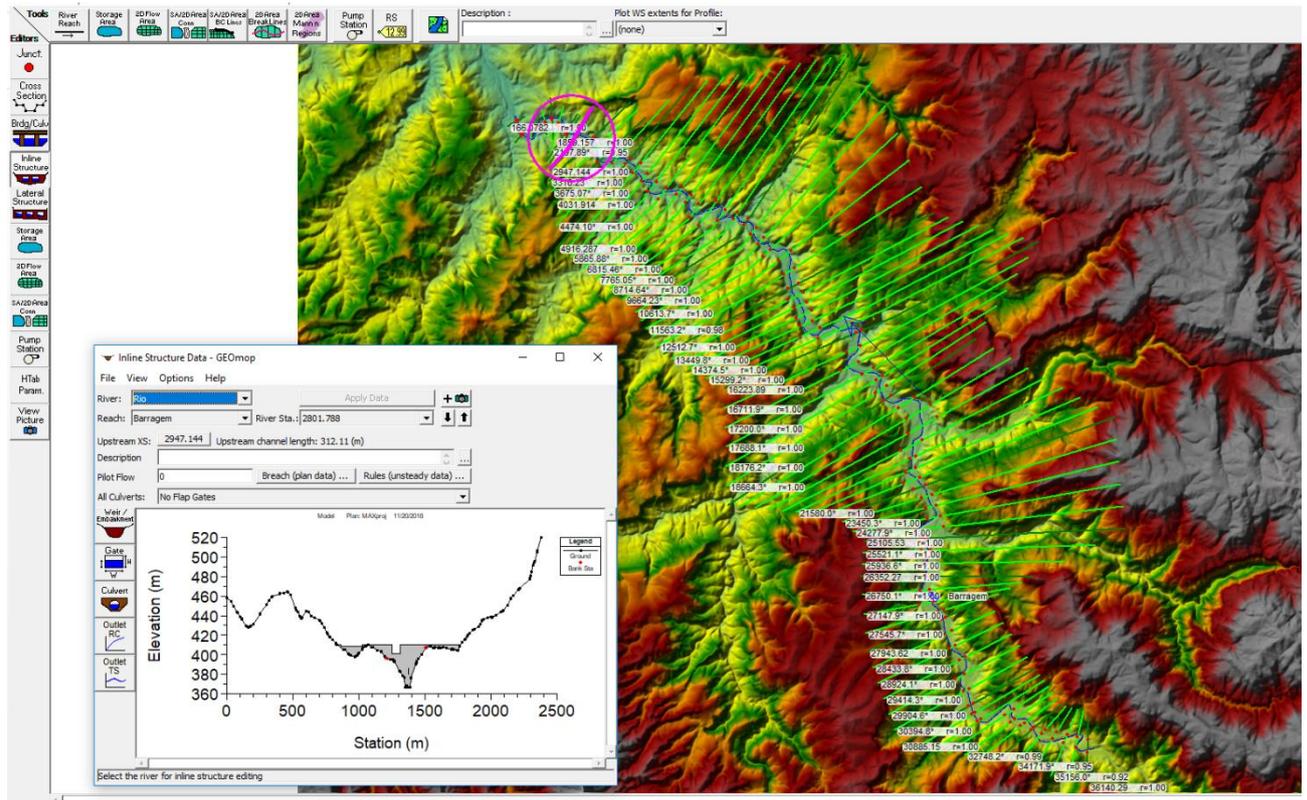


Figura 19. Modelo conceitual de operação da Barragem Sul.

2.4 DADOS DE ENTRADA

O desenvolvimento do presente estudo foi baseado em dados hidrológicos, topográficos e levantamentos de campo realizados ao longo do trecho estudado. O Quadro 1 resume os dados empregados no desenvolvimento do modelo numérico da Barragem Sul.

Quadro 1. Resumo de dados.

Tipo de base dados	Variável
Hidrológico	Dados diários de Cota, Vazão e Resumo de Descarga Líquida da estação fluviométrica Rio do Sul - Novo (cód. 83300200) e Ituporanga (cód. 83250000).

Tipo de base dados	Variável
Operação do reservatório	Medição de descarga líquida a jusante do eixo da barragem e registro do monitoramento de nível d'água no reservatório e configuração de abertura das comportas do descarregador de fundo.
Modelo digital de terreno	Utilizado modelo digital de terreno realizado pela SDS/SC, com pixel de 2 m, obtidas por meio do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) através do endereço eletrônico http://sigsc.sds.sc.gov.br/ .

2.4.1 CHUVA DE PROJETO

Para o presente projeto foi determinada chuvas de projeto para o desenvolvimento de simulações de operação do reservatório da Barragem Sul e propagação da cheia até a seção de controle de restrição no município de Rio do Sul, SC. Segundo estudo da JICA (2011), a chuva padrão deflagradora de inundações ocorre num período de 4 dias, com sistemas meteorológicos que abrangem em totalidade, ou quase totalidade, a área da bacia do Rio Itajaí.

Tal padrão de chuvas é coerente, sendo os últimos eventos ocorridos em junho de 2017 e setembro de 2018 com o mesmo padrão mapeado no estudo hidrológica da JICA (2011). Desta forma, a chuva de referência de julho de 2017 foi usada para calcular as chuvas de projeto de duração de 4 dias para os períodos de retorno do estudo indicado.

Na Tabela 5 estão resumidas as alturas acumuladas de chuva para duração de 4 dias.

Tabela 5. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.²

Período de retorno – TR [anos]	Acumulado em 4 dias [mm]
2	105
5	173
10	208
20	243
25	265
50	293
80	320
100	333

² A equação para cálculo do período de retorno em função do acumulado de chuva em 4 dias é $TR = 0,2119e^{0,0184P}$



Código: 602-SDC-RT-HID-APE-0001

Título: Apêndices – Manual de Operação
Hidráulica das Barragens de Contenção
de Cheias do Vale do Itajaí



Revisão: 3

Emissão: 18/10/2024

Período de retorno – TR [anos]	Acumulado em 4 dias [mm]
150	357
200	375

Os eventos de chuva são empregados como limiar, e devem ser interpretados como variável de referência, para caracterizar a operação das barragens e como variável de entrada no modelo hidrológico para reconstituição dos eventos de cheia associados a cada chuva de projeto.

A chuva de projeto unitária está ilustrada na Figura 20 junto com as curvas de acumulação para cada período de retorno.

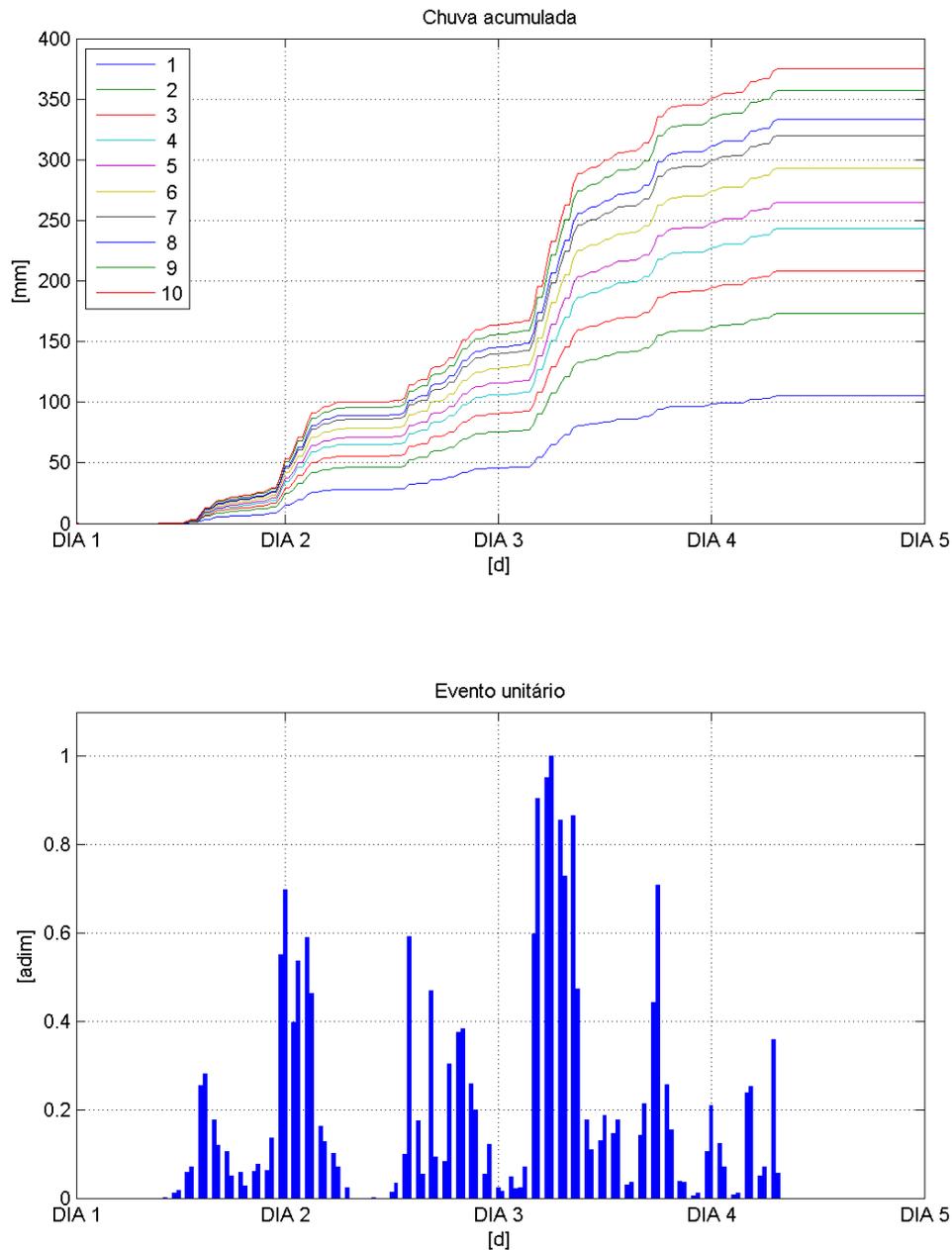


Figura 20. Chuva de projeto.

2.4.2 CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA

Na Figura 21 está ilustrado o modelo conceitual desenvolvimento para a realização das simulações hidrológicas. A reconstituição do evento de cheia de setembro de 2018 considera uma análise integrada da bacia hidrográfica do Rio Itajaí até a seção de Rio do Sul, contemplando o efeito de armazenamento das barragens a montante de Rio do Sul. Na

reconstituição hidrológica regras de operação não são simuladas, somente o efeito de armazenamento dos reservatórios é calculado.

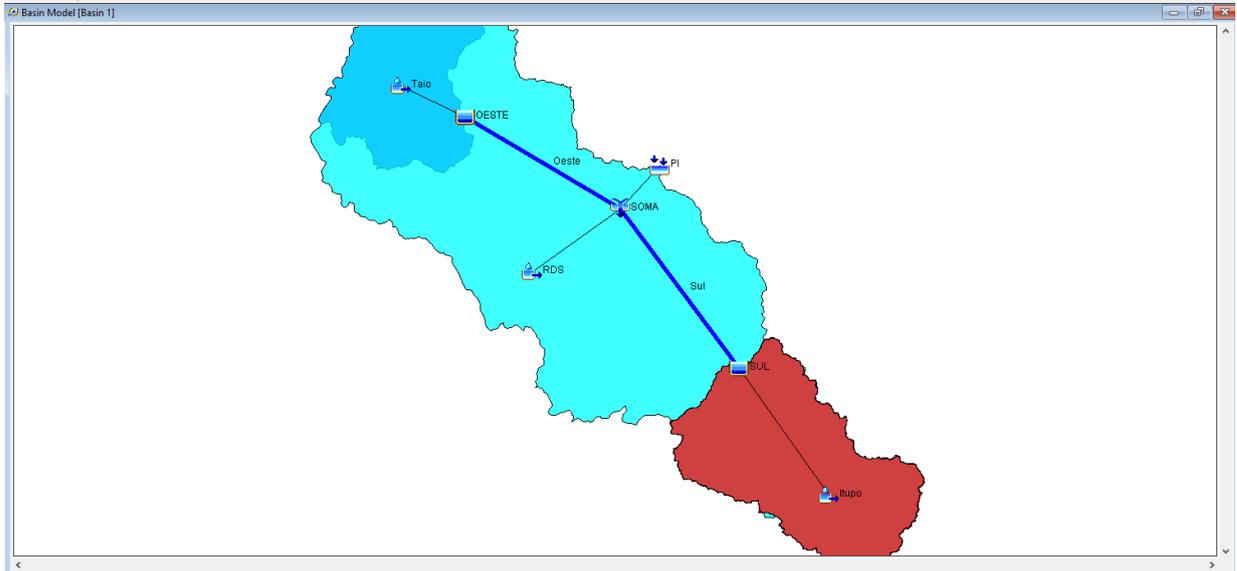


Figura 21. Modelo hidrológico conceitual.

A calibração do modelo hidrológico levou em consideração o comportamento na estação Rio do Sul – Novo – 83300200 e na estação Taio – 83029900, bem como o monitoramento dos níveis dos reservatórios da Barragem Sul e Barragem Oeste. A calibração, através do balanço hídrico do evento, obteve NSE de 0,96 e desvio volumétrico de 8% (Figura 22). A simulação buscou ajustar a geração de escoamento da bacia hidrográfica, das áreas de drenagem até o eixo das barragens e incremental, e o armazenamento dos reservatórios. Nessa simulação somente o enchimento foi representado.

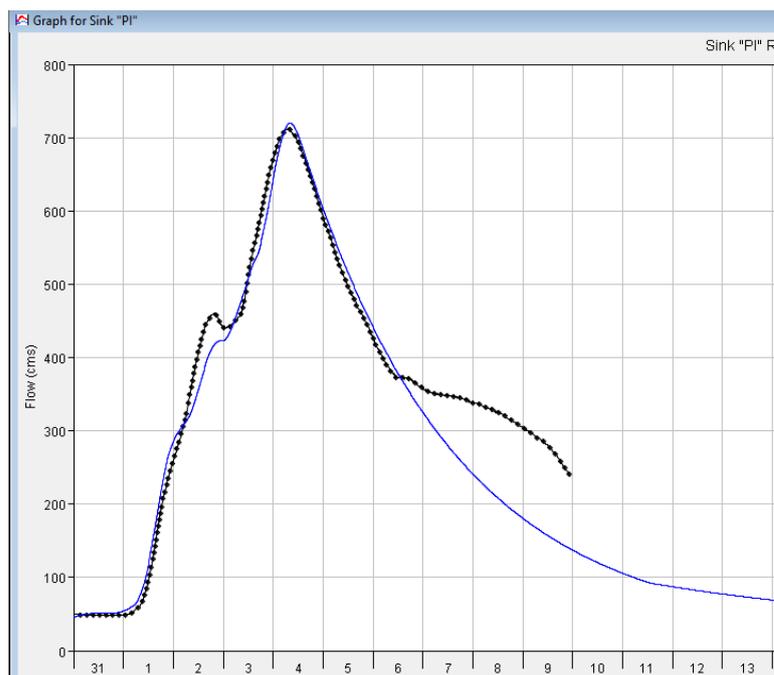


Figura 22. Calibração do evento de setembro de 2018.

Com a simulação de calibração identificou-se características de resposta do sistema bacia- reservatórios, onde a restrição prioritária fica definida como a estação de Rio do Sul – Novo – 83300200. Uma verificação importante durante a ocorrência do evento foi a antecipação da operação para garantir maior volume de calha natural de rio disponível para o armazenamento da cheia, enquanto não ocorra extravasamento na planície de inundação pelo rio Itajaí.

A estação fluviométrica Ituporanga – 83250000 serve como ponto de restrição secundário, pois a barragem regula os eventos hidrológicos até o atingir a capacidade máxima de armazenamento seguida de vertimento. O desenvolvimento de uma provável inundação em Ituporanga ocorre posteriormente à inundação em Rio do Sul.

O modelo hidrológico foi empregado para constituir os cenários hidrológicos para cada chuva de projeto, calculando os hidrogramas afluentes nos reservatórios e a contribuições na área incremental até Rio do Sul.

As áreas de drenagem de referência para o balanço hídrico são:

- Área de drenagem do reservatório da Barragem Sul: 1.316 km²;
- Área de drenagem do reservatório da Barragem Oeste: 959 km²;
- Área de drenagem incremental até Rio do Sul: 3488 km²;

O total de área de drenagem é igual a 5.763 km², em Rio do Sul. A área de drenagem da Barragem Sul representa 23% da área total e a área de drenagem da Barragem Oeste

representa 17%, totalizando 40% da área total até Rio do Sul com capacidade de regulação da resposta hidrológica. Tais percentuais são significativos e já indicam alta capacidade de contenção de cheia pelas barragens.

A operação referente ao evento de setembro de 2018 foi reproduzida em modelos numéricos, a fim de aferir o modelo hidráulico HEC-RAS para a simulação dos cenários de operação associados às chuvas de projeto. Com a simulação, quantificou-se o impacto da Barragem Sul, e também da Barragem Oeste, as quais operam conjuntamente, na inundação que se inicia na seção de controle de Rio do Sul.

Na Figura 23 está ilustrada a passagem da cheia de setembro de 2018, comparando o cenário natural teórico, sem barragens, com o cenário atual com o efeito de armazenamento da cheia pelas barragens.

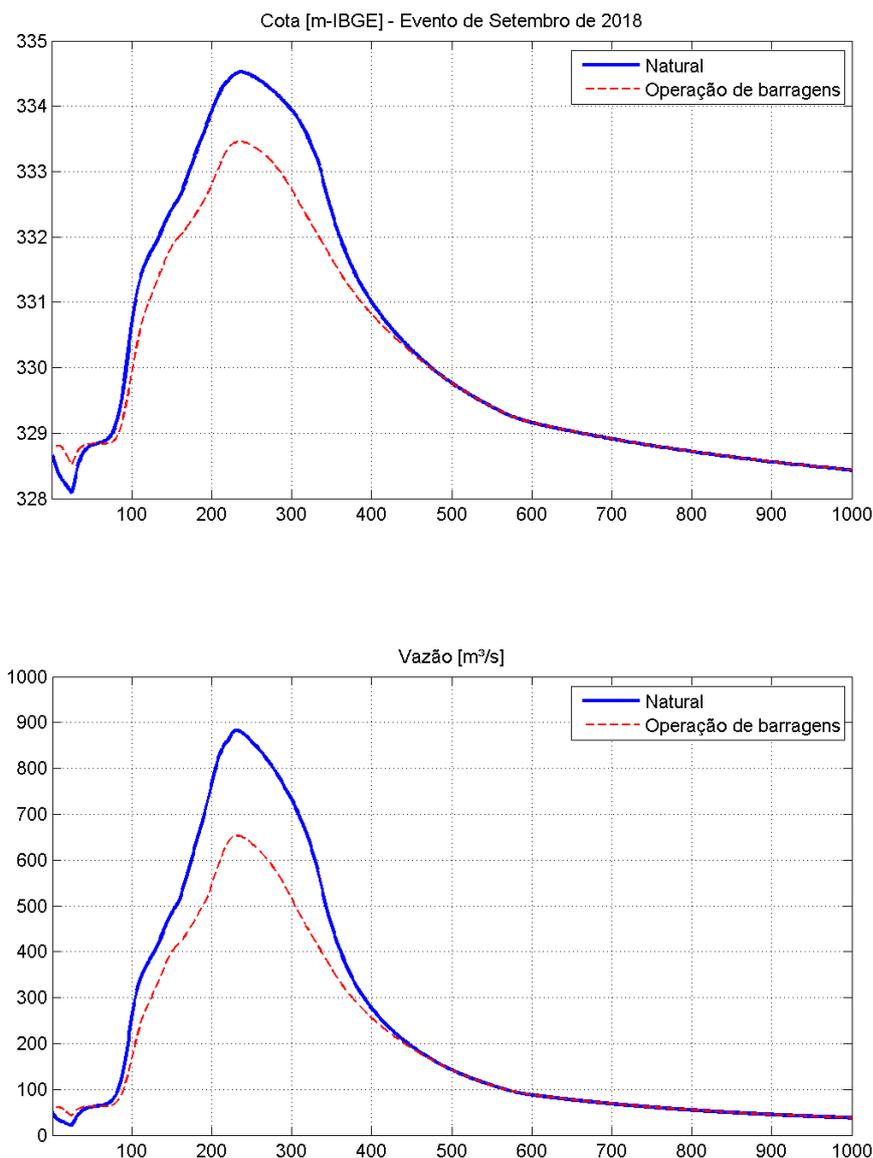


Figura 23. Quantificação do efeito das Barragens Sul e Oeste na inundação de Rio do Sul.

Em suma, a vazão natural em Rio do Sul poderia ter chegado a 1.100 m³/s, sendo que a vazão real, com efeito da regulação das barragens, chegou a 710 m³/s. O rio Itajaí escoou em calha plena, não atingindo benfeitorias. Num cenário natural, a cota d'água teria sido 1,10 m superior, o que consolidaria danos em benfeitorias ao longo da cidade de Rio do Sul.

No mapa da Figura 24 está ilustrada a espacialização do evento em relação a um cenário natural e de período de retorno de 2 anos.

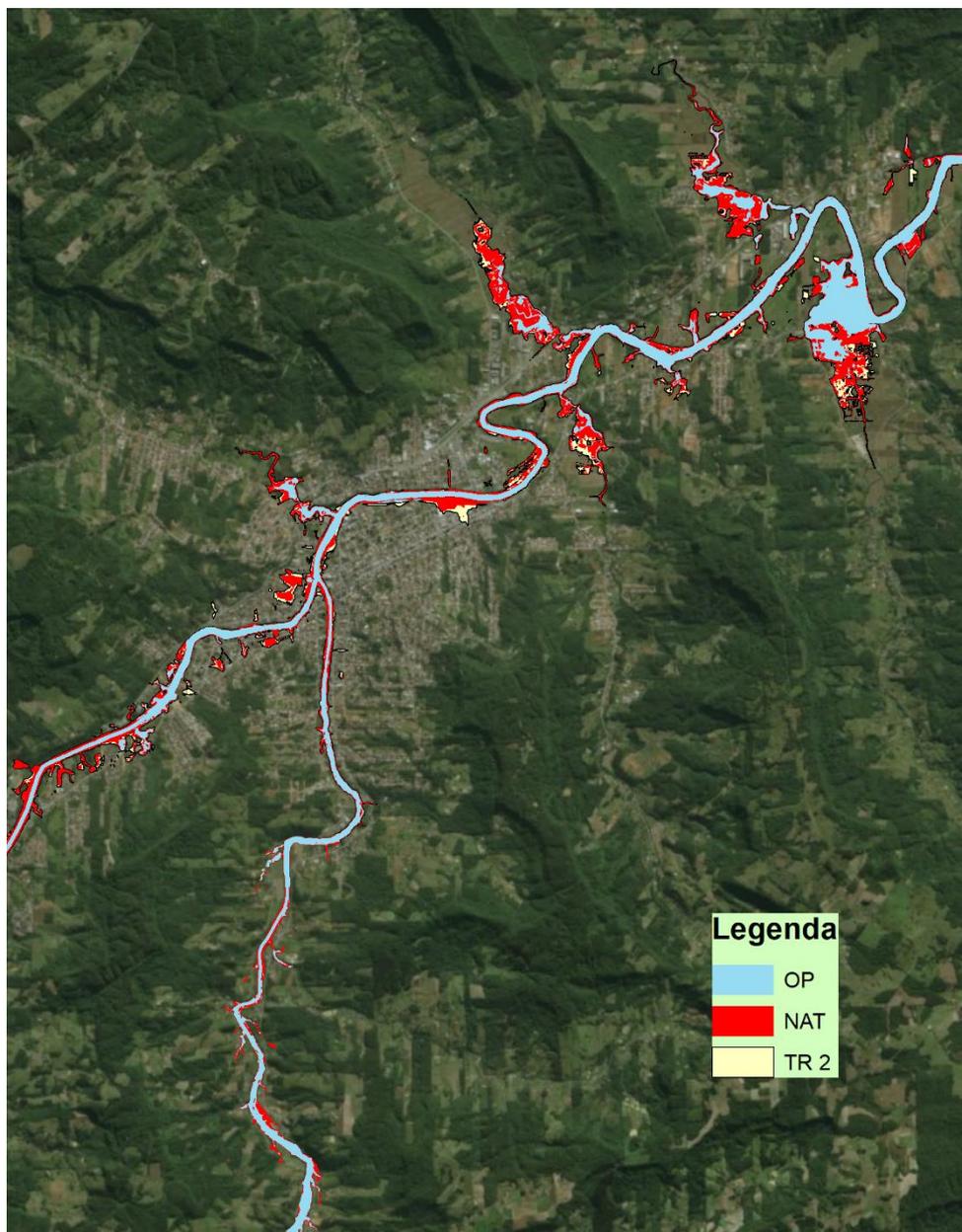


Figura 24. Cheia de setembro de 2018.

Para o cenário de operação de setembro de 2018, os modelos hidráulicos são os mesmos dos empregados nas calibrações e validações dos estudos de inundação de Ituporanga (361-SDC-RT-EHI-008.5), Taio (361-SDC-RT-EHI-008.6) e Rio do Sul (361-SDC-RT-EHI-008.4), incluindo os modelos da Barragem Sul e Barragem Oeste.

2.5 RESULTADOS

Os modelos das barragens para a análise operativa contemplam dois tipos de simulação, sendo “enchimento” e “esvaziamento”. O resultado do esvaziamento foi então empregado no modelo hidráulica integrado de Ituporanga, Taio e Rio do Sul. O procedimento

de esvaziamento determinou o tempo necessário para a manobra e o limiar hidráulico na seção de Rio do Sul para determinar o início da manobra, garantindo adequado nível de segurança.

Na Figura 25 está ilustrado o fluxograma do estudo de operação dos reservatórios, desde a reconstituição hidrológica até a definição das regras de operação.

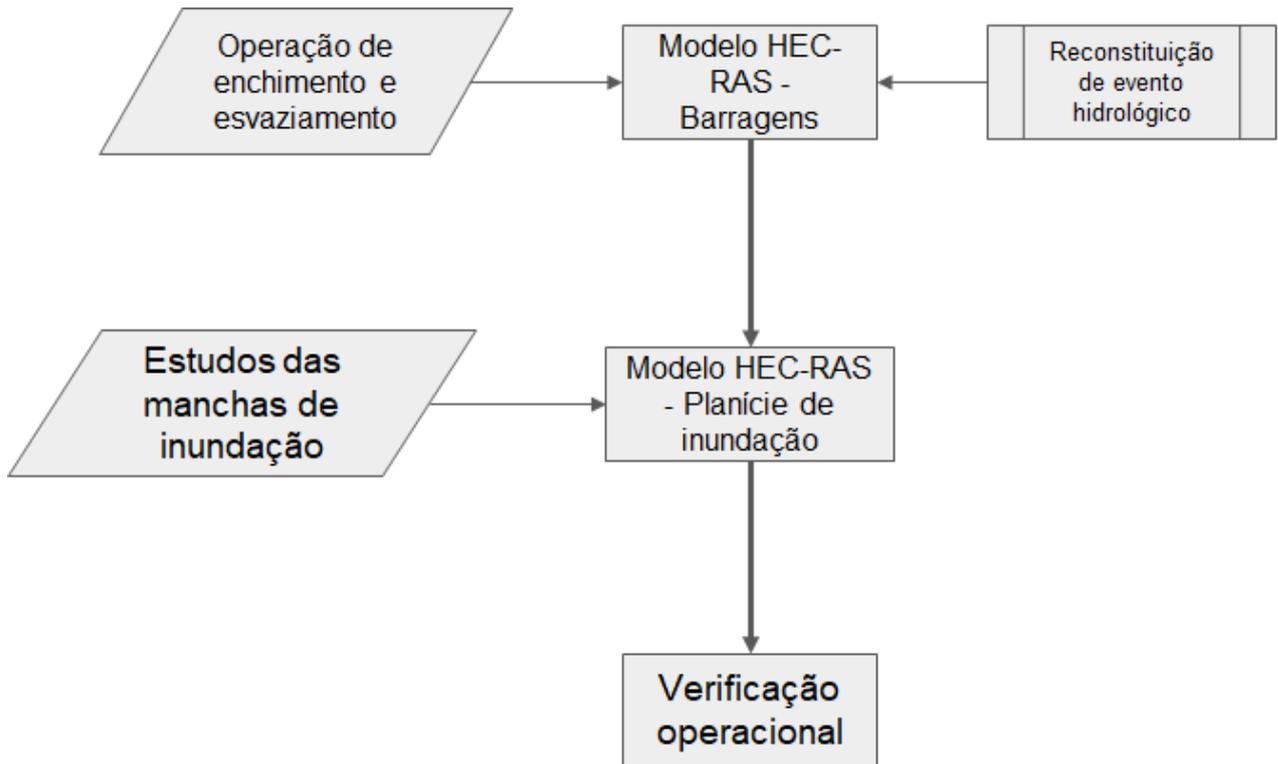


Figura 25. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Sul.

2.5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Os cenários identificados para determinar as regras de operação da Barragem Sul foram determinados a partir das simulações hidrológicas em função das chuvas de projeto. Dez cenários foram definidos para vazão afluente nos reservatórios da Barragem Sul e Barragem Oeste e área incremental:

- Período de retornos de 2 anos;
- Período de retornos de 5 anos;
- Período de retornos de 10 anos;
- Período de retornos de 20 anos;
- Período de retornos de 25 anos;
- Período de retornos de 50 anos;
- Período de retornos de 80 anos;

- Período de retornos de 100 anos;
- Período de retornos de 150 anos; e,
- Período de retornos de 200 anos.

Os hidrogramas afluentes ao reservatório da Barragem Sul estão ilustrados na Figura 26³.

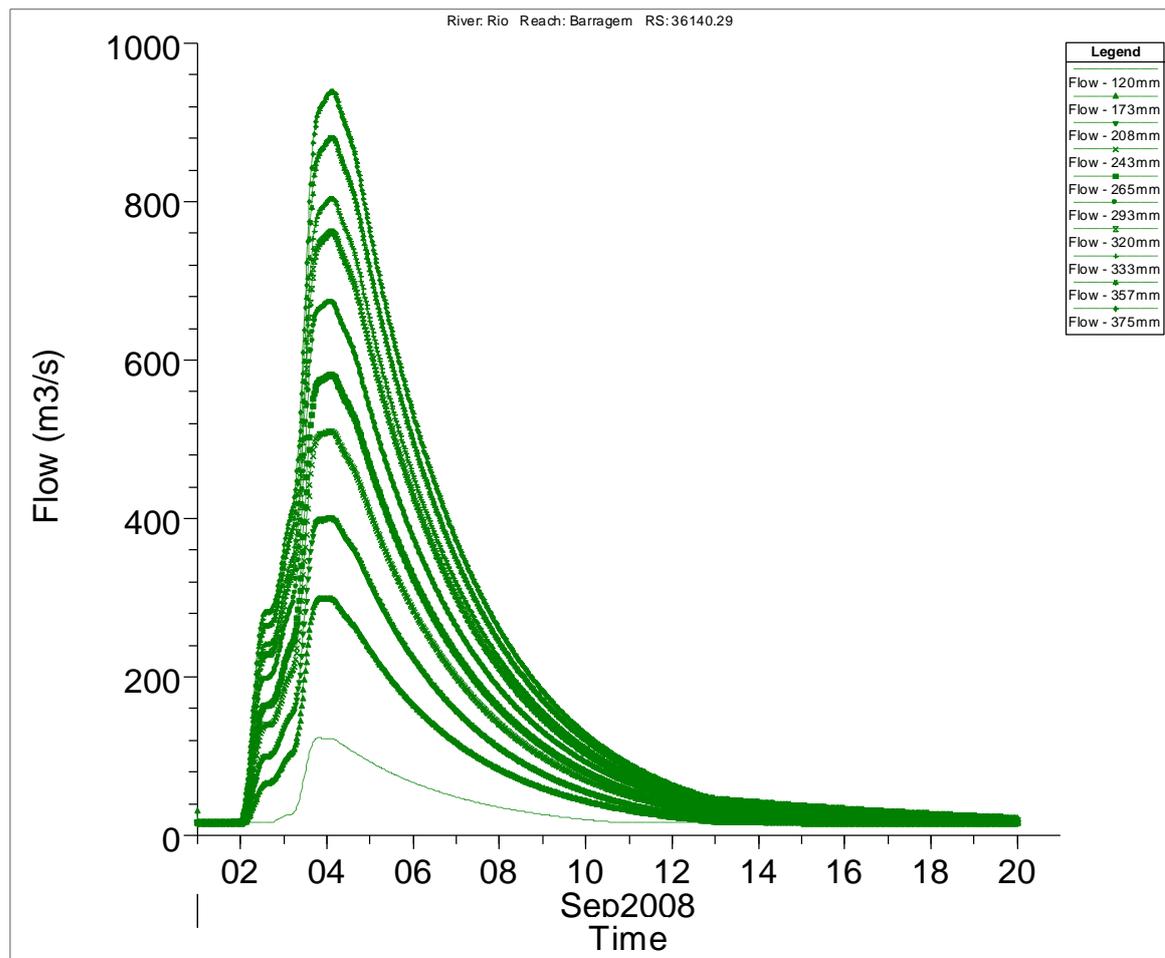


Figura 26. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Sul.

2.5.2 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO

Nas figuras abaixo estão resumidas as análises, associada a cada chuva de projeto, de enchimento do reservatório⁴ da Barragem Sul com indicação da vazão de pico do hidrograma afluente e defluente, volume armazenamento e cota d'água no reservatório.

³ Os hidrogramas gerados na modelagem chuva-vazão podem resultar em magnitudes superiores ao período de retorno da chuva. Devido a não-linearidade da resposta hidrológica, principalmente na bacia do Rio Itajaí.

⁴ Os volumes de armazenamento apresentados nos resultados contemplam o efeito hidráulico do movimento da água, podendo diferir com valores maiores em relação aos volumes da Curva Cota-Volume. A Curva Cota-Volume representa a água parada, hidrostática, tendendo à relação volume e cota topográfica.

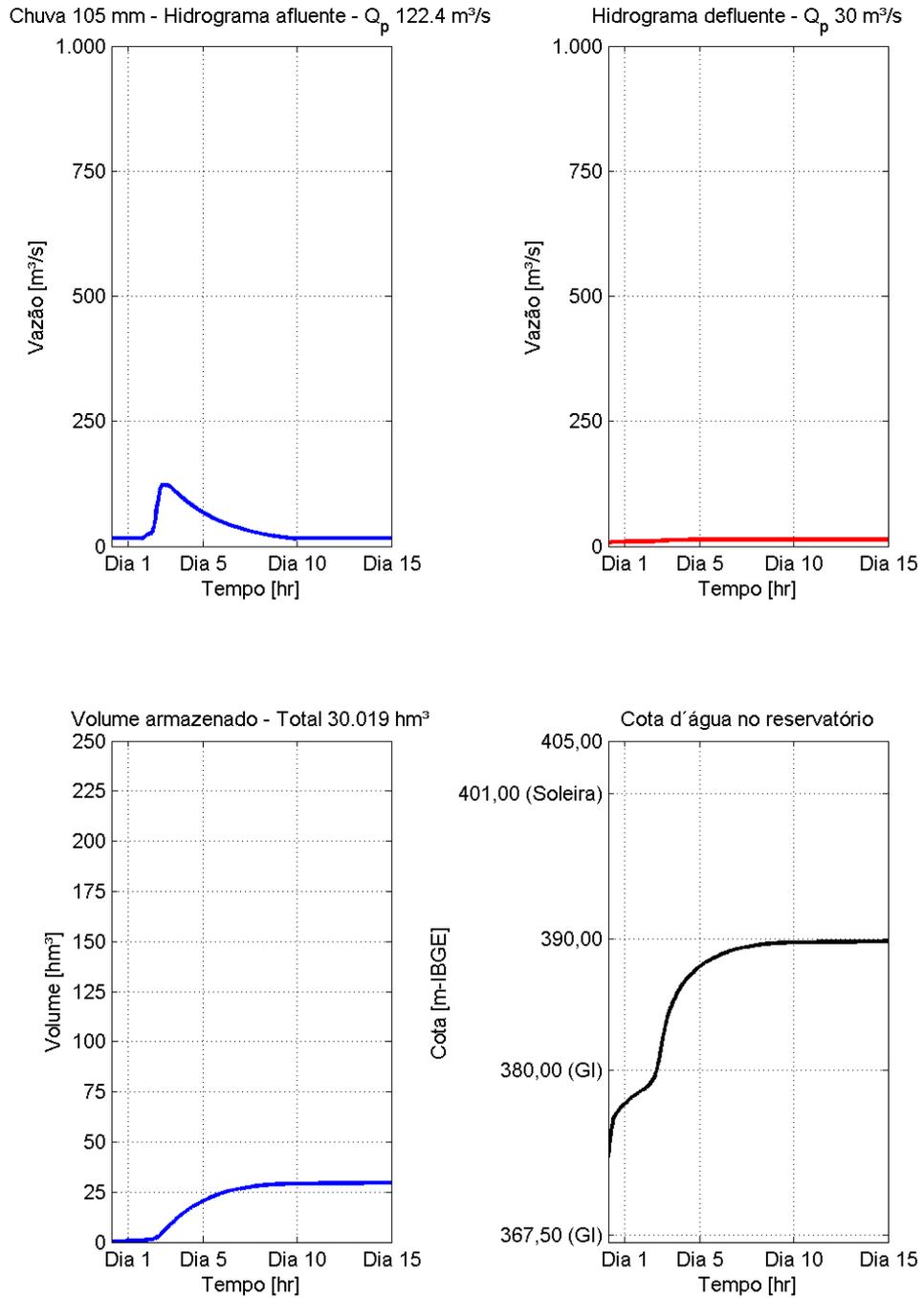


Figura 27. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 75%.

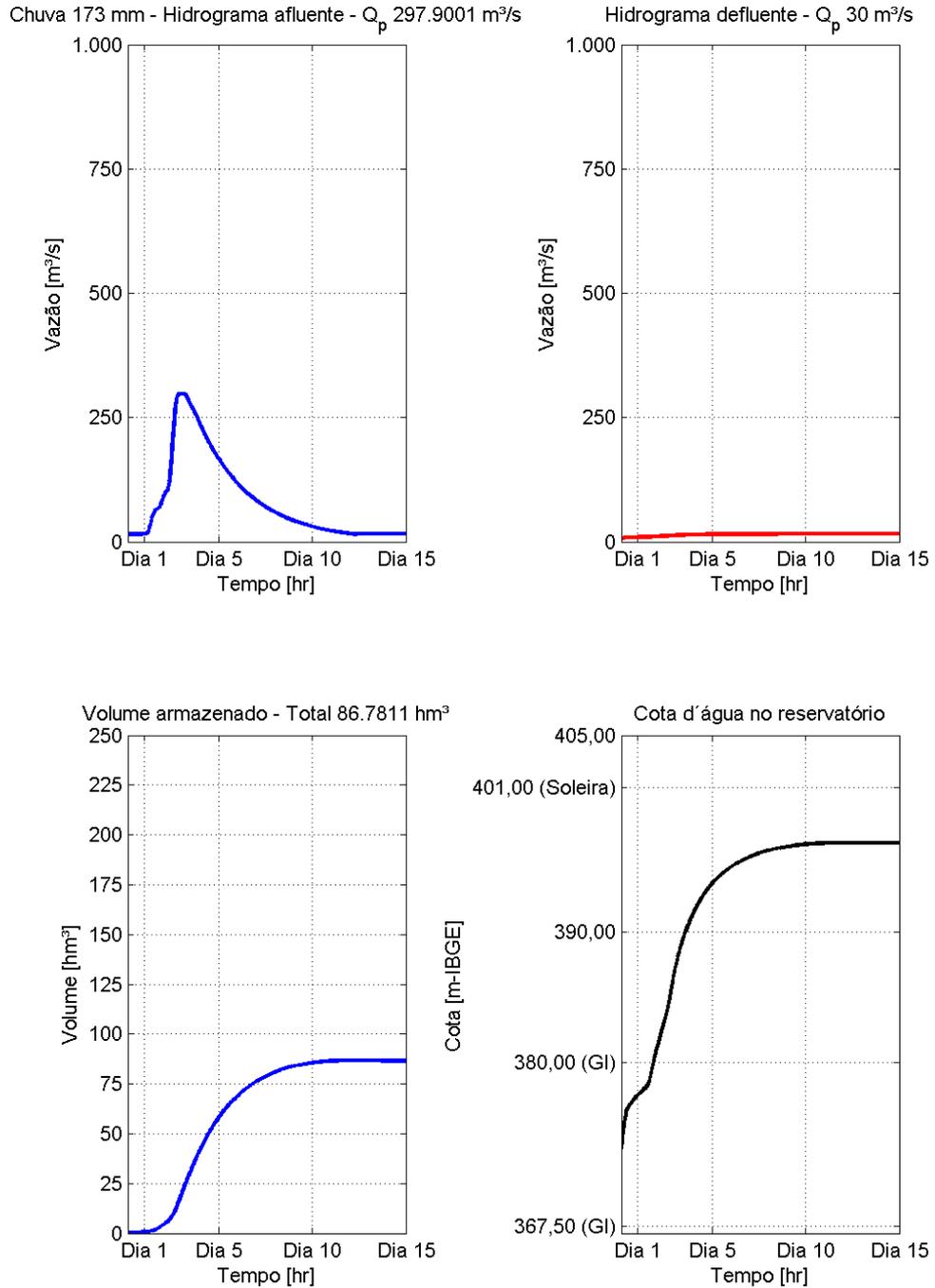


Figura 28. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 90%.

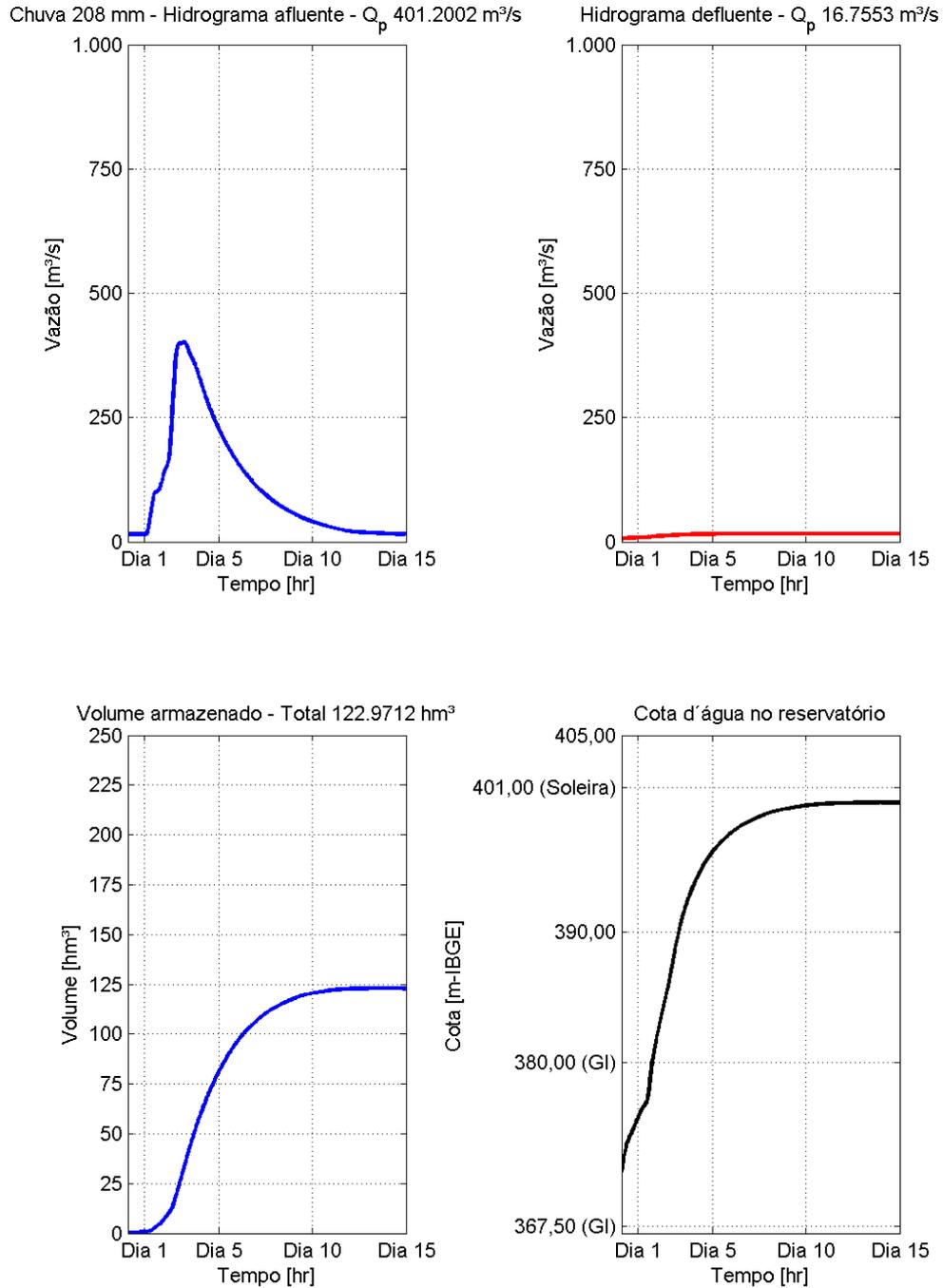


Figura 29. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 96 %.

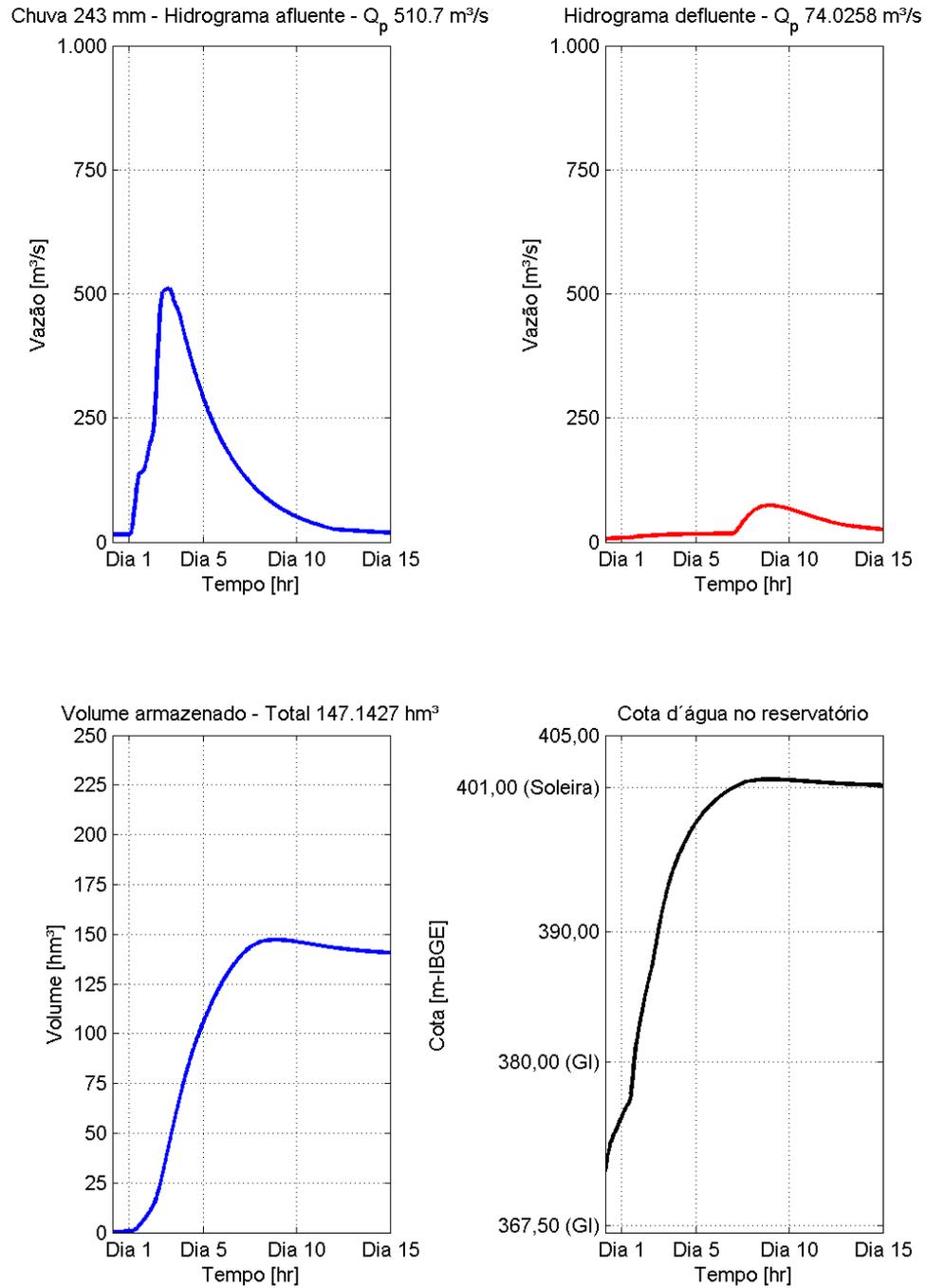


Figura 30. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 85%.

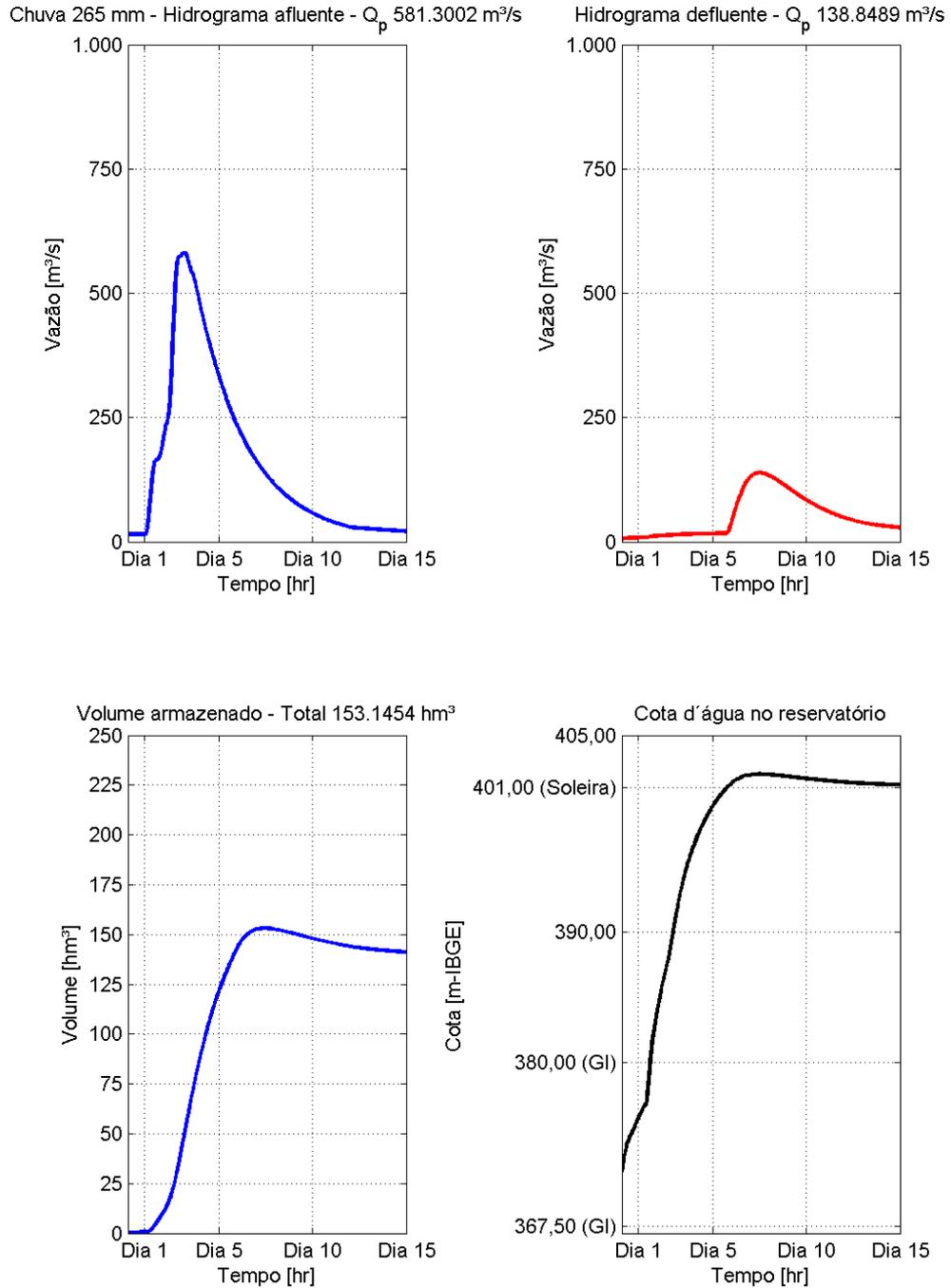


Figura 31. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 76%.

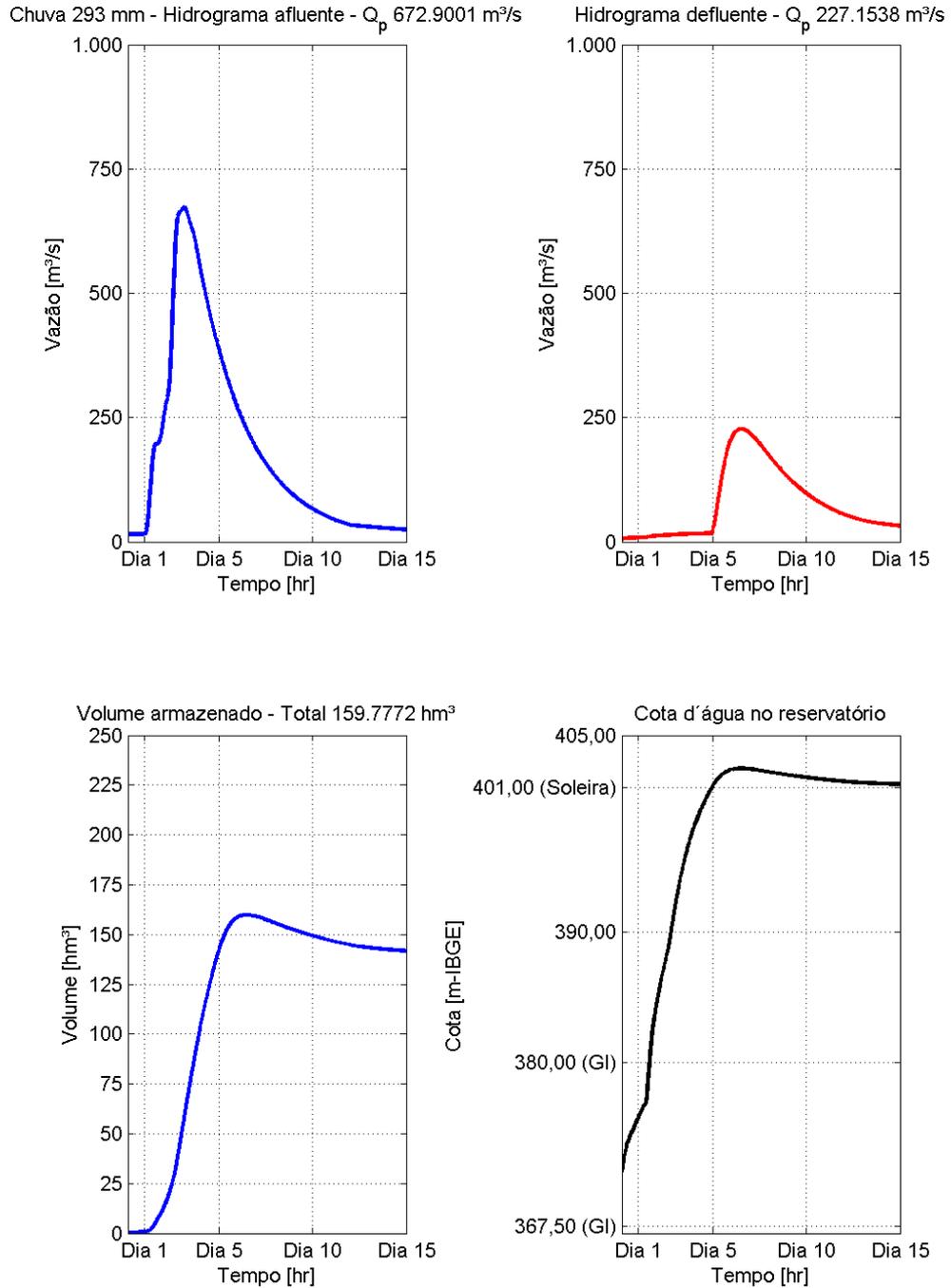


Figura 32. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 66 %.

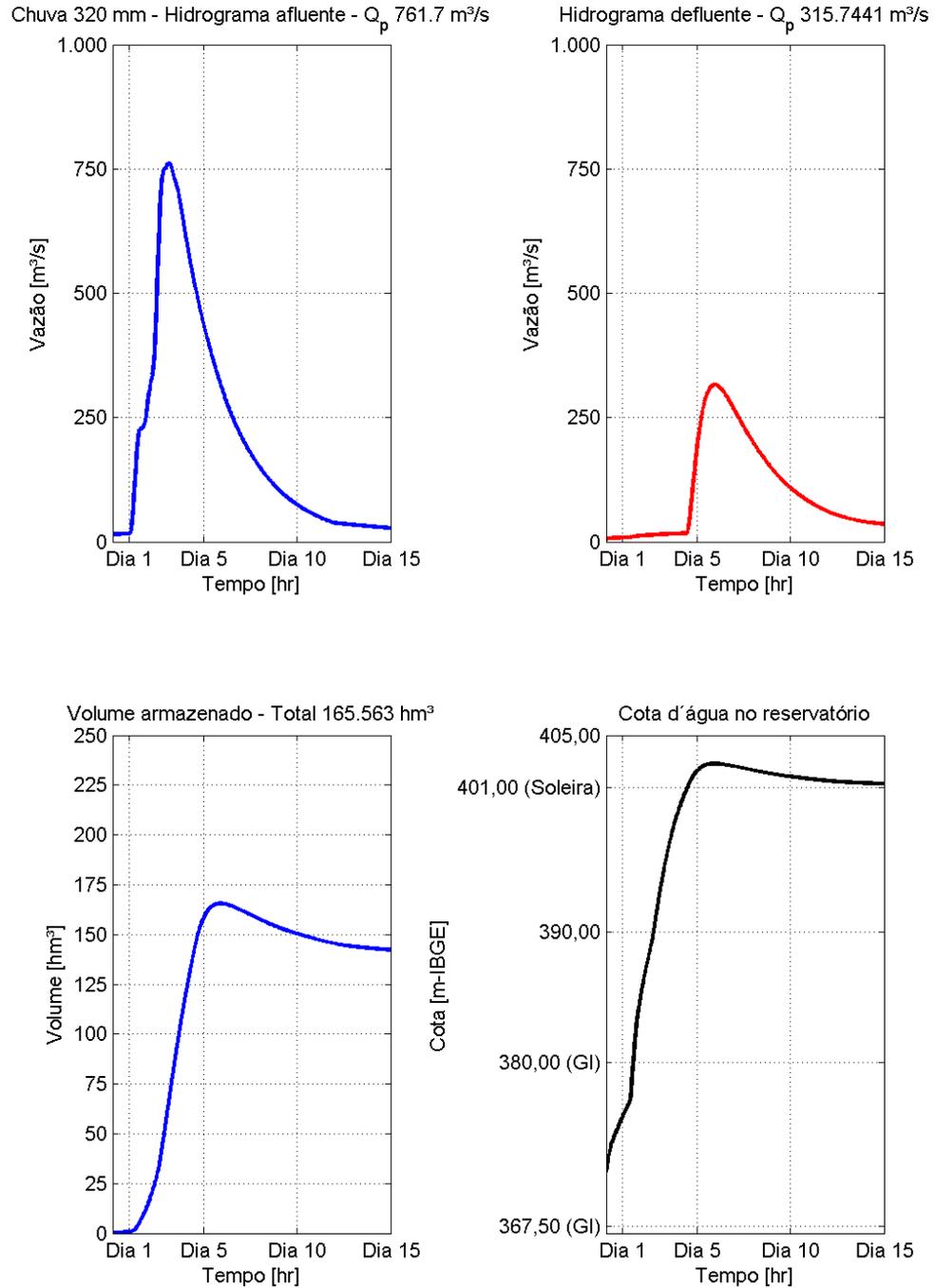


Figura 33. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 58%.

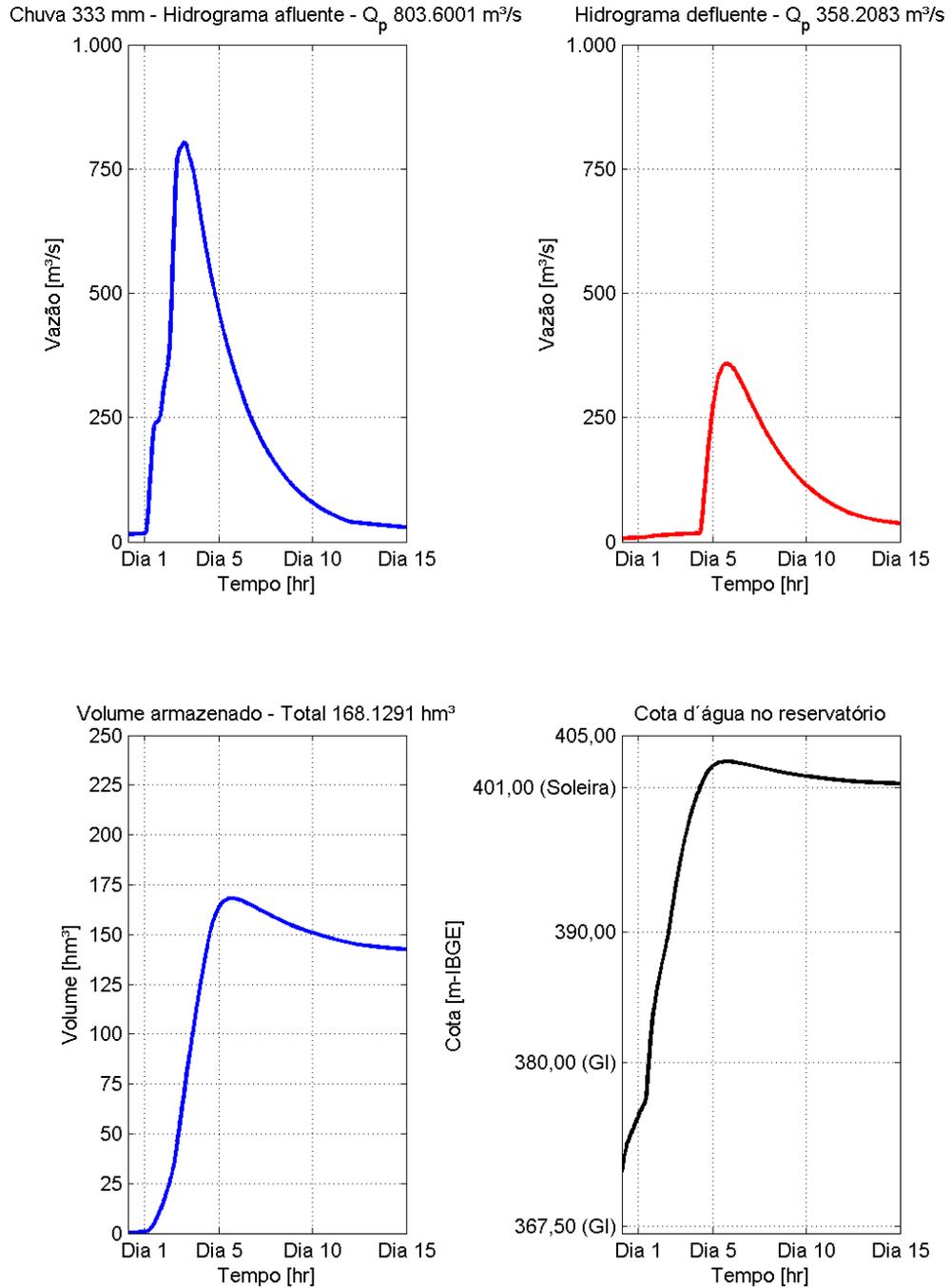


Figura 34. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 55%.

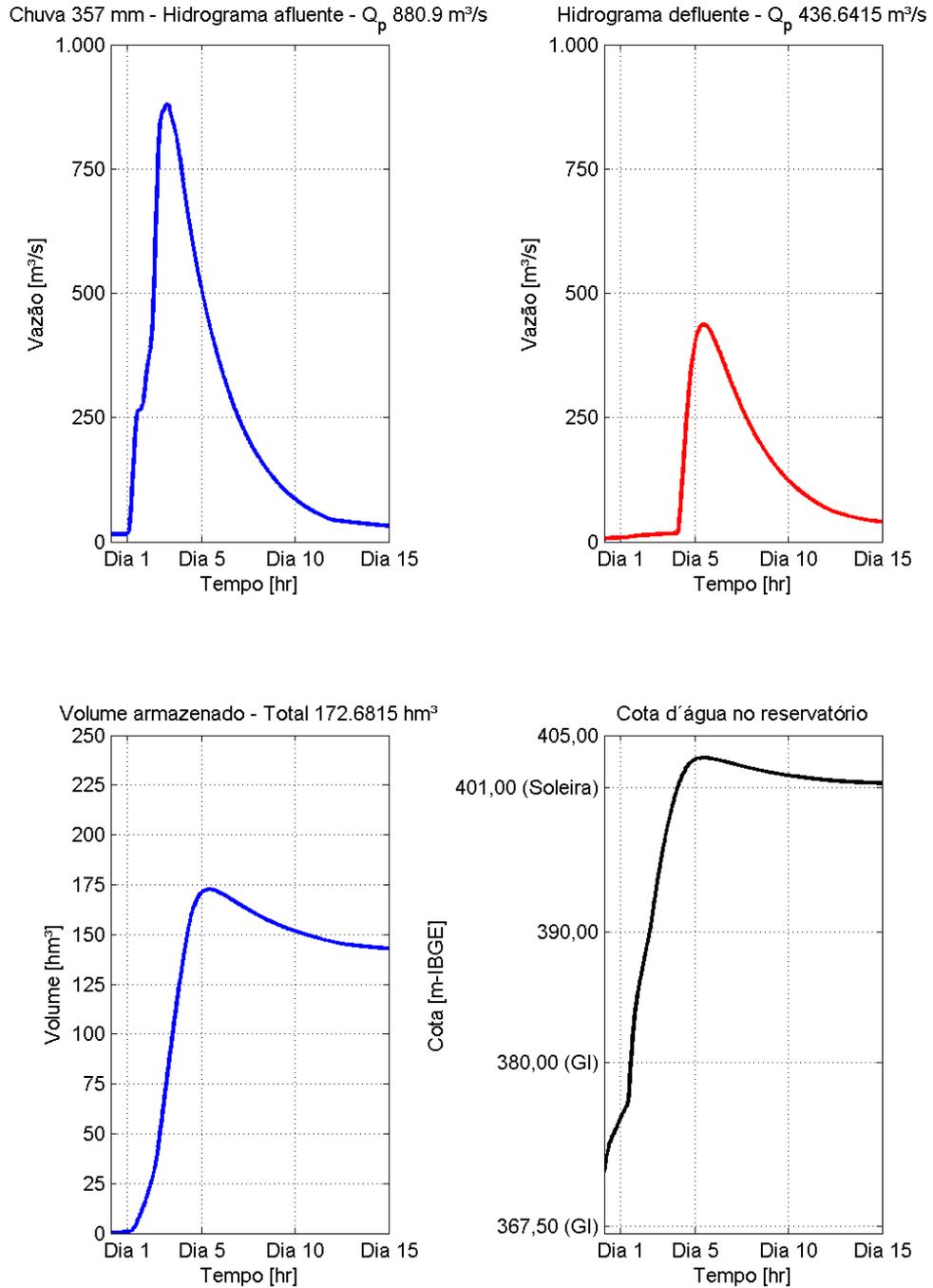


Figura 35. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 50%.

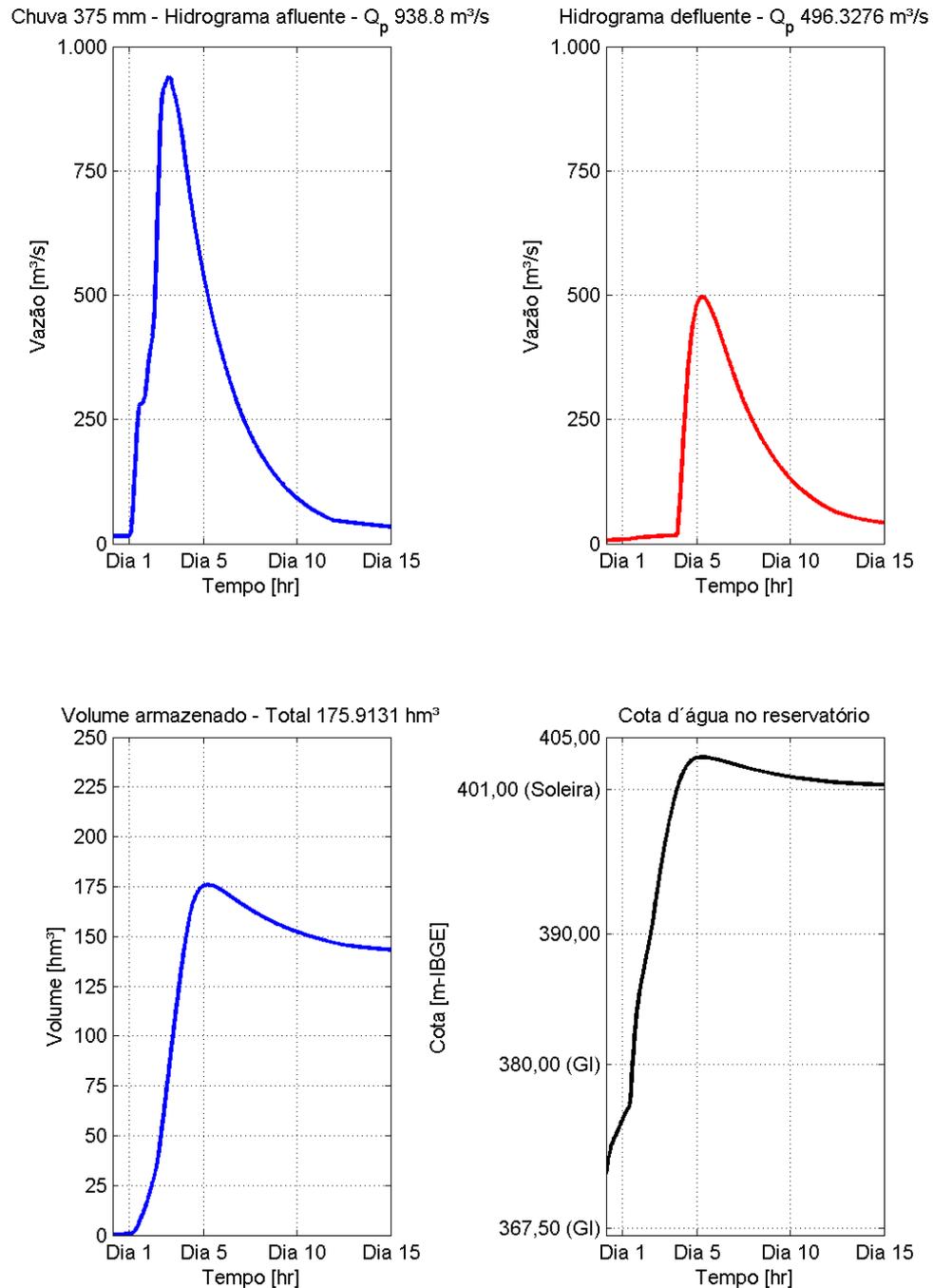


Figura 36. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 47%.

Com a análise de enchimento, a variável de precipitação determina a interpretação do evento e o comportamento do armazenamento da água no reservatório. A chuva passa a ser o limiar para classificado do evento hidrológico e definição do nível de criticidade.

O limiar de 200 mm passa a ser considerado como o limite para início de uma situação de vertimento do reservatório. Para os eventos analisados, mesmo sob condição de vertimento, a Barragem Sul abate mais de 50% da vazão de pico com a mesma proporção de contenção de volume total do hidrograma afluente.

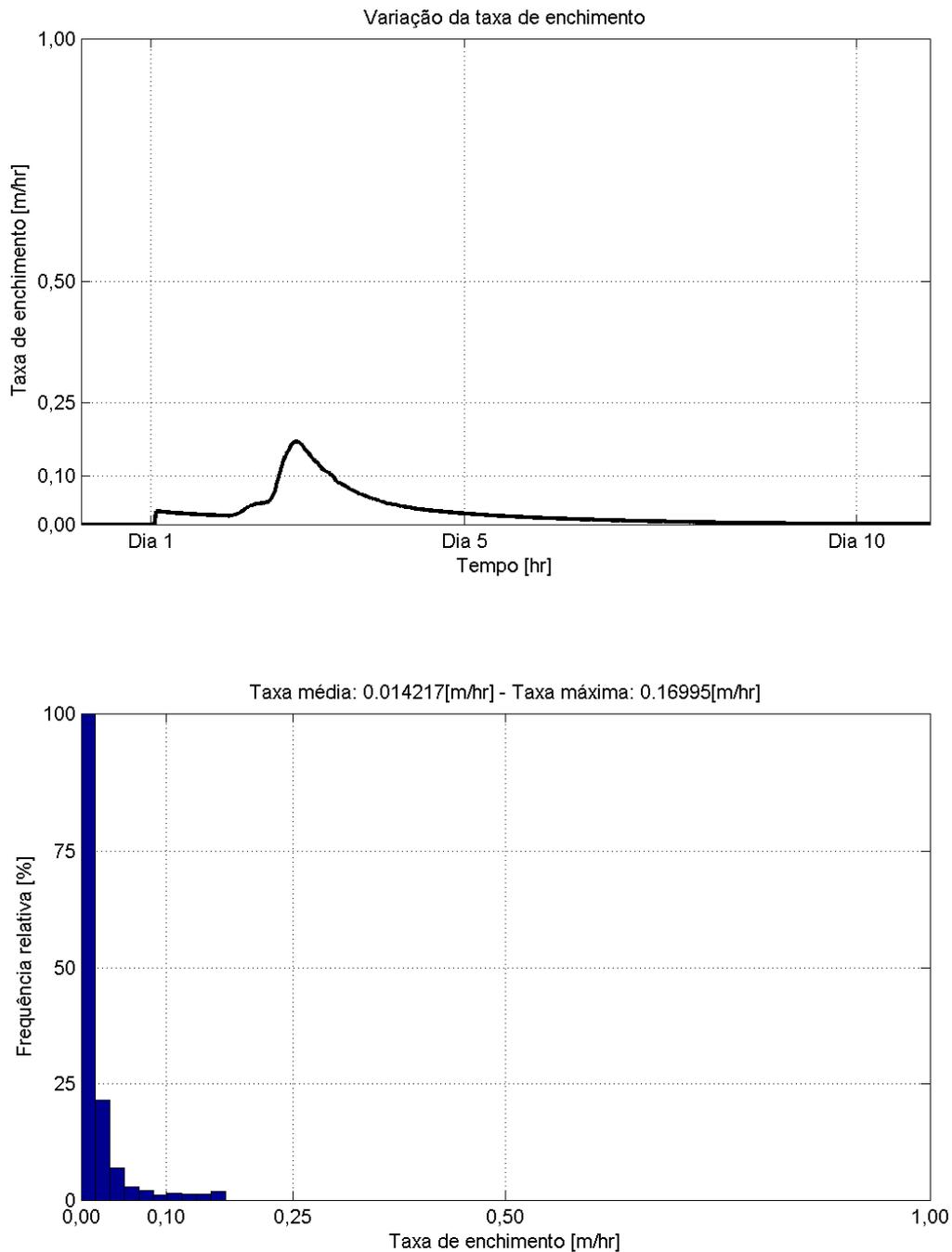


Figura 37. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.

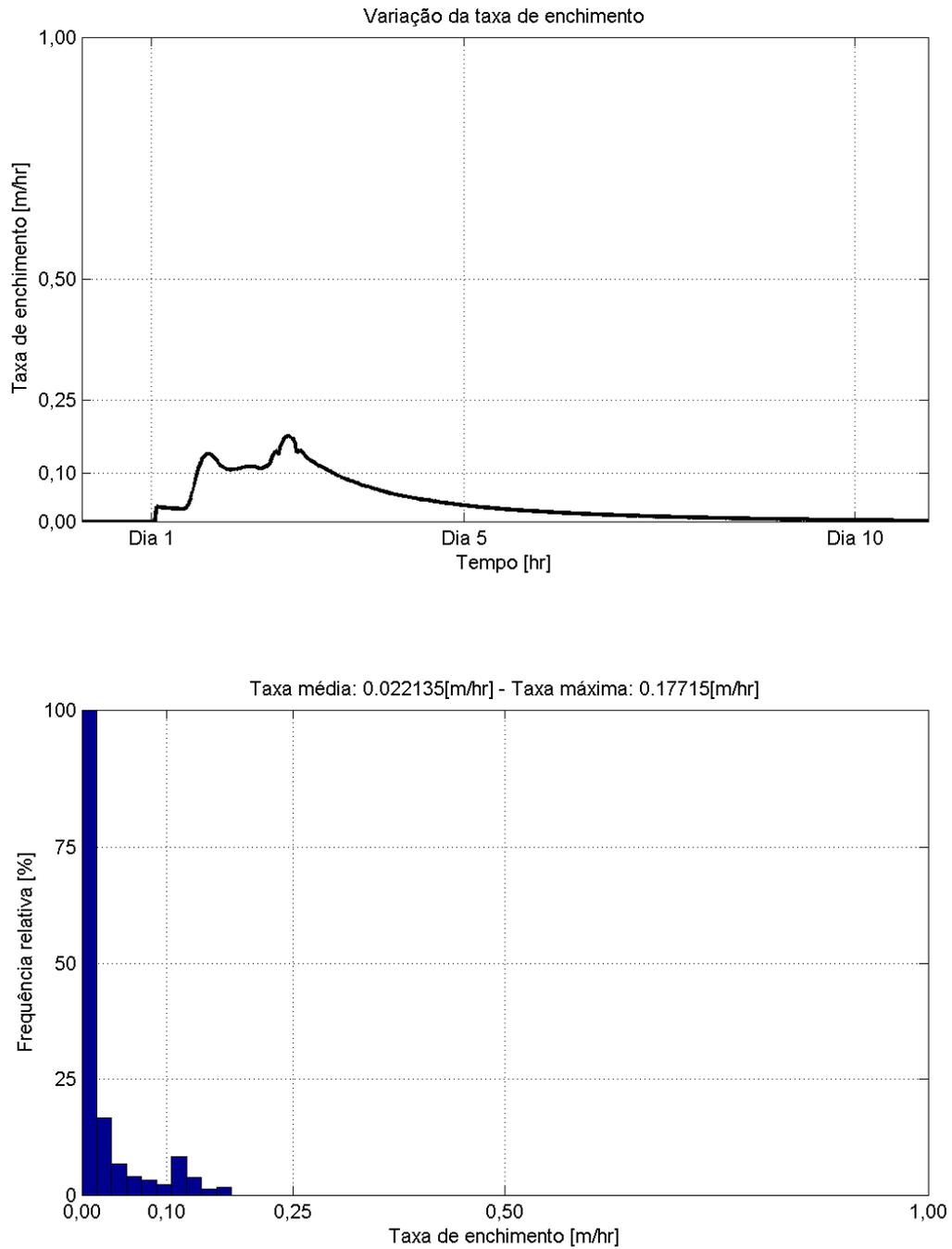


Figura 38. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.

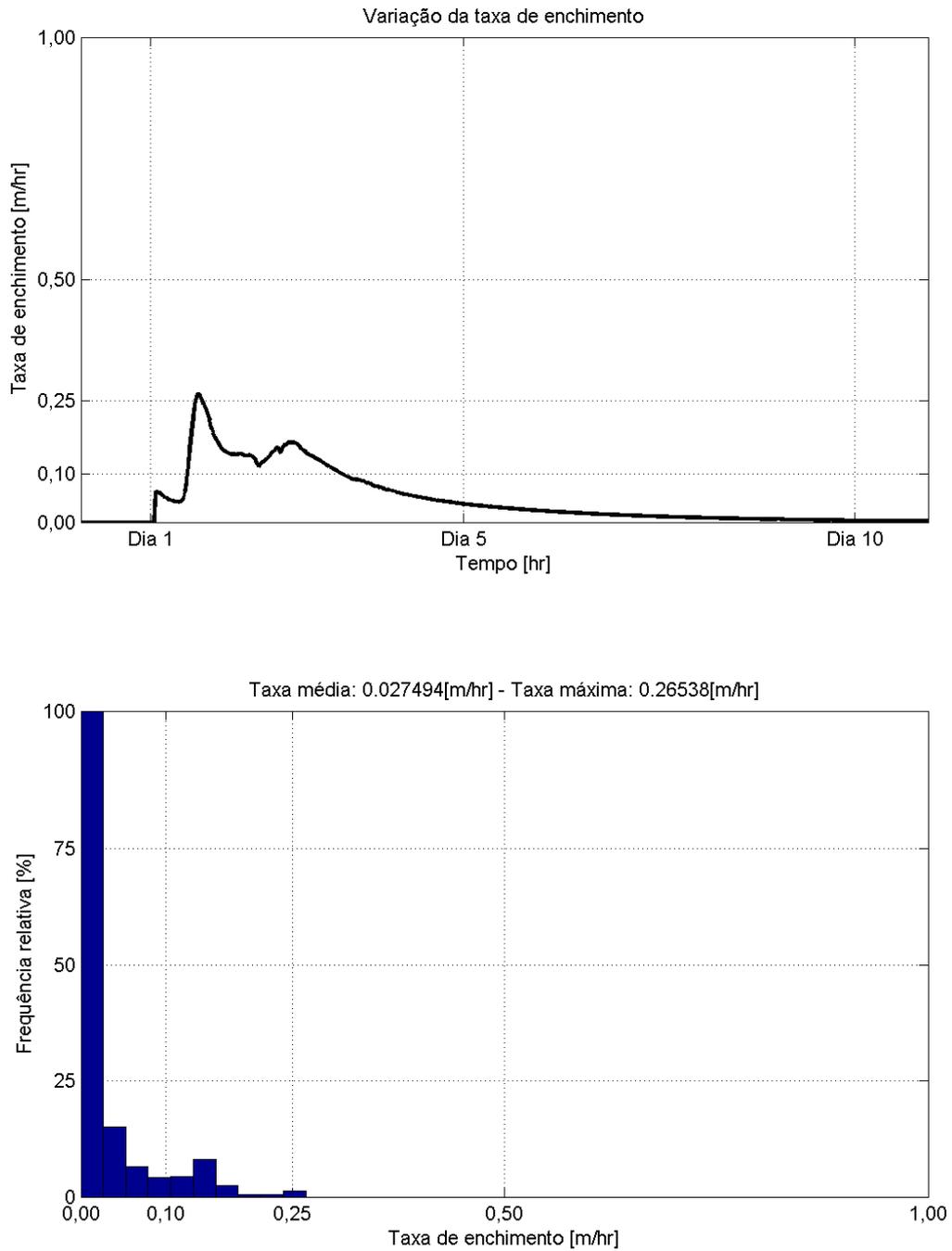


Figura 39. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.

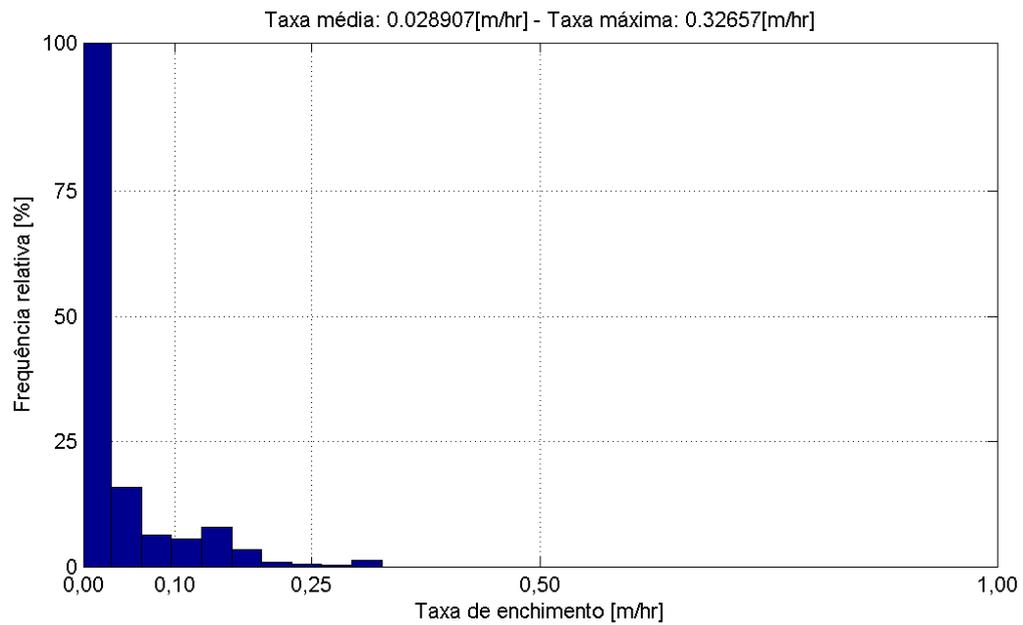
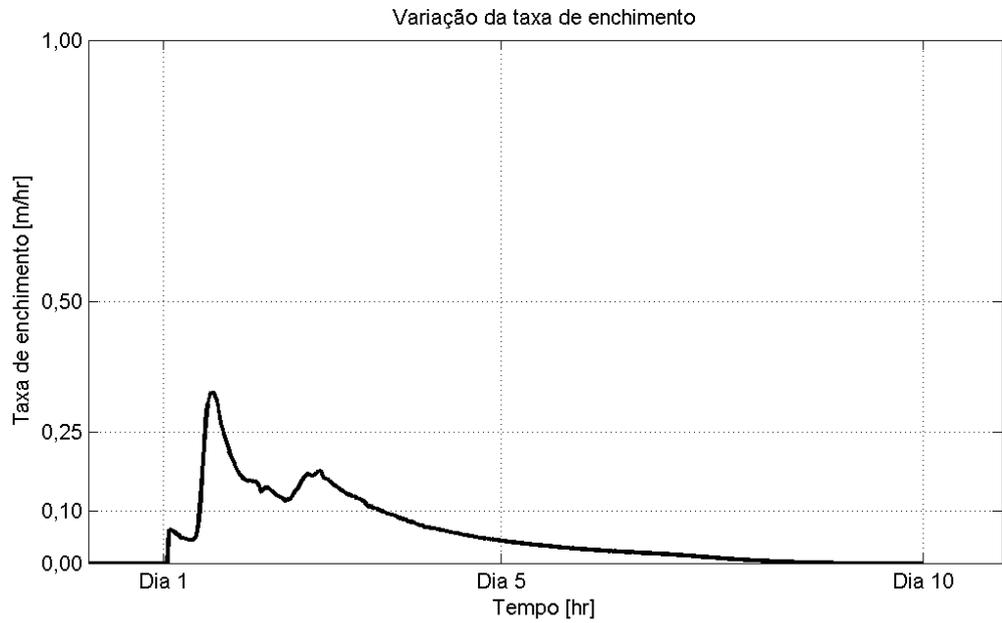


Figura 40. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.

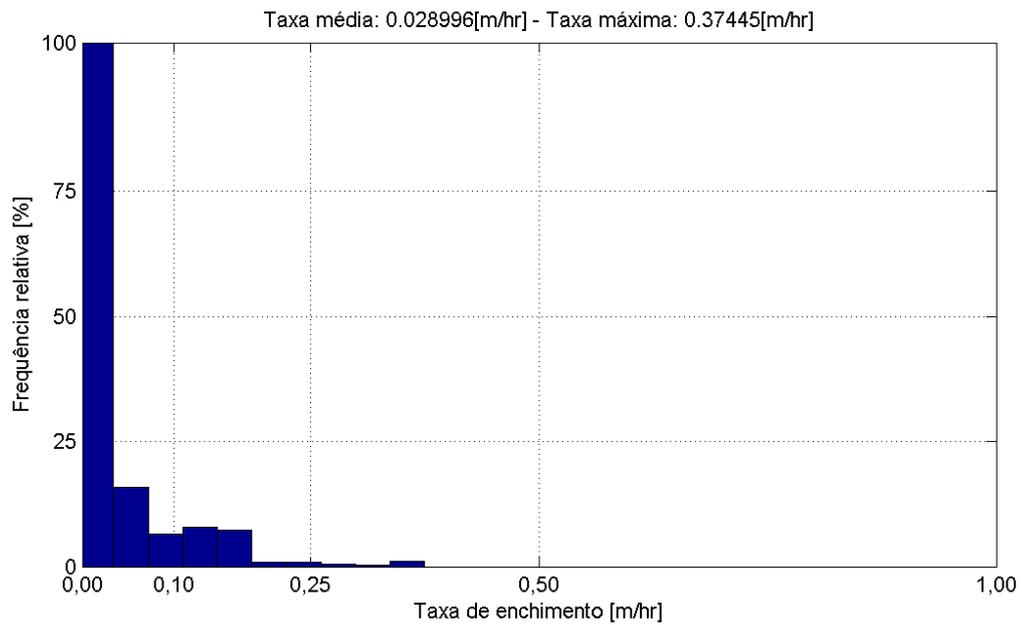
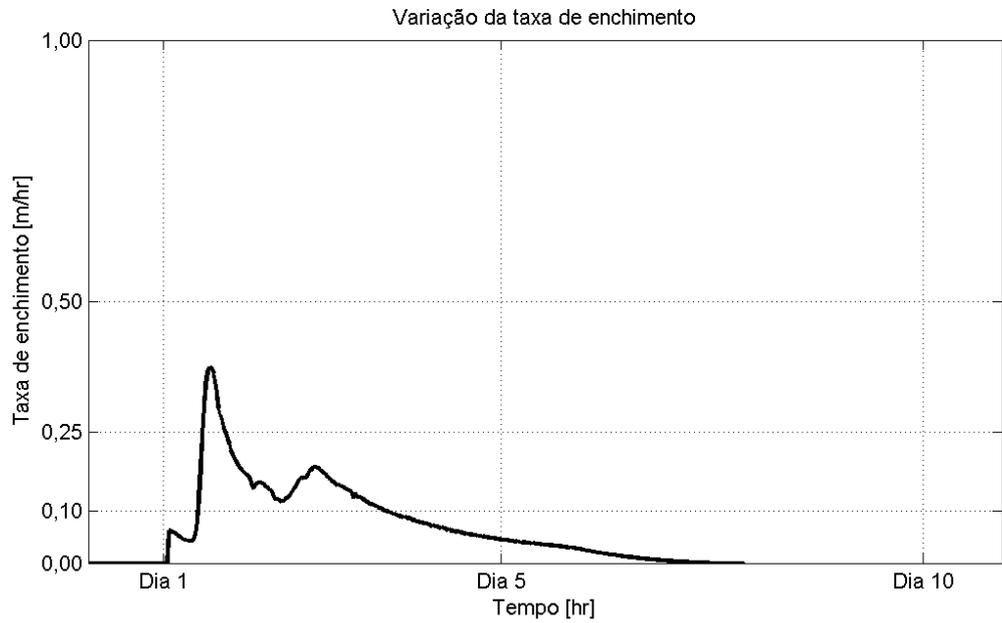


Figura 41. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.

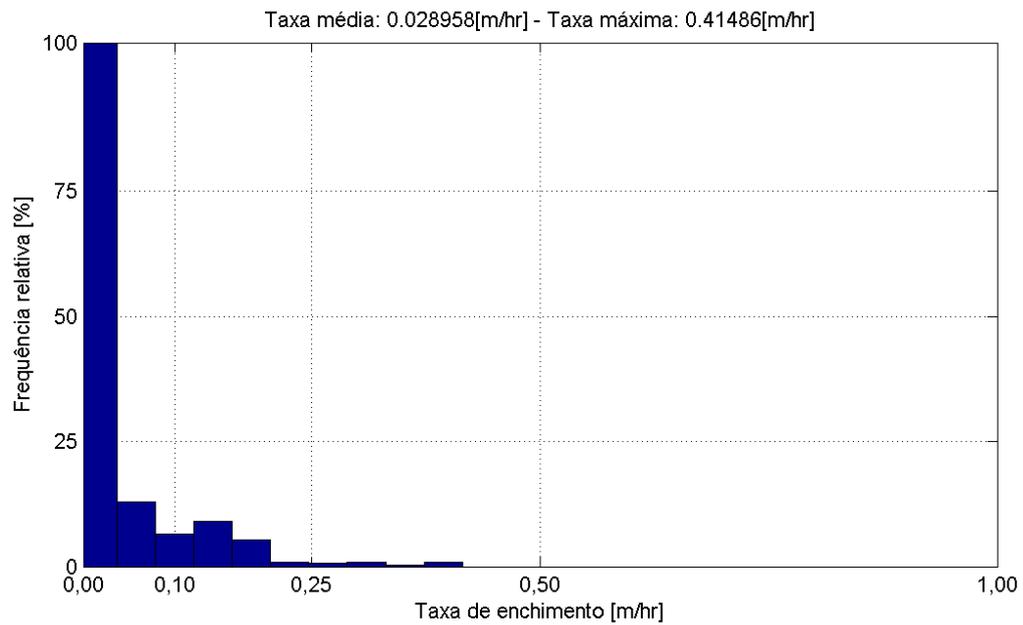
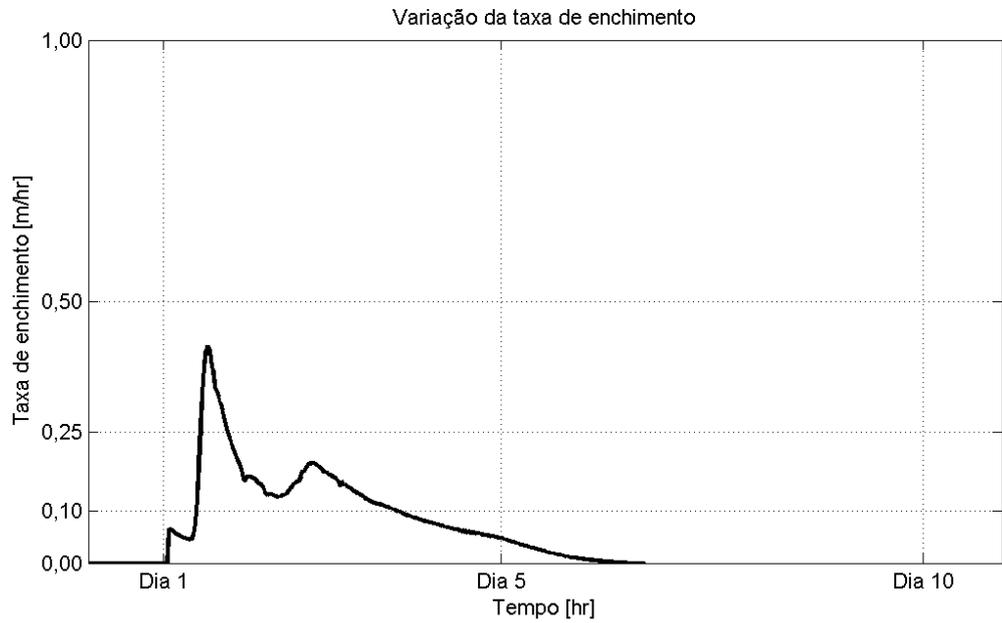


Figura 42. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.

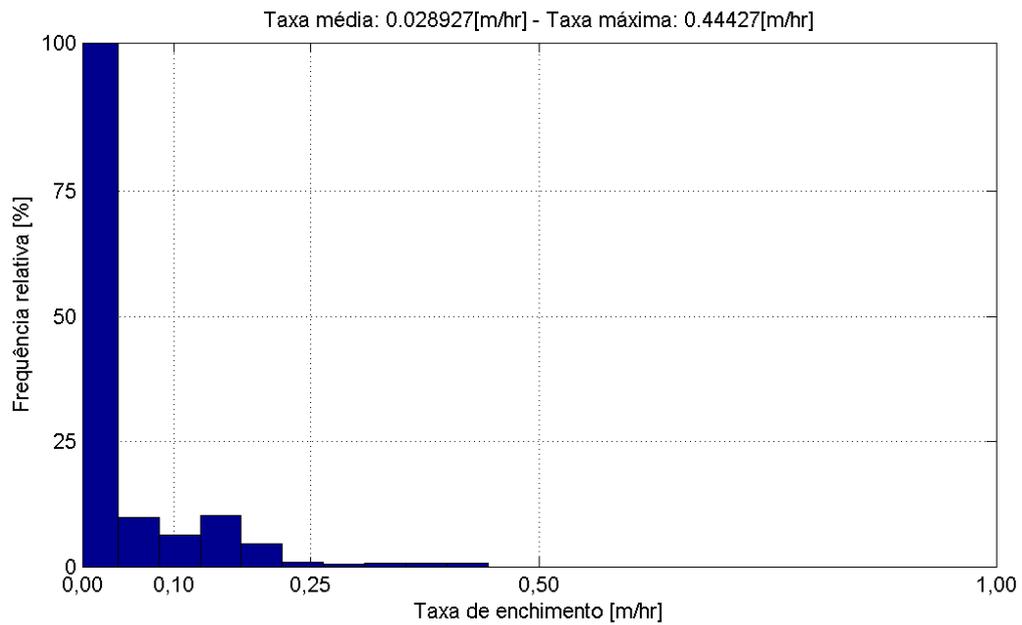
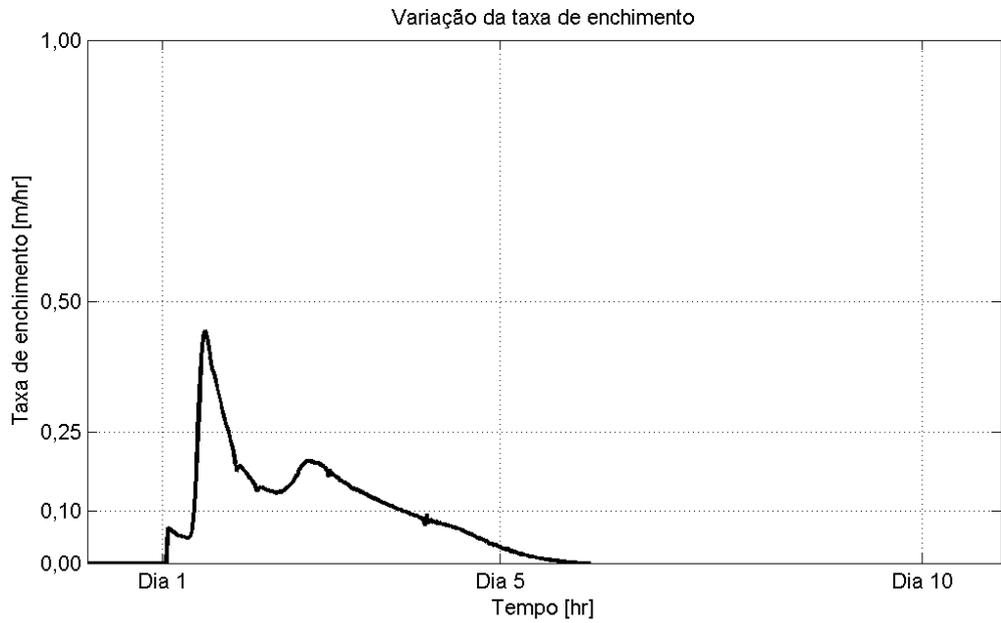


Figura 43. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.

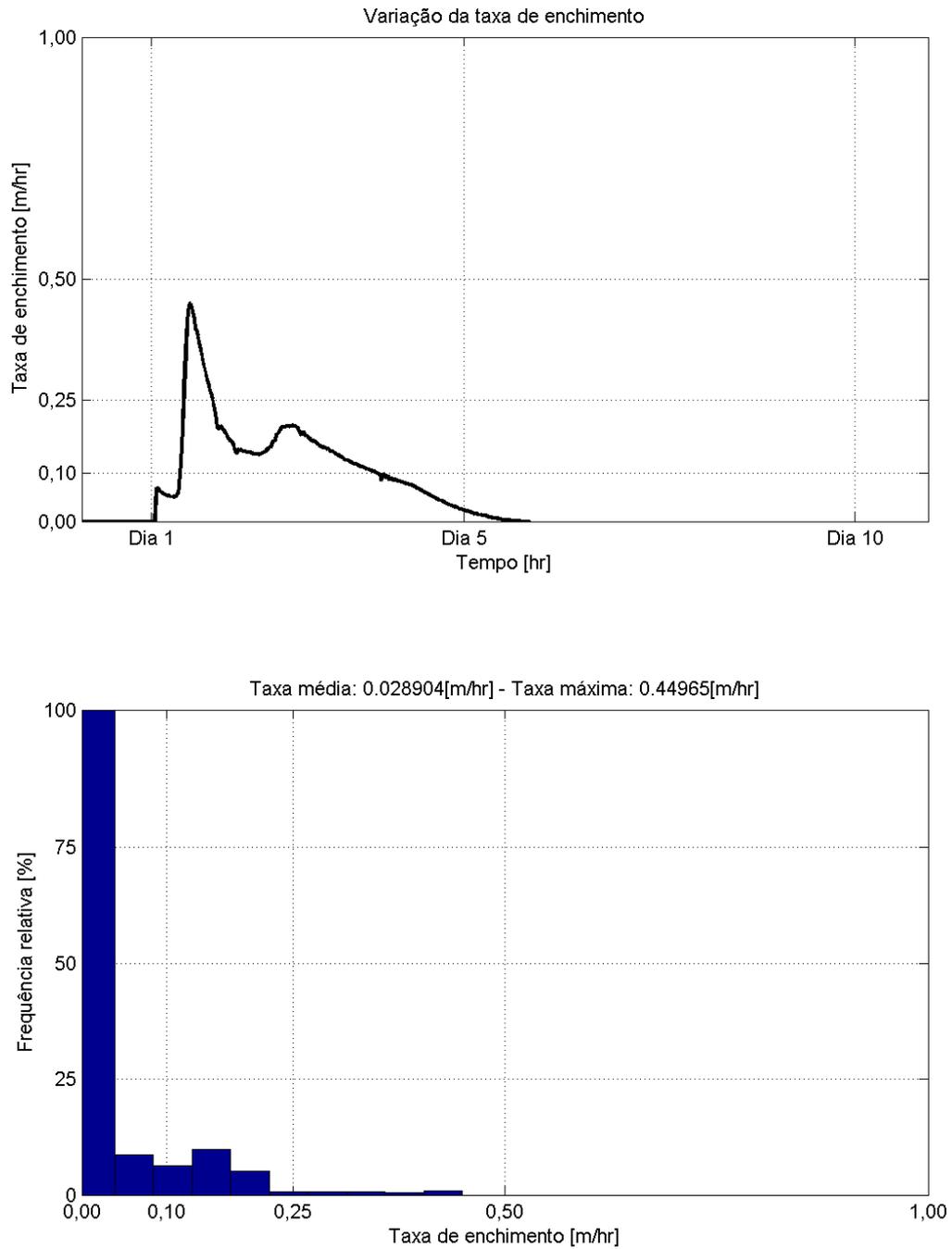


Figura 44. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.

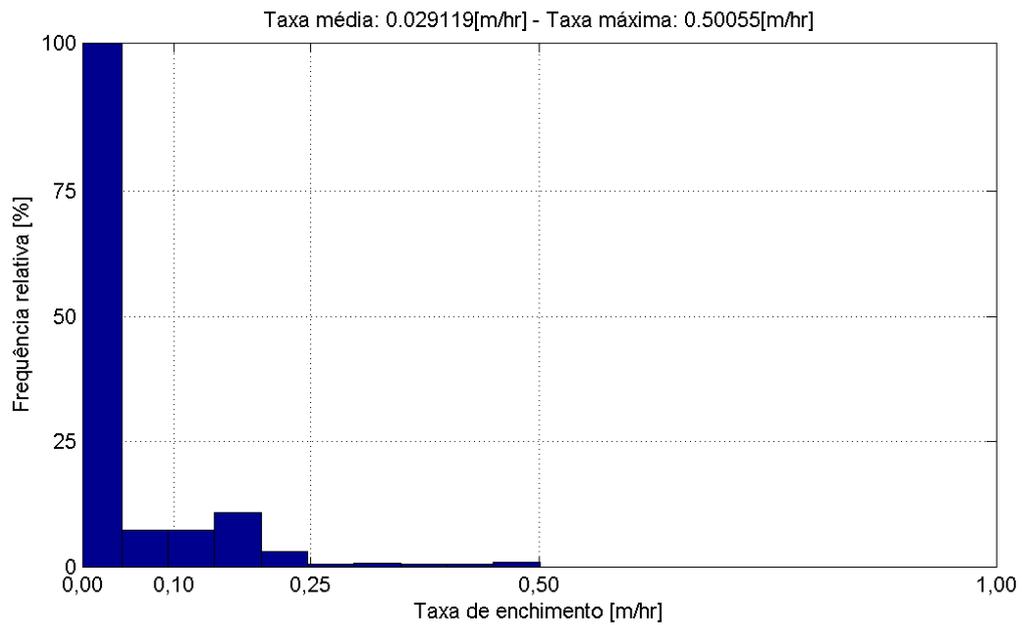
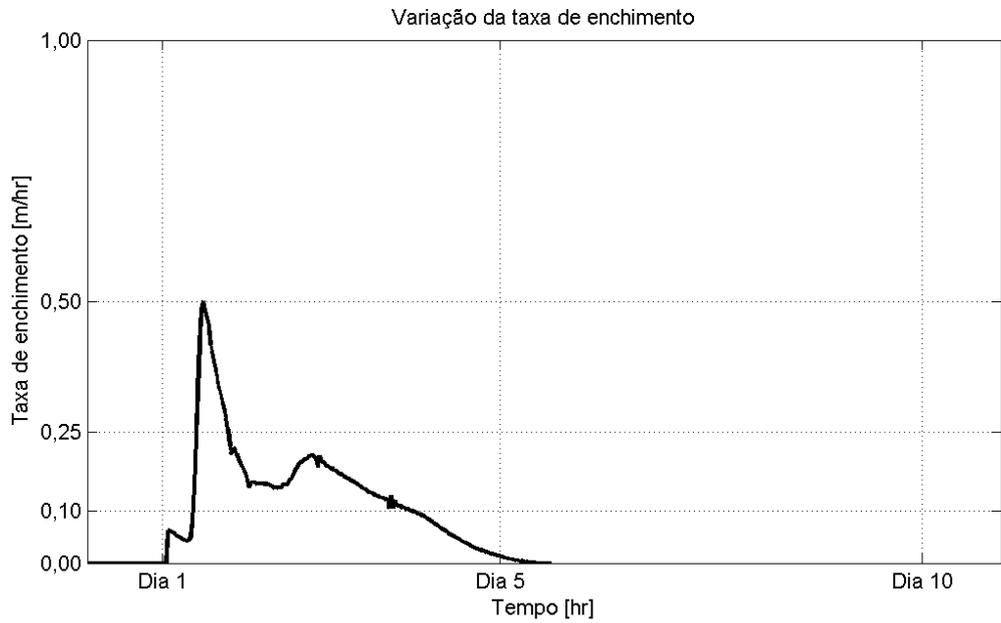


Figura 45. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.

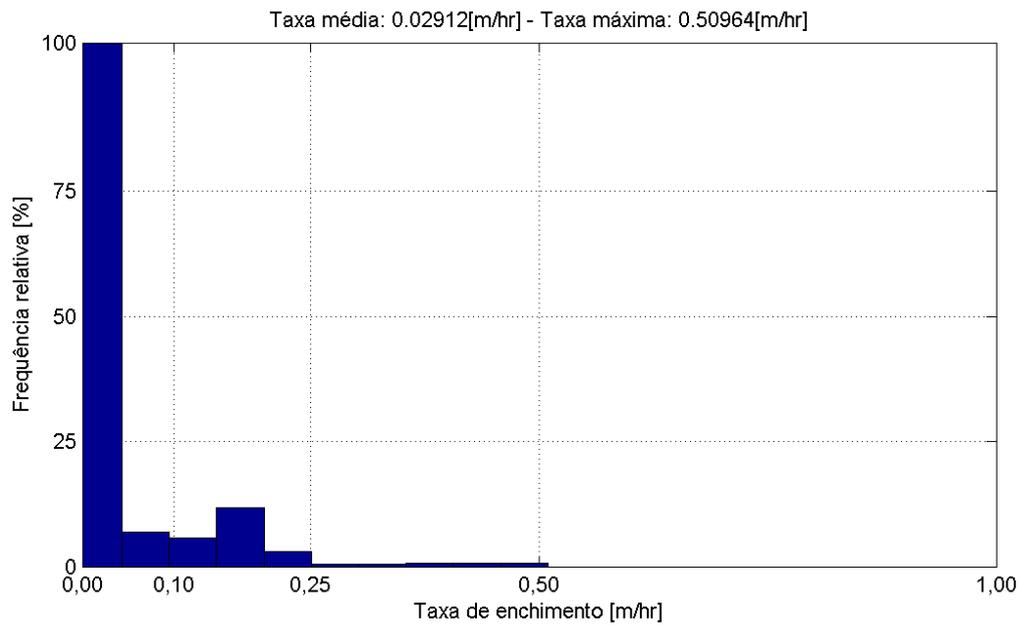
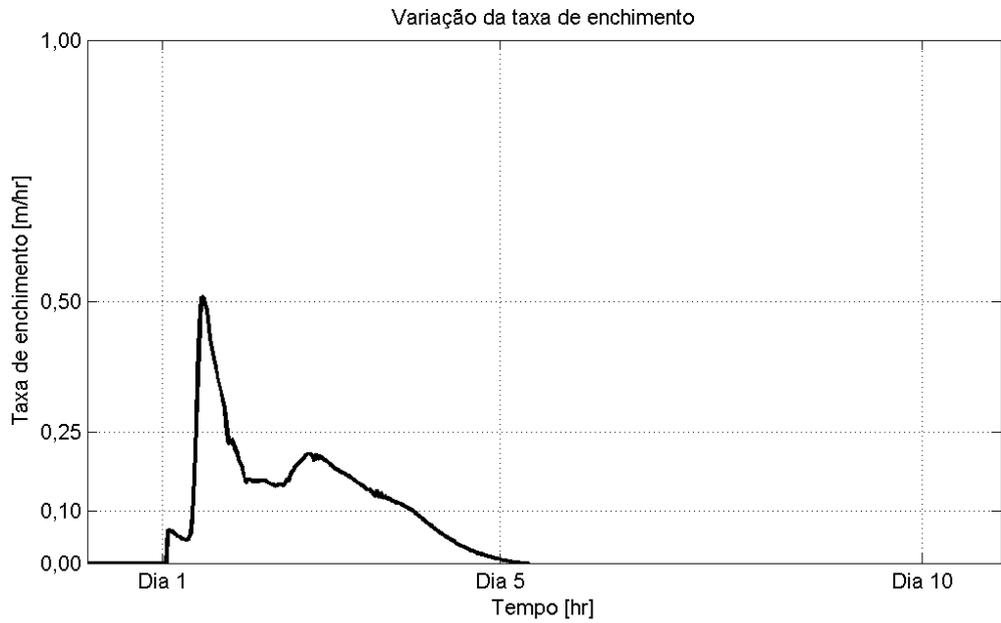


Figura 46. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.

2.5.3 SIMULAÇÃO DE Esvaziamento

Com uso do modelo numérico hidráulico, as taxas de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul são apresentadas para cada estado hidráulico esperado do reservatório em relação à chuva de projeto. Na Tabela 6 está o resumo dos resultados operacionais.

Tabela 6. Esvaziamento do reservatório da Barragem Sul.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/hr]	Máxima[m/hr]	Tempo Total [d]
105	389,00	0,04	0,43	10
173	396,30	0,06	1,07	14
208	399,45	0,06	1,24	19
243	401,00	0,06	1,24	19
265	401,00	0,06	1,19	20
293	401,00	0,05	1,24	21
320	401,00	0,06	1,08	21
333	401,00	0,06	1,08	21
357	401,00	0,06	1,08	21
375	401,00	0,06	1,08	21

Na Figura 47 estão ilustrados os períodos de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul, considerando uma margem de 6 dias corridos em caso de indisponibilidade de 1 comporta do descarregador de fundo.

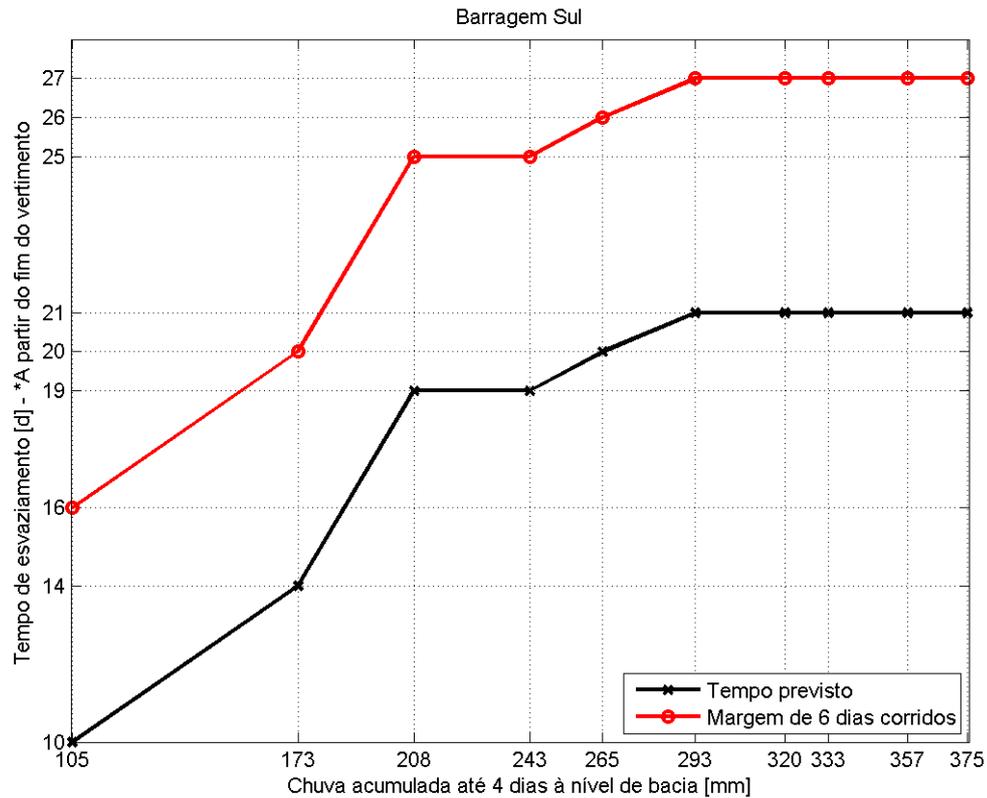


Figura 47. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul.

A análise numérica de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul foi desenvolvida para a passagem completa do evento hidrológico. Os critérios de início de esvaziamento foram a vazão igual ou menor do que 400 m³/s na seção de Rio do Sul e vertimento nulo pela soleira livre do vertedor. Nas figuras abaixo estão resumidas as simulações de esvaziamento do reservatório para as chuvas de 105 mm, 173 mm, 208 mm, 265 mm, 293 mm e 375 mm

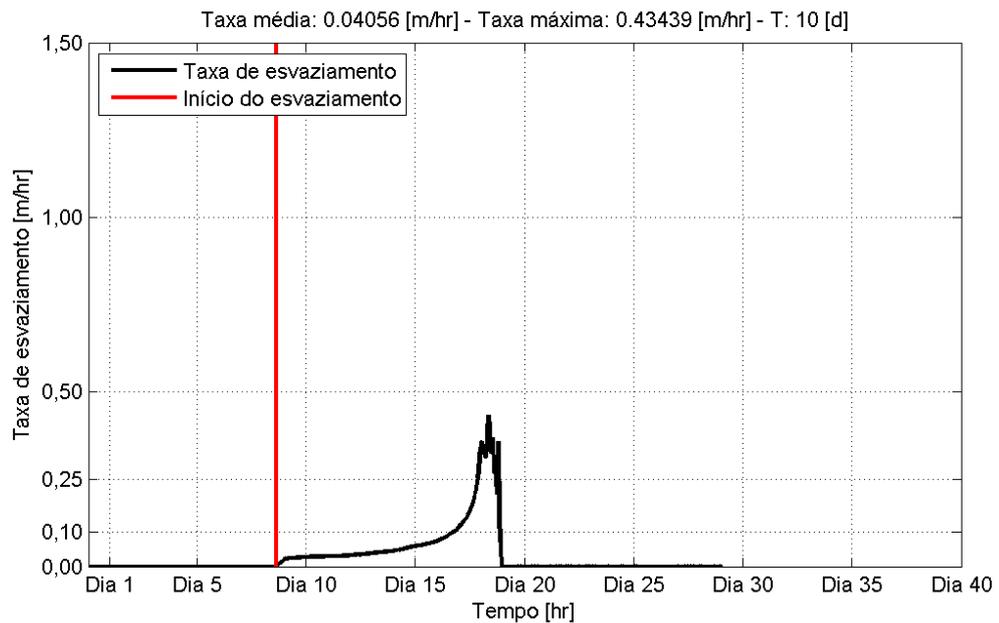
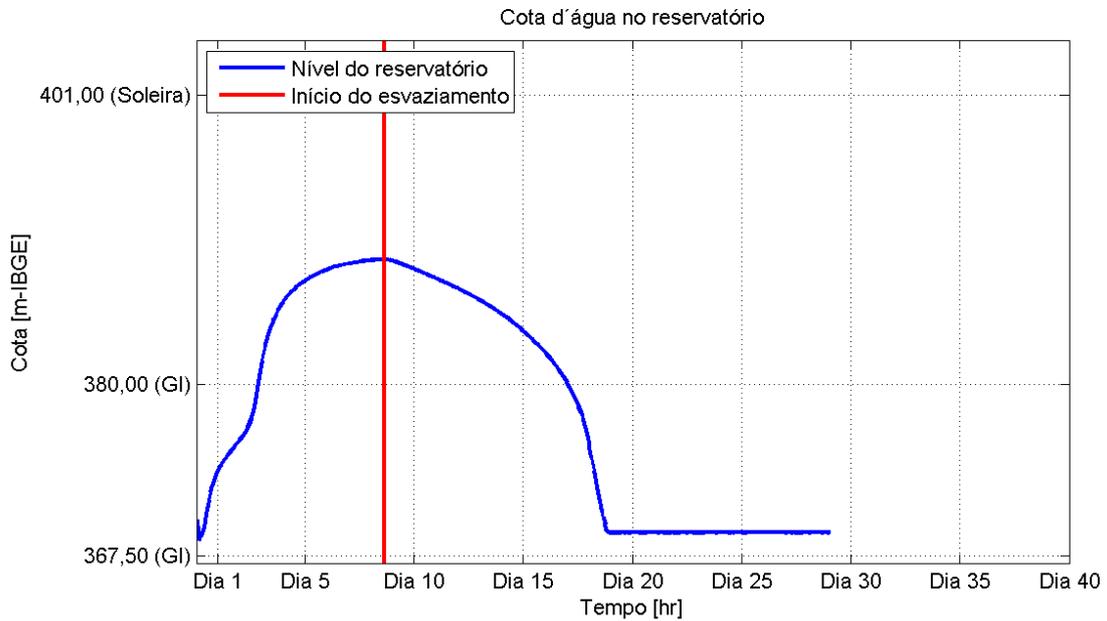


Figura 48. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 105 mm.

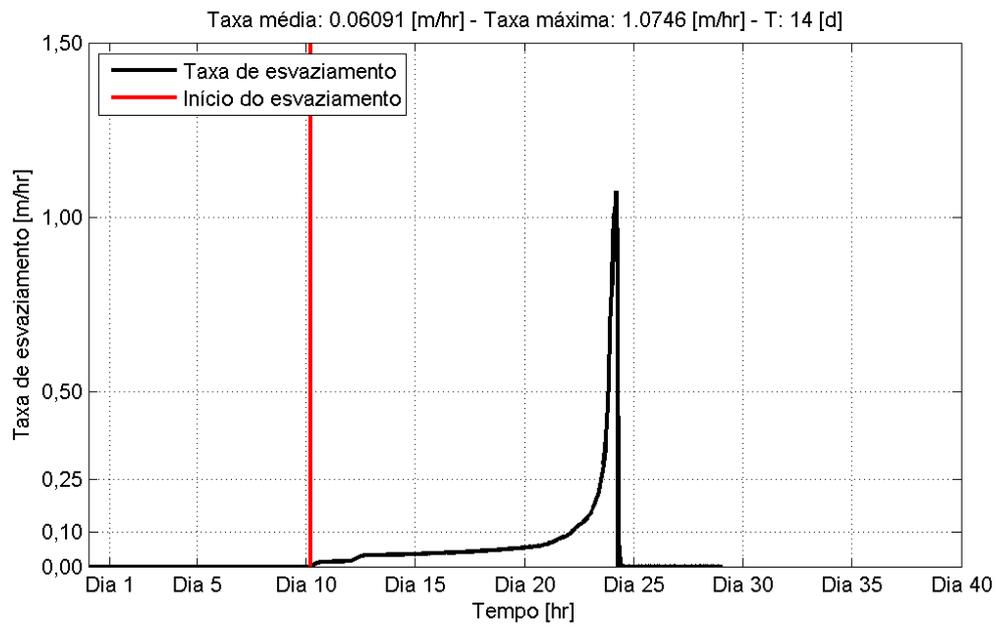
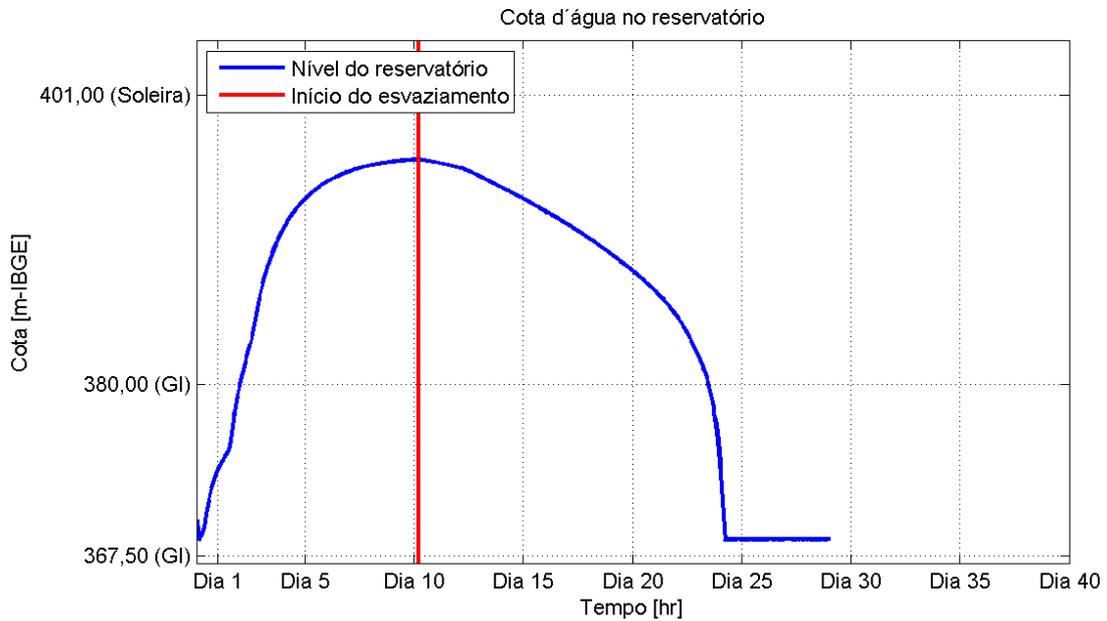


Figura 49. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 173 mm.

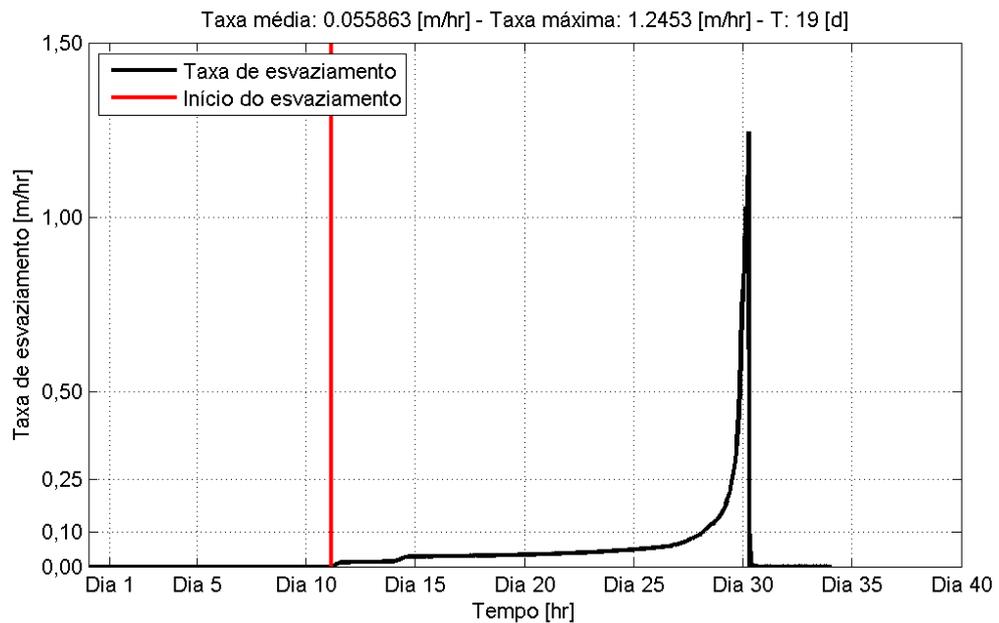
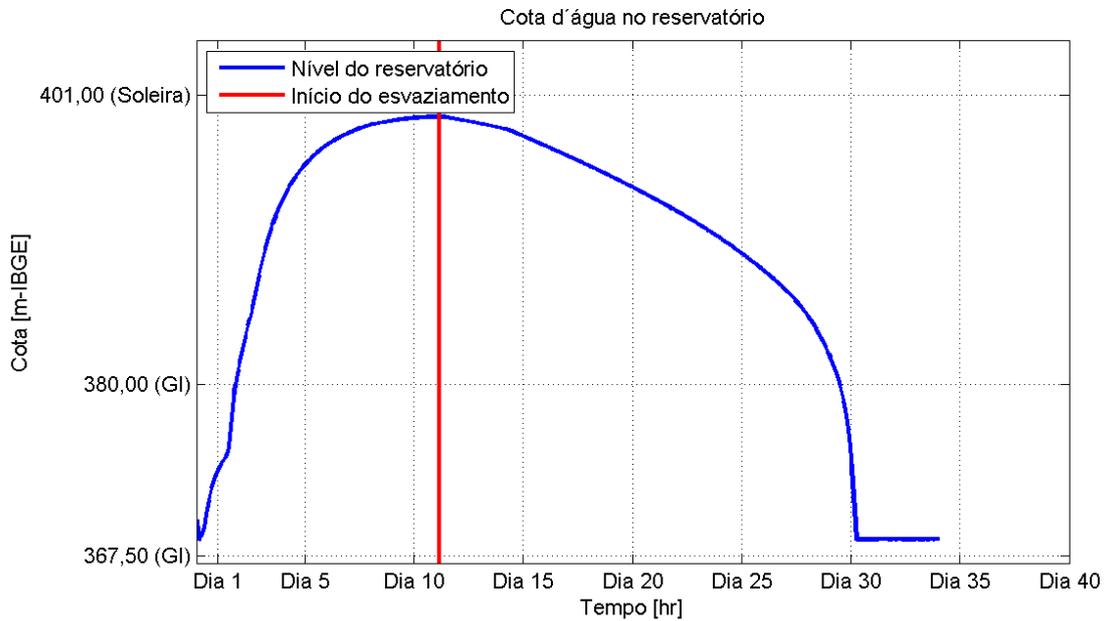


Figura 50. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 208 mm.

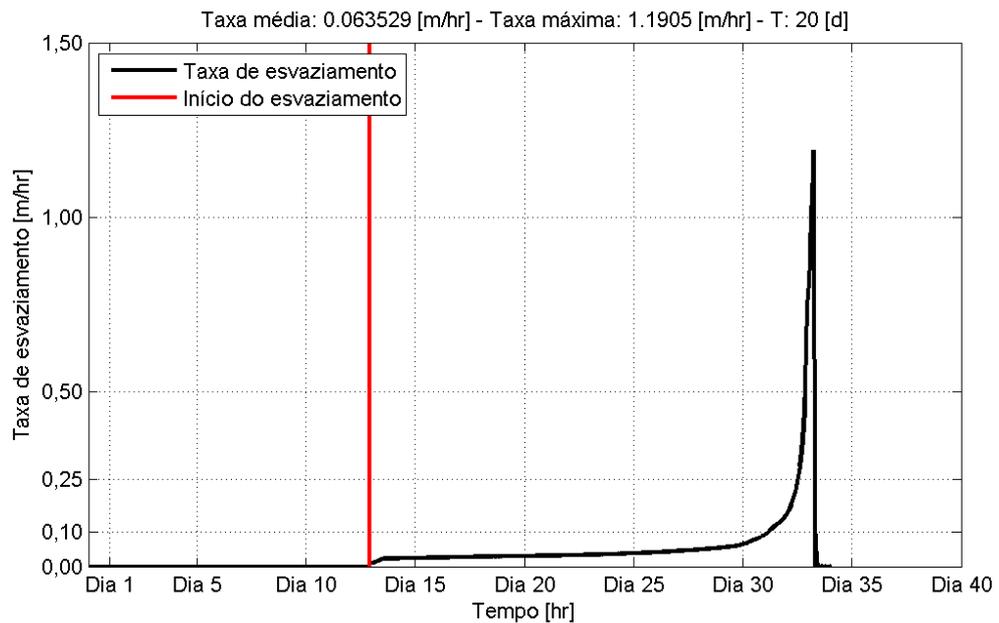
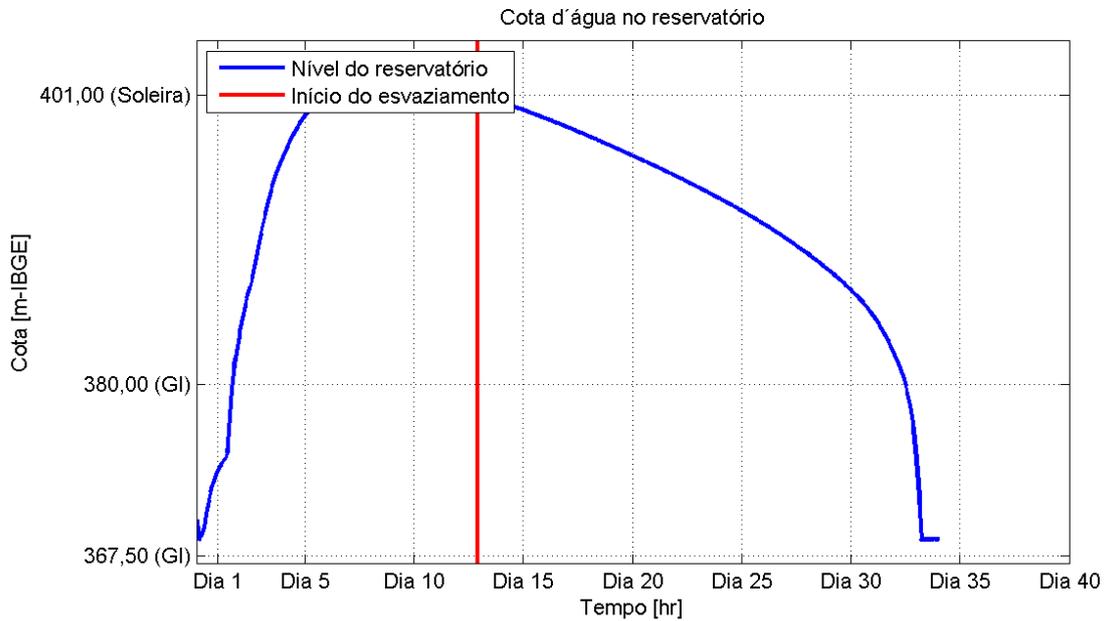


Figura 51. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 265 mm.

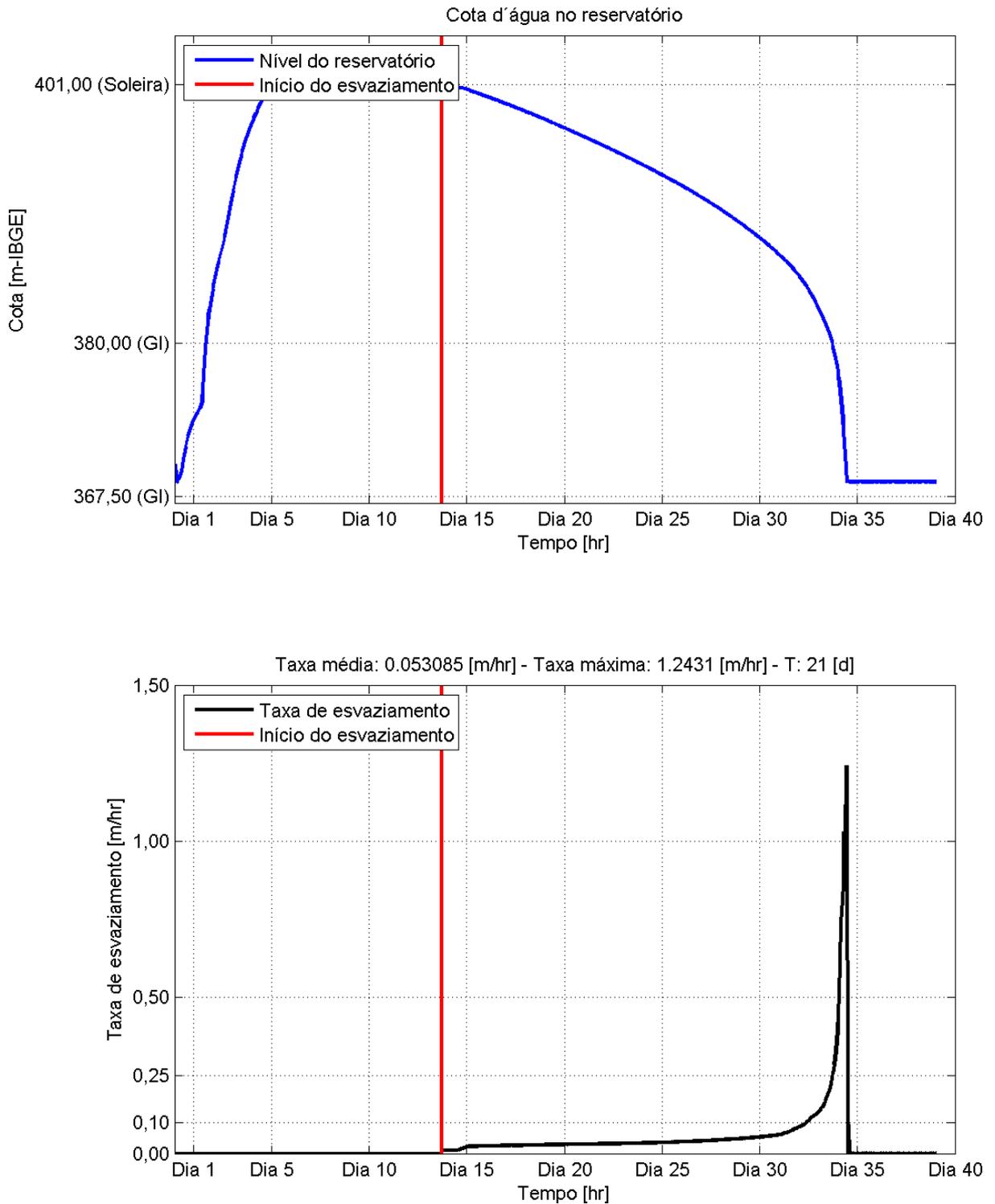


Figura 52. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 293 mm.

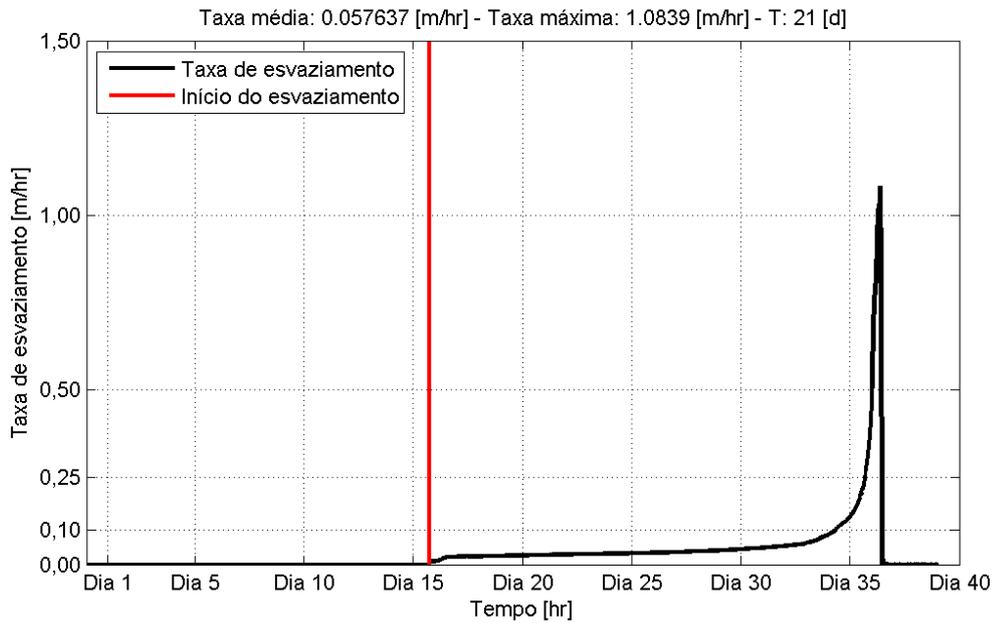
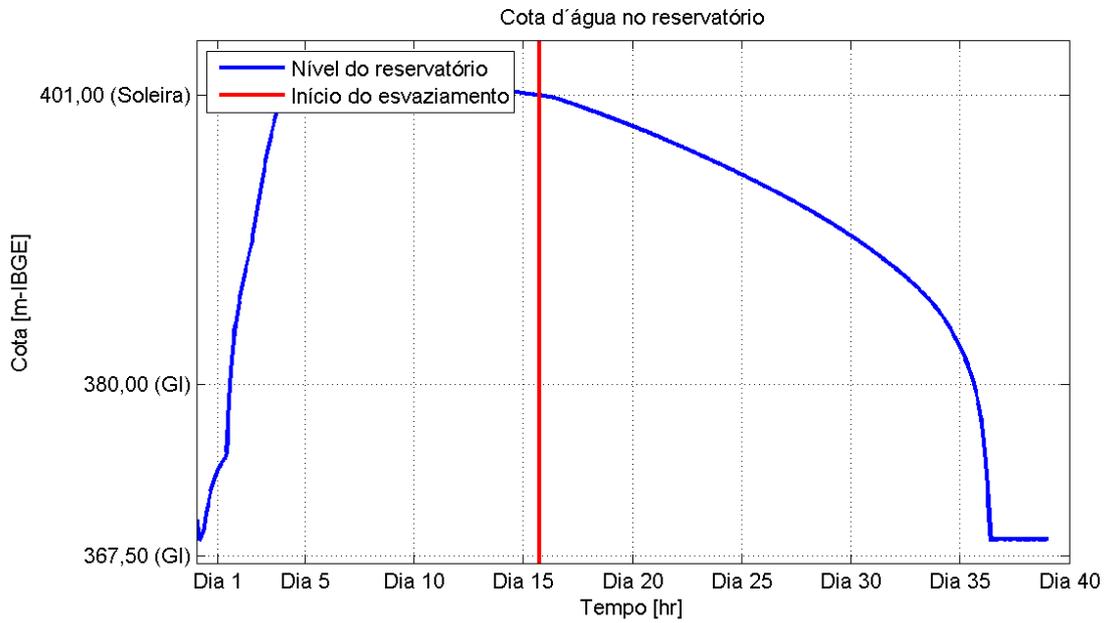


Figura 53. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Sul. Chuva 375 mm.

2.5.4 SIMULAÇÃO OTIMIZADA DO VERTEDOURO

Foram realizadas simulações adicionais para as chuvas de projeto 293 mm e 320 mm onde a capacidade máxima de retenção do reservatório é superada. Foram estudados dois tipos de operação para o excedente de volume correspondente às chuvas de projeto:

- Operação favorável ao vertimento: mantém-se as comportas das galerias de descarga fechadas e o excedente de volume é defluído pelo vertedouro.
- Operação minimizando o vertimento: é realizada a abertura das comportas das galerias de descarga a fim de minimizar que o excedente de volume seja defluído pelo vertedouro.

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam as vazões defluentes totais para as operações “favorável ao vertimento” e “minimizando o vertimento” para as chuvas de projeto 293 mm e 320 mm, respectivamente.

Observa-se que para as duas chuvas de projeto as vazões defluentes totais são maiores quando a operação é “minimizando o vertimento”, ou seja, é realizada a abertura das comportas das galerias de descarga. Com isso, pode-se afirmar que a operação “favorável ao vertimento” reduz os níveis d’água em Rio do Sul, comparando-se com a operação “minimizando vertimento”. A abertura das comportas em carga com o reservatório cheio, gera um pulso abrupto de vazão, o qual tornará a condição a jusante da inundação mais severa.

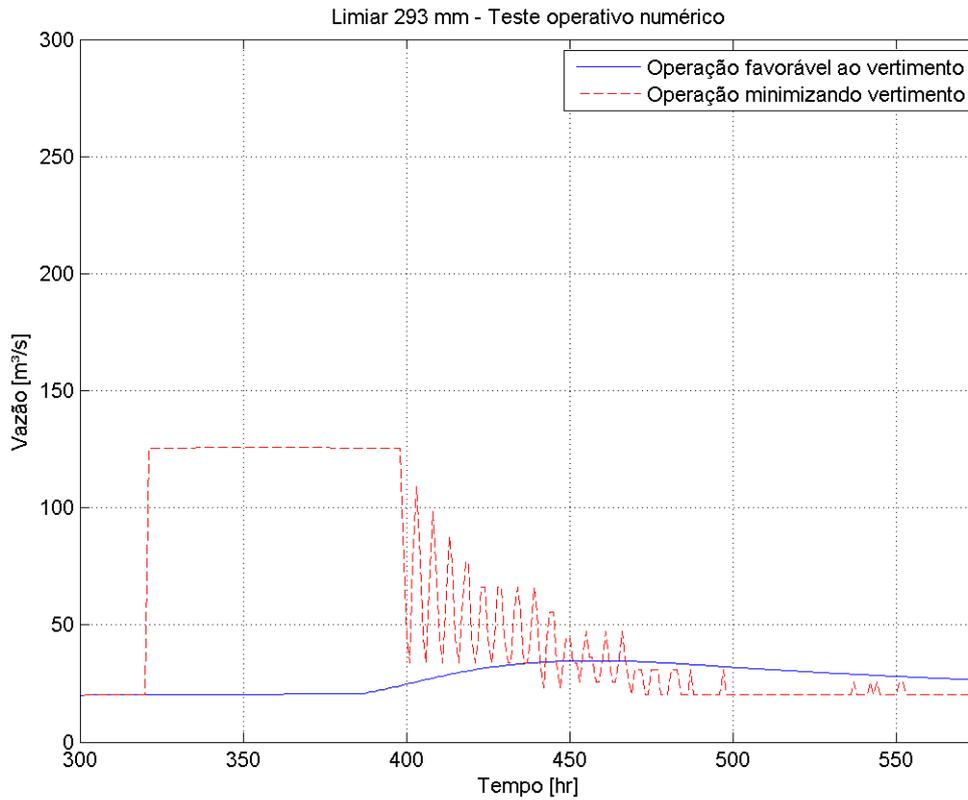


Figura 54. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 293 mm.

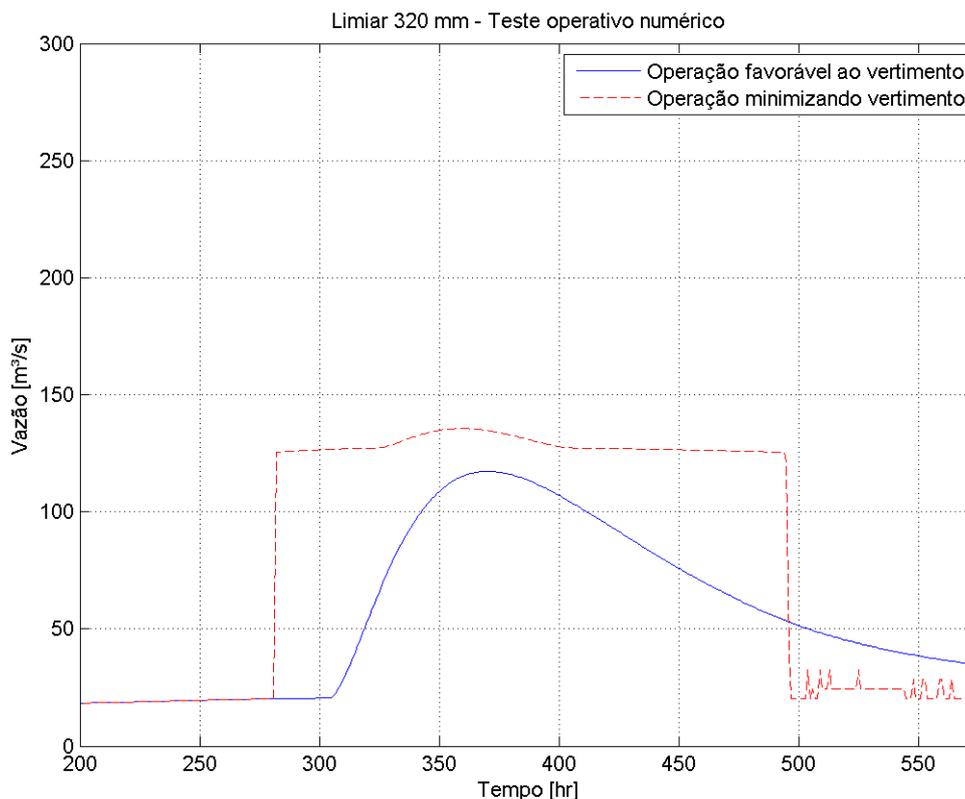


Figura 55. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 320 mm.

A abertura das comportas do descarregador de fundo devem ser consideradas se a cota d'água no reservatório atingir 408,00 [m-IBGE]. Tal condição hidráulica seria catastrófica, e a medida de abertura das comportas do descarregador de fundo nessa situação é uma forma de atenuar o risco de galgamento das estruturas⁵.

2.5.5 ANÁLISE COMPARATIVA – NATURAL E ATUAL

A análise comparativa é a verificação numérica, com base modelo numérico hidráulico integrado de Taió, Ituporanga e Rio do Sul, de como a inundação se comporta no entorno da seção de restrição em Rio do Sul. Os cenários de inundação reconstituídos em função das chuvas de projeto são apresentados naturalmente, numa condição teórica sem a construção da Barragem Oeste e Barragem Sul, e para a situação atual.

As figuras abaixo ilustram em mapas as diferenças de inundação para os eventos de chuva de 105 mm, 173 mm, 208 mm, 265 mm, 293 mm e 375 mm.

⁵ Para o presente ciclo de trabalhos, o descarregador lateral ou túnel, não está em condições adequadas de operação. Desta forma, não deve ser considerado como opção de dispositivo de descarga numa situação extrema ou anormal de operação do reservatório da Barragem Sul.

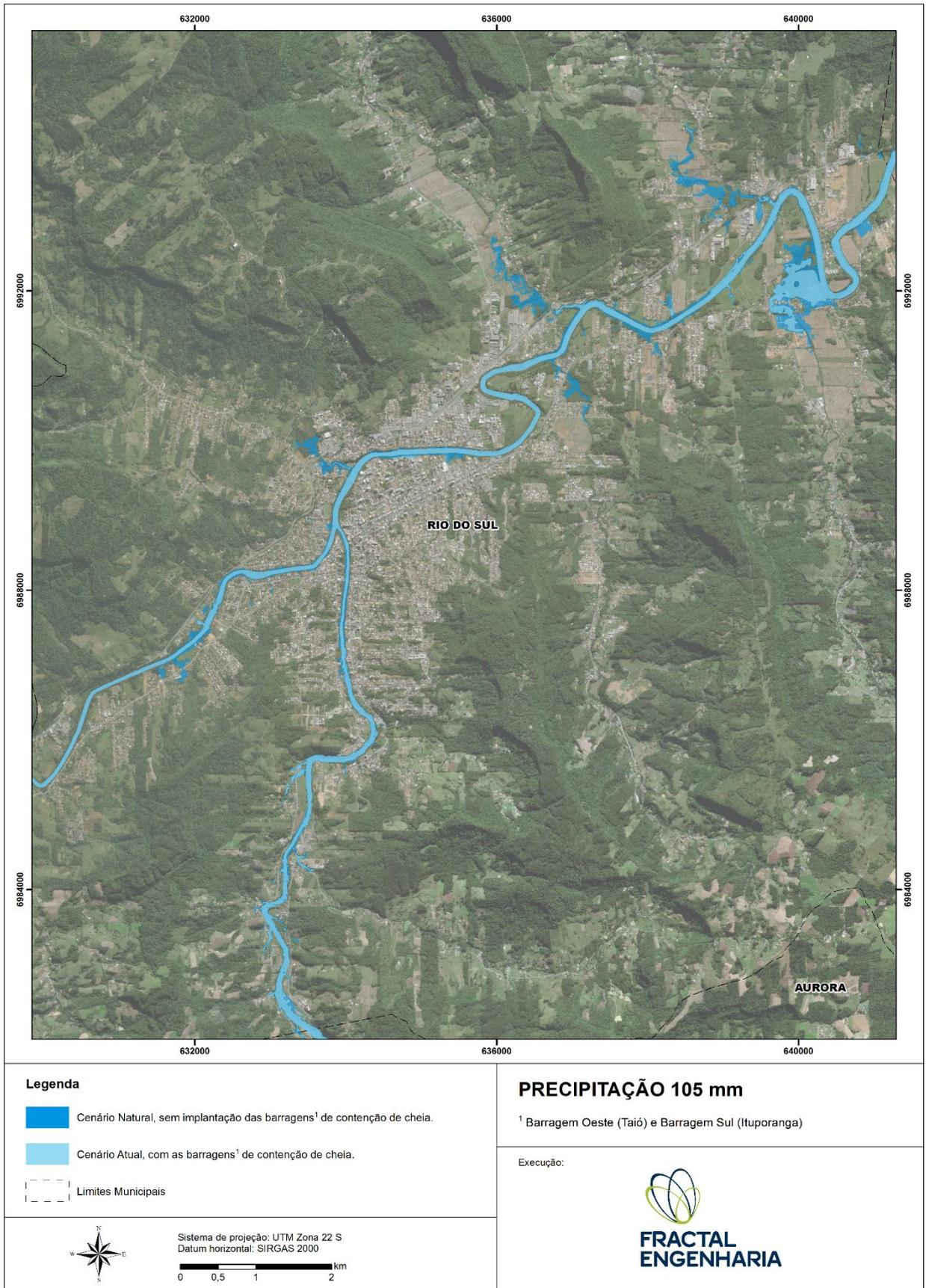


Figura 56. Comparativo de inundação – Chuva 105 mm.

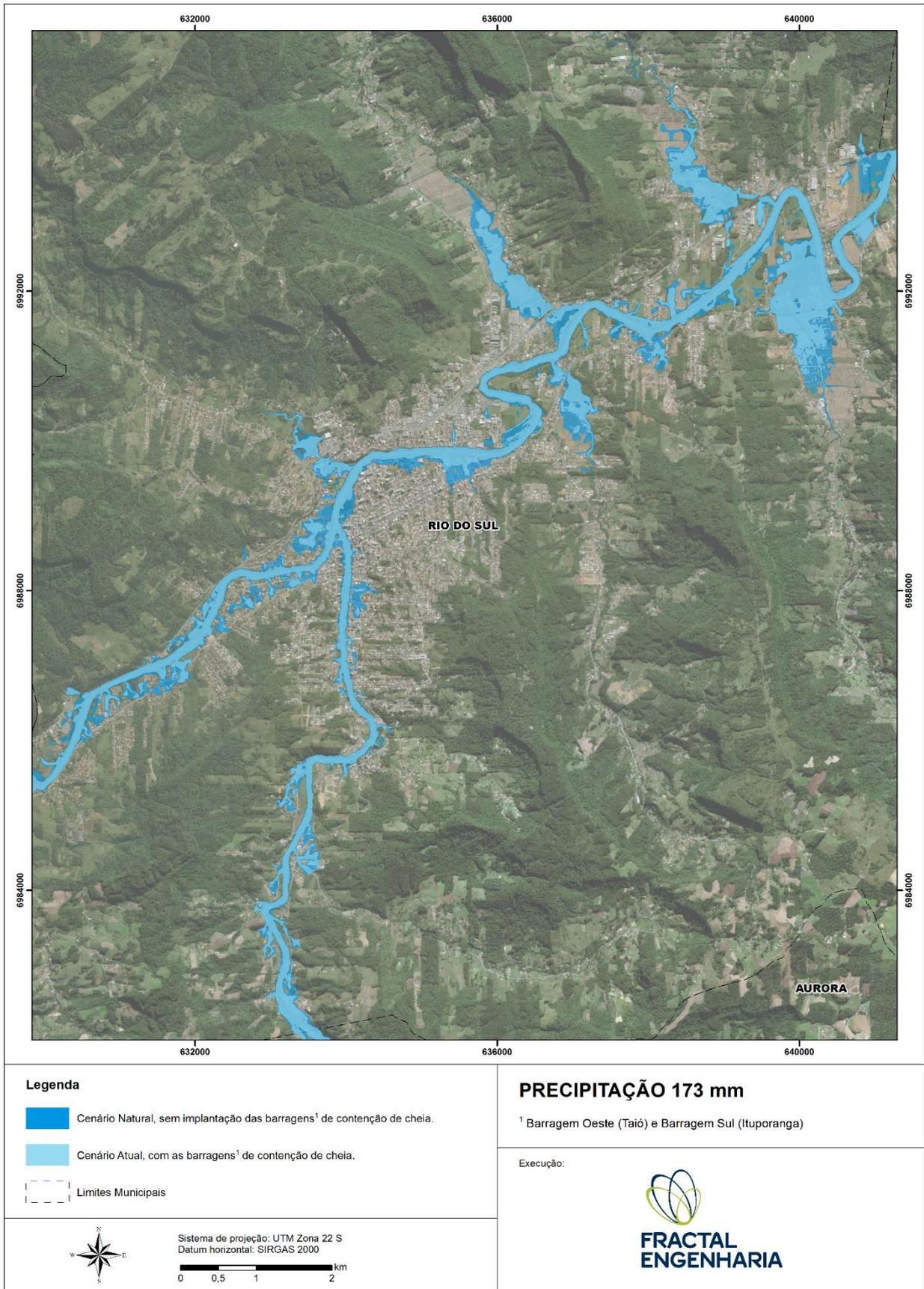


Figura 57. Comparativo de inundação – Chuva 173 mm.

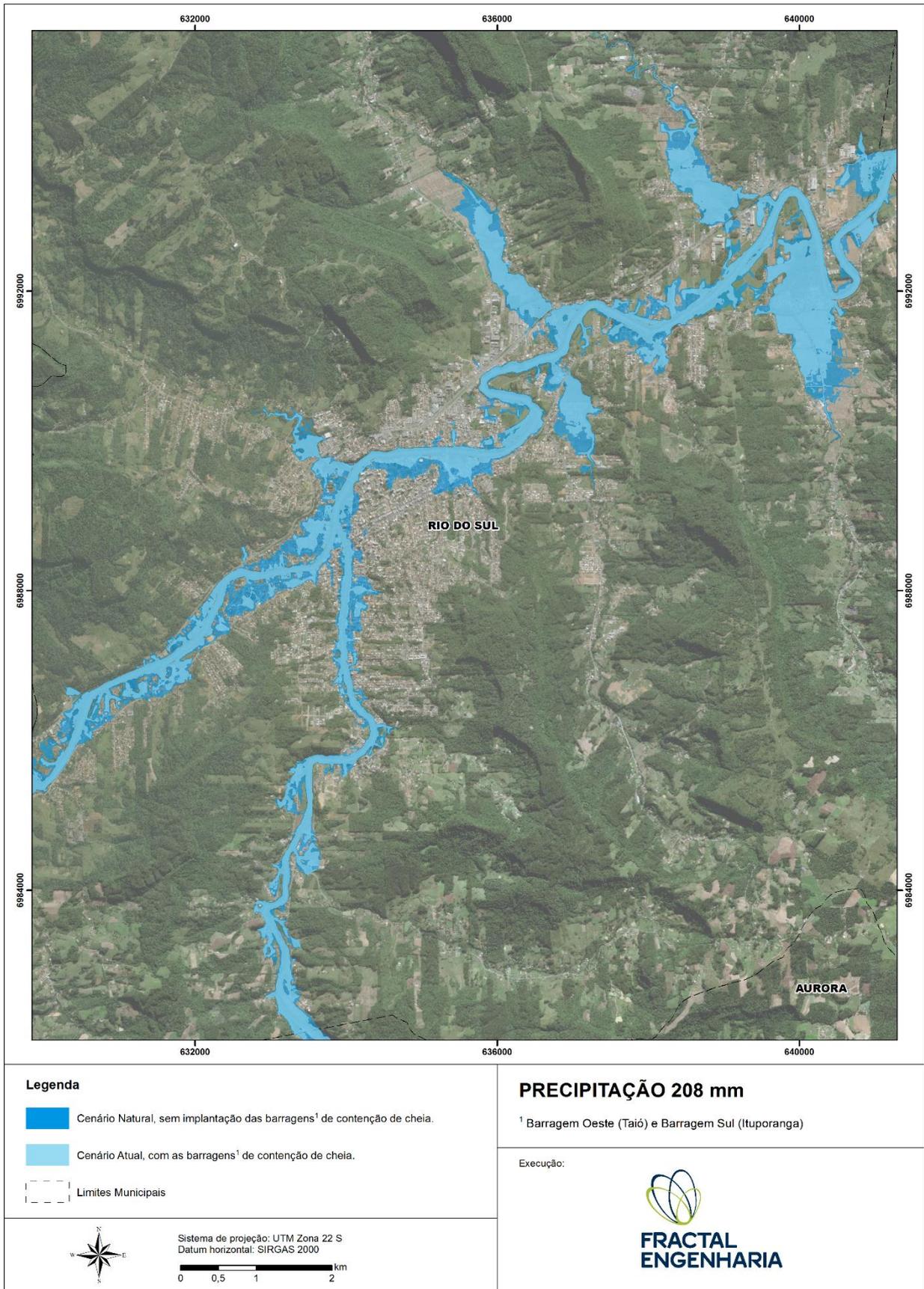


Figura 58. Comparativo de inundação – Chuva 208 mm.

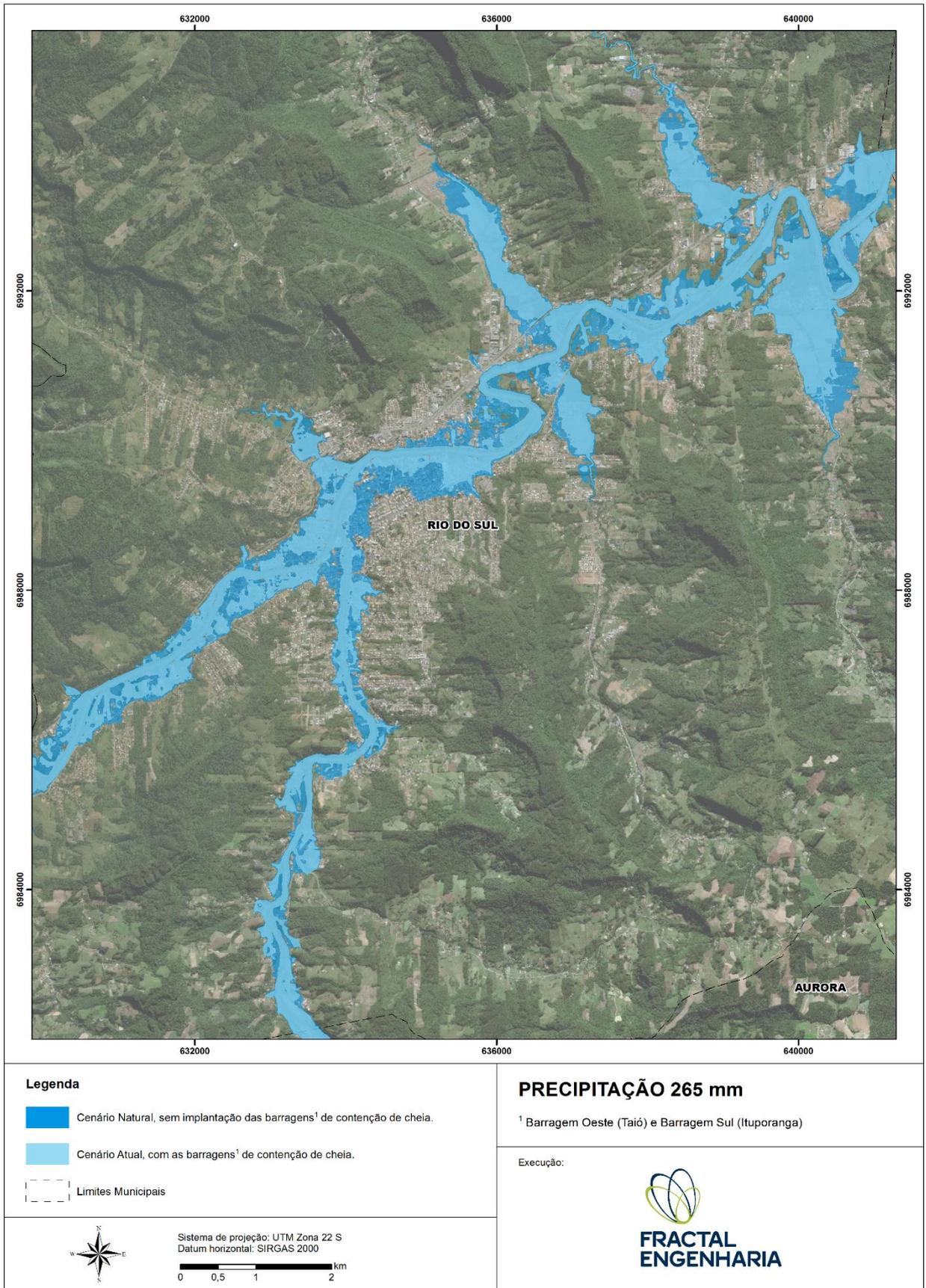


Figura 59. Comparativo de inundação – Chuva 265 mm.

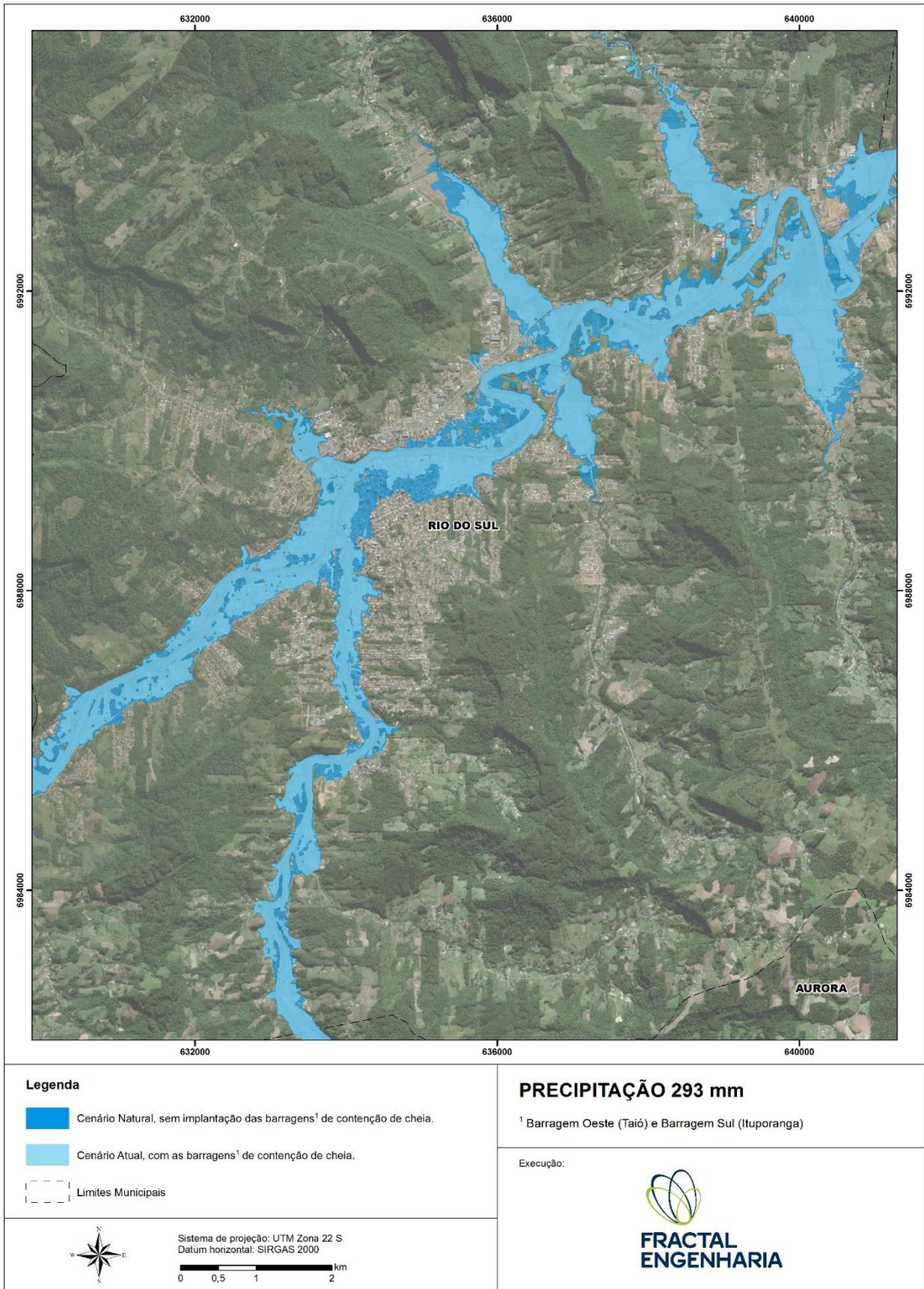


Figura 60. Comparativo de inundação – Chuva 293 mm.

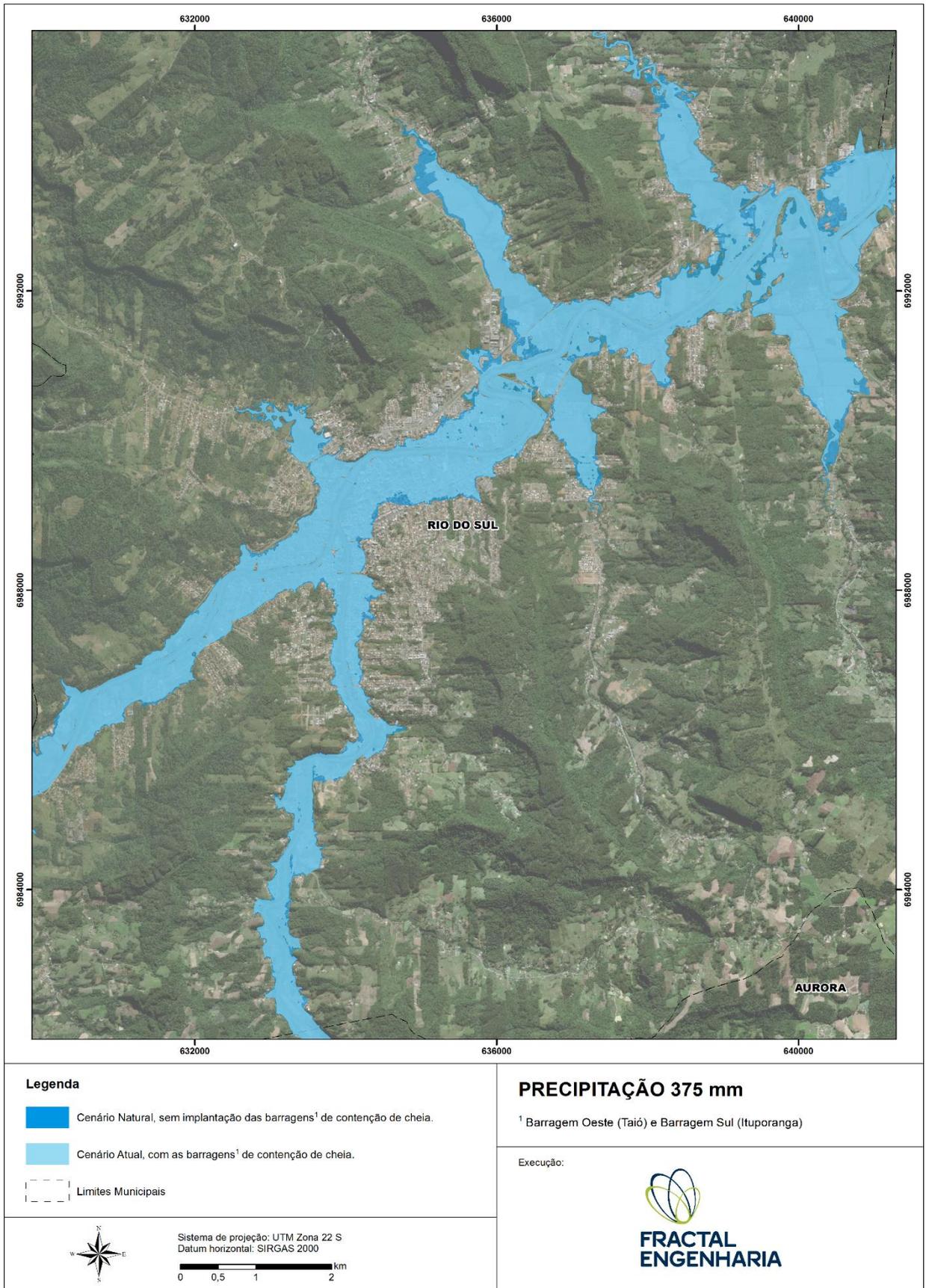


Figura 61. Comparativo de inundação – Chuva 375 mm.

As próximas figuras resumem numericamente as diferenças entre a inundação natural e a inundação regulada pelas Barragens Oeste e Sul. As diferenças são quantificadas em termos de vazão e cota d'água, ilustrando no tempo os hidrogramas e os cotogramas.

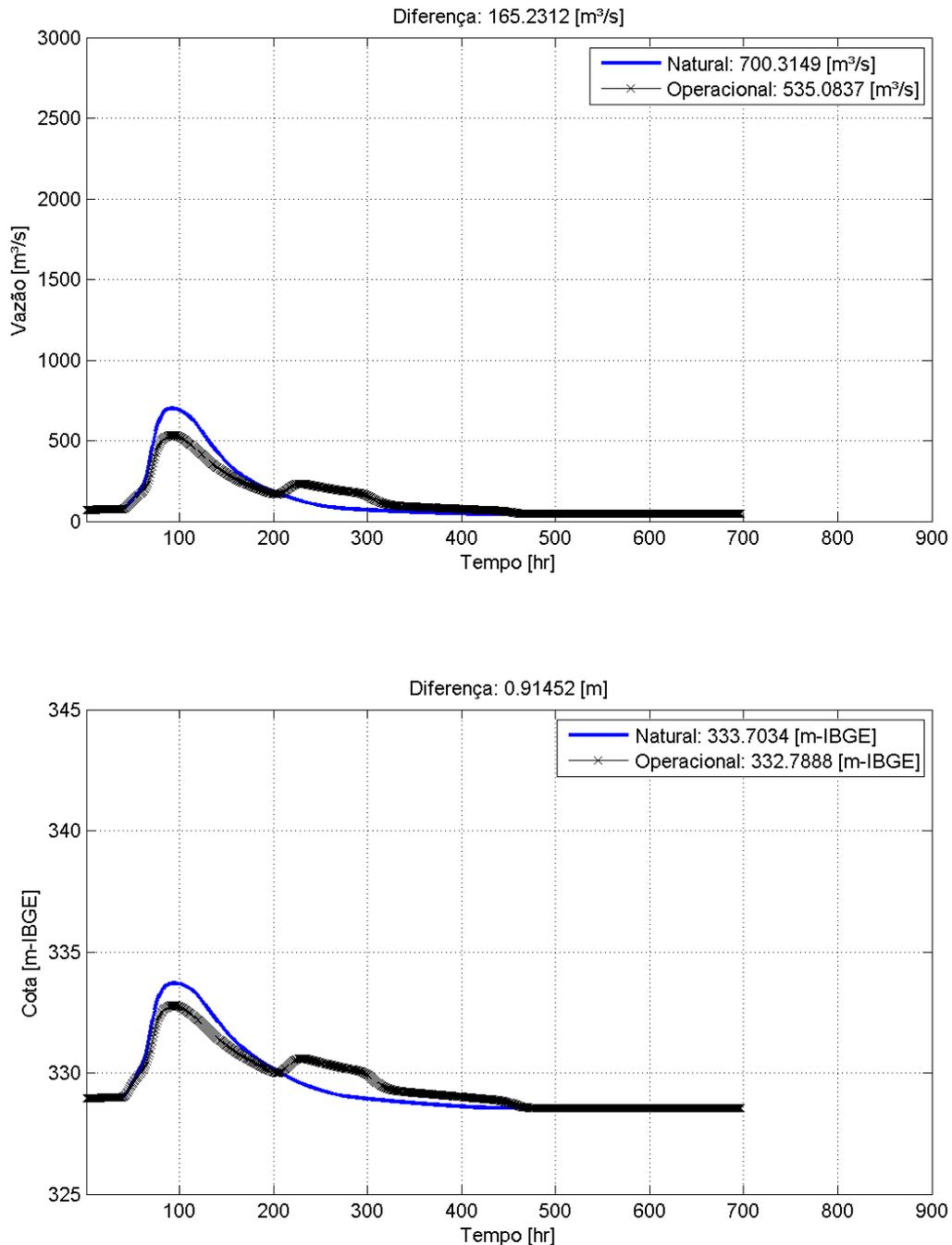


Figura 62. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 105 mm.

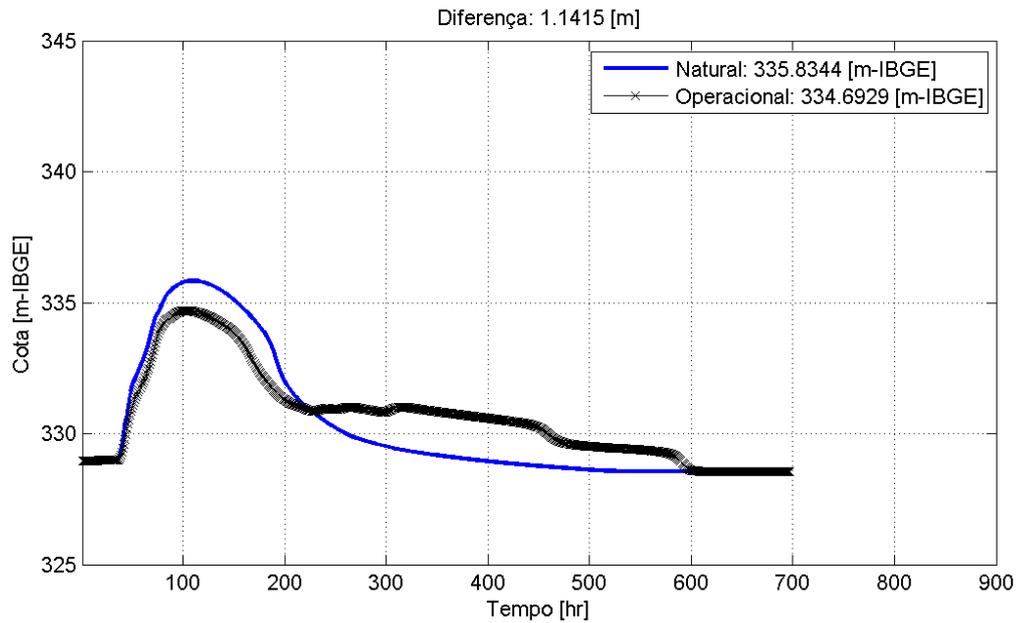
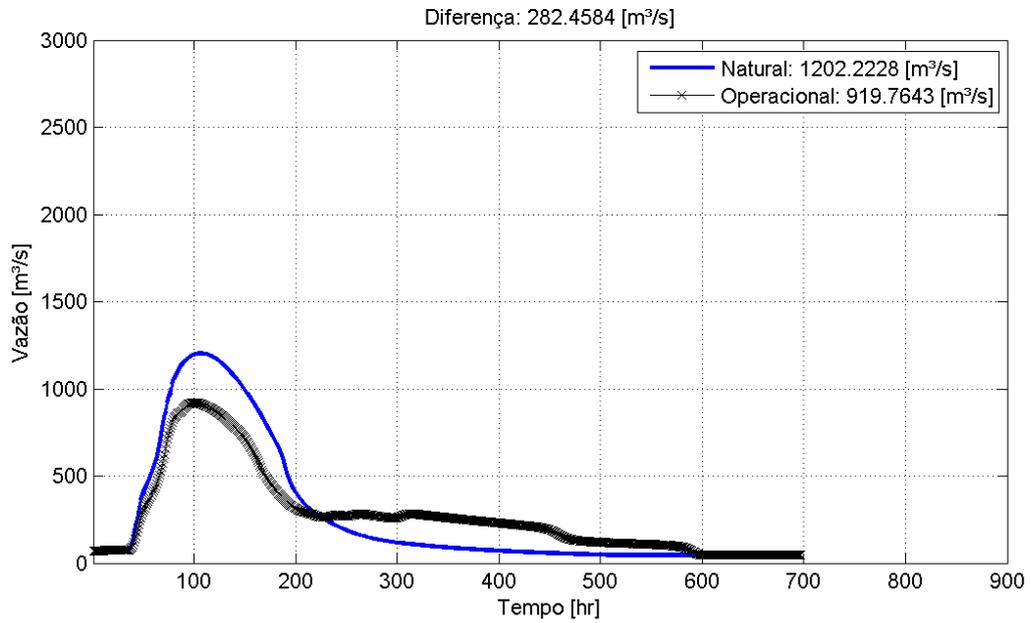


Figura 63. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 173 mm.

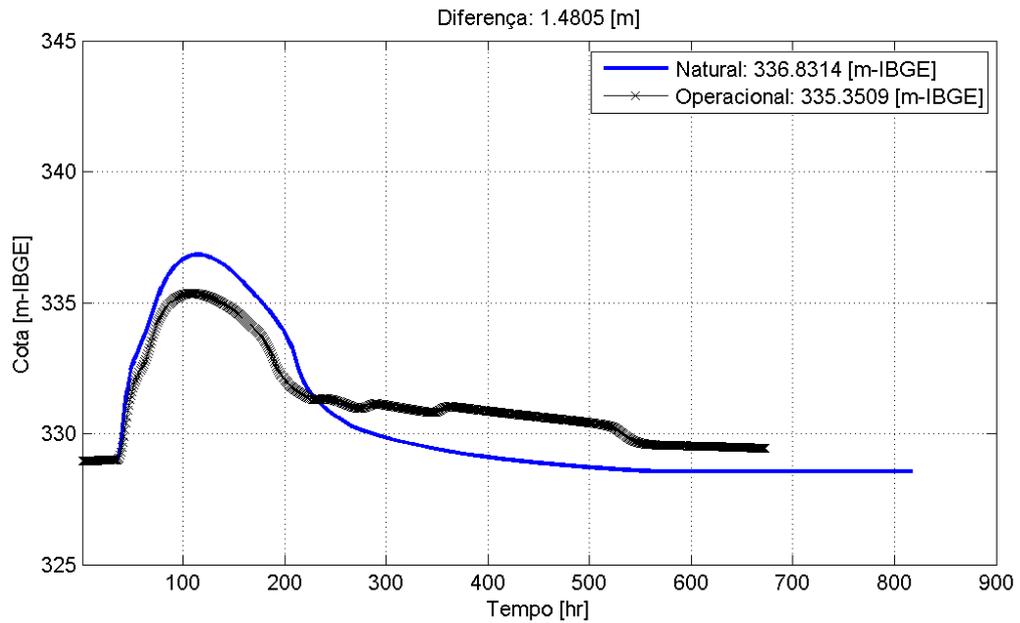
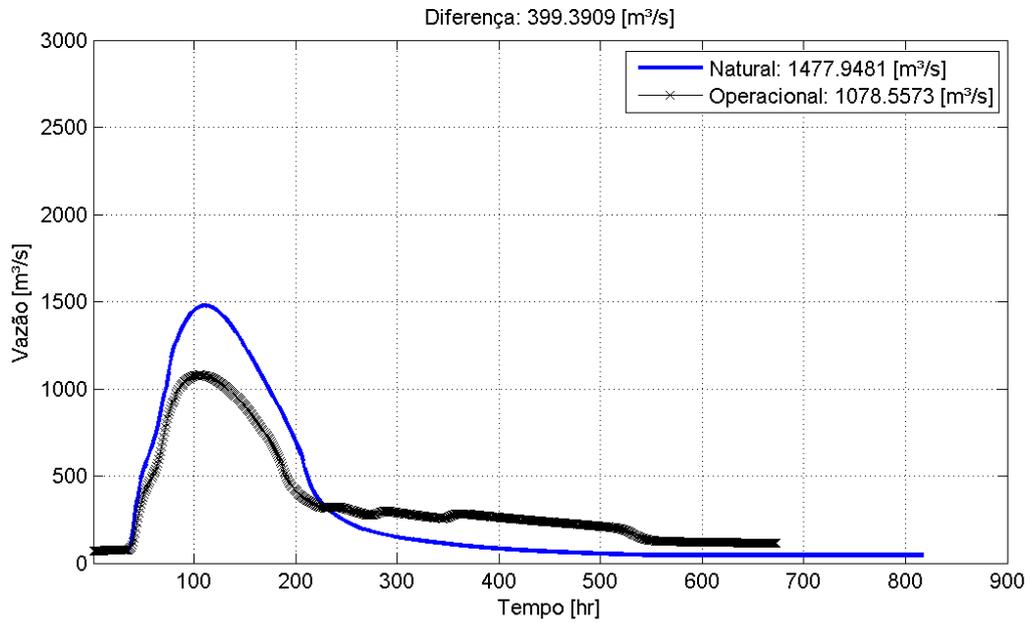


Figura 64. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 208 mm.

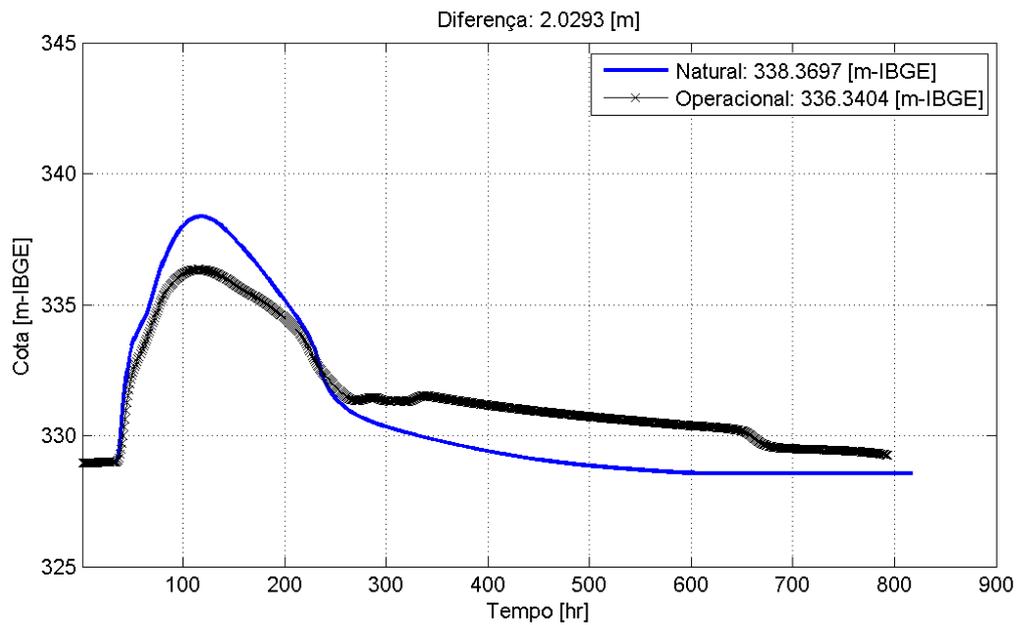
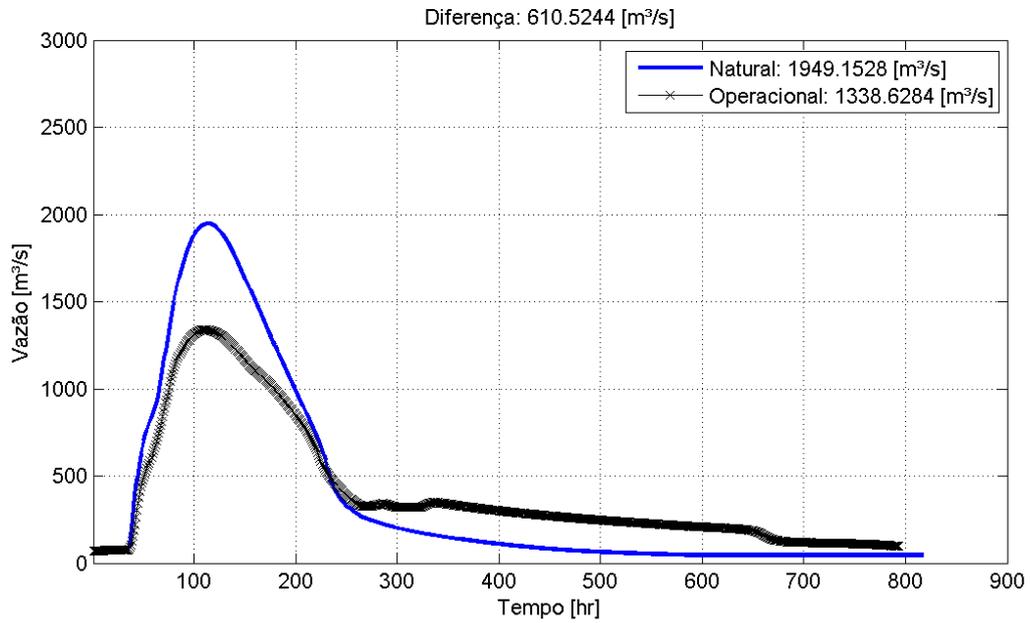


Figura 65. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 265 mm.

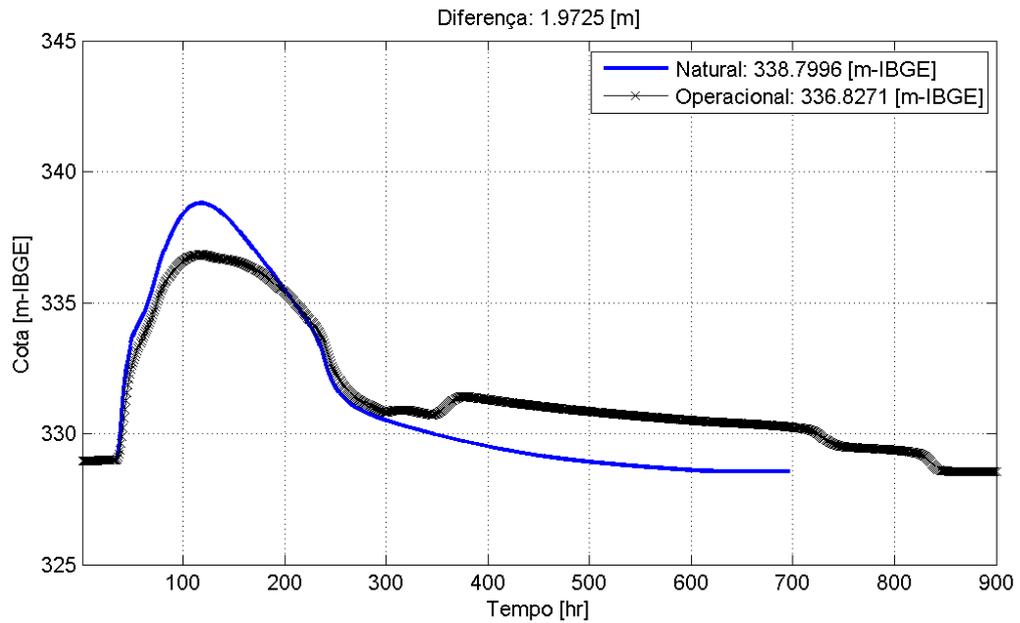
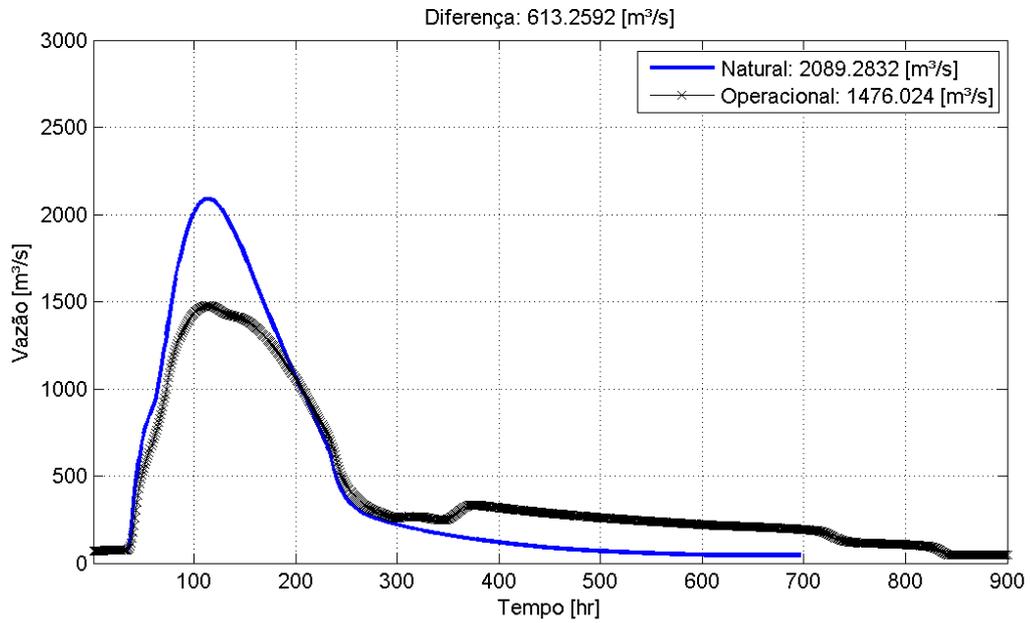


Figura 66. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 293 mm.

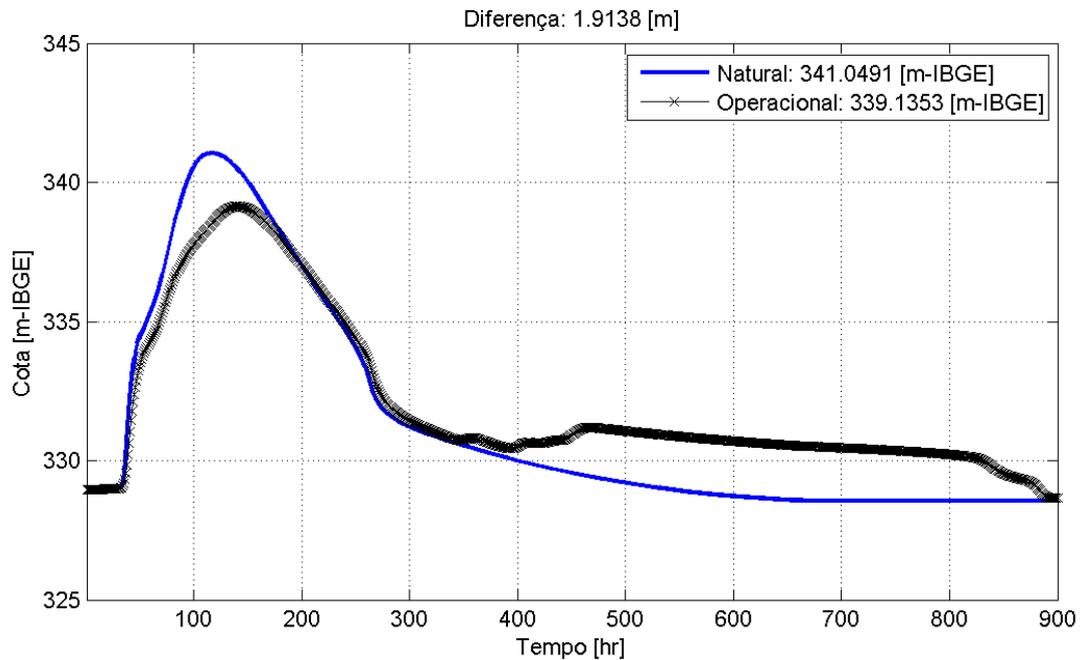
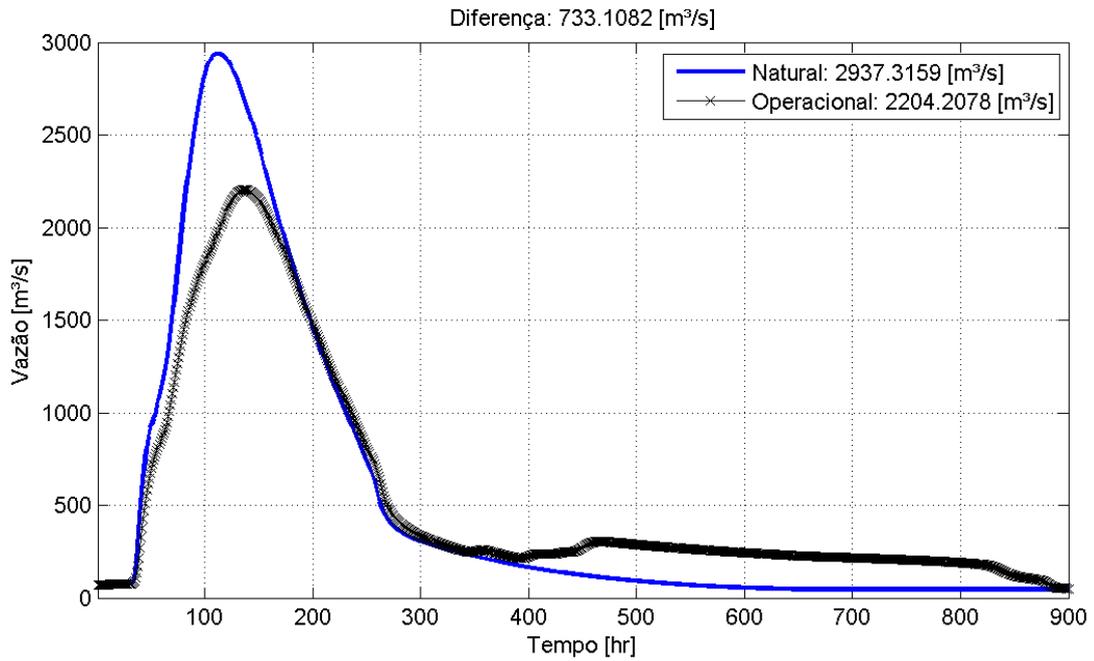


Figura 67. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 375 mm.

APÊNDICE C – Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Oeste

3.1 INTRODUÇÃO

O presente documento, realizado no ano de 2018, é o resumo do estudo hidráulico para determinação da regra de operação da Barragem Oeste. Neste documento estão descritos os modelos numéricos empregados nas análises, a metodologia de calibração e concepção dos modelos numéricos na representação da Barragem Oeste e os resultados obtidos para confecção das regras de operação e curvas hidráulicas dos dispositivos de descarga da barragem.

Parte dos resultados desse estudo aparecem de forma redundante no documento principal do manual de operação da Barragem Oeste. As simulações tiveram embasamento dos dados observados no evento de cheia de setembro de 2018. O referido evento hidrológico de setembro de 2018 foi observado e acompanhado pela equipe técnica do presente projeto. Os registros de chuva, vazão e operação da Barragem Sul e Oeste serviram para estudar e aferir o comportamento das barragens, bem como reconstituir a contribuição hidrológica da área incremental entre as barragens até a estação Rio do Sul Novo – 83300200.

A ocorrência de um evento real durante a fase de estudos do manual de operação da Barragem Oeste contribuiu para agregar robustez e aferir a qualidade dos resultados obtidos e dos cenários operacionais analisados.

3.2 MODELO HIDROLÓGICO

O balanço hídrico para o evento hidrológico foi realizado com o uso do modelo hidrológico HEC-HMS. Este modelo foi projetado para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, em diferentes escalas temporais e espaciais. O modelo foi usado por permitir fazer a análise integrada da bacia hidrográfica com os reservatórios. O uso do modelo propiciou o entendimento do modelo conceitual da bacia do Rio Itajaí na seção de Rio do Sul. Com os resultados obtidos, os reservatórios serão implementados no SPEHC, sistema responsável pela geração de boletins de previsão hidrológica nas barragens e para Rio do Sul.

De acordo com HEC (2009), este modelo opera em módulos separados para os cálculos do ciclo hidrológico. Desta forma, o usuário pode estabelecer o método mais conveniente para

caracterização do escoamento superficial, infiltração e perdas, escoamento básico, evapotranspiração e efeito de armazenamento por reservatórios⁶.

3.3 MODELO HIDRÁULICO

O HEC-RAS (HEC, 2016) é um modelo unidimensional e bidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície d'água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, podendo ocorrer mudanças de um regime para outro. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações em que o perfil da superfície d'água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite a análise e cálculo de regras operacionais de dispositivos hidráulicos, tais como barragens.

A formulação matemática unidimensional do HEC-RAS é baseada nas equações da conservação do momento de St. Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{|Q|Q}{K^2} + q \frac{Q}{A} = 0 \quad (12)$$
$$L \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Onde Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície d'água [m]; K é capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o fluxo lateral [m³/s/m]; β é o fator de distribuição do fluxo [adim].

O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na Eq.(12) para obtenção de sua solução hidráulica. A capacidade de transporte das formulações hidráulicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional e bidimensional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} h \quad (13)$$

⁶ Regras de operação não são calculadas ou analisadas no modelo hidrológico HEC-HMS.

Onde V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; S é a declividade do escoamento [m/m]; R_h raio hidráulico [m].

O reservatório e os dispositivos da barragem são simulados hidraulicamente por meio da equação de momento, assim o deslocamento da onda no reservatório é adequadamente representado. As regras de operação dos dispositivos de descarga, para controle do reservatório, são igualmente representadas.

Na Figura 68 está ilustrado o modelo hidráulico conceitual da Barragem Oeste na interface HEC-RAS.

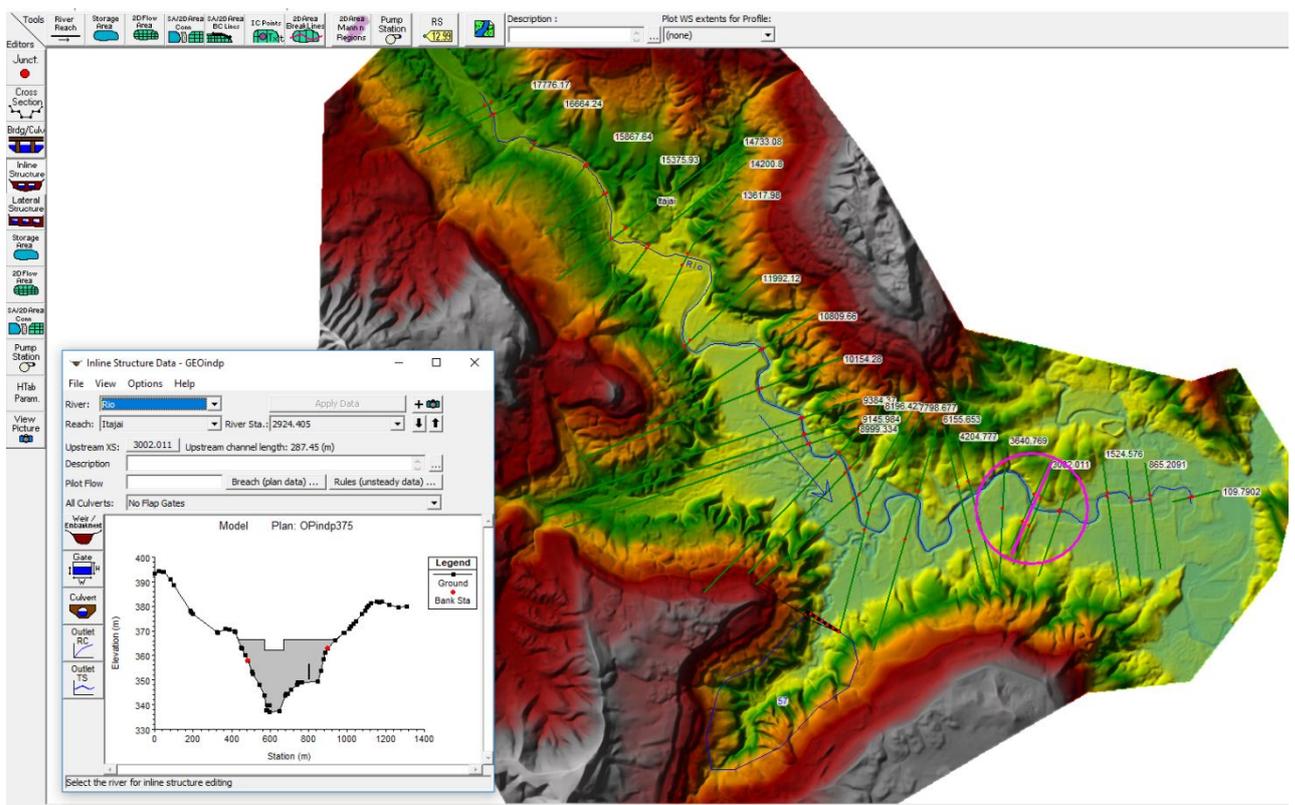


Figura 68. Modelo conceitual de operação da Barragem Oeste.

3.4 DADOS DE ENTRADA

O desenvolvimento do presente estudo foi baseado em dados hidrológicos, topográficos e levantamentos de campo realizados ao longo do trecho estudado. O Quadro 1 resume os dados empregados no desenvolvimento do modelo numérico da Barragem Oeste.

Quadro 2. Resumo de dados.

Tipo de base dados	Variável
Hidrológico	Dados diários de Cota, Vazão e Resumo de Descarga Líquida da estação fluviométrica Rio do Sul - Novo (cód. 83300200) e Taió (cód. 83029900).
Operação do reservatório	Medição de descarga líquida a jusante do eixo da barragem e registro do monitoramento de nível d'água no reservatório e configuração de abertura das comportas do descarregador de fundo.
Modelo digital de terreno	Utilizado modelo digital de terreno realizado pela SDS/SC, com pixel de 2 m, obtidas por meio do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) através do endereço eletrônico http://sigsc.sds.sc.gov.br/ .

3.4.1 CHUVA DE PROJETO

Para o presente projeto foi determinada chuvas de projeto para o desenvolvimento de simulações de operação do reservatório da Barragem Oeste e propagação da cheia até a seção de controle de restrição no município de Rio do Sul, SC. Segundo estudo da JICA (2011), a chuva padrão deflagradora de inundações ocorre num período de 4 dias, com sistemas meteorológicos que abrangem em totalidade, ou quase totalidade, a área da bacia do Rio Itajaí.

Tal padrão de chuvas é coerente, sendo os últimos eventos ocorridos em junho de 2017 e setembro de 2018 com o mesmo padrão mapeado no estudo hidrológica da JICA (2011). Desta forma, a chuva de referência de julho de 2017 foi usada para calcular as chuvas de projeto de duração de 4 dias para os períodos de retorno do estudo indicado.

Na Tabela 5 estão resumidas as alturas acumuladas de chuva para duração de 4 dias.

Tabela 7. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.⁷

Período de retorno – TR [anos]	Acumulado em 4 dias [mm]
2	105
5	173
10	208
20	243
25	265
50	293

⁷ A equação para cálculo do período de retorno em função do acumulado de chuva em 4 dias é $TR = 0,2119e^{0,0184P}$



Código: 602-SDC-RT-HID-APE-0001

Título: Análise operacional hidráulica complementar das barragens Oeste e Sul



Revisão: 3

Emissão: 13/05/2024

80

320

100

333

150

357

200

375

Os eventos de chuva são empregados como limiar para caracterizar a operação das barragens e como variável de entrada no modelo hidrológico para reconstituição dos eventos de cheia associados a cada chuva de projeto.

A chuva de projeto unitária está ilustrada na Figura 20 junto com as curvas de acumulação para cada período de retorno.

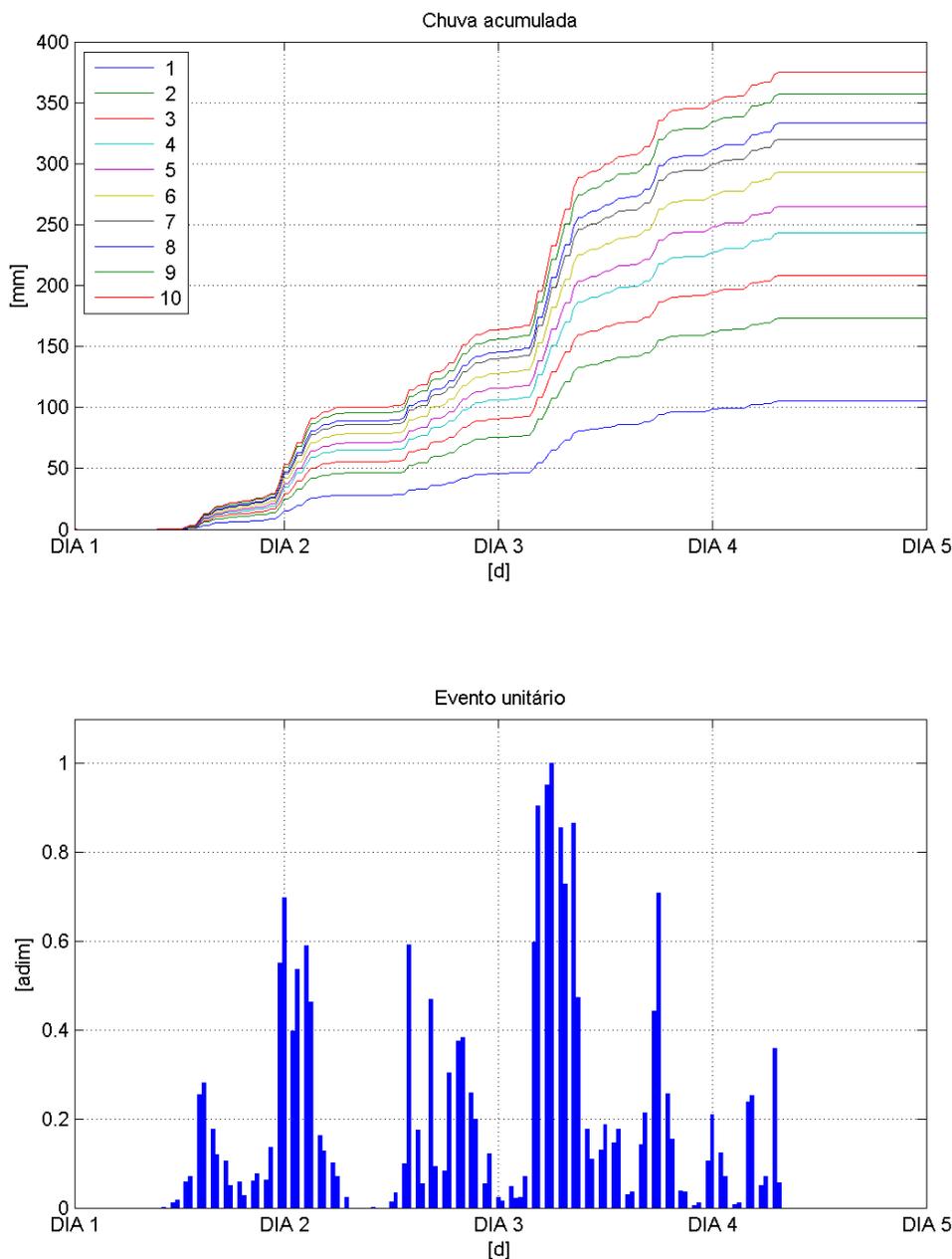


Figura 69. Chuva de projeto.

3.4.2 CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA

Na Figura 21 está ilustrado o modelo conceitual desenvolvimento para a realização das simulações hidrológicas. A reconstituição do evento de cheia de setembro de 2018 considera uma análise integrada da bacia hidrográfica do Rio Itajaí até a seção de Rio do Sul, contemplando o efeito de armazenamento das barragens a montante de Rio do Sul. Na

reconstituição hidrológica regras de operação não são simuladas, somente o efeito de armazenamento dos reservatórios.

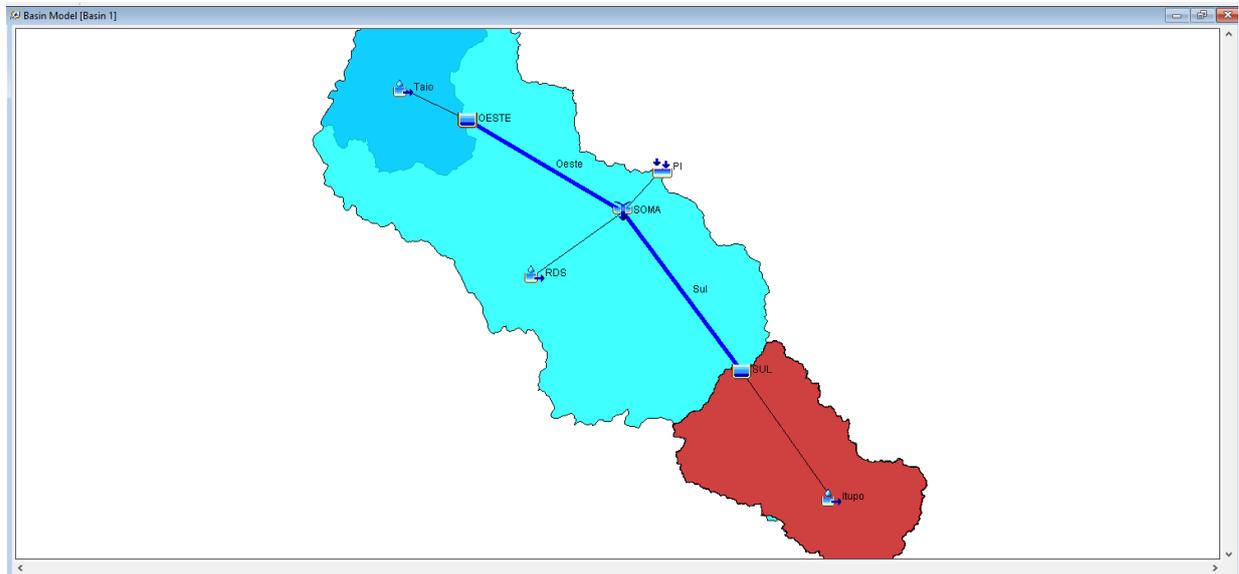


Figura 70. Modelo hidrológico conceitual.

A calibração do modelo hidrológico levou em consideração o comportamento na estação Rio do Sul – Novo – 83300200 e na estação Taio – 83029900, bem como o monitoramento dos níveis dos reservatórios da Barragem Sul e Barragem Oeste. A calibração, através do balanço hídrico do evento, atingindo NSE de 0,96 e desvio volumétrico de 8% (Figura 22). A simulação buscou ajustar a geração de escoamento da bacia hidrográfica, das áreas de drenagem das barragens e incremental, e o armazenamento dos reservatórios. Nessa simulação somente o enchimento foi representado, já o esvaziamento não fez parte da simulação devido ao HEC-HMS não representar regras de operação.

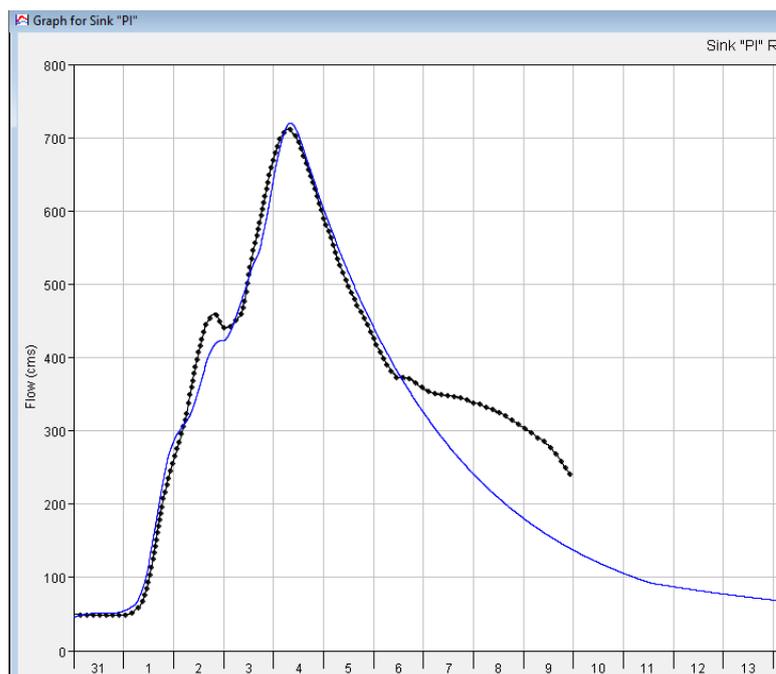


Figura 71. Calibração do evento de setembro de 2018.

Com a simulação de calibração identificou-se características de resposta do sistema bacia- reservatórios, onde a restrição prioritária fica definida como a estação de Rio do Sul – Novo – 83300200. Uma verificação importante durante a ocorrência do evento foi a antecipação da operação para garantir maior volume de calha natural de rio disponível para o armazenamento da cheia, enquanto não ocorra extravasamento na planície de inundação pelo rio Itajaí.

O modelo hidrológico foi empregado para constituir os cenários hidrológicos para cada chuva de projeto, calculando os hidrogramas afluentes nos reservatórios e a contribuições na área incremental até Rio do Sul.

As áreas de drenagem de referência para o balanço hídrico são:

- Área de drenagem do reservatório da Barragem Sul: 1.316 km²;
- Área de drenagem do reservatório da Barragem Oeste: 959 km²;
- Área de drenagem incremental até Rio do Sul: 3488 km²;

O total de área de drenagem é igual a 5.763 km², em Rio do Sul. A área de drenagem da Barragem Sul representa 23% da área total e a área de drenagem da Barragem Oeste representa 17%, totalizando 40% da área total até Rio do Sul com capacidade de regulação da resposta hidrológica. Tais percentuais são significativos e já indicam alta capacidade de contenção de cheia pelas barragens.

A operação referente ao evento de setembro de 2018 foi reproduzida em modelos numéricos, a fim de aferir o modelo hidráulico HEC-RAS para a simulação dos cenários de operação associados às chuvas de projeto. Com a simulação, quantificou-se o impacto da Barragem Oeste, e também da Barragem Sul, as quais operam conjuntamente, na inundação que se inicia na seção de controle de Rio do Sul.

Na Figura 23 está ilustrada a passagem da cheia de setembro de 2018, comparando o cenário natural teórico, sem barragens, com o cenário atual com o efeito de armazenamento da cheia pelas barragens.

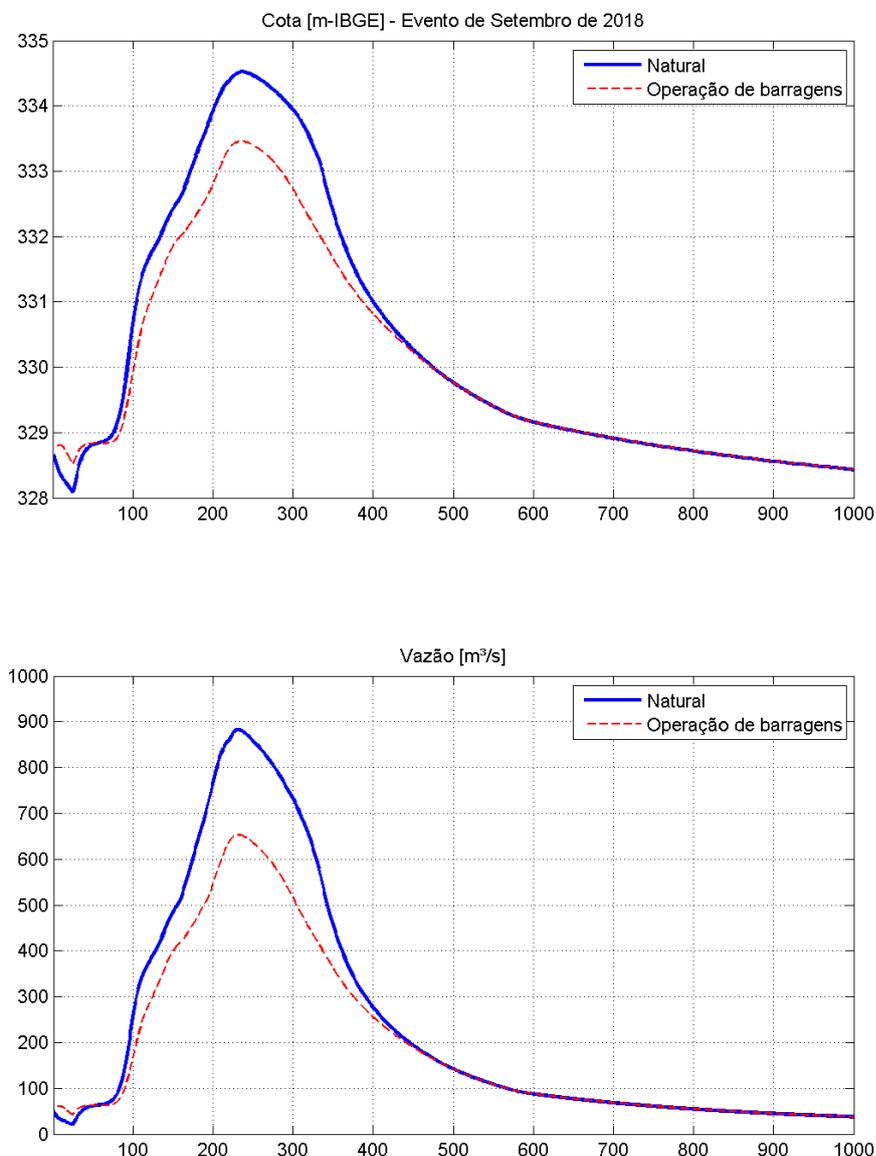


Figura 72. Quantificação do efeito das Barragens Sul e Oeste na inundação de Rio do Sul.

Em suma, a vazão natural em Rio do Sul poderia ter chegado a 1.100 m³/s, sendo que a vazão real, com efeito da regulação das barragens, chegou a 710 m³/s. O rio Itajaí escoou em calha plena, não atingindo benfeitorias. Num cenário natural, a cota d'água teria sido 1,10 m superior, o que consolidaria danos em benfeitorias ao longo da cidade de Rio do Sul.

No mapa da Figura 24 está ilustrada a espacialização do evento em relação a um cenário natural e de período de retorno de 2 anos.

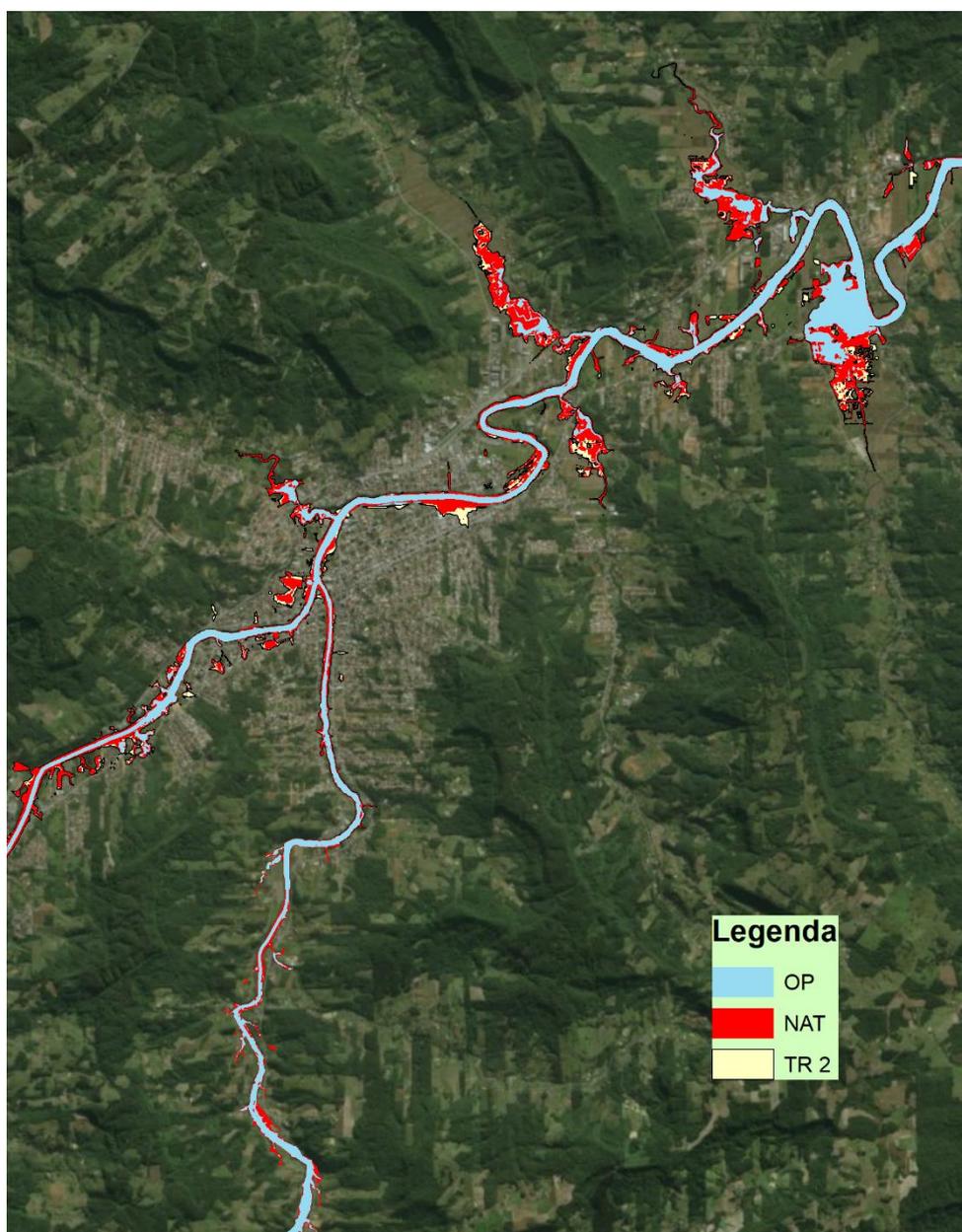


Figura 73. Cheia de setembro de 2018.

Para o cenário de operação de setembro de 2018, os modelos hidráulicos são os mesmos empregados nas calibrações dos estudos de inundação de Ituporanga (361-SDC-RT-EHI-008.5), Taió (361-SDC-RT-EHI-008.6) e Rio do Sul (361-SDC-RT-EHI-008.4), incluindo os modelo da Barragem Sul e Barragem Oeste.

3.5 RESULTADOS

Os modelos das barragens para a análise operativa contemplam dois tipos de simulação, sendo “enchimento” e “esvaziamento”. O resultado do esvaziamento foi então empregado no modelo hidráulica integrado de Ituporanga, Taio e Rio do Sul. O procedimento de esvaziamento determinou o tempo necessário para a manobra e o limiar hidráulico na seção de Rio do Sul para determinar o início da manobra, garantindo adequado nível de segurança.

Na Figura 25 está ilustrado o fluxograma do estudo de operação dos reservatórios, desde a reconstituição hidrológica até a definição das regras de operação.

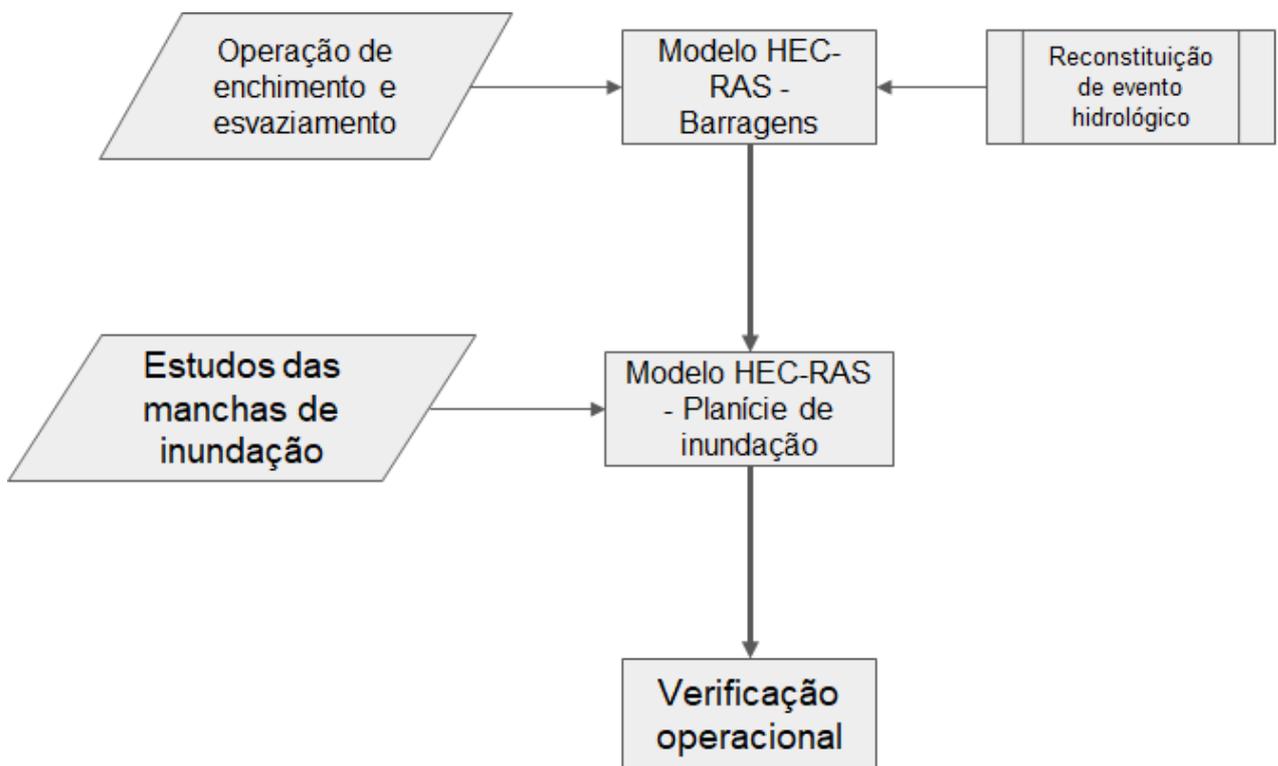


Figura 74. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Sul.

3.5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Os cenários identificados para determinar as regras de operação da Barragem Oeste foram determinados a partir das simulações hidrológicas em função das chuvas de projeto.

Dez cenários foram definidos para vazão afluente nos reservatórios da Barragem Sul e Barragem Oeste e área incremental:

- Período de retornos de 2 anos;
- Período de retornos de 5 anos;
- Período de retornos de 10 anos;
- Período de retornos de 20 anos;
- Período de retornos de 25 anos;
- Período de retornos de 50 anos;
- Período de retornos de 80 anos;
- Período de retornos de 100 anos;
- Período de retornos de 150 anos; e,
- Período de retornos de 200 anos.

Os hidrogramas afluentes ao reservatório da Barragem Oeste estão ilustrados na Figura 26⁸.

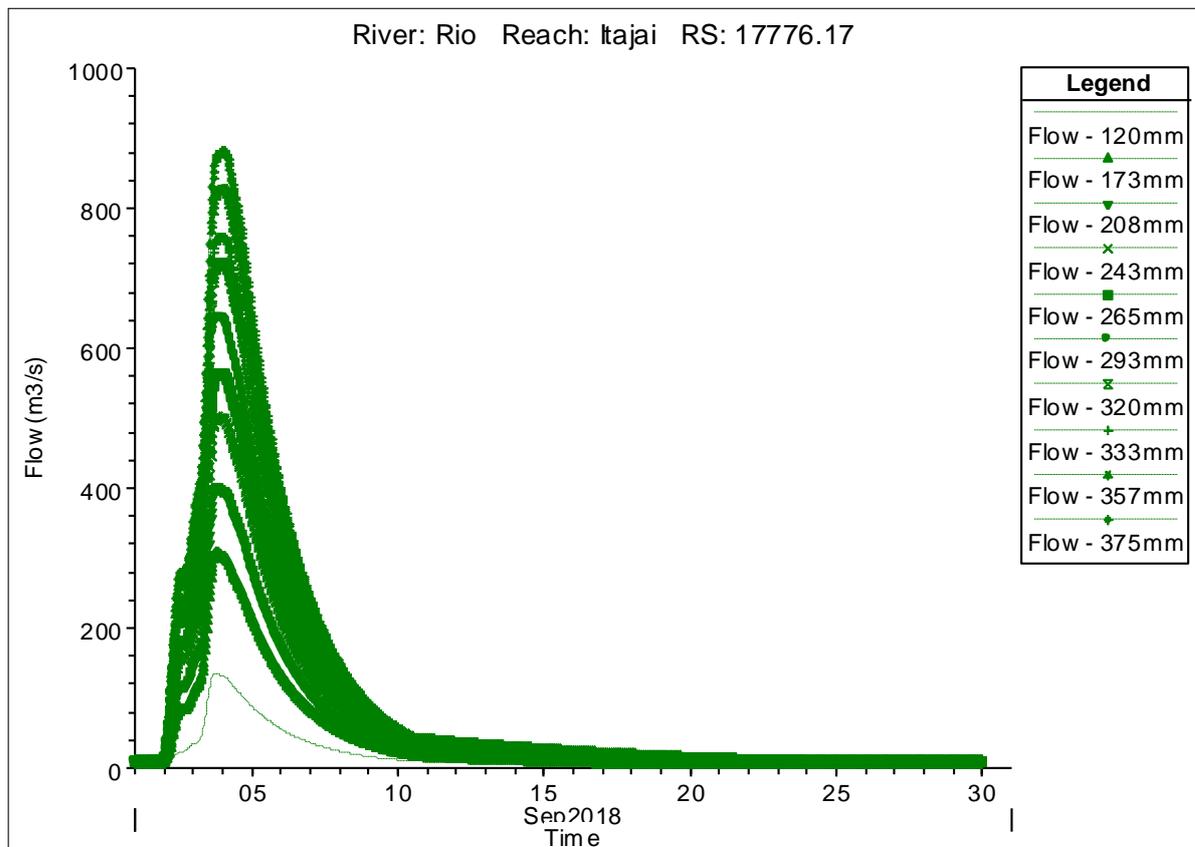


Figura 75. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Oeste.

⁸ Os hidrogramas gerados na modelagem chuva-vazão podem resultar em magnitudes superiores ao período de retorno da chuva. Devido a não-linearidade da resposta hidrológica, principalmente na bacia do Rio Itajaí, um chuva não apresenta mesmo período da vazão resultante.

3.5.2 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO

Nas figuras abaixo estão resumidas as análises, associada a cada chuva de projeto, de enchimento do reservatório⁹ da Barragem Sul com indicação da vazão de pico do hidrograma afluente e defluente, volume armazenamento e cota d'água no reservatório.

⁹ Os volumes de armazenamento apresentados nos resultados contemplam o efeito hidráulico do movimento da água, podendo diferir com valores maiores em relação aos volumes da Curva Cota-Volume. A Curva Cota-Volume representa a água parada, hidrostática, tendendo à relação volume e cota topográfica.

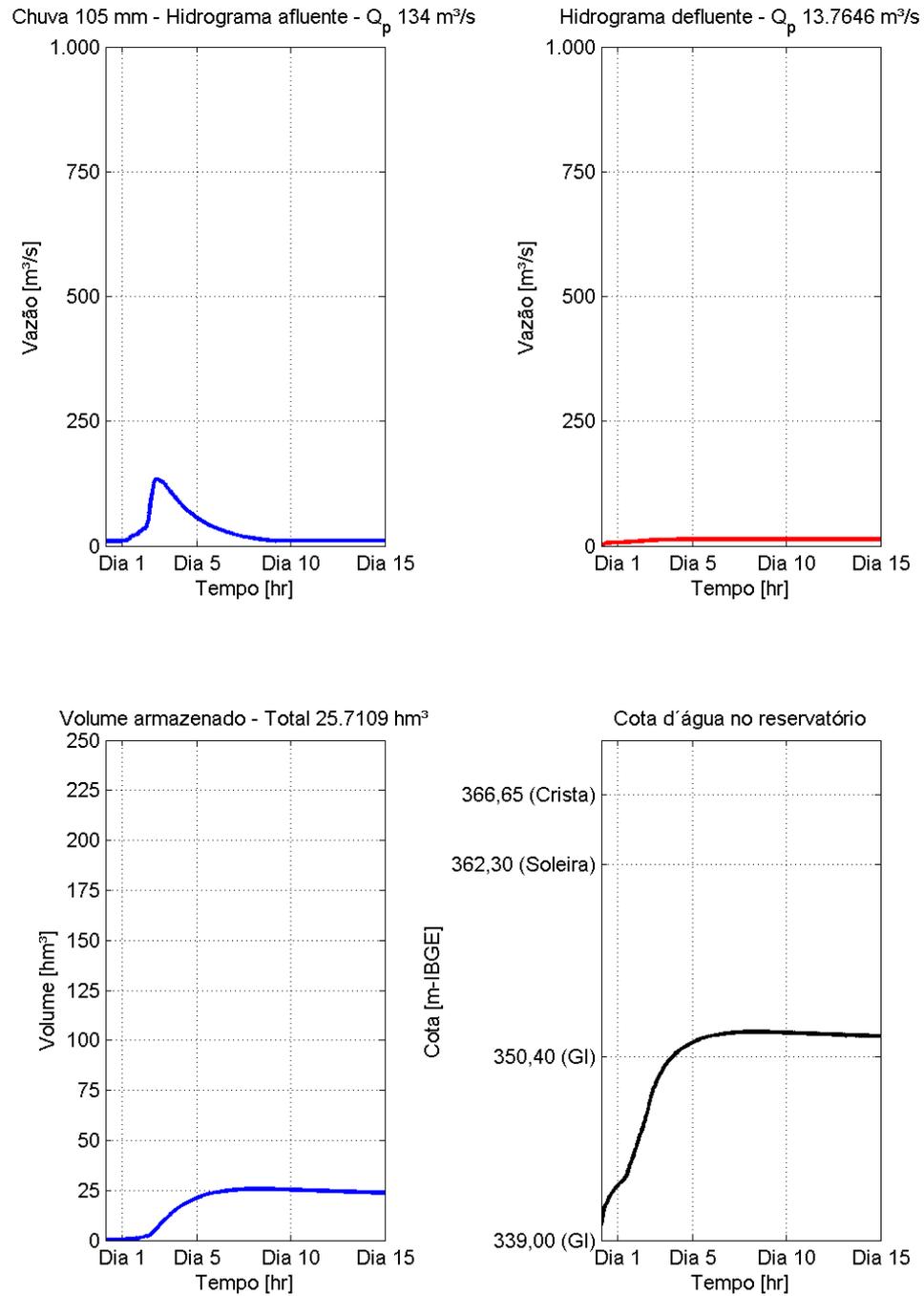


Figura 76. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 90%.

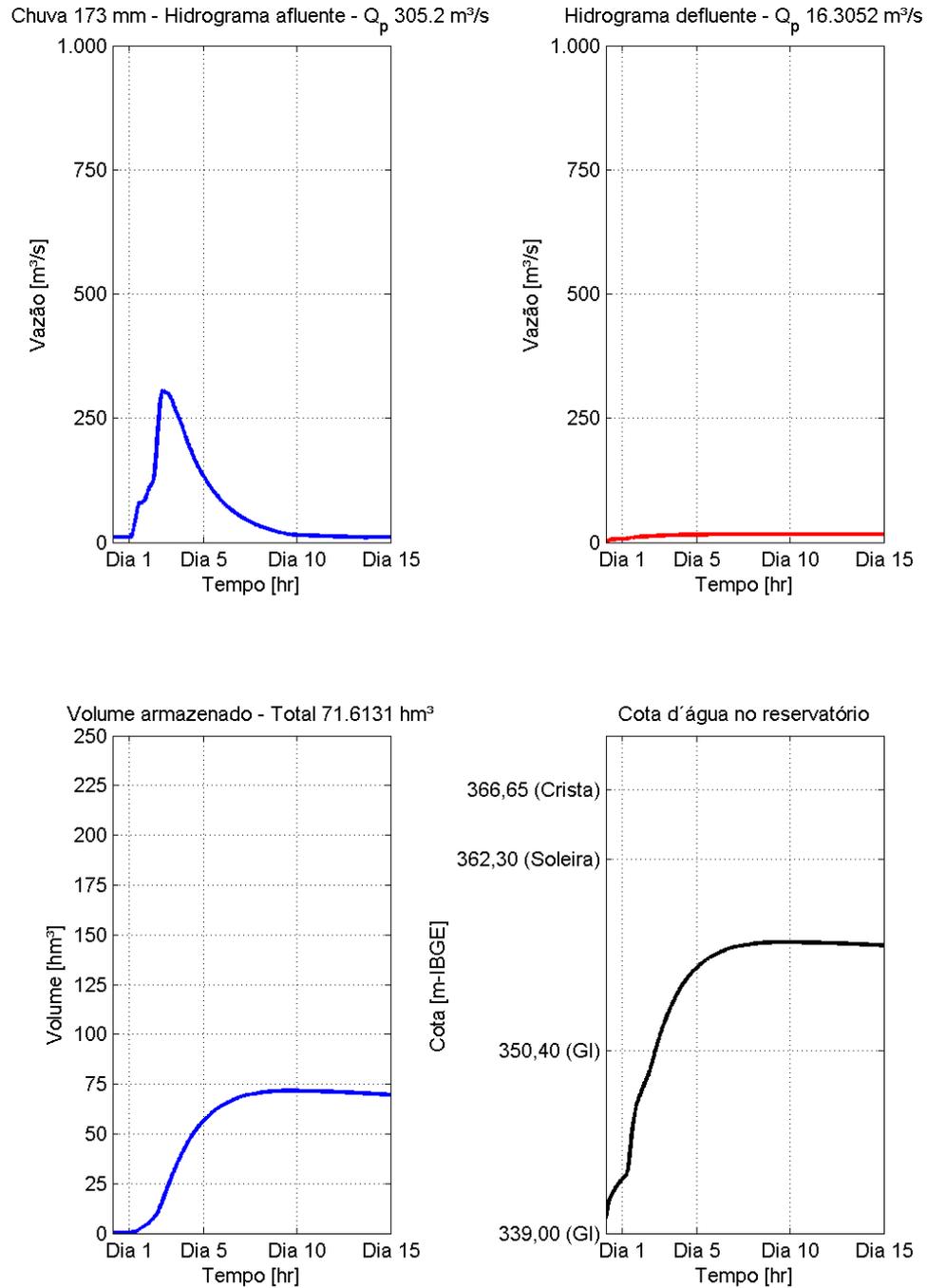


Figura 77. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 95%.

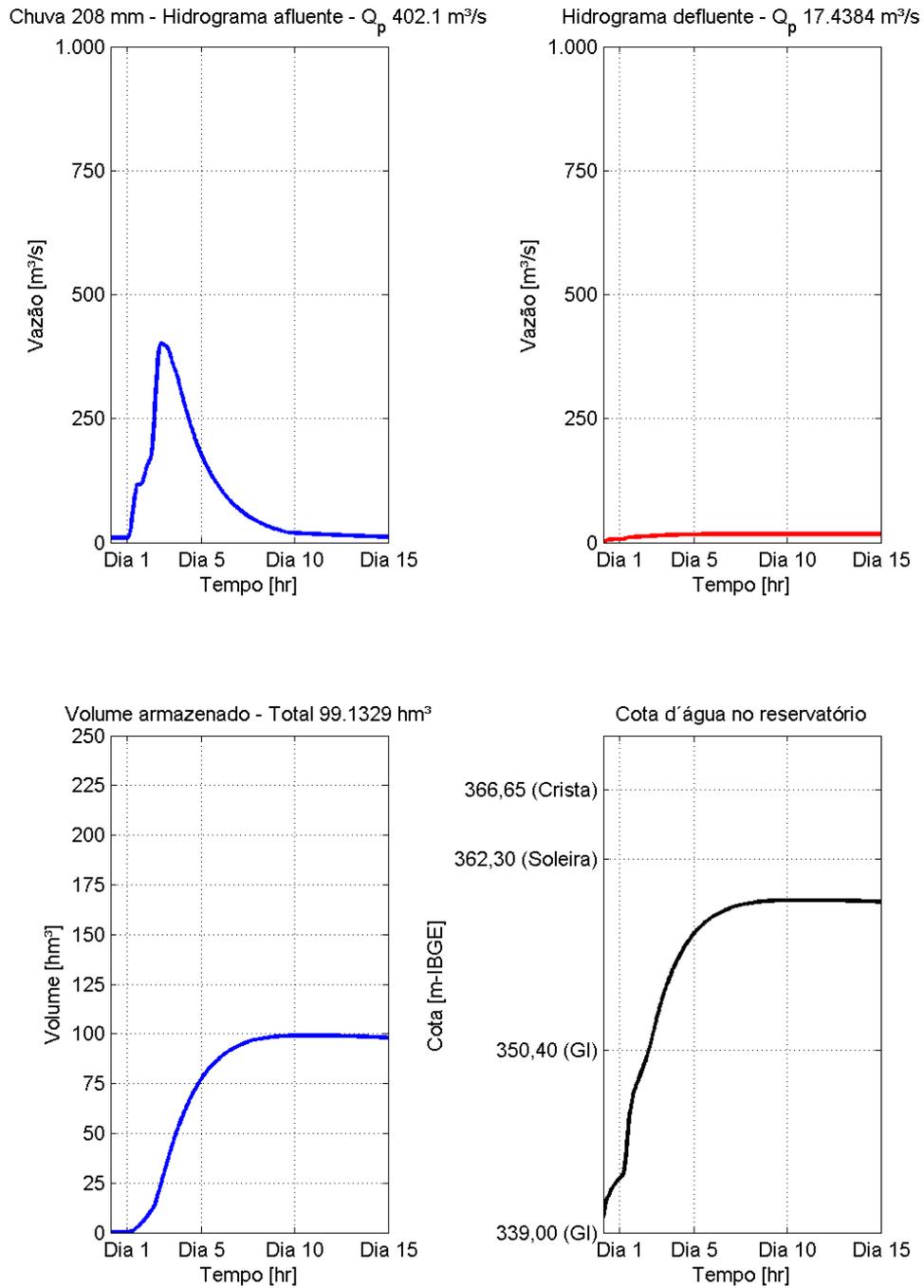


Figura 78. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 96 %.

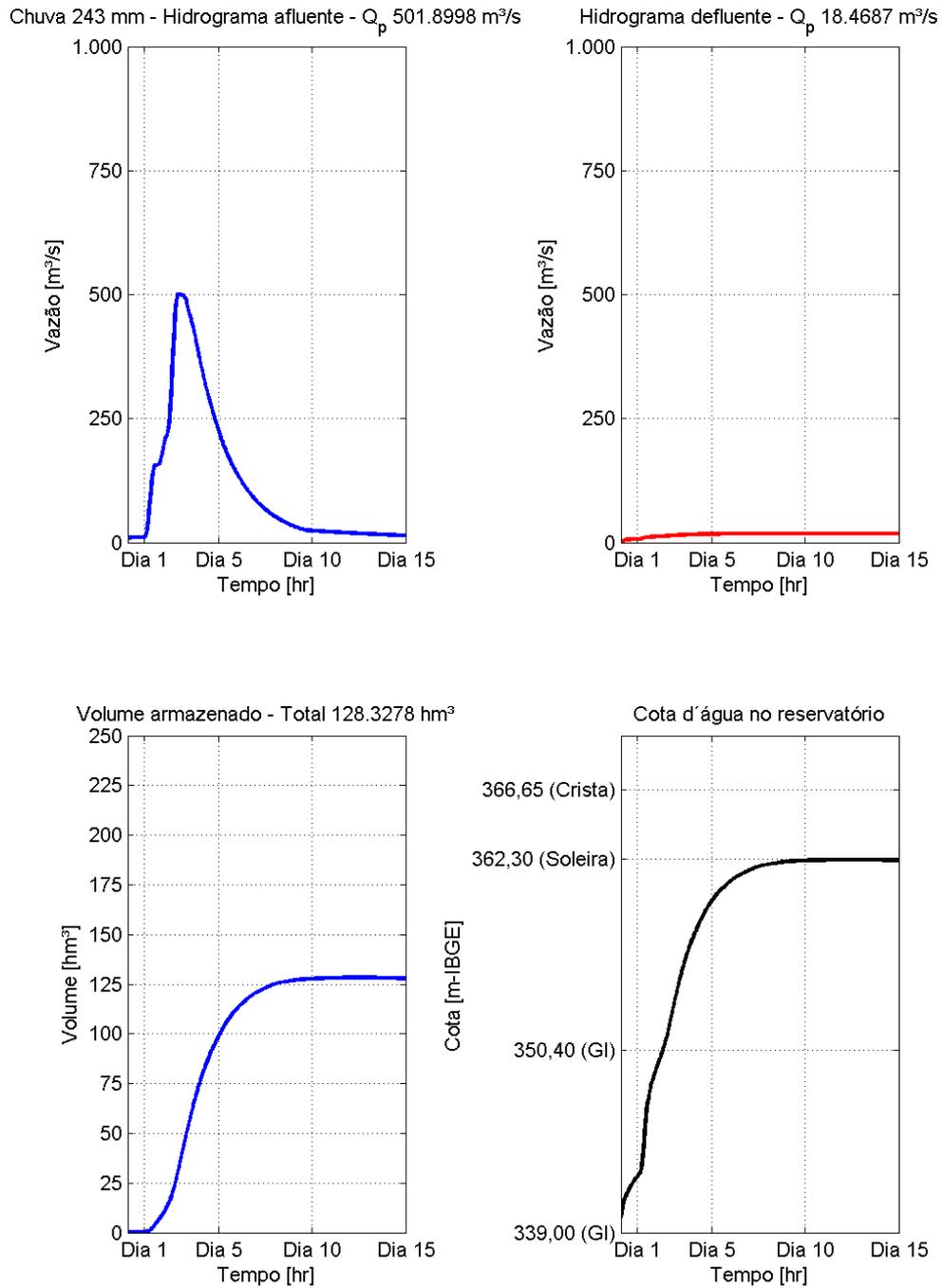


Figura 79. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 96%.

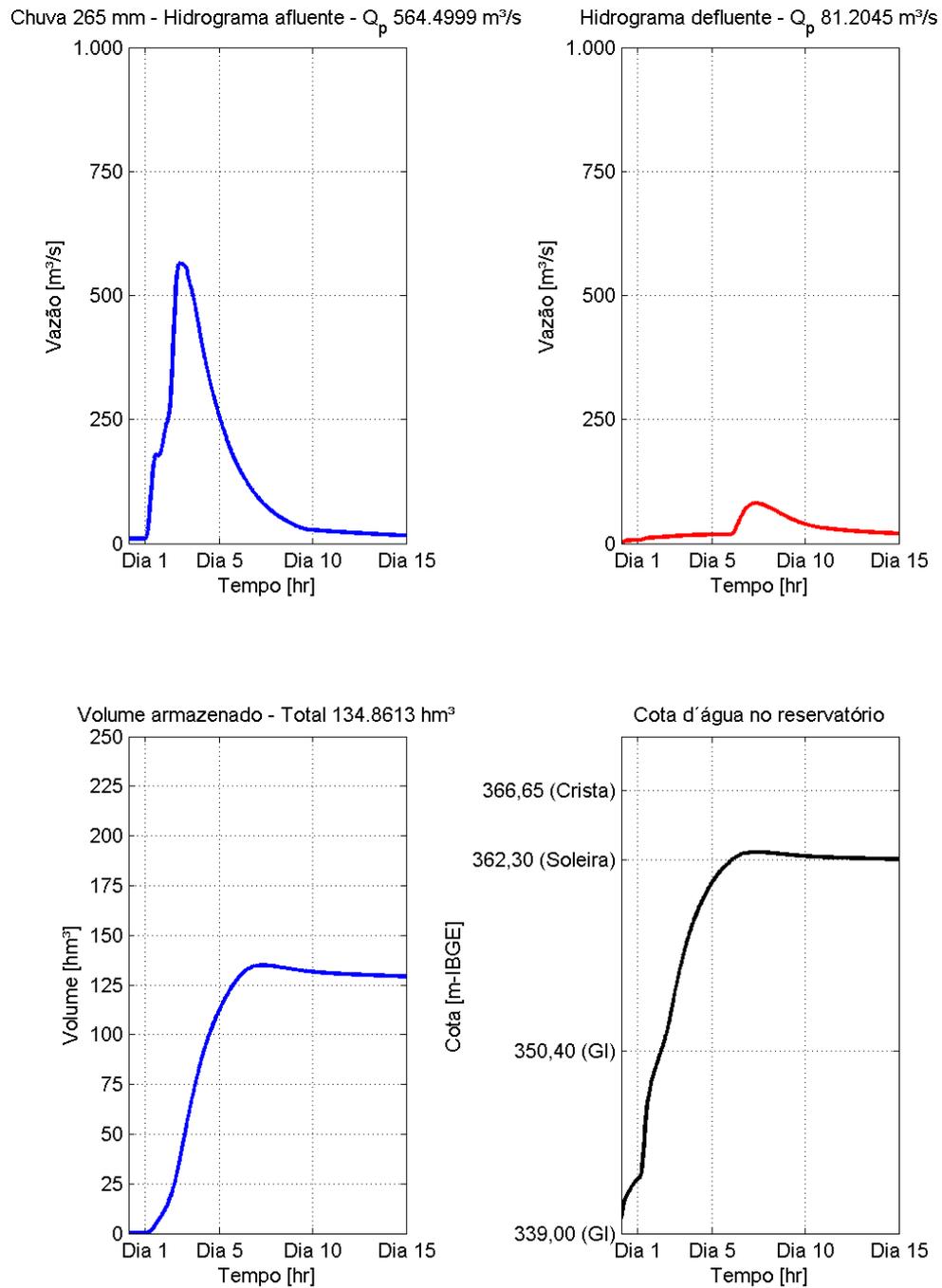


Figura 80. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 86 %.

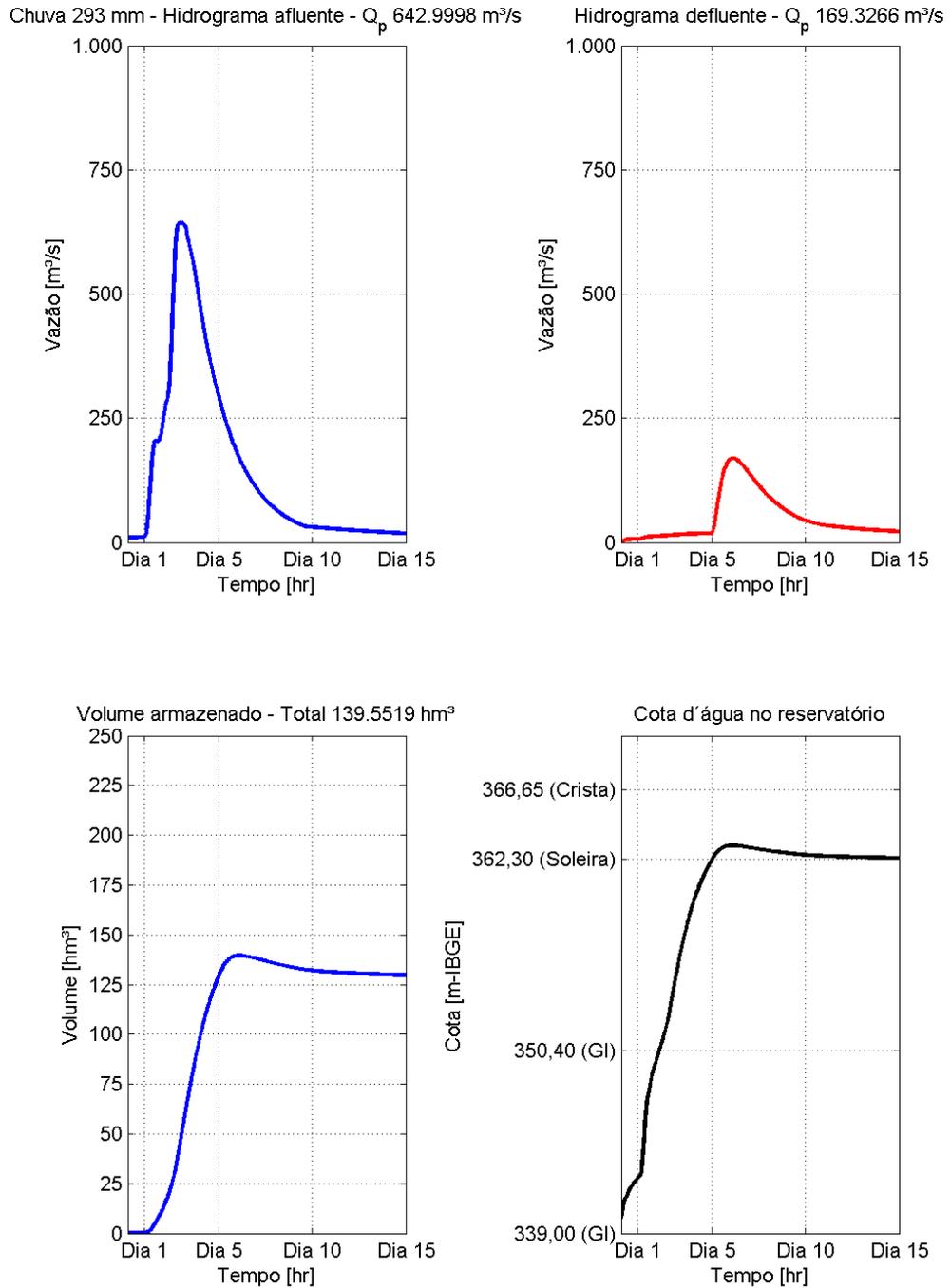


Figura 81. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 74 %.

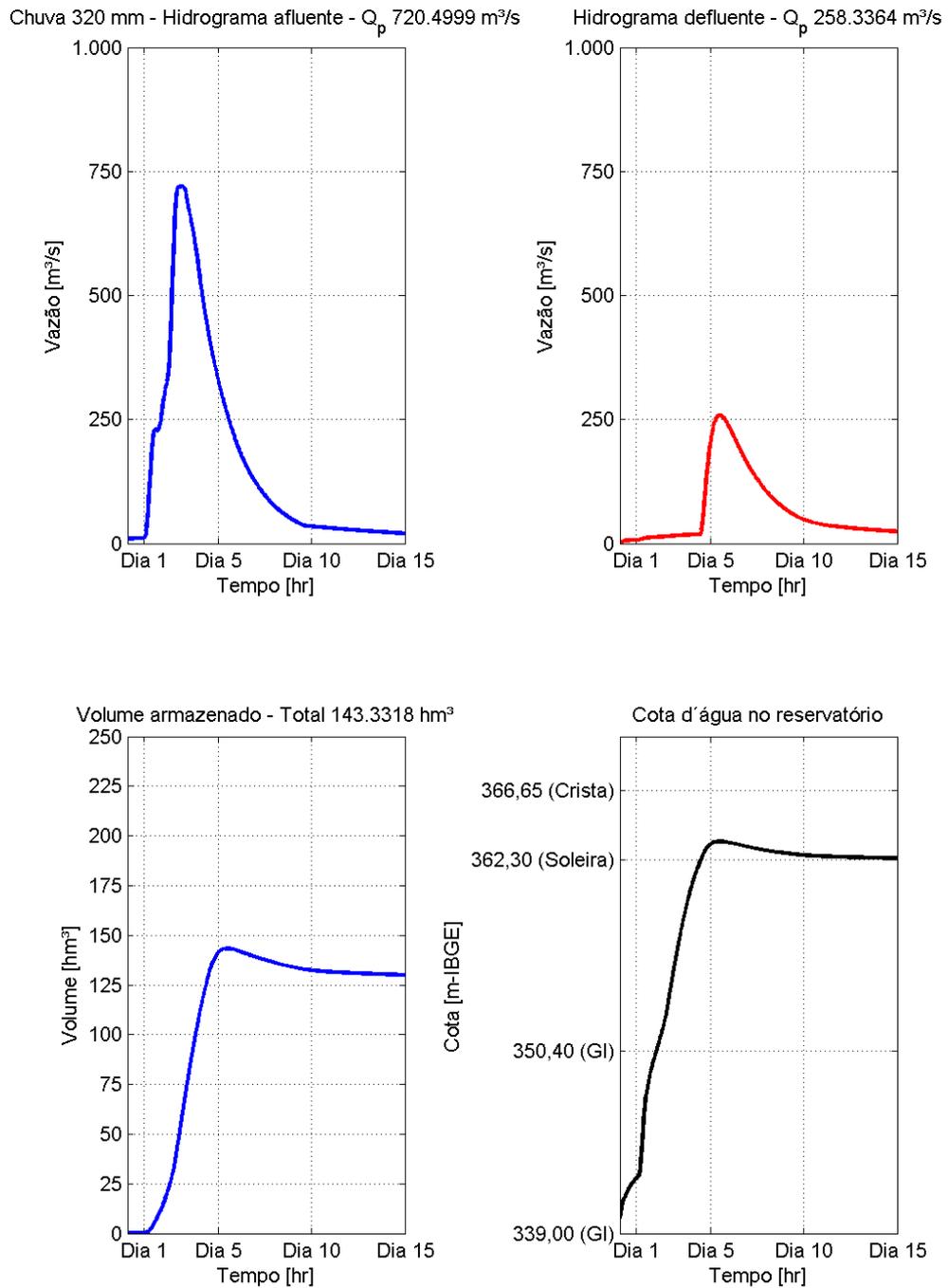


Figura 82. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 65 %.

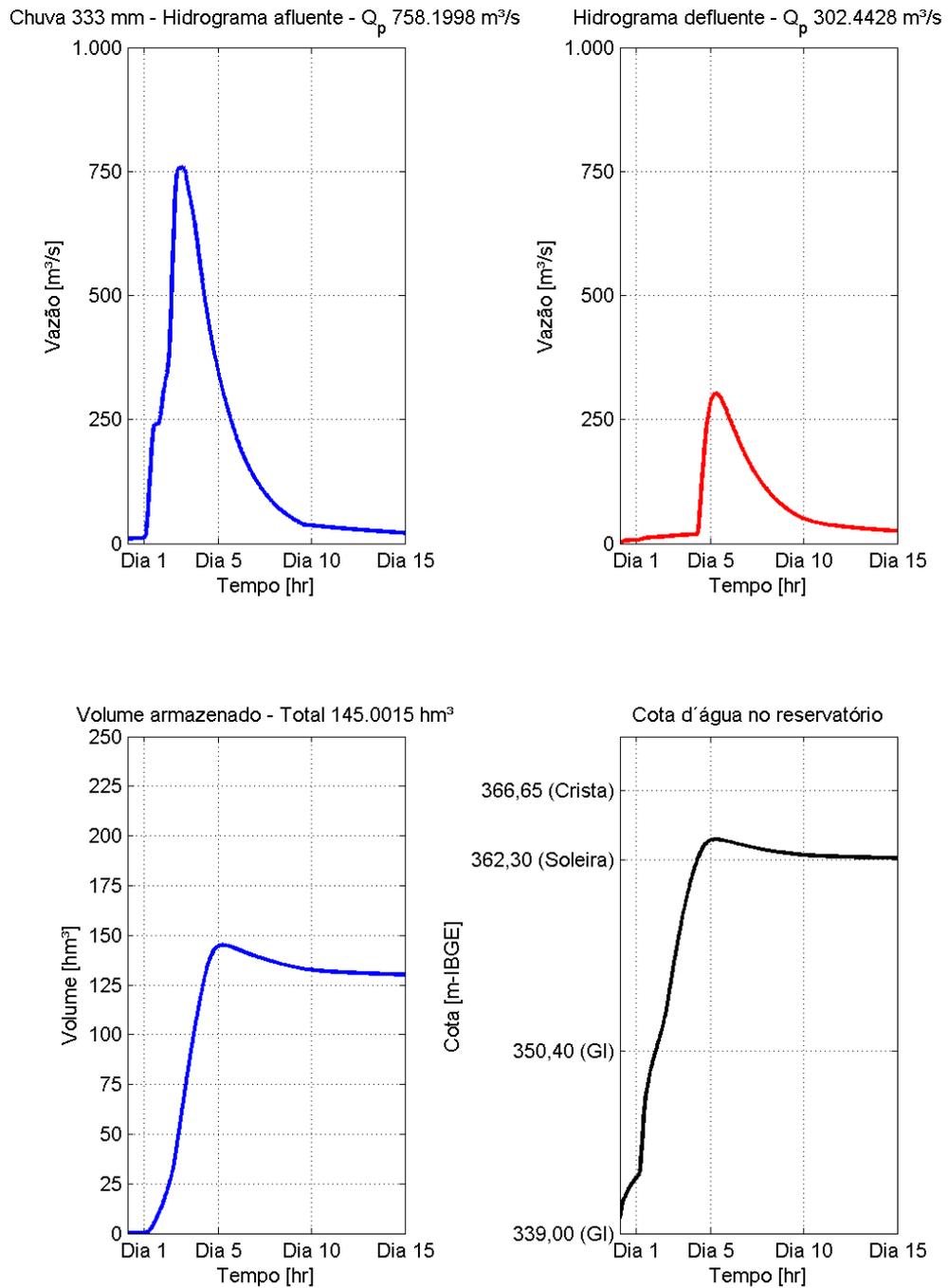


Figura 83. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 60 %.

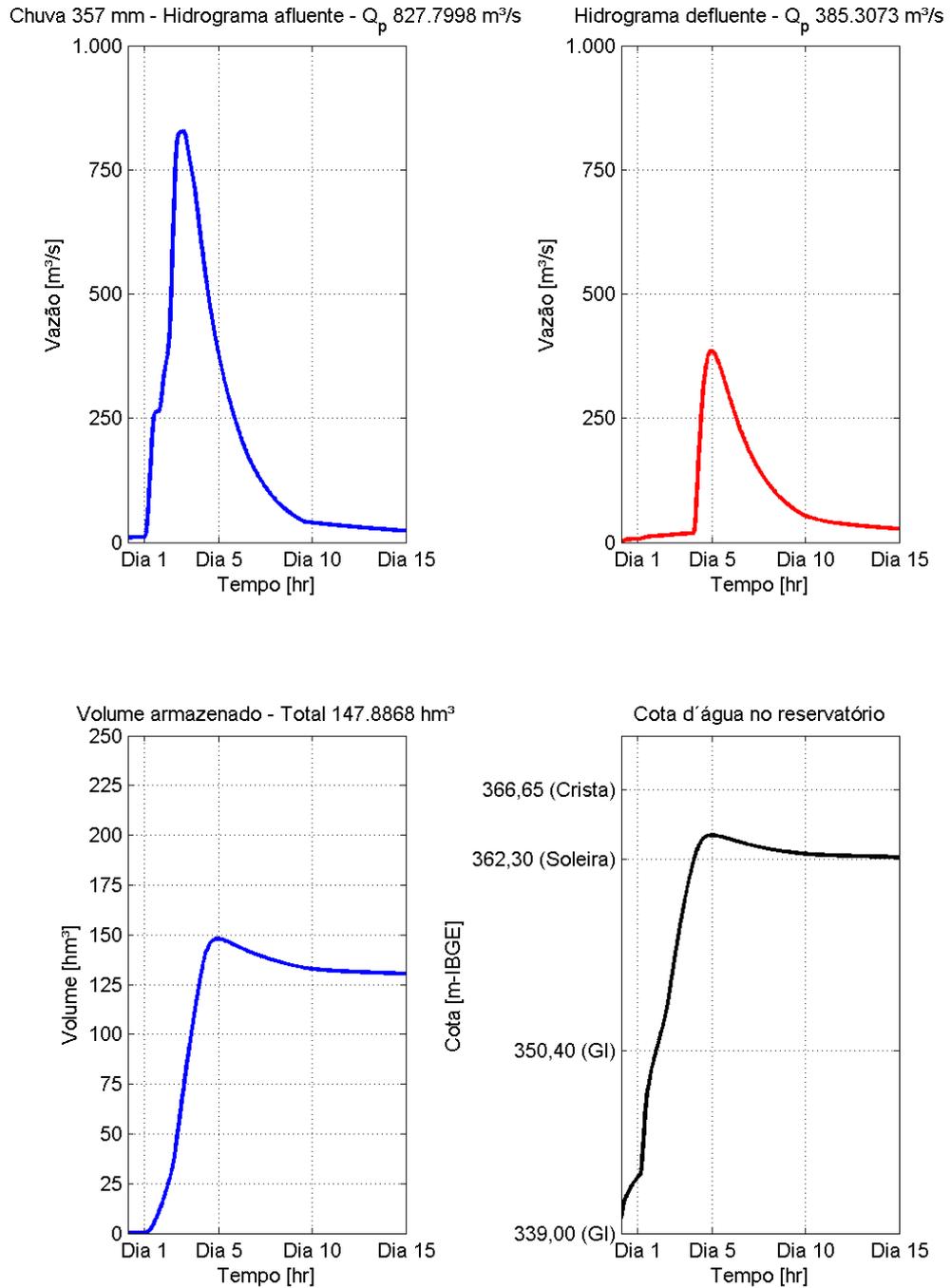


Figura 84. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 54 %.

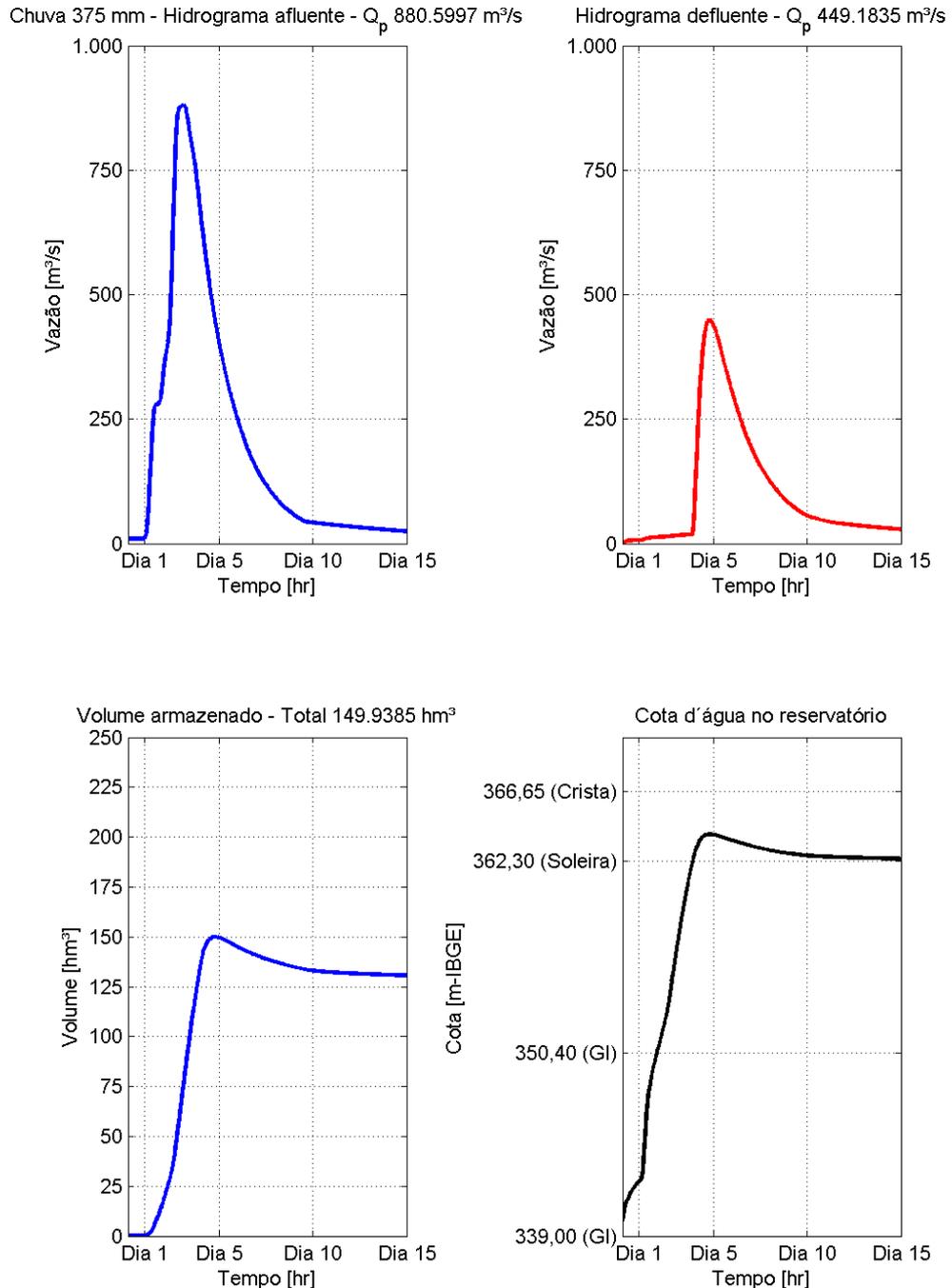


Figura 85. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 49 %.

Com a análise de enchimento, a variável de precipitação determina a interpretação do evento e o comportamento do armazenamento da água no reservatório. A chuva passa a ser o limiar para classificado do evento hidrológico e definição do nível de criticidade.

O limiar de 200 mm passa a ser considerado como o limite para início de uma situação de vertimento do reservatório. Para os eventos analisados, mesmo sob condição de vertimento, a Barragem Oeste abate mais de 50% da vazão de pico com a mesma proporção de contenção de volume total do hidrograma afluente.

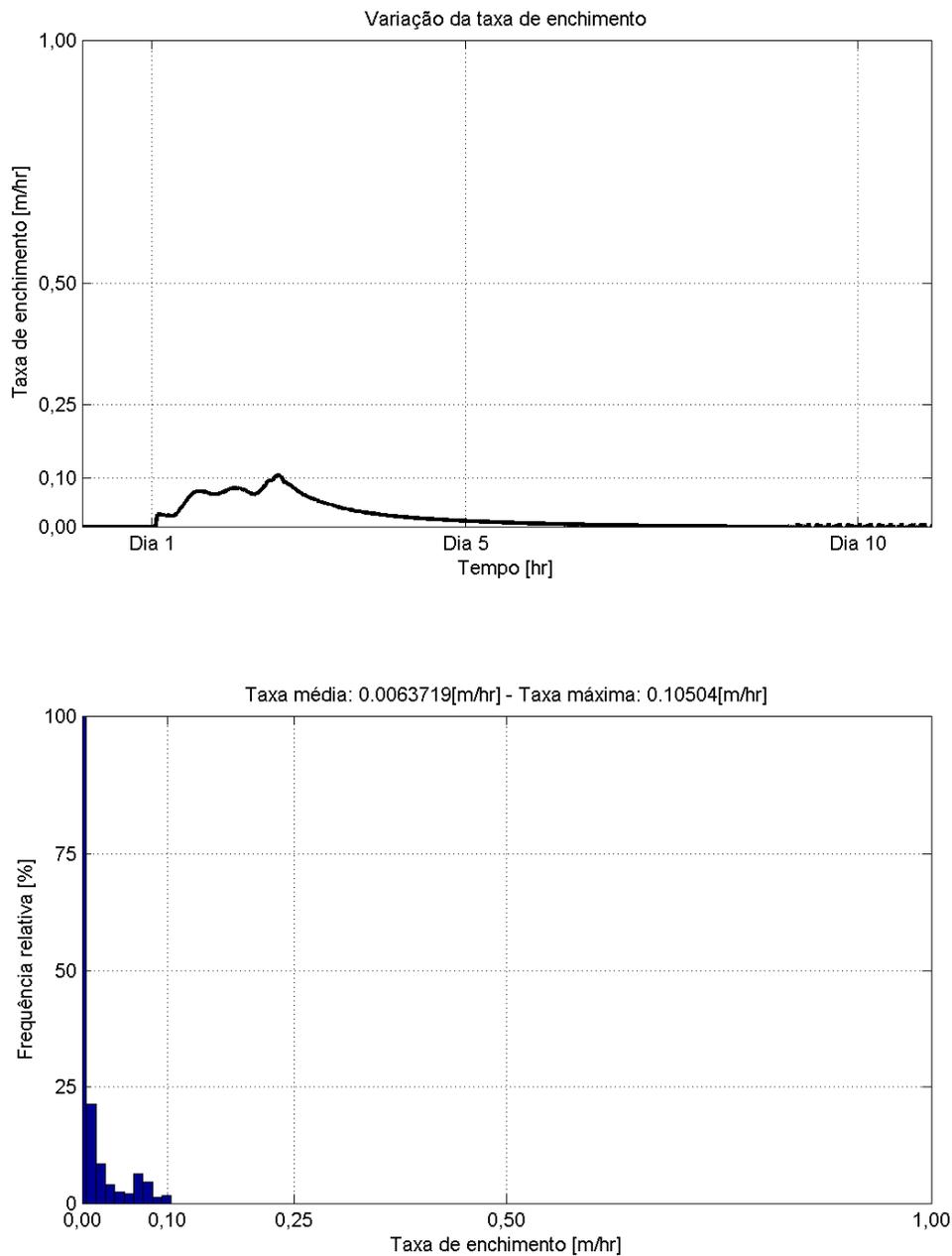


Figura 86. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.

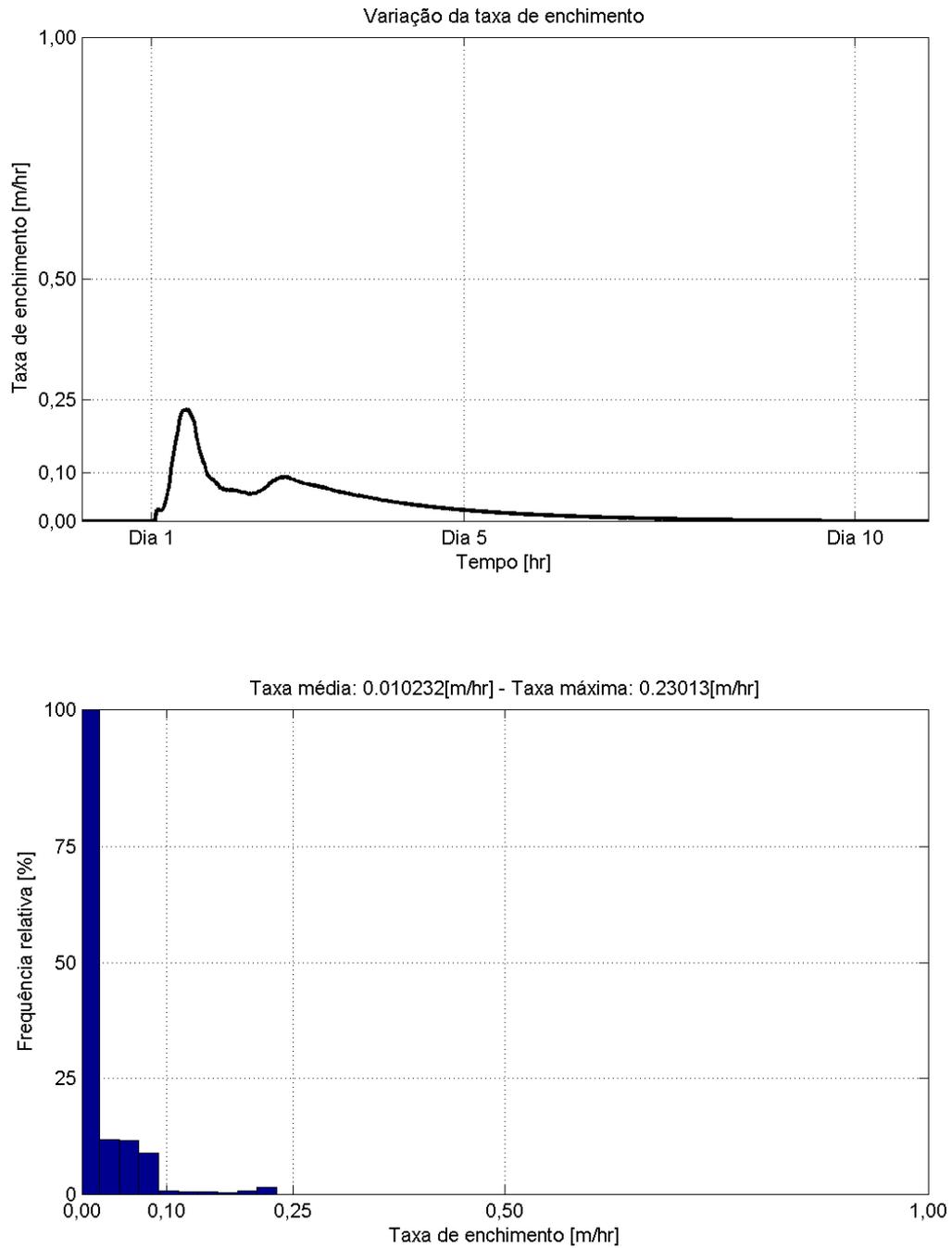


Figura 87. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.

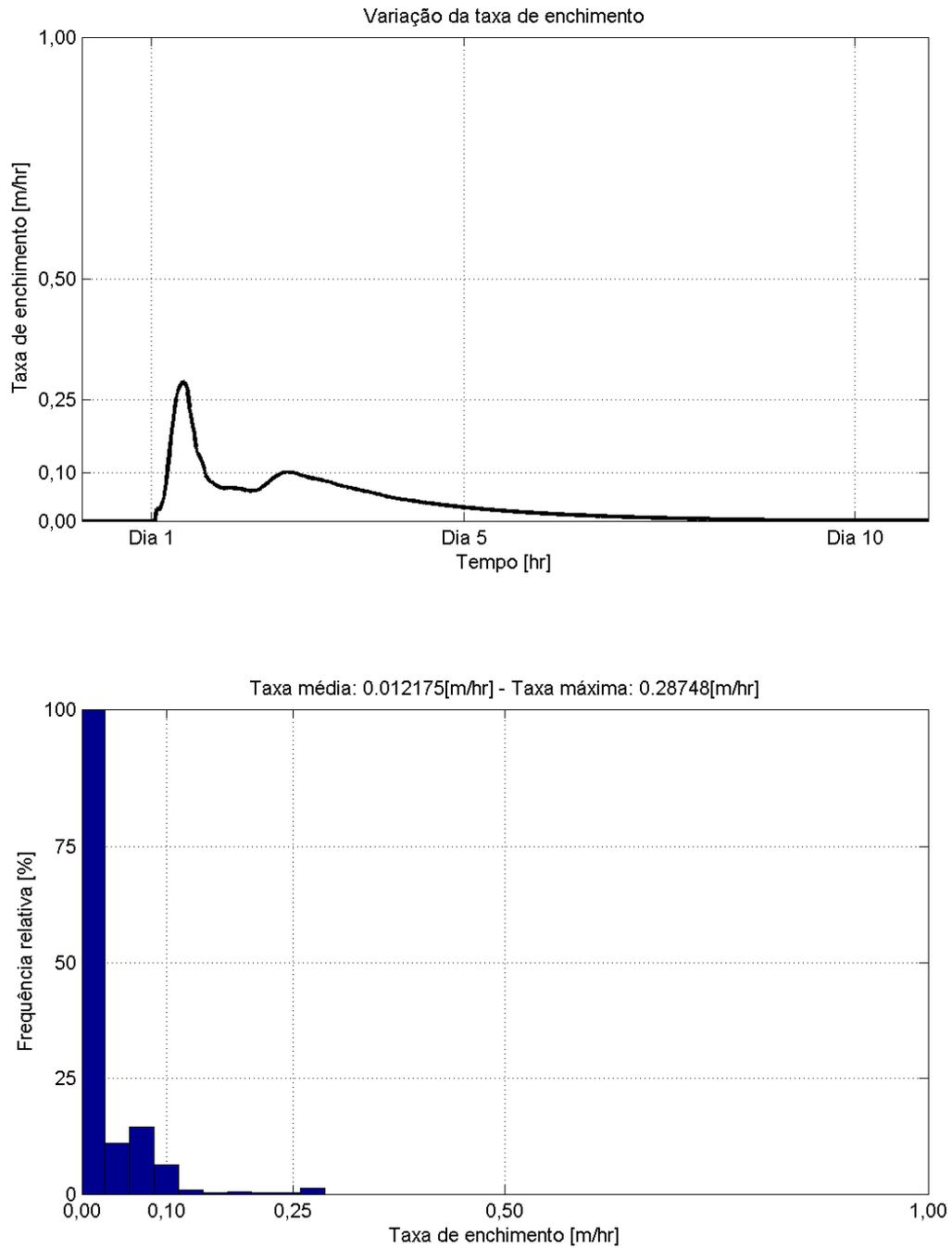


Figura 88. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.

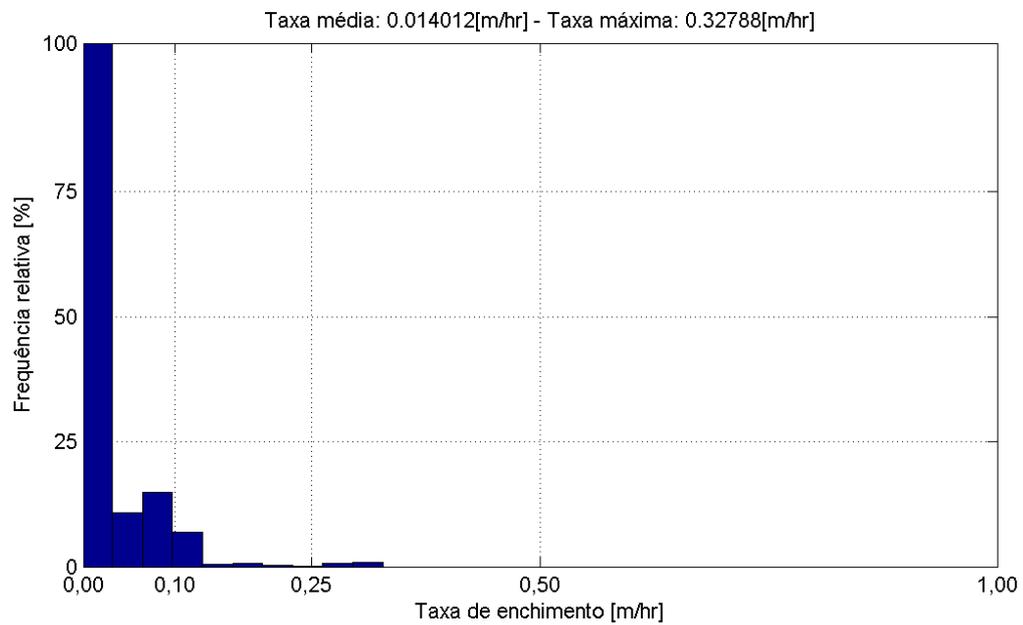
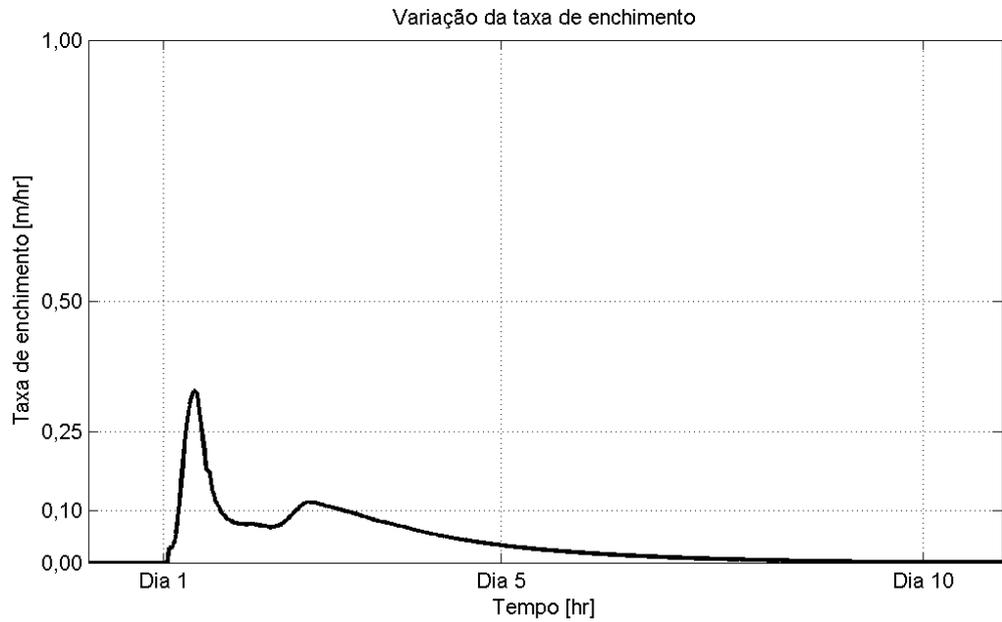


Figura 89. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.

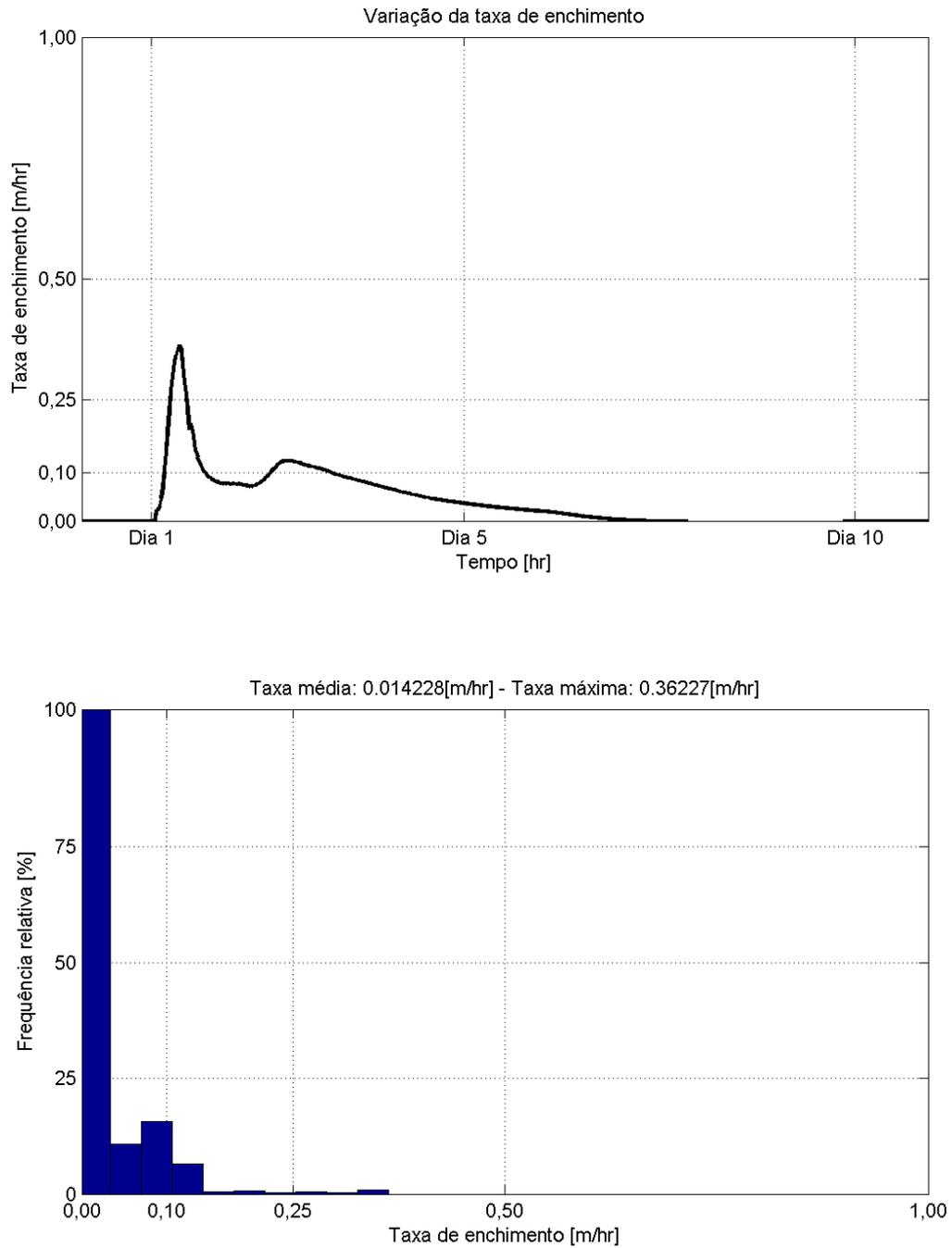


Figura 90. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.

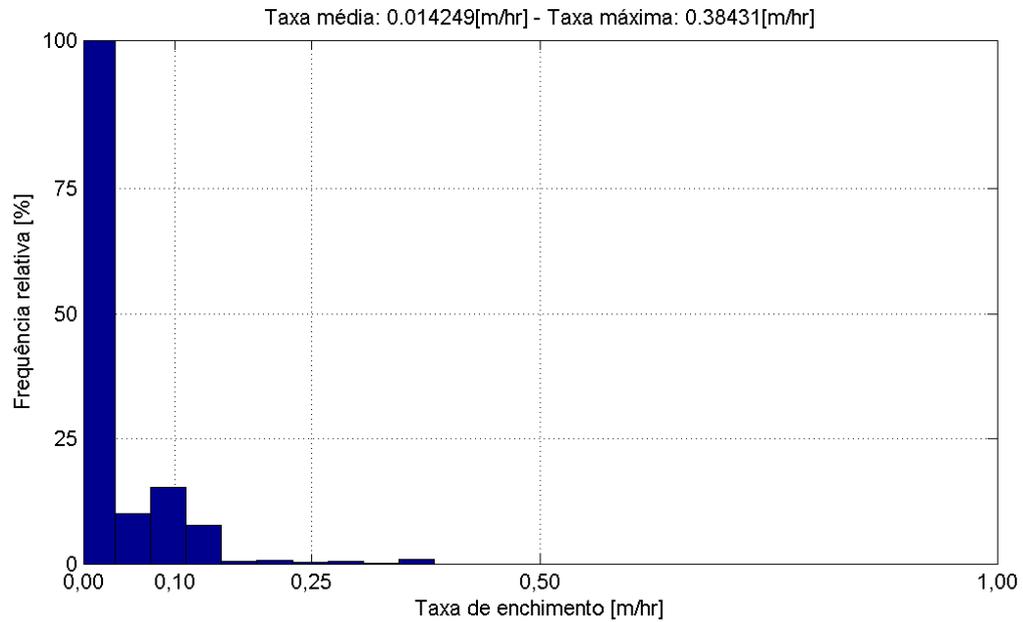
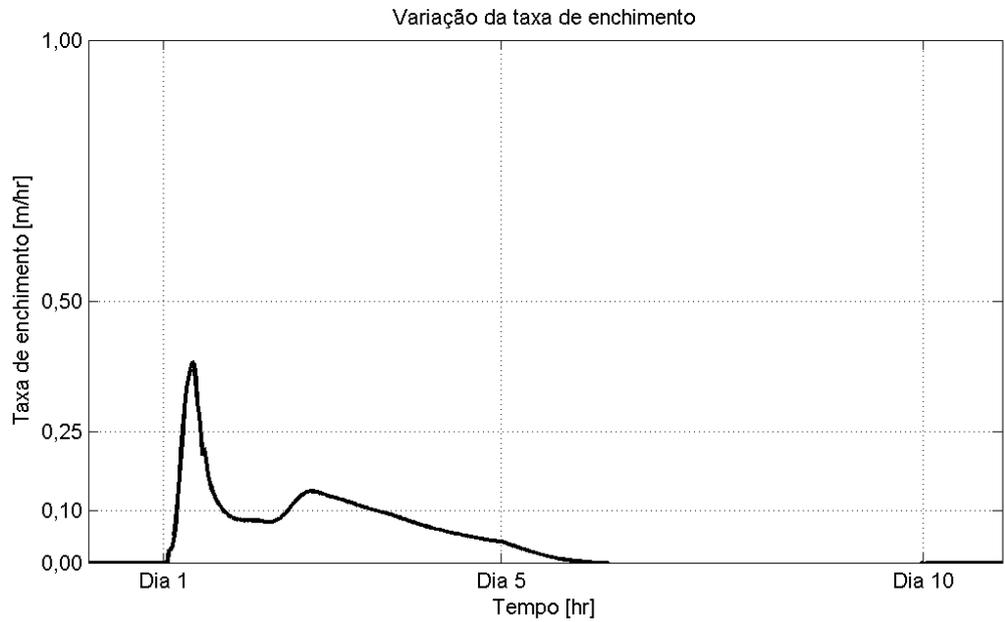


Figura 91. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.

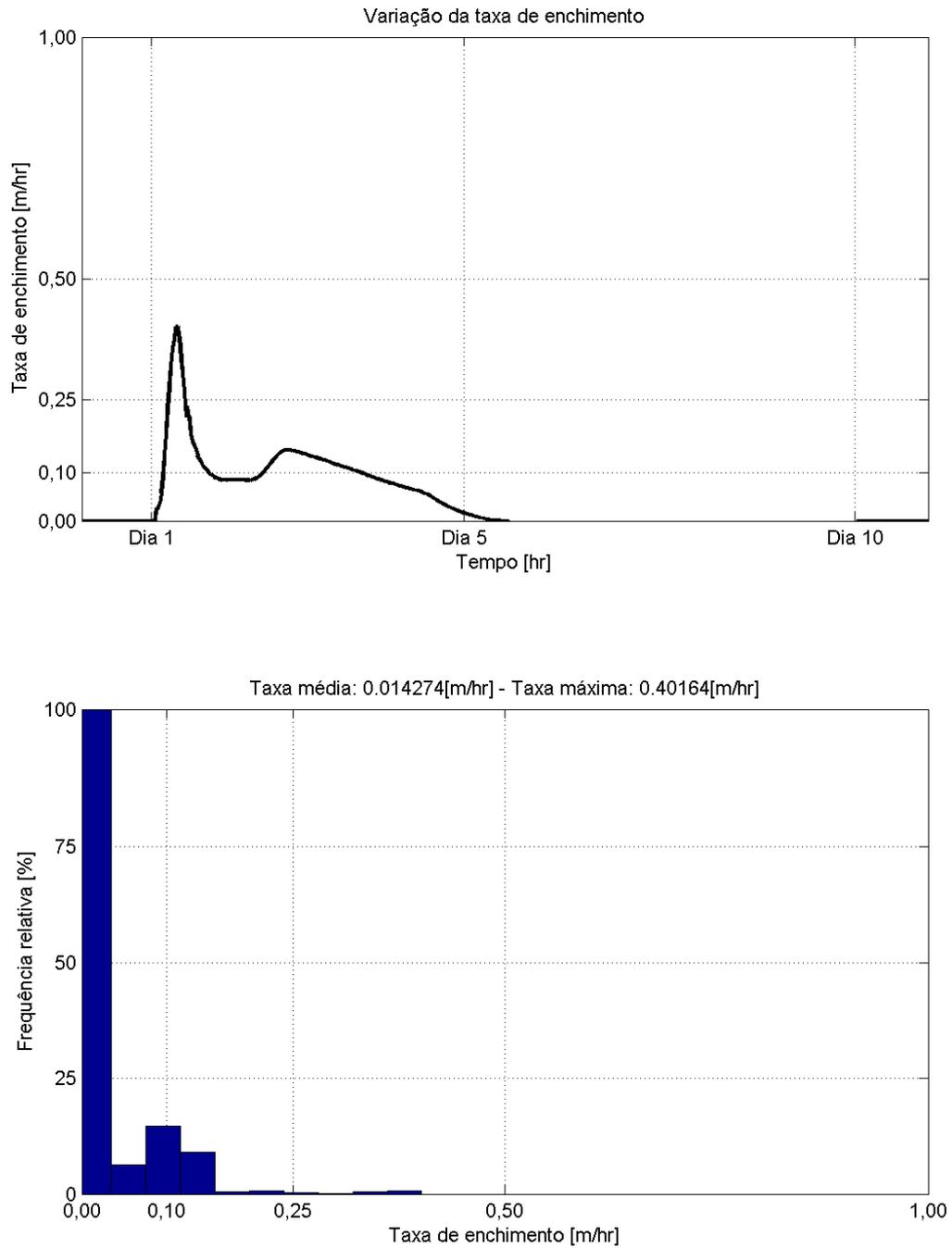


Figura 92. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.

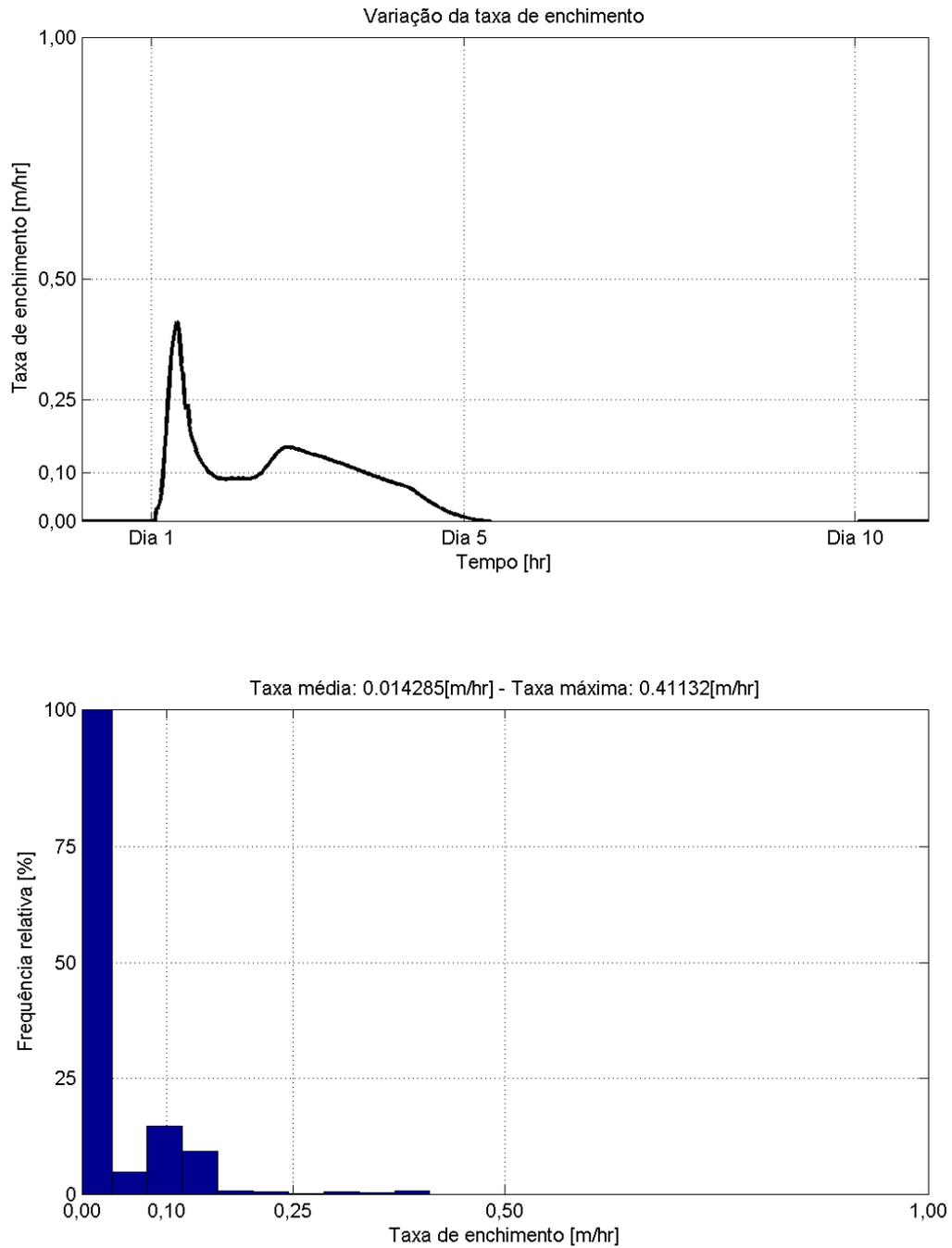


Figura 93. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.

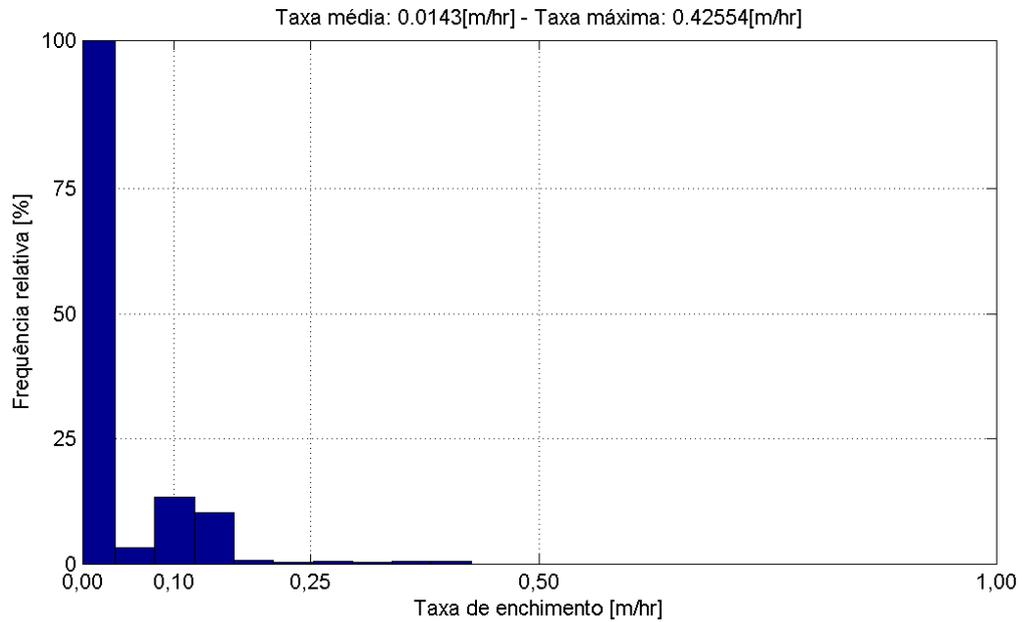
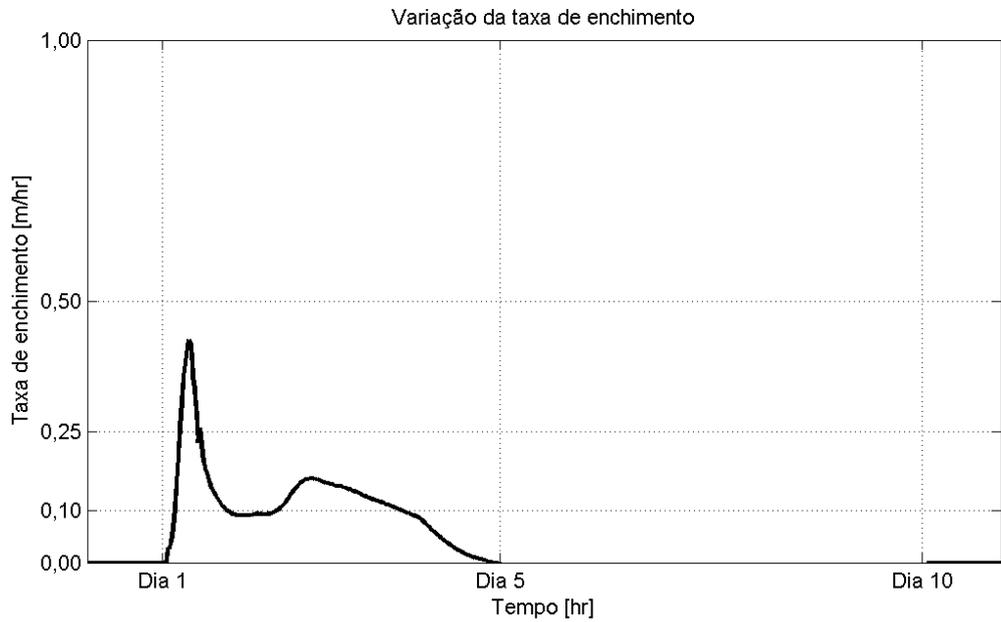


Figura 94. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.

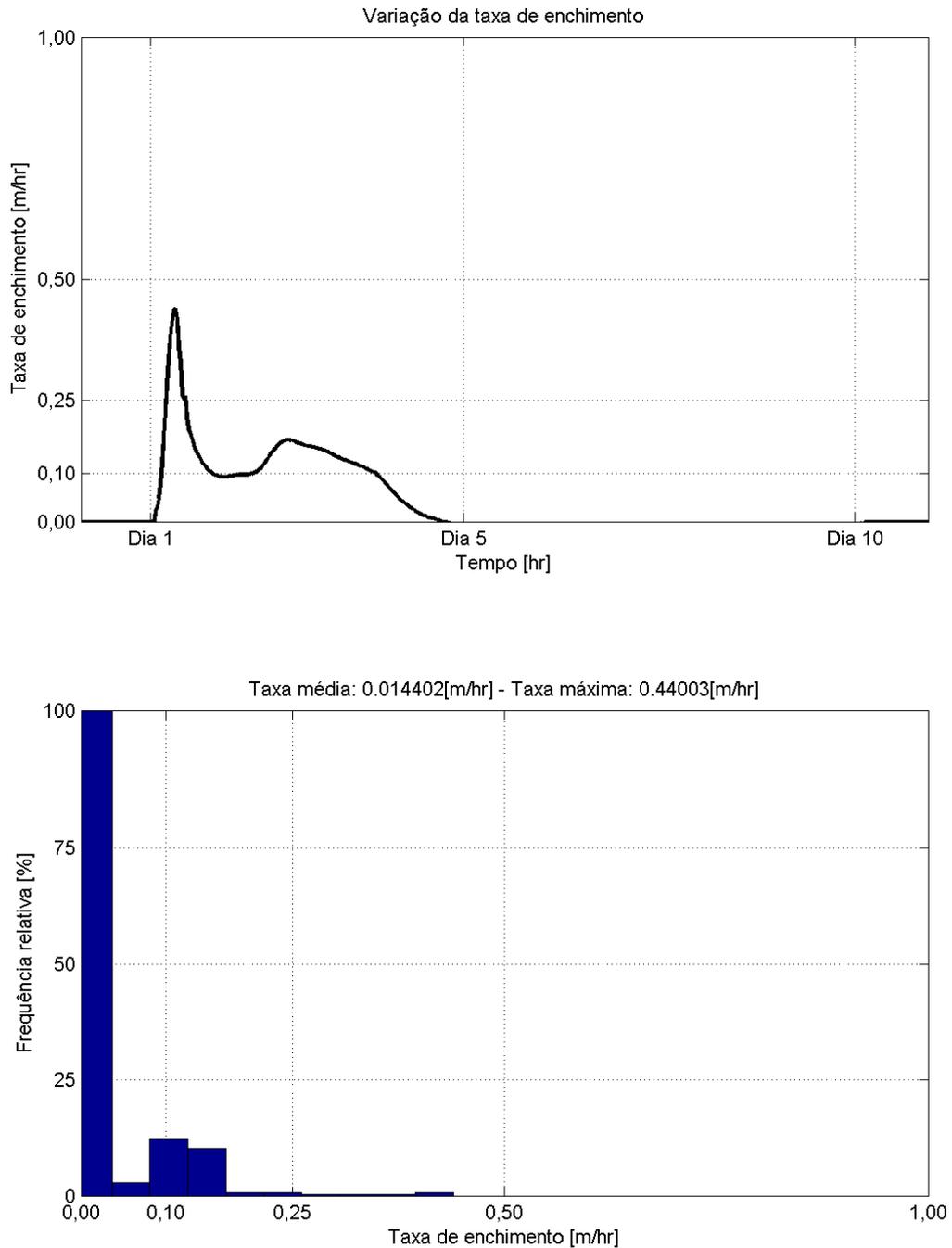


Figura 95. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.

3.5.3 SIMULAÇÃO DE Esvaziamento

Com uso do modelo numérico hidráulico, as taxas de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste são apresentadas para cada estado hidráulico esperado do reservatório em relação à chuva de projeto. Na Tabela 8 está o resumo dos resultados operacionais.

Tabela 8. Esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/hr]	Máxima[m/hr]	Tempo Total [d]
105		0,07	0,80	4
173		0,03	0,74	11
208		0,04	0,75	14
243		0,04	0,73	17
265		0,04	0,73	17
293		0,04	0,73	17
320		0,04	0,63	17
333		0,04	0,63	17
357		0,04	0,63	17
375		0,04	0,63	17

Na Figura 96 estão ilustrados os períodos de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste, considerando uma margem de 3 dias corridos em caso de indisponibilidade de 1 comporta do descarregador de fundo.

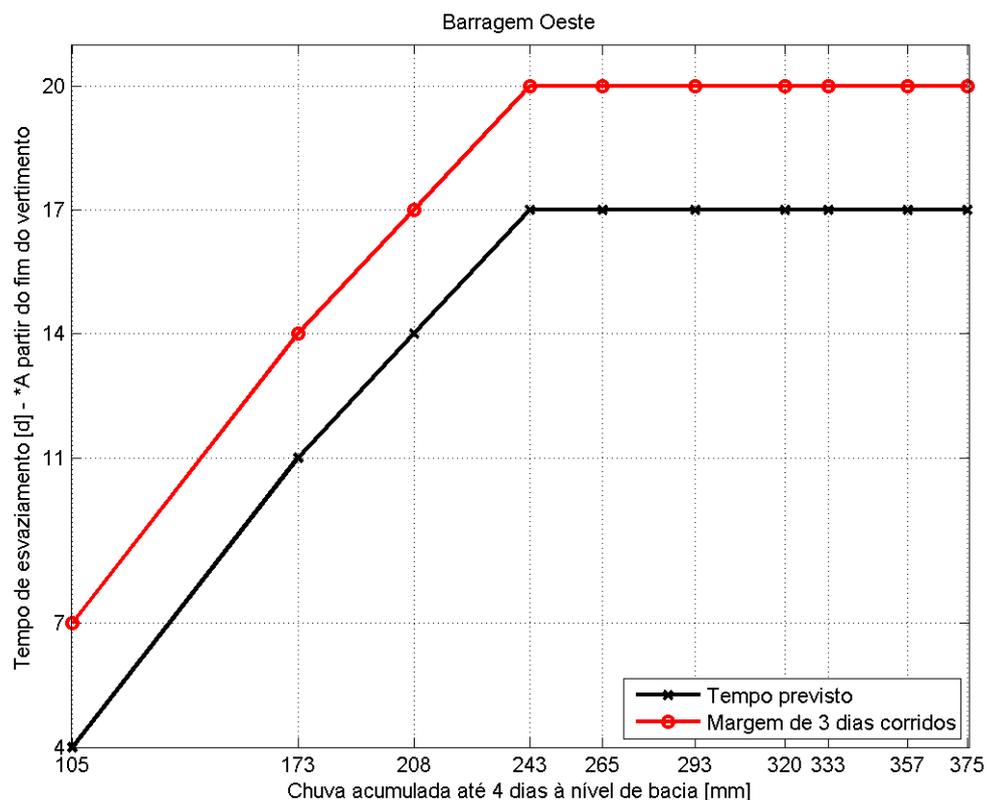


Figura 96. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste.

A análise numérica de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste foi desenvolvida para a passagem completa do evento hidrológico. Os critérios de início de esvaziamento foram a vazão igual ou menor do que 400 m³/s na seção de Rio do Sul e

vertimento nulo pela soleira livre do vertedor. Nas figuras abaixo estão resumidas as simulações de esvaziamento do reservatório para as chuvas de 105 mm, 173 mm, 208 mm, 265 mm, 293 mm e 375 mm.

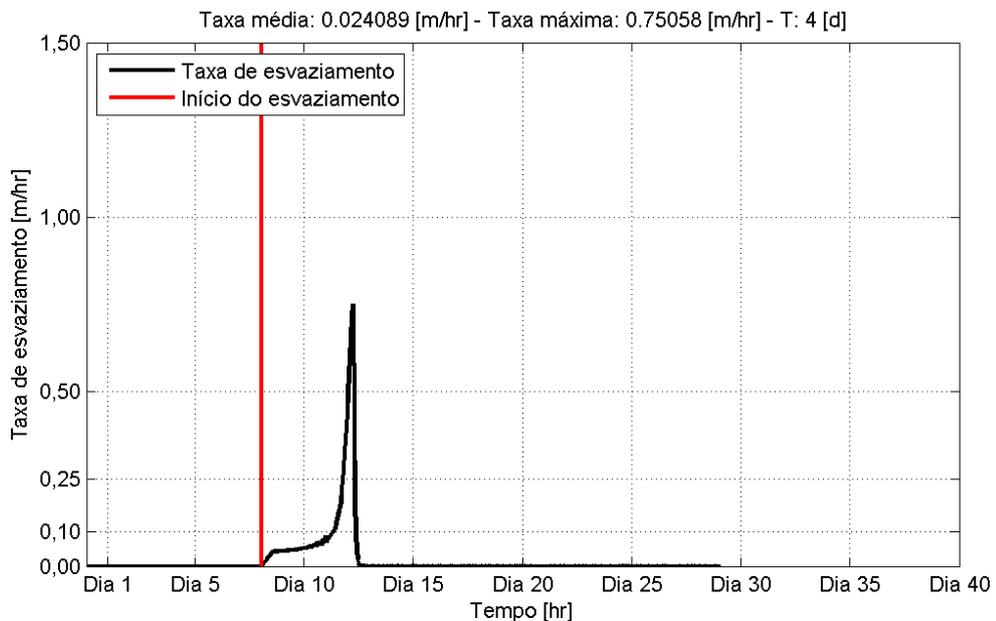
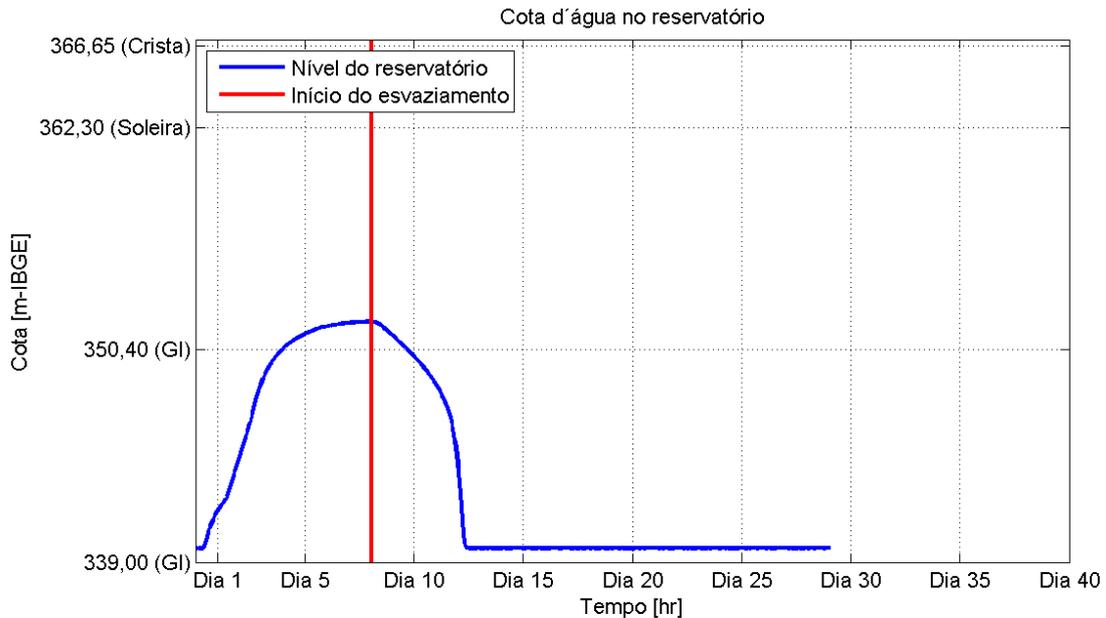


Figura 97. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 105 mm.

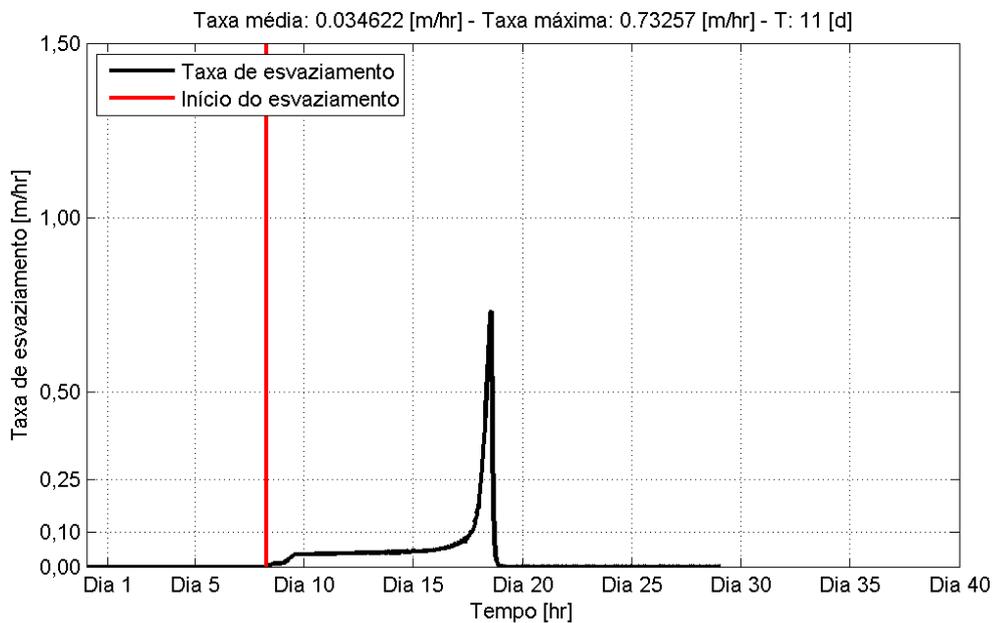
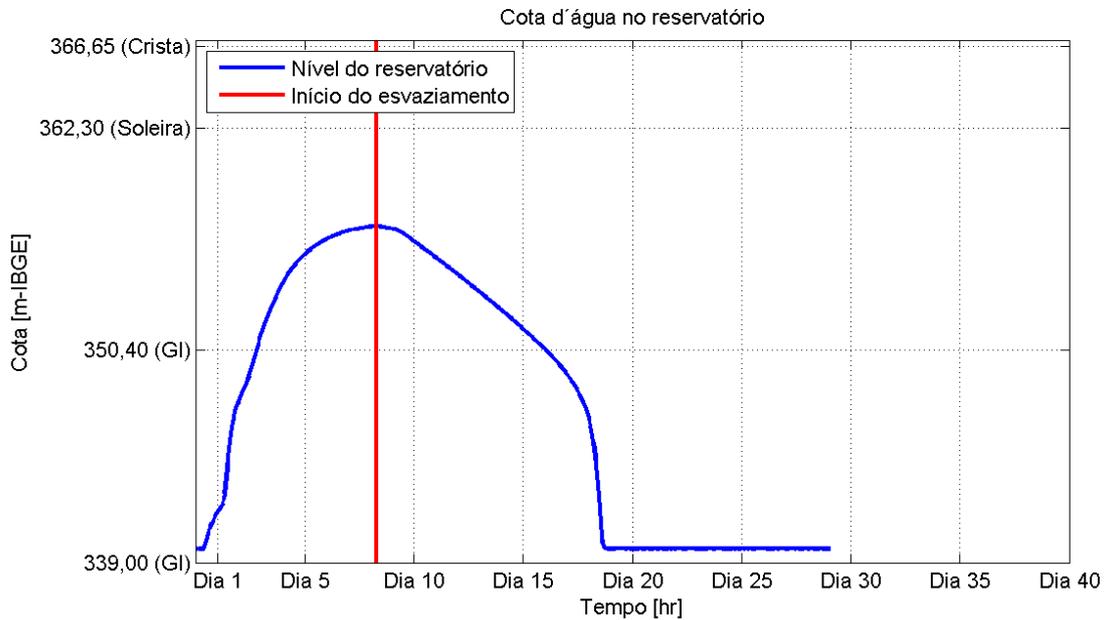


Figura 98. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 173 mm.

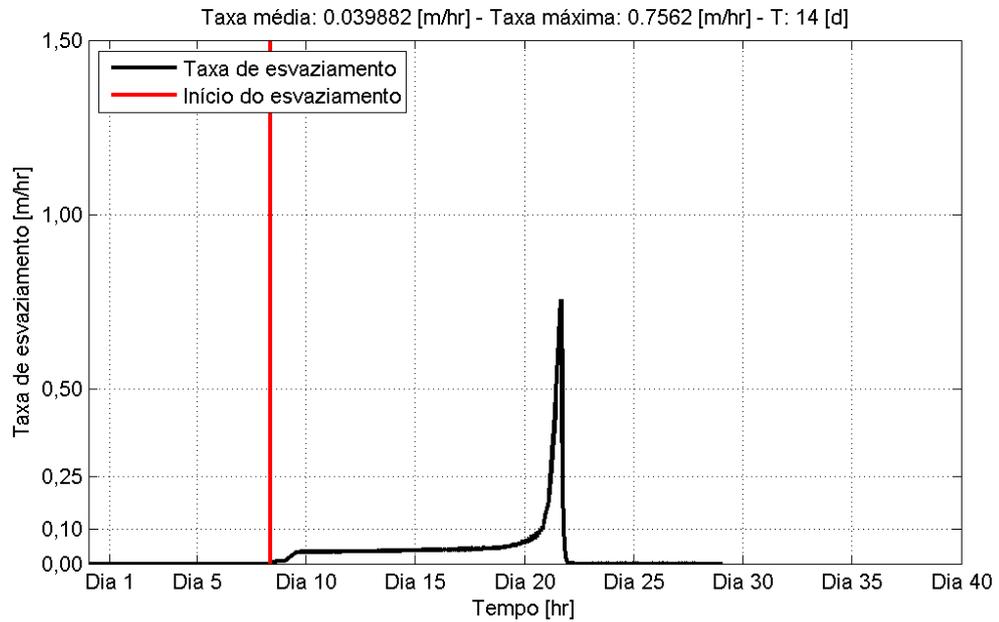
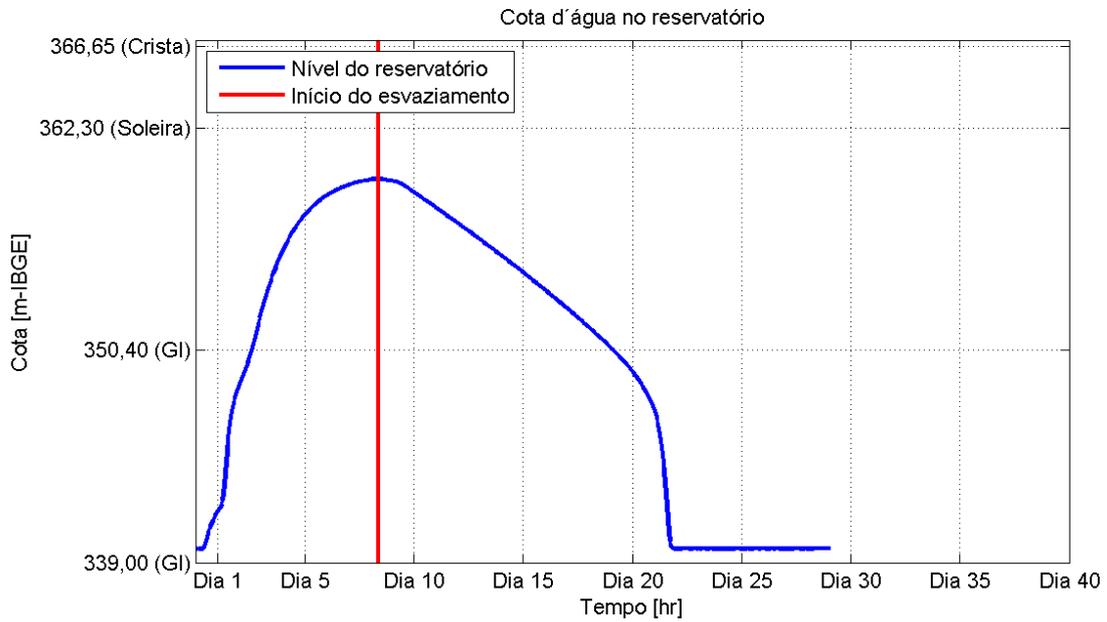


Figura 99. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 208 mm.

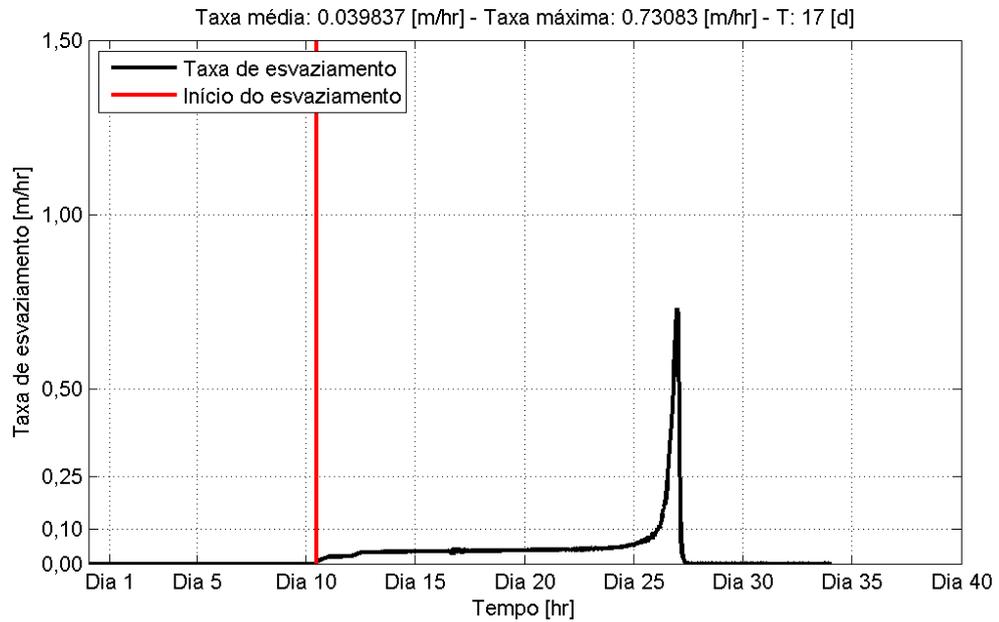
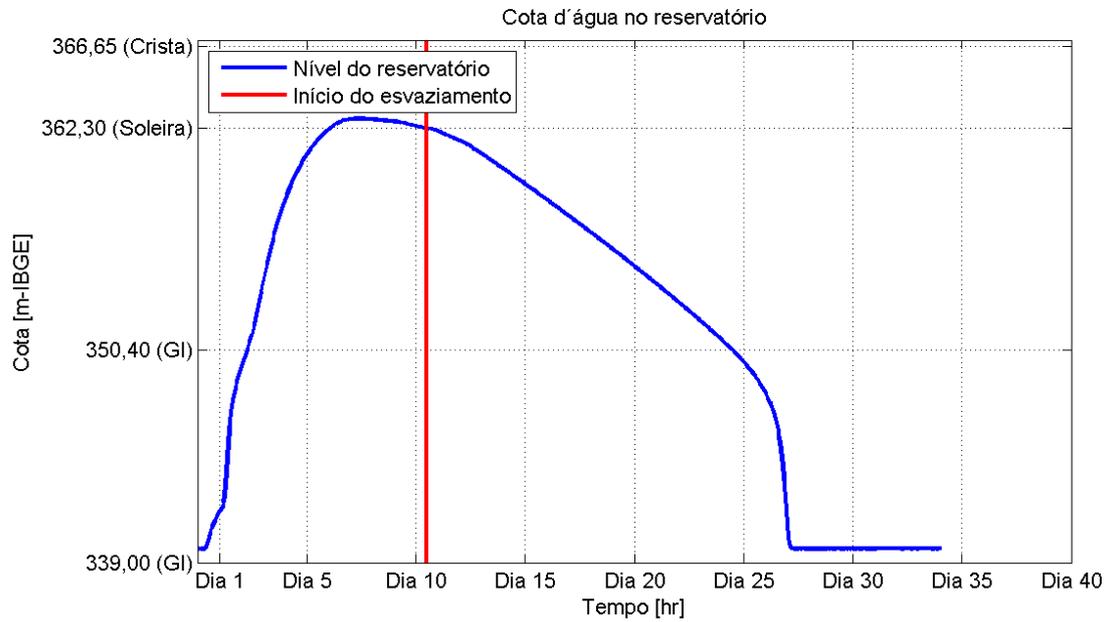


Figura 100. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 265 mm.

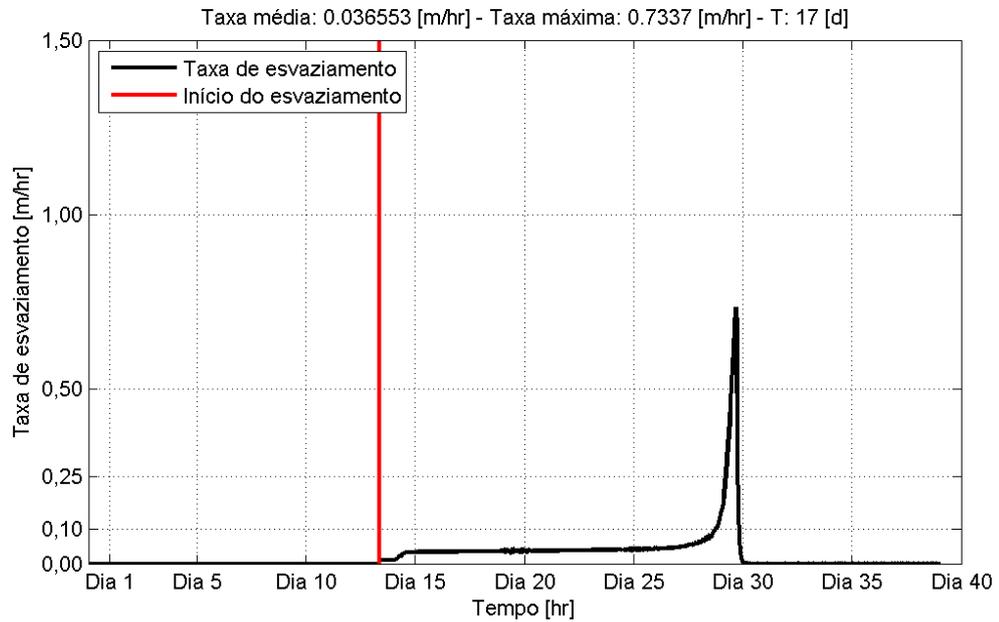
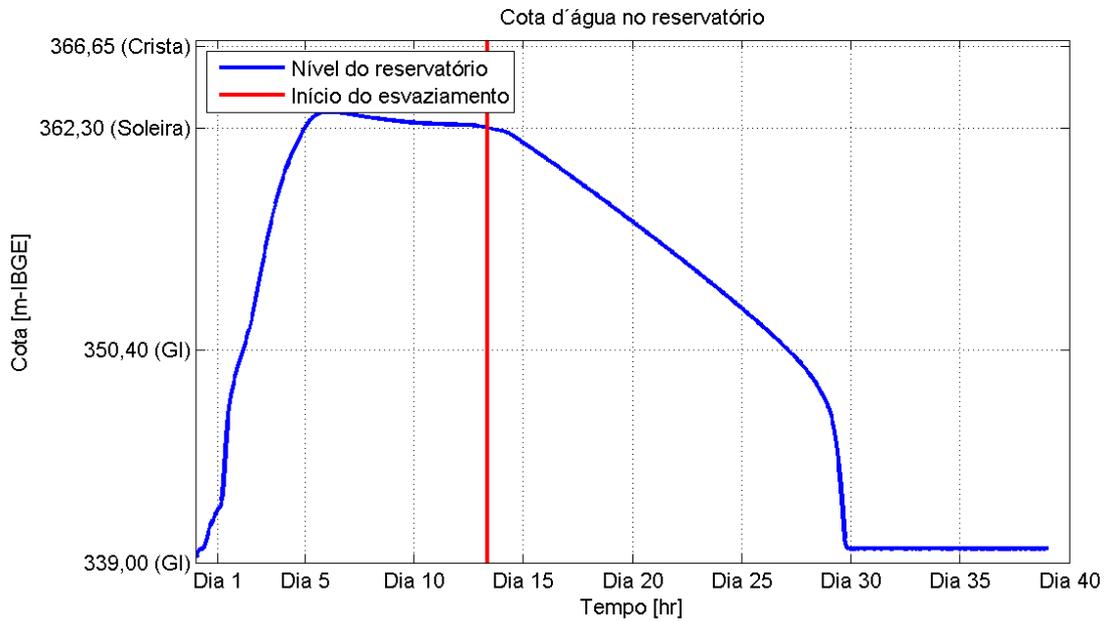


Figura 101. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 293 mm.

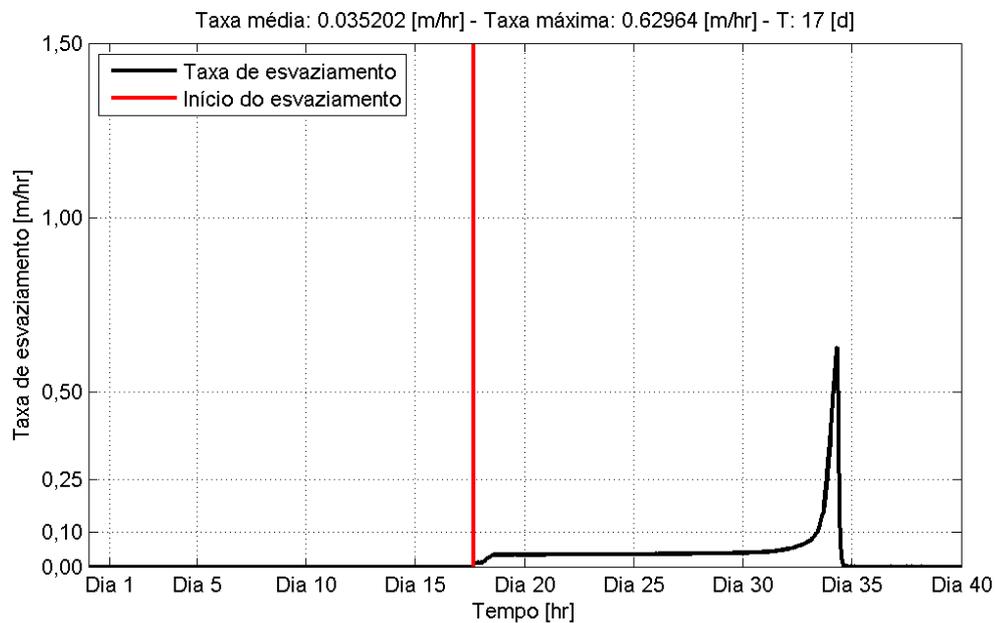
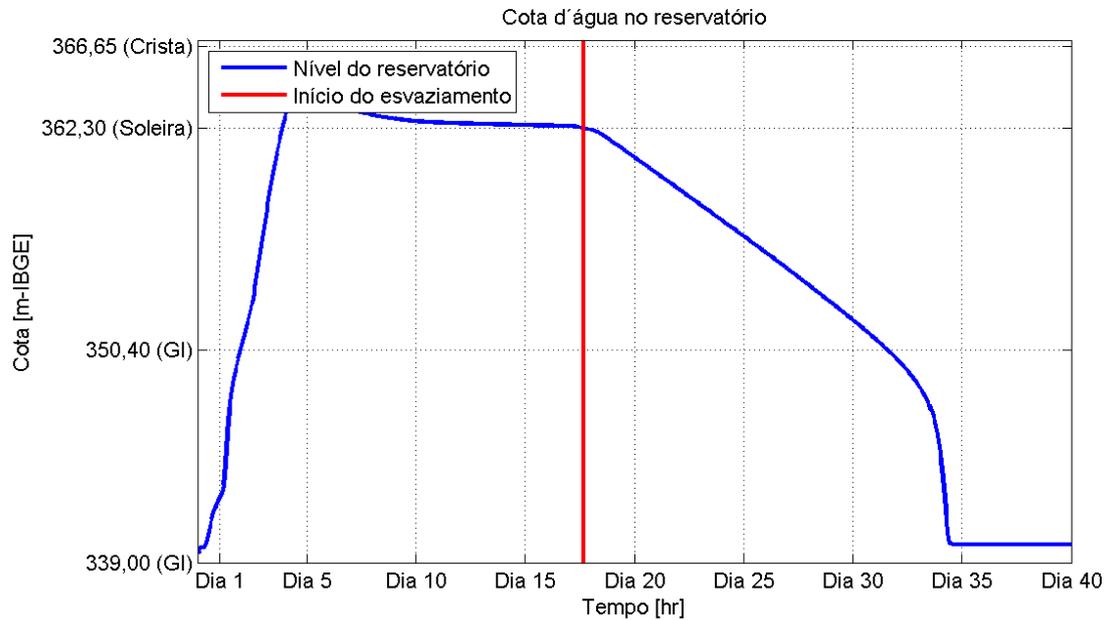


Figura 102. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Oeste. Chuva 375 mm.

3.5.4 SIMULAÇÃO OTIMIZADA DO VERTEDOURO

Foram realizadas simulações adicionais para as chuvas de projeto 293 mm e 320 mm onde a capacidade máxima de retenção do reservatório é superada. Foram estudados dois tipos de operação para o excedente de volume correspondente as referidas chuvas de projeto:

- Operação favorável ao vertimento: mantém-se as comportas das galerias de descarga fechadas e o excedente de volume é defluído pelo vertedouro.
- Operação minimizando o vertimento: é realizada a abertura das comportas das galerias de descarga a fim de minimizar que o excedente de volume seja defluído pelo vertedouro.

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam as vazões defluentes totais para as operações “favorável ao vertimento” e “minimizando o vertimento” para as chuvas de projeto 293 mm e 320 mm, respectivamente.

Observa-se que para as duas chuvas de projeto as vazões defluentes totais são maiores quando a operação é “minimizando o vertimento”, ou seja, é realizada a abertura das comportas das galerias de descarga. Com isso, pode-se afirmar que a operação “favorável ao vertimento” reduz os níveis d’água em Rio do Sul, comparando-se com a operação “minimizando o vertimento”.

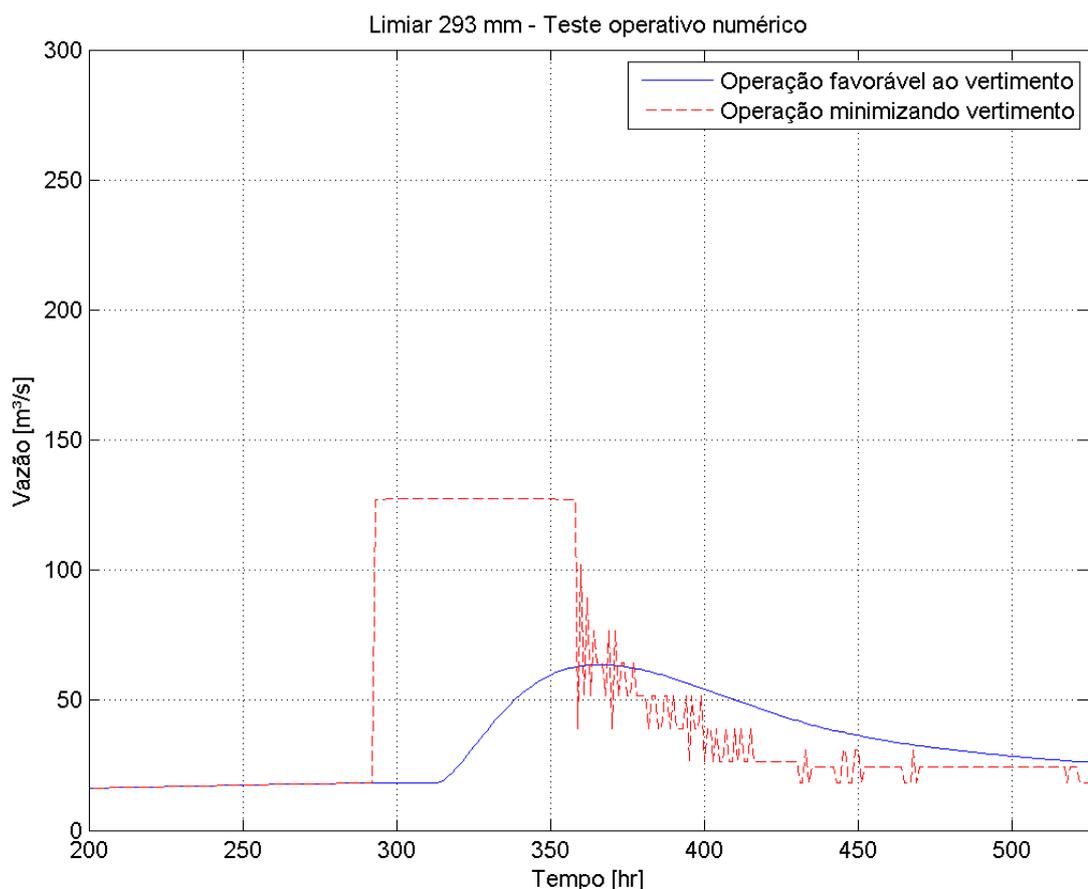


Figura 103. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 293 mm.

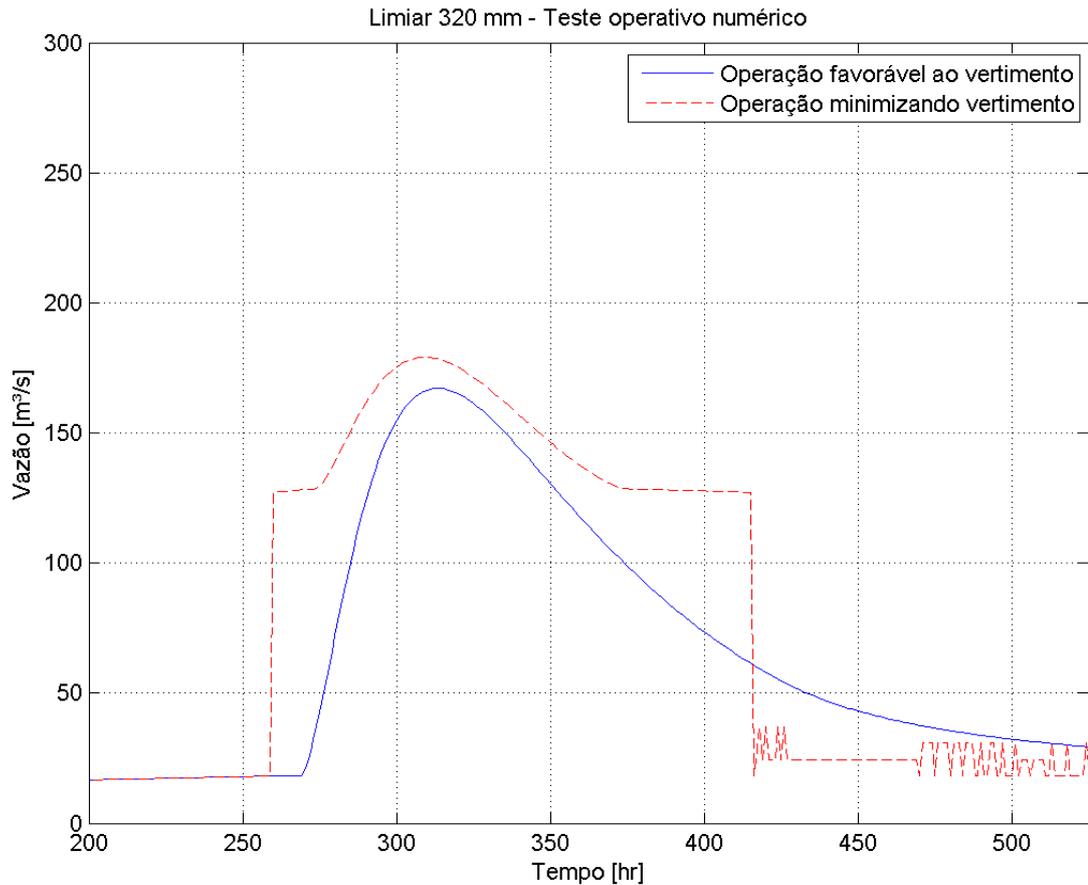


Figura 104. Comparação entre as vazões na operação favorável ao vertimento e operação minimizando o vertimento (seção da barragem) – chuva de projeto 320 mm.

A abertura das comportas do descarregador de fundo devem ser consideradas se a cota d'água no reservatório atingir 365,60 [m-IBGE]. Tal condição hidráulica seria catastrófica, e a medida de abertura das comportas do descarregador de fundo nessa situação é uma forma de atenuar o risco de galgamento das estruturas¹⁰.

3.5.5 ANÁLISE COMPARATIVA – NATURAL E ATUAL

A análise comparativa é a verificação numérica, com base modelo numérico hidráulico integrado de Taió, Ituporanga e Rio do Sul, de como a inundação se comporta no entorno da seção de restrição em Rio do Sul. Os cenários de inundação reconstituídos em função das chuvas de projeto são apresentados naturalmente, numa condição teórica sem a construção da Barragem Oeste e Barragem Sul, e para a situação atual.

¹⁰ Para o presente ciclo de trabalhos, o descarregador lateral ou túnel, não está em condições adequadas de operação. Desta forma, não deve ser considerado como opção de dispositivo de descarga numa situação extrema ou anormal de operação do reservatório da Barragem Oeste.



Código: 602-SDC-RT-HID-APE-0001

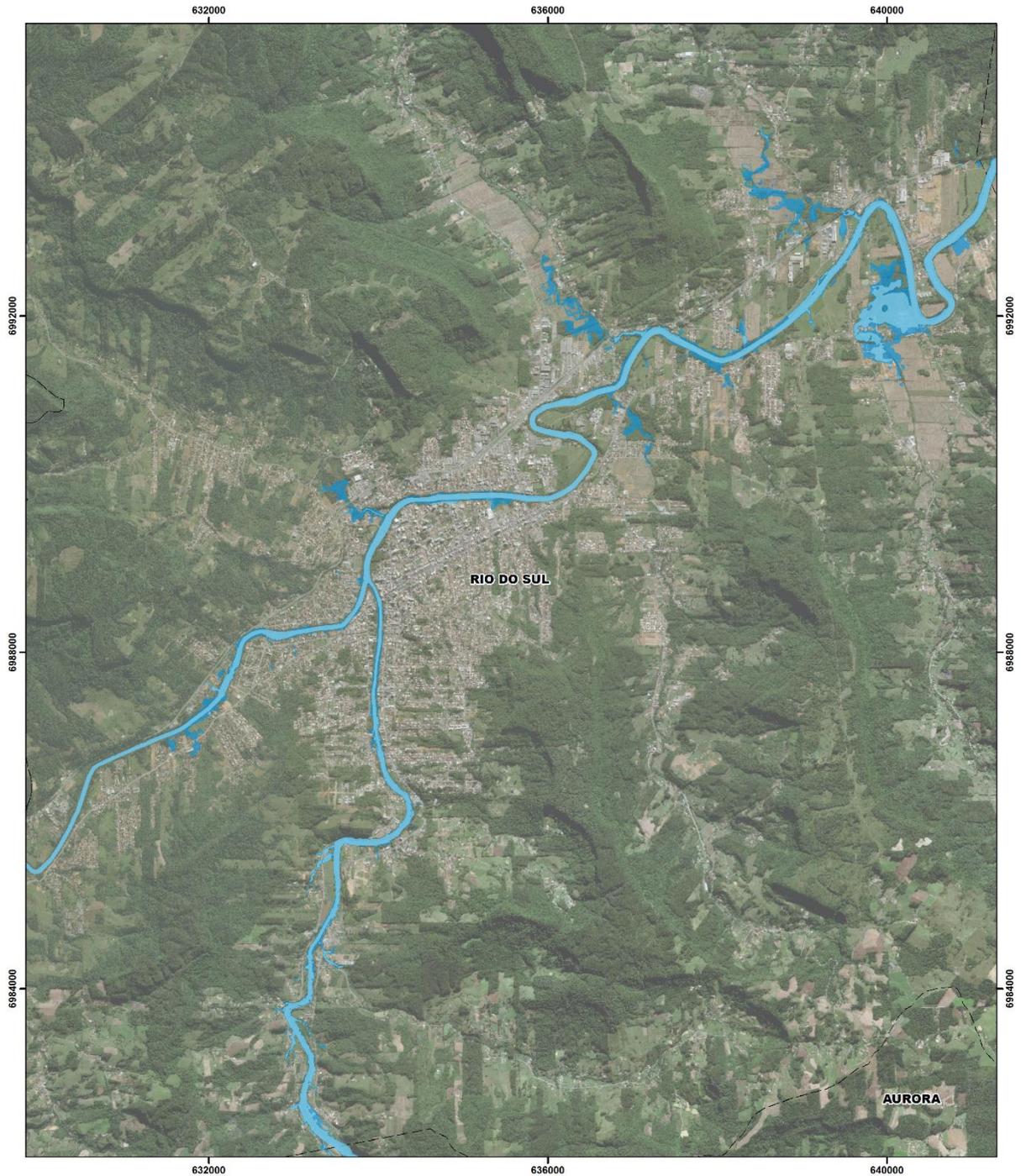
Título: Análise operacional hidráulica complementar das barragens Oeste e Sul



Revisão: 3

Emissão: 13/05/2024

As figuras abaixo ilustram em mapas as diferenças de inundação para os eventos de chuva de 105 mm, 173 mm, 208 mm, 265 mm, 293 mm e 375 mm.



Legenda

-  Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
-  Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
-  Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000
0 0,5 1 2 km

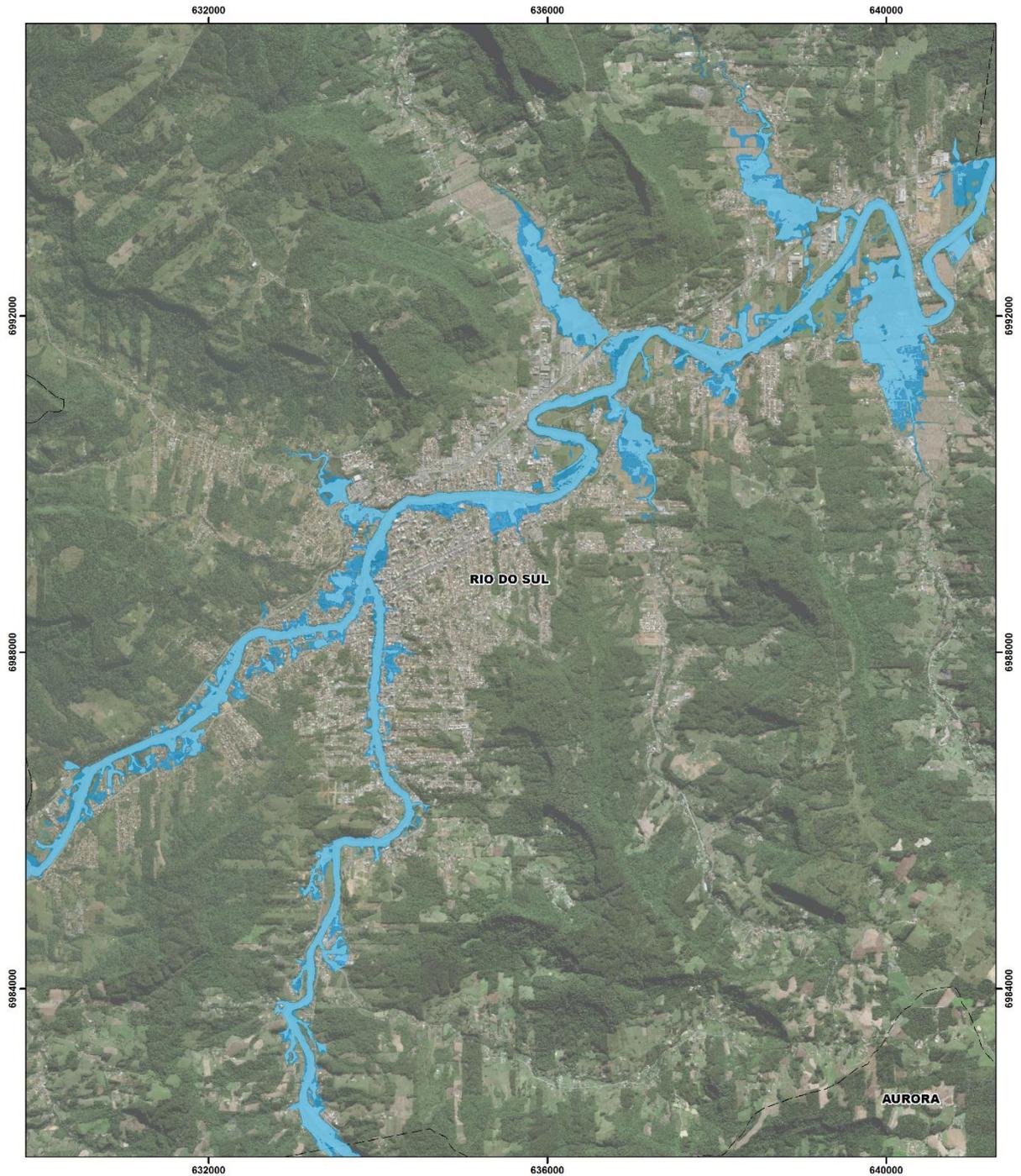
PRECIPITAÇÃO 105 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 105. Comparativo de inundação – Chuva 105 mm.



Legenda

-  Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
-  Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
-  Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000
0 0,5 1 2 km

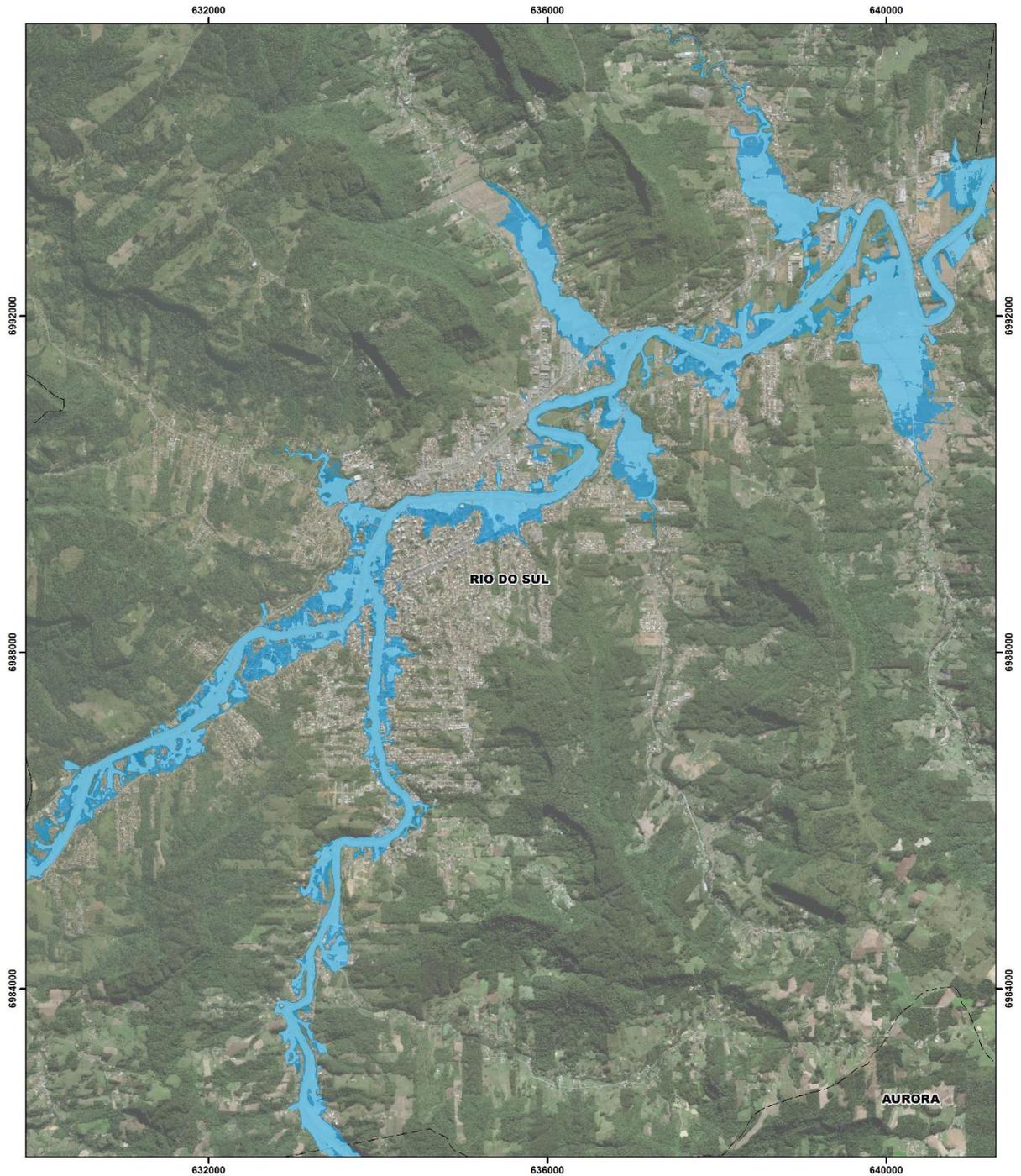
PRECIPITAÇÃO 173 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 106. Comparativo de inundação – Chuva 173 mm.



Legenda

-  Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
-  Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
-  Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000
0 0,5 1 2 km

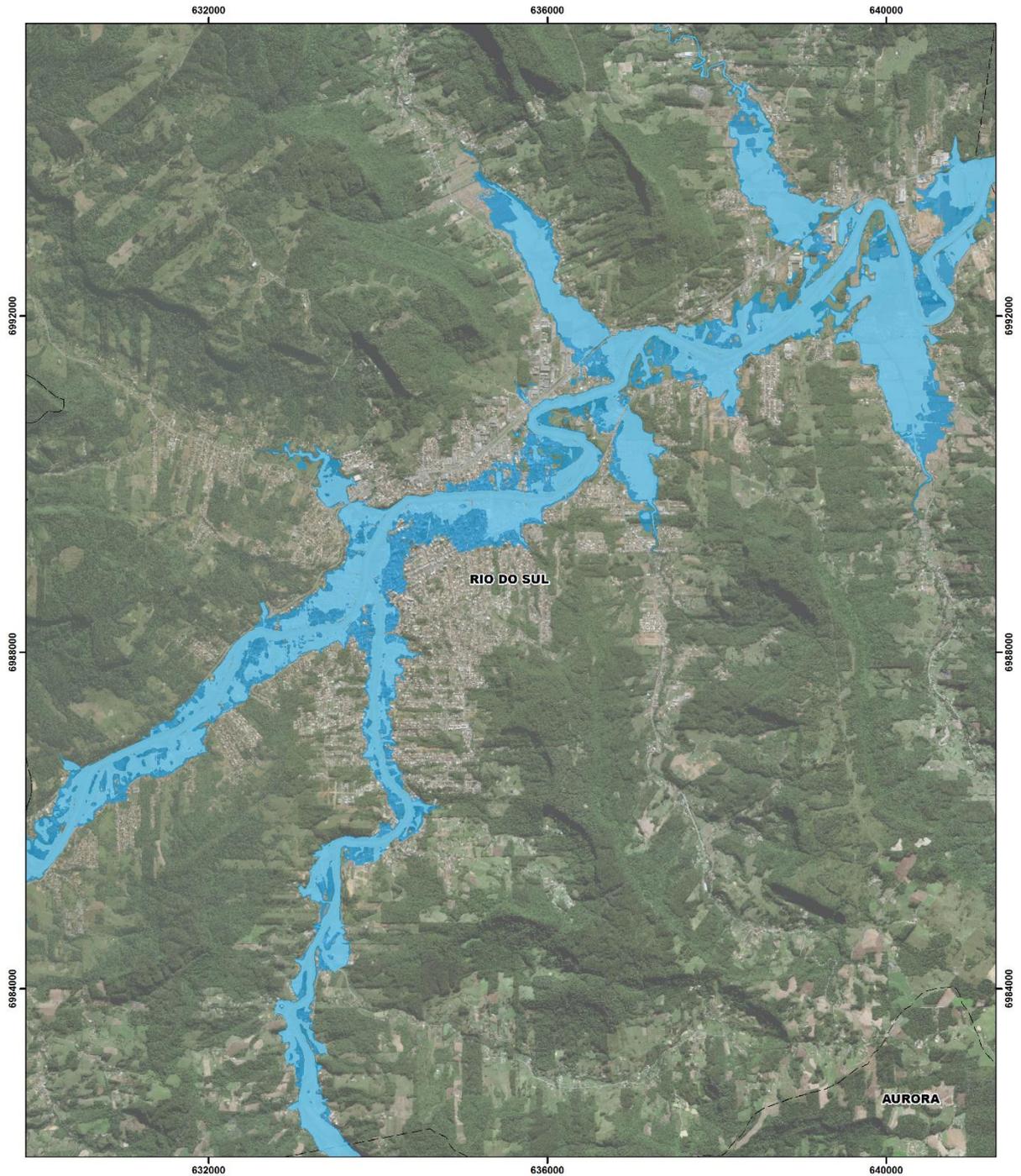
PRECIPITAÇÃO 208 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 107. Comparativo de inundação – Chuva 208 mm.



Legenda

-  Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
-  Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
-  Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000
0 0,5 1 2 km

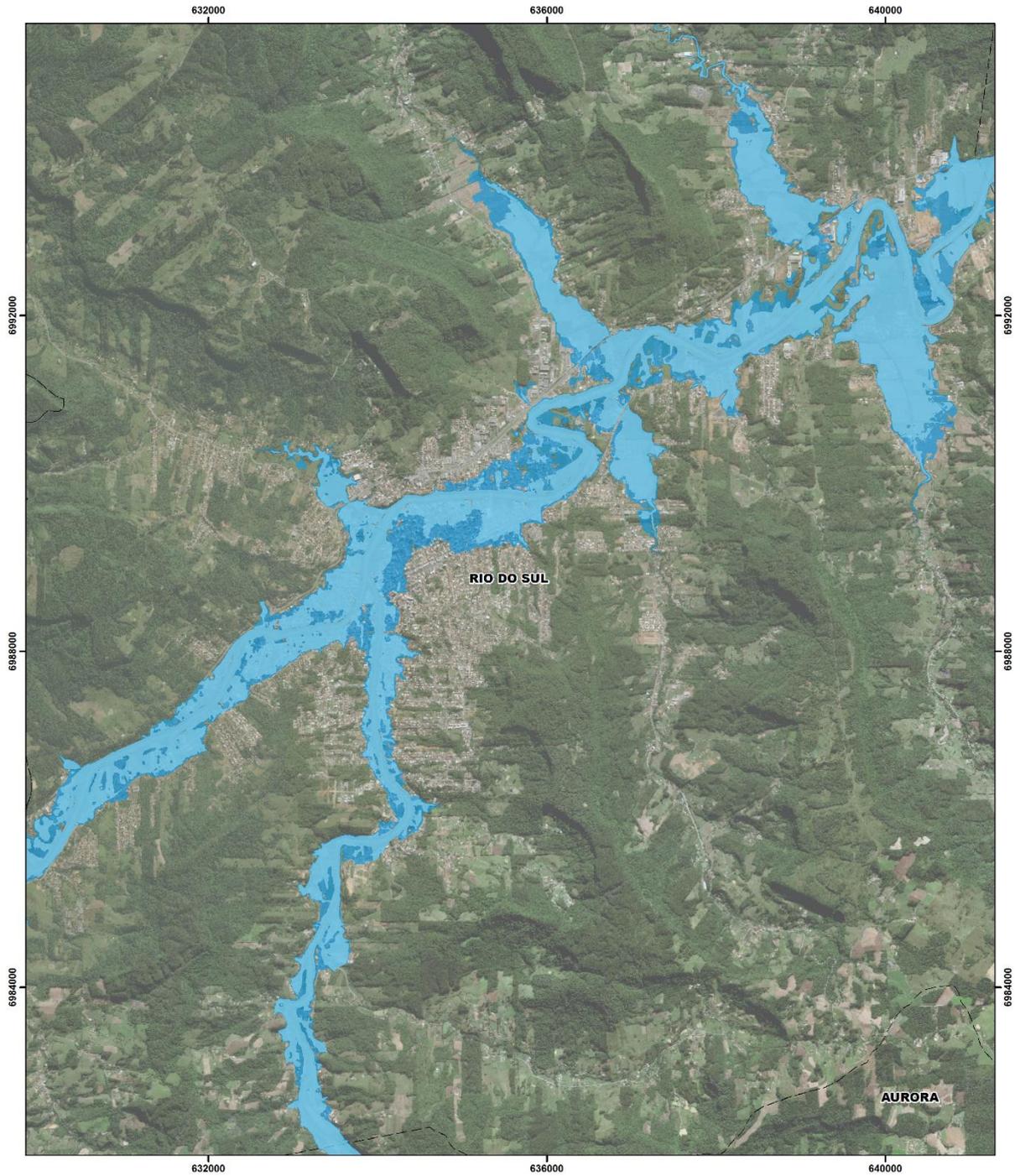
PRECIPITAÇÃO 265 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 108. Comparativo de inundação – Chuva 265 mm.



Legenda

- Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
- Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
- Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000

0 0,5 1 2 km

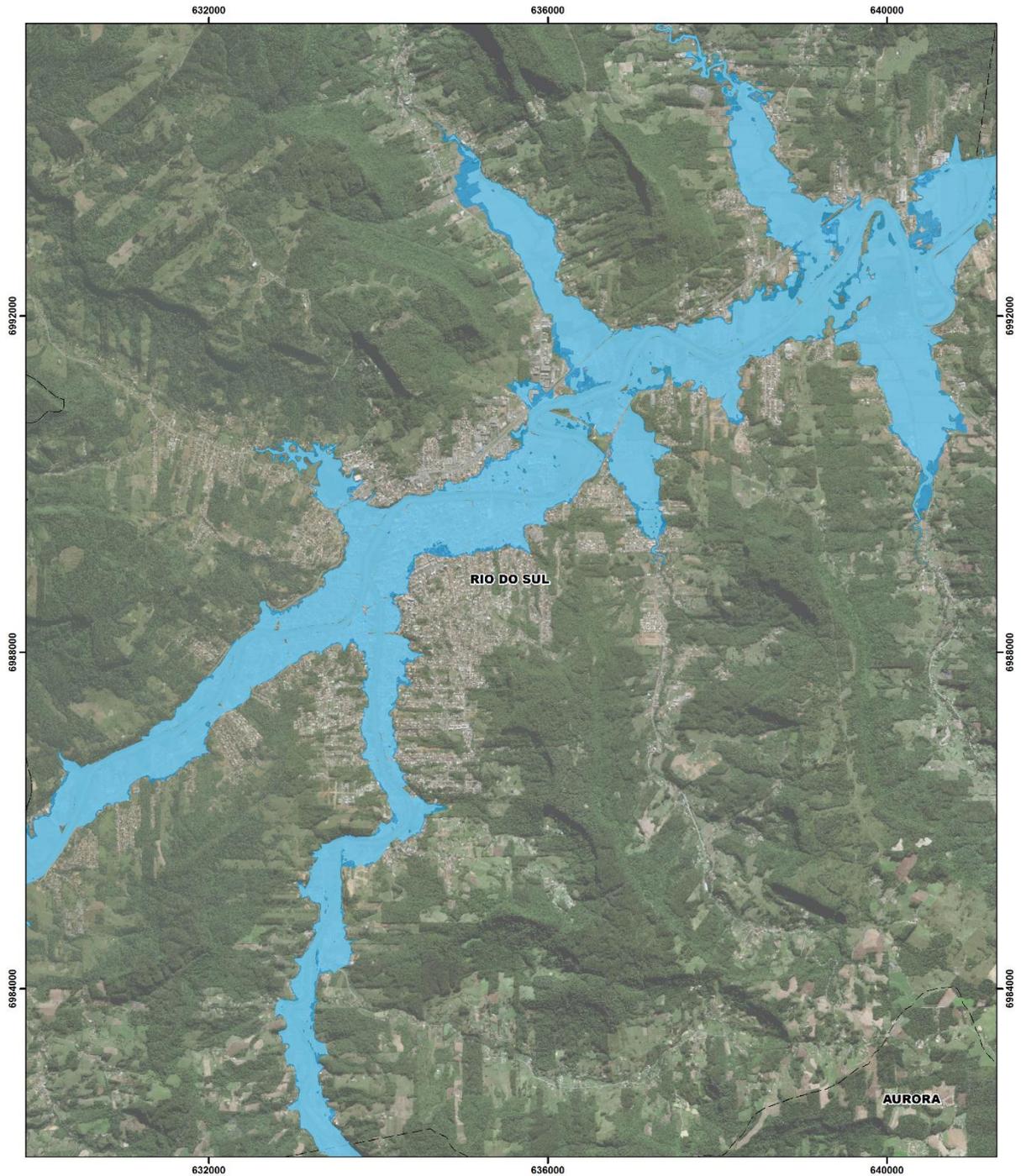
PRECIPITAÇÃO 293 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 109. Comparativo de inundação – Chuva 293 mm.



Legenda

- Cenário Natural, sem implantação das barragens¹ de contenção de cheia.
- Cenário Atual, com as barragens¹ de contenção de cheia.
- Limites Municipais



Sistema de projeção: UTM Zona 22 S
Datum horizontal: SIRGAS 2000

0 0,5 1 2 km

PRECIPITAÇÃO 375 mm

¹ Barragem Oeste (Taió) e Barragem Sul (Ituporanga)

Execução:



Figura 110. Comparativo de inundação – Chuva 375 mm.

As próximas figuras resumem numericamente as diferenças entre a inundação natural e a inundação regulada pelas Barragens Oeste e Sul. As diferenças são quantificadas em termos de vazão e cota d'água, ilustrando no tempo os hidrogramas e os cotogramas.

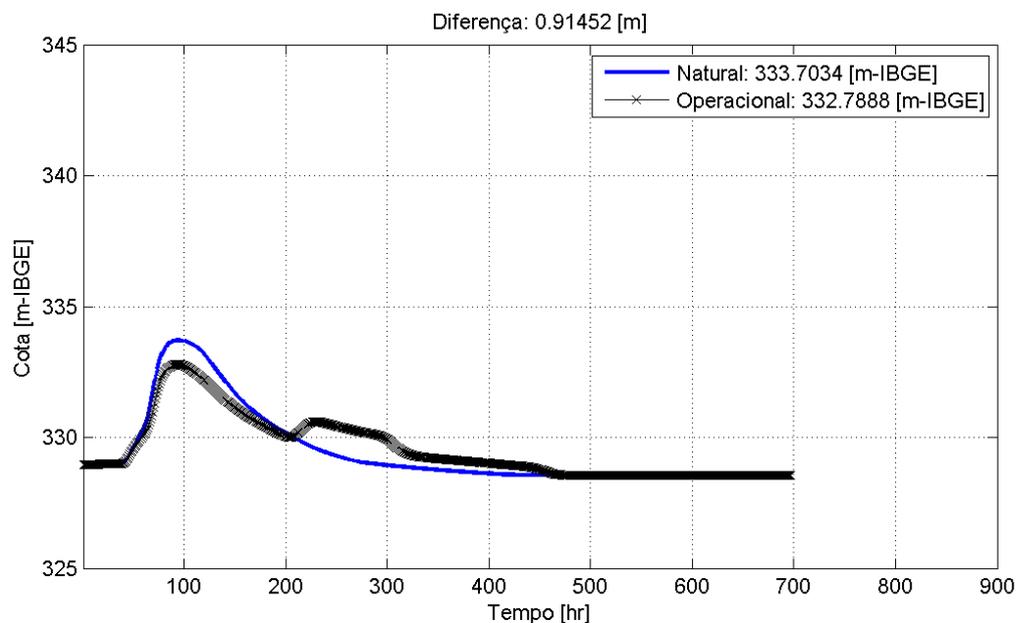
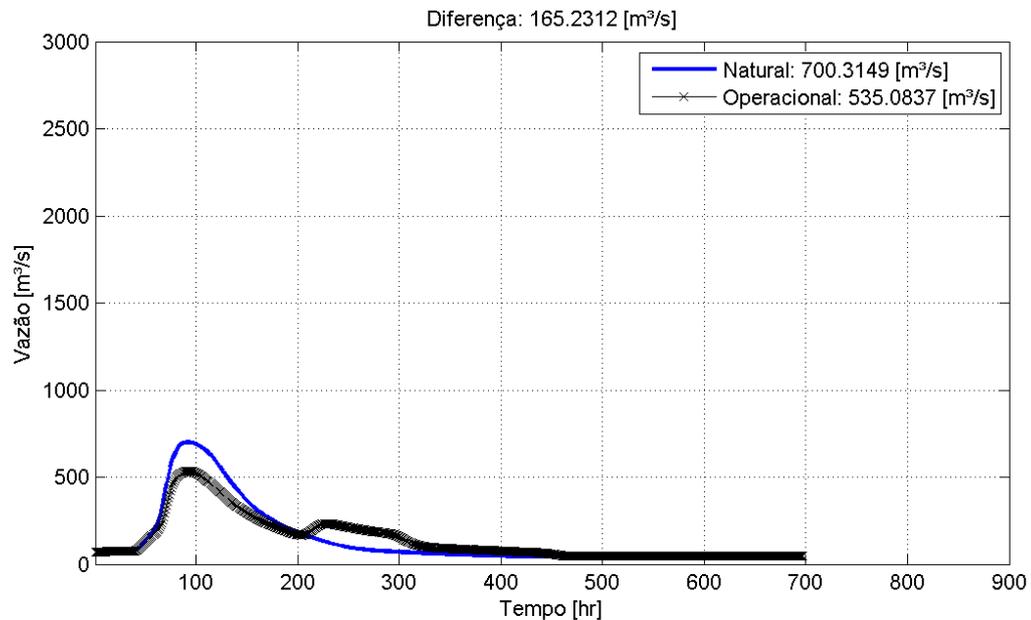


Figura 111. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 105 mm.

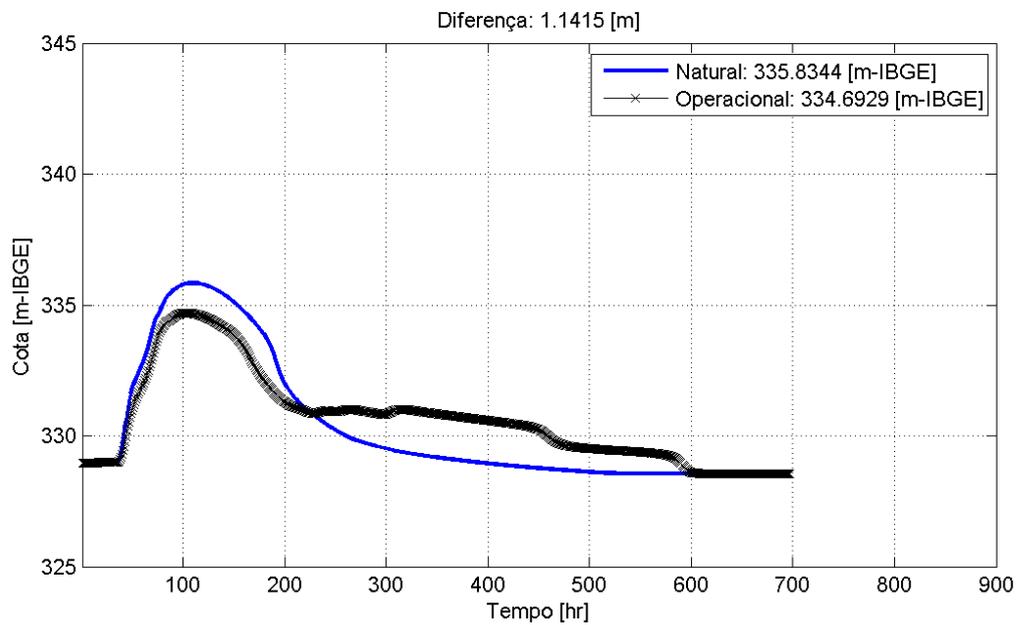
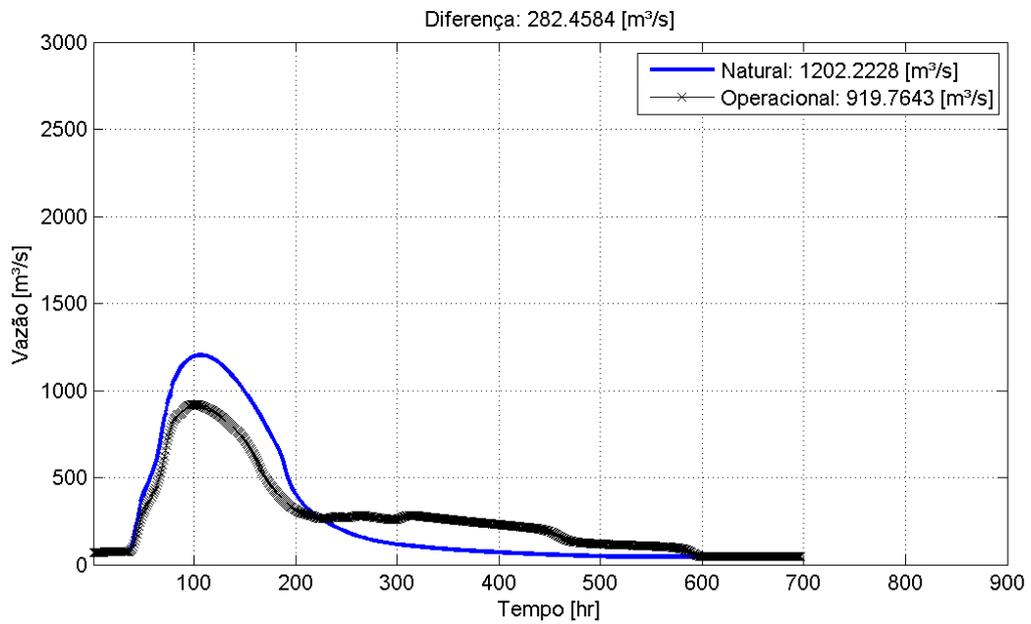


Figura 112. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 173 mm.

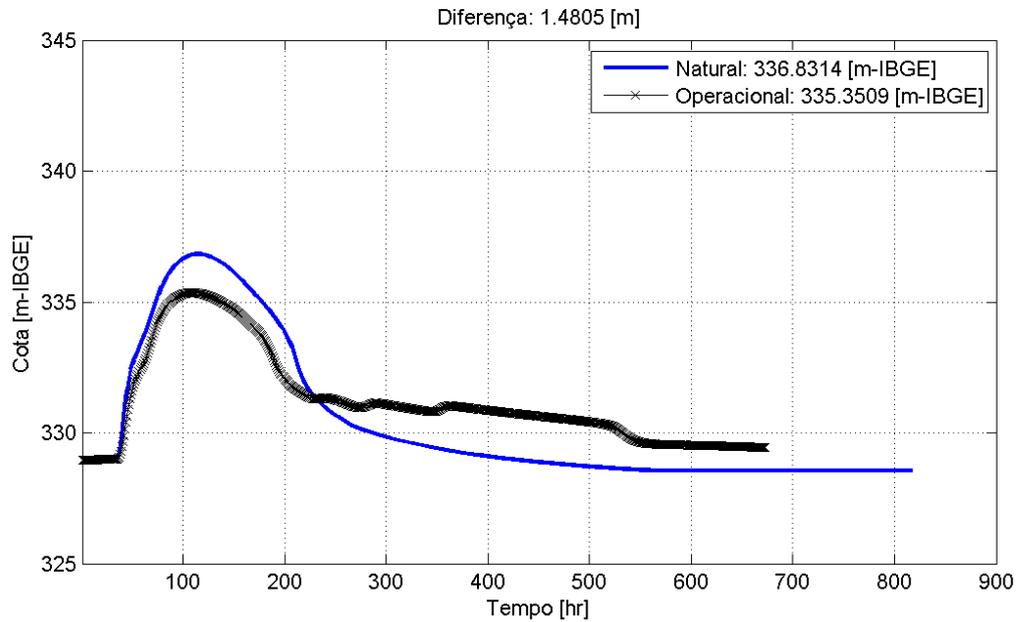
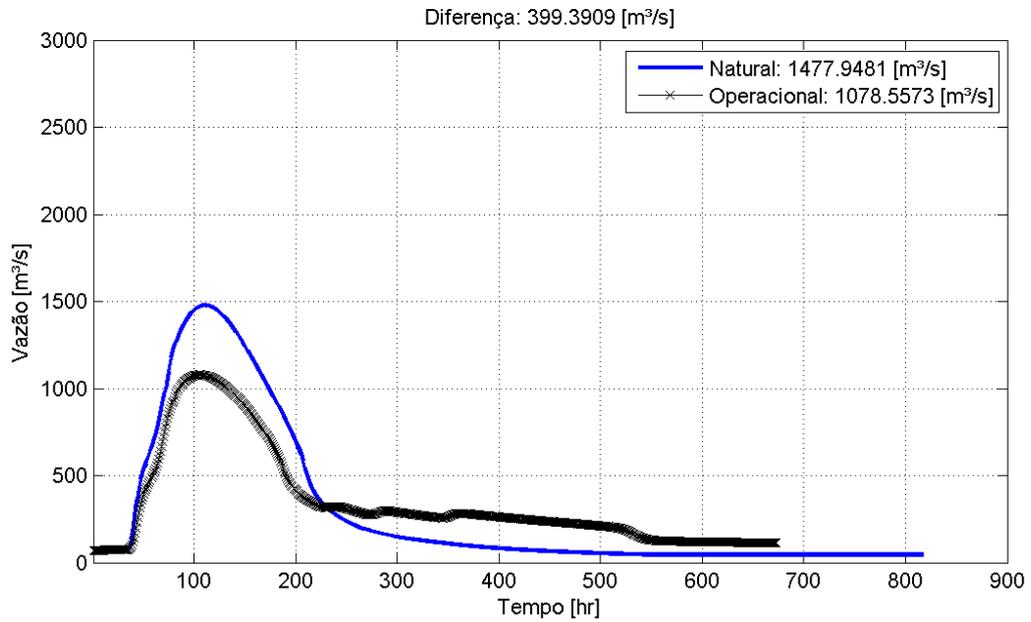


Figura 113. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 208 mm.

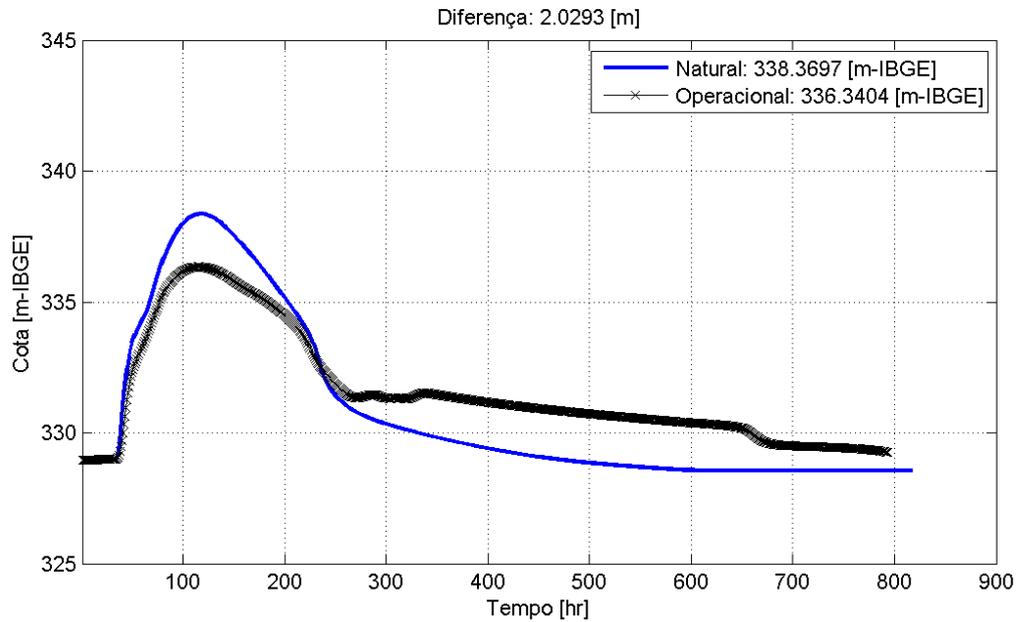
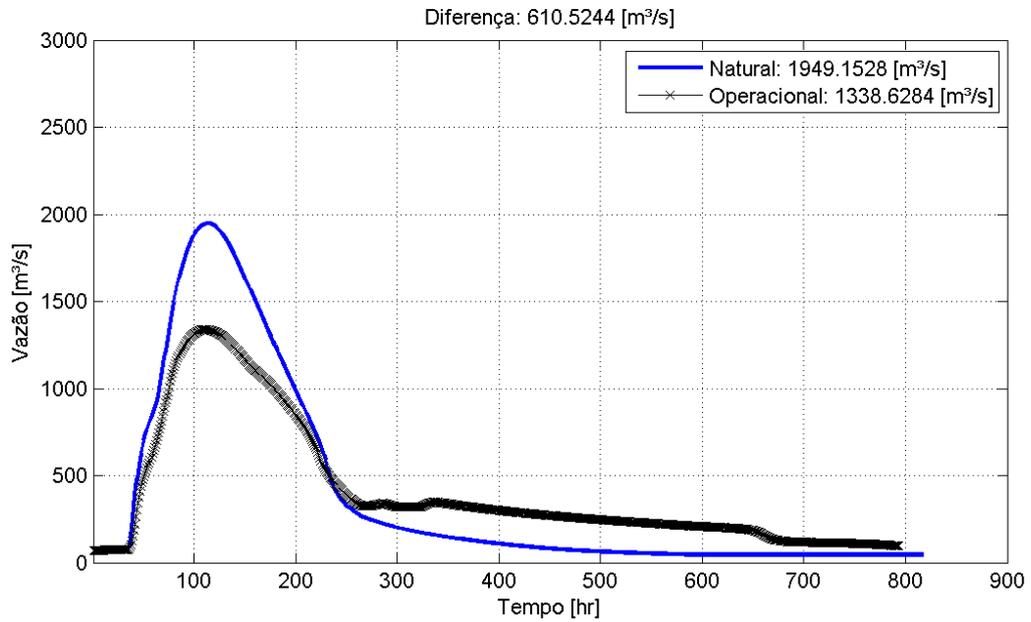


Figura 114. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 265 mm.

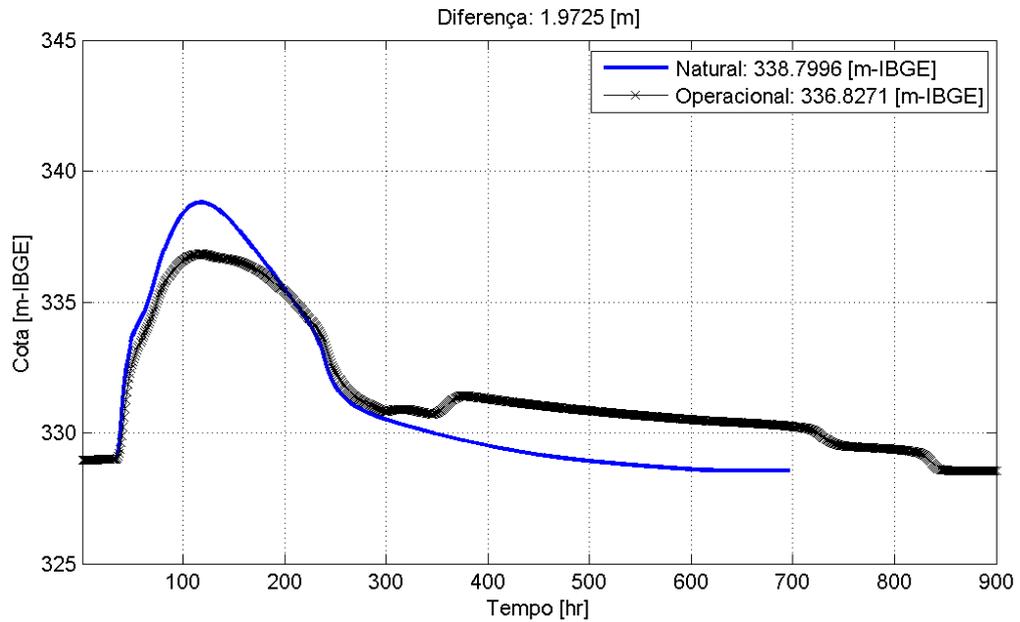
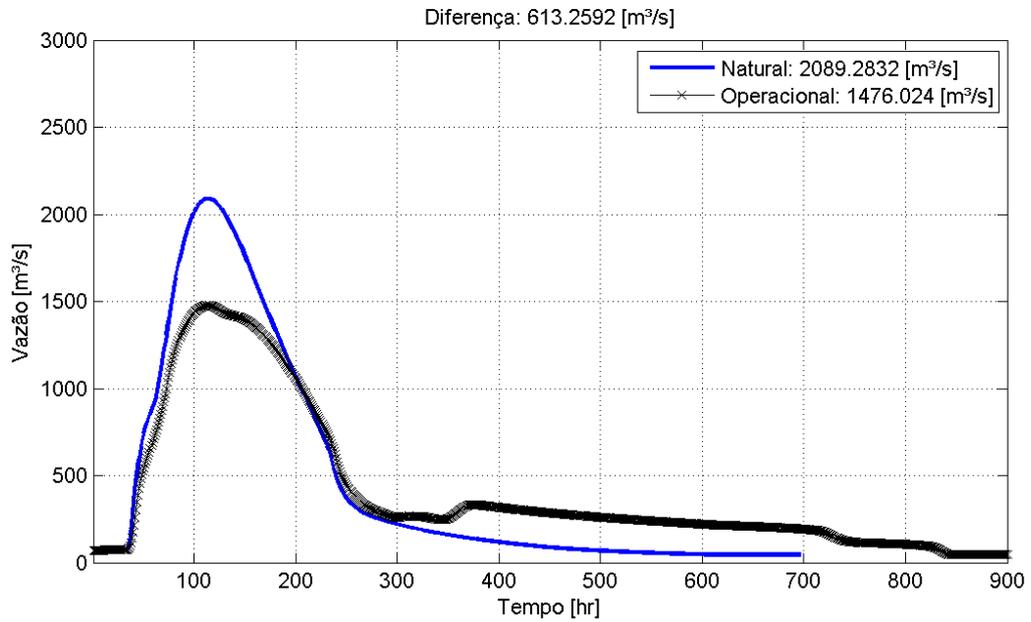


Figura 115. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 293 mm.

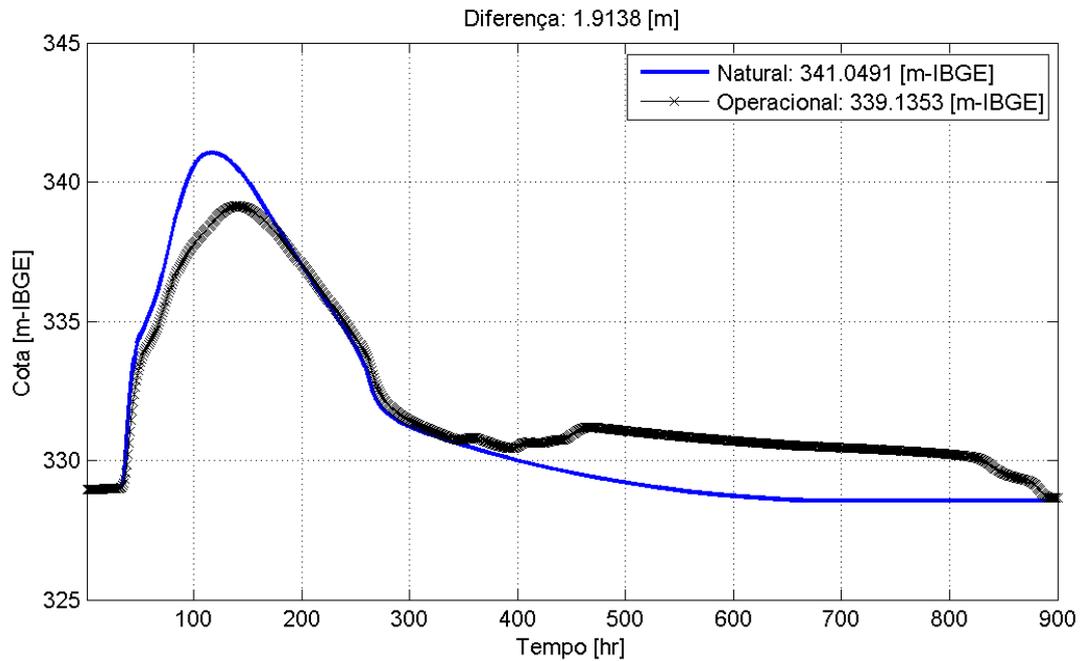
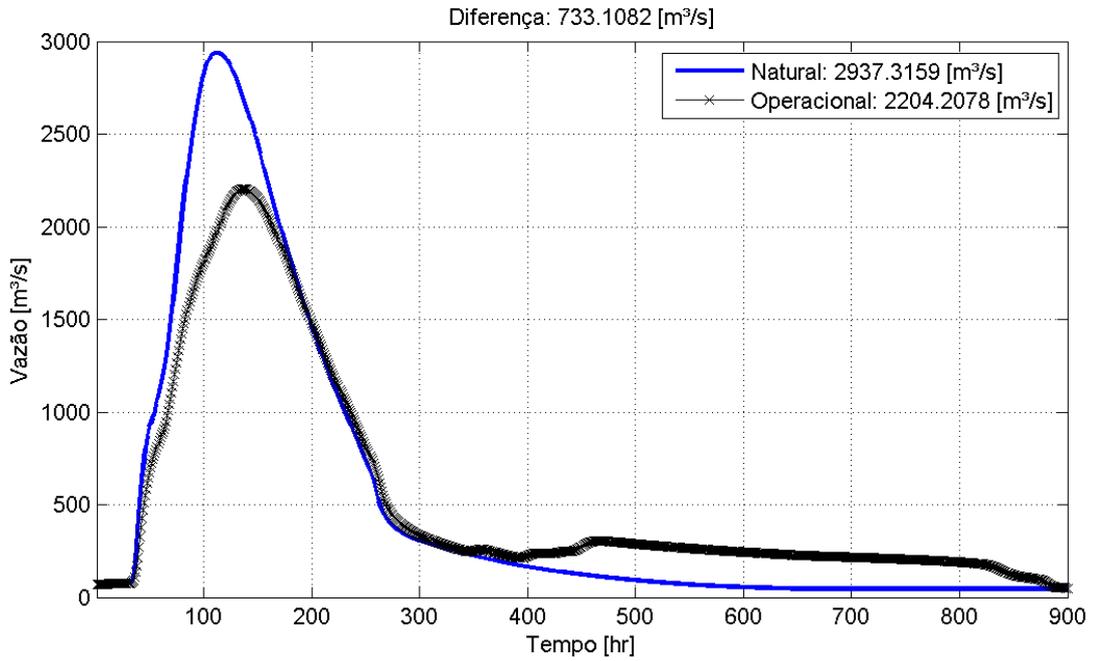


Figura 116. Passagem das ondas de cheia na seção de Rio do Sul. Chuva 375 mm.

APÊNDICE D – Estudo Hidráulico Operacional – Barragem Norte

4.1 INTRODUÇÃO

O presente documento, realizado no ano de 2018, é o resumo do estudo hidráulico para determinação da regra de operação da Barragem Norte. Neste documento estão descritos os modelos numéricos empregados nas análises, a metodologia de calibração e concepção dos modelos numéricos na representação da Barragem Norte e os resultados obtidos para confecção das regras de operação e curvas hidráulicas dos dispositivos de descarga da barragem.

Parte dos resultados desse estudo aparecem de forma redundante no documento principal do manual de operação. As simulações tiveram embasamento dos dados observados no evento de cheia de setembro de 2018, observado na estação PCH Mafrás José Boiteux – 83370000.

A ocorrência de um evento real durante a fase de estudos do manual de operação da Barragem Norte contribuiu para agregar robustez e aferir a qualidade dos resultados obtidos e dos cenários operacionais analisados. Para o presente ciclo de trabalhos, o embasamento das características dos dispositivos da Barragem Norte é proveniente de dados do projeto, visto que atualmente o empreendimento não se encontra em condições adequadas para operação.

4.2 MODELO HIDROLÓGICO

O balanço hídrico para o evento hidrológico foi realizado com o uso do modelo hidrológico HEC-HMS. Este modelo foi projetado para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, em diferentes escalas temporais e espaciais. O uso do modelo numérico permitiu a análise e o entendimento dos processos hidrológicos da área contribuinte no reservatório da barragem Norte.

De acordo com HEC (2009), este modelo opera em módulos separados para os cálculos do ciclo hidrológico. Desta forma, o usuário pode estabelecer o método mais conveniente para caracterização do escoamento superficial, infiltração e perdas, escoamento básico, evapotranspiração e efeito de armazenamento por reservatórios¹¹.

4.3 MODELO HIDRÁULICO

O HEC-RAS (HEC, 2016) é um modelo unidimensional e bidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície d'água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, podendo ocorrer mudanças de um regime para outro. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações em que o perfil da superfície d'água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite a análise e cálculo de regras operacionais de dispositivos hidráulicos, tais como barragens.

A formulação matemática unidimensional do HEC-RAS é baseada nas equações da conservação do momento de St. Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{|Q|Q}{K^2} + q \frac{Q}{A} = 0 \quad (1)$$
$$L \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Onde Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície d'água [m]; K é capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o fluxo lateral [m³/s/m]; β é o fator de distribuição do fluxo [adim].

¹¹ Regras de operação não são calculadas ou analisadas no modelo hidrológico HEC-HMS.

O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na Eq.(12) para obtenção de sua solução hidráulica. A capacidade de transporte das formulações hidráulicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional e bidimensional, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}_h \quad (2)$$

Onde V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; S é a declividade do escoamento [m/m]; Rh raio hidráulico [m].

O reservatório e os dispositivos da barragem são simulados hidráulicamente por meio da equação de momento, assim o deslocamento da onda no reservatório é adequadamente representado. As regras de operação dos dispositivos de descarga, para controle do reservatório, são igualmente representadas.

Na Figura 19 está ilustrado o modelo hidráulico conceitual da Barragem Norte na interface HEC-RAS.

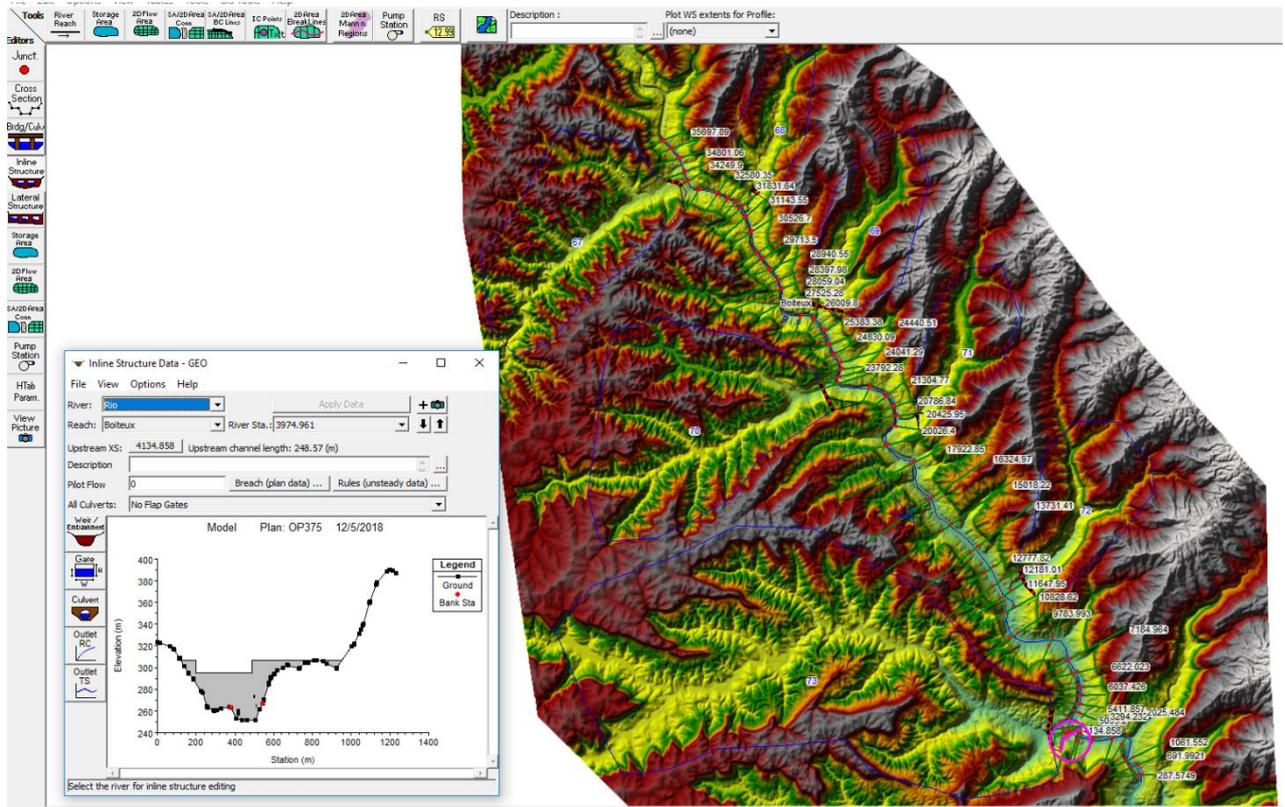


Figura 117. Modelo conceitual de operação da Barragem Norte.

4.4 DADOS DE ENTRADA

O desenvolvimento do presente estudo foi baseado em dados hidrológicos, topográficos e levantamentos de campo realizados ao longo do trecho estudado. O Quadro 1 resume os dados empregados no desenvolvimento do modelo numérico da Barragem Norte.

Quadro 3. Resumo de dados.

Tipo de base dados	Variável
Hidrológico	Dados diários de Cota, Vazão e Resumo de Descarga Líquida da estação fluviométrica PCH Mafrás José Boiteux (cód. 83370000).
Operação do reservatório	Informações de projeto.
Modelo digital de terreno	Utilizado modelo digital de terreno realizado pela SDS/SC, com pixel de 2 m, obtidas por meio do Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) através do endereço eletrônico http://sigsc.sds.sc.gov.br/ .

4.4.1 CHUVA DE PROJETO

Para o presente projeto foi determinada chuvas de projeto para o desenvolvimento de simulações de operação do reservatório da Barragem Norte. Segundo estudo da JICA (2011), a chuva padrão deflagradora de inundações ocorre num período de 4 dias, com sistemas meteorológicos que abrangem em totalidade, ou quase totalidade, a área da bacia do Rio Itajaí.

Tal padrão de chuvas é coerente, sendo os últimos eventos ocorridos em junho de 2017 e setembro de 2018 com o mesmo padrão mapeado no estudo hidrológico da JICA (2011). Desta forma, a chuva de referência de julho de 2017 foi usada para calcular as chuvas de projeto de duração de 4 dias para os períodos de retorno do estudo indicado.

Na Tabela 5 estão resumidas as alturas acumuladas de chuva para duração de 4 dias.

Tabela 9. Alturas acumuladas em 4 dias das chuvas de projeto.¹²

Período de retorno – TR [anos]	Acumulado em 4 dias [mm]
2	105
5	173
10	208

¹² A equação para cálculo do período de retorno em função do acumulado de chuva em 4 dias é $TR = 0,2119e^{0,0184P}$

Período de retorno – TR [anos]	Acumulado em 4 dias [mm]
20	243
25	265
50	293
80	320
100	333
150	357
200	375

Os eventos de chuva são empregados como limiar, e devem ser interpretados como variável de referência, para caracterizar a operação das barragens e como variável de entrada no modelo hidrológico para reconstituição dos eventos de cheia associados a cada chuva de projeto.

A chuva de projeto unitária está ilustrada na Figura 20 junto com as curvas de acumulação para cada período de retorno.

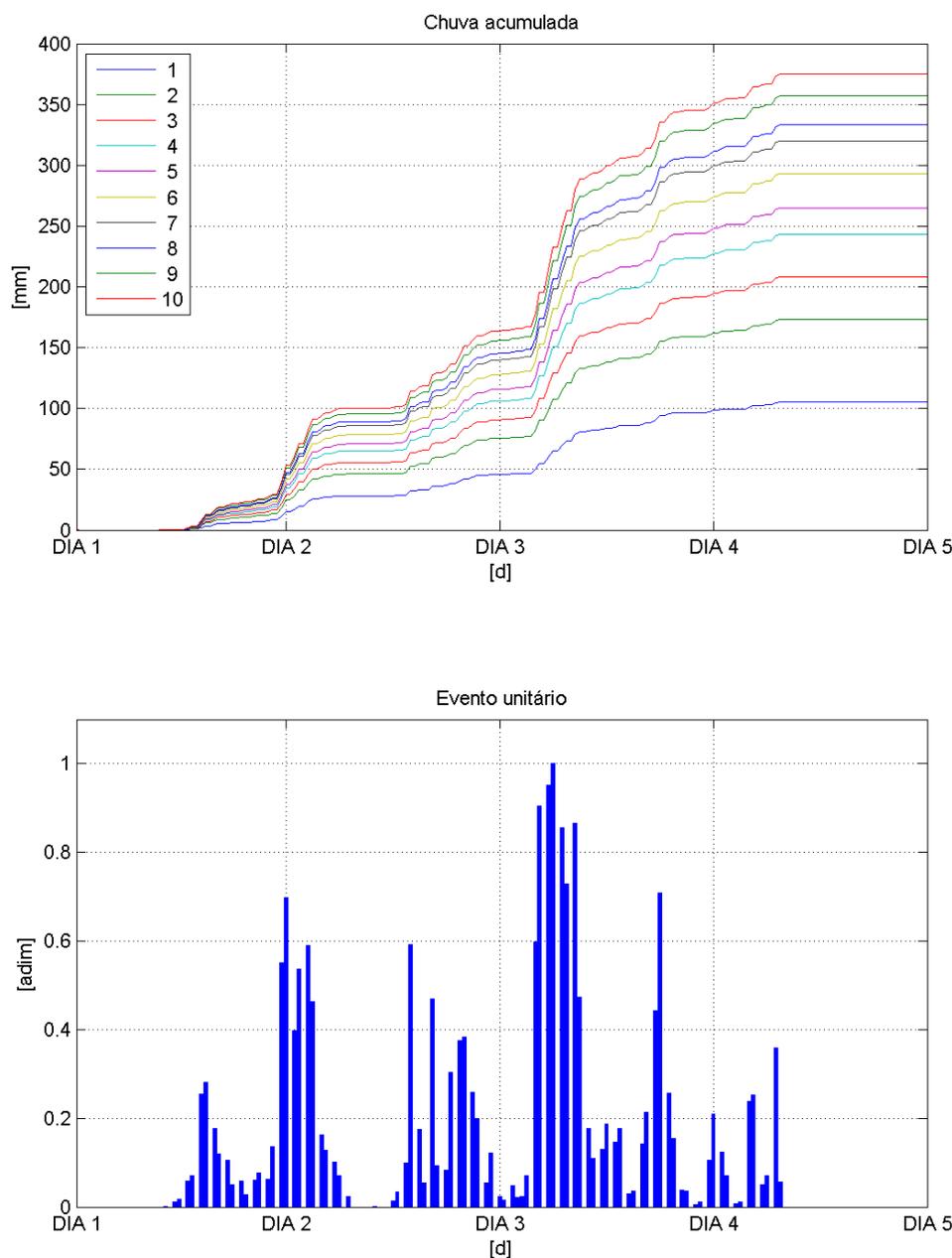


Figura 118. Chuva de projeto.

4.4.2 CALIBRAÇÃO E RECONSTITUIÇÃO HIDROLÓGICA

Na Figura 21 está ilustrado o modelo conceitual desenvolvimento para a realização das simulações hidrológicas. A reconstituição do evento de cheia de setembro de 2018 considera uma análise integrada da bacia hidrográfica do Rio Itajaí até a seção de Rio do Sul, contemplando o efeito de armazenamento das barragens a montante de Rio do Sul. Na

reconstituição hidrológica regras de operação não são simuladas, somente o efeito de armazenamento dos reservatórios é calculado.

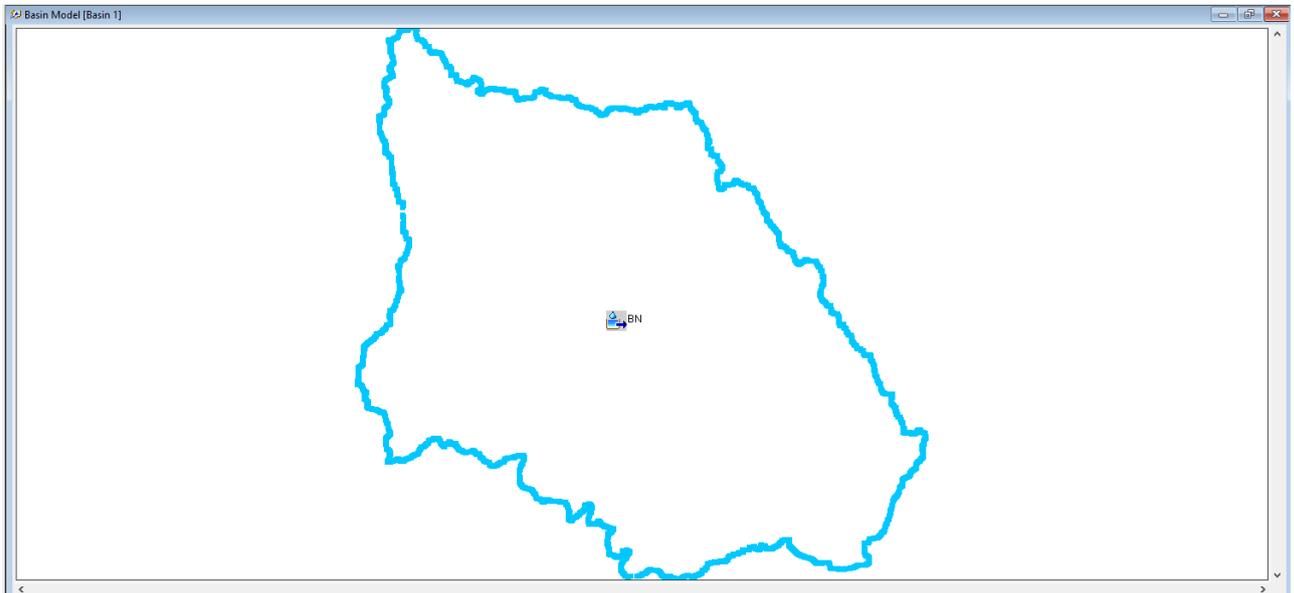


Figura 119. Modelo hidrológico conceitual.

A calibração do modelo hidrológico levou em consideração o comportamento na estação PCH Mafrás José Boiteux 83370000. A calibração, através do balanço hídrico do evento, obteve NSE de 0,97 e desvio volumétrico de 0,10 % (Figura 22). A simulação buscou ajustar a geração de escoamento da bacia hidrográfica, da área de drenagem contribuinte no reservatório. Nessa simulação somente o enchimento foi representado.

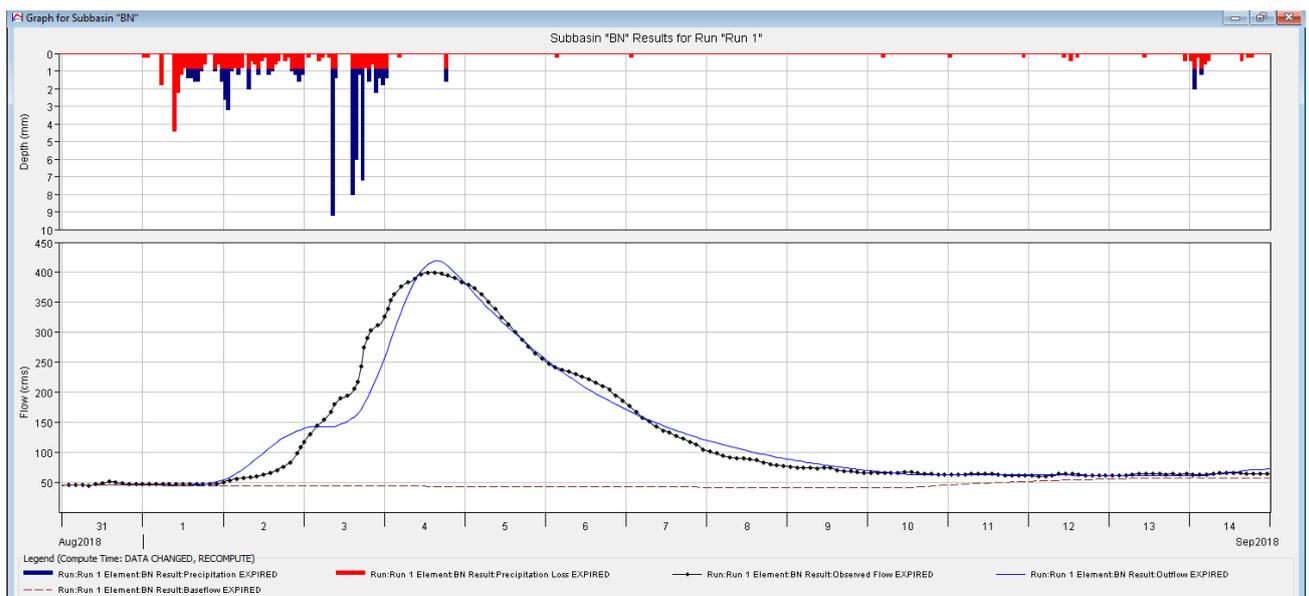


Figura 120. Calibração do evento de setembro de 2018.

A estação fluviométrica PCH Mafrás José Boiteux – 83370000 serve como ponto de restrição secundário, pois a barragem regula os eventos hidrológicos até atingir a capacidade máxima de armazenamento seguida de vertimento.

O modelo hidrológico foi empregado para constituir os cenários hidrológicos para cada chuva de projeto, calculando os hidrogramas afluentes ao reservatório.

As áreas de drenagem de referência para o balanço hídrico são:

- Área de drenagem do reservatório da Barragem Norte: 2.325 km².

O total de área de drenagem é igual a 12.138 km², em Blumenau. As áreas de drenagem das Barragens Sul, Oeste e Norte representam 38% da área total até Blumenau com capacidade de regulação da resposta hidrológica. Tais percentuais são significativos e já indicam alta capacidade de contenção de cheia pelas barragens.

4.5 RESULTADOS

Os modelos das barragens para a análise operativa contemplam dois tipos de simulação, sendo “enchimento” e “esvaziamento”. O procedimento de esvaziamento determinou o tempo necessário para a manobra e o limiar hidráulico na seção de Blumenau para determinar o início da manobra, garantindo adequado nível de segurança.

Na Figura 25 está ilustrado o fluxograma do estudo de operação dos reservatórios, desde a reconstituição hidrológica até a definição das regras de operação.

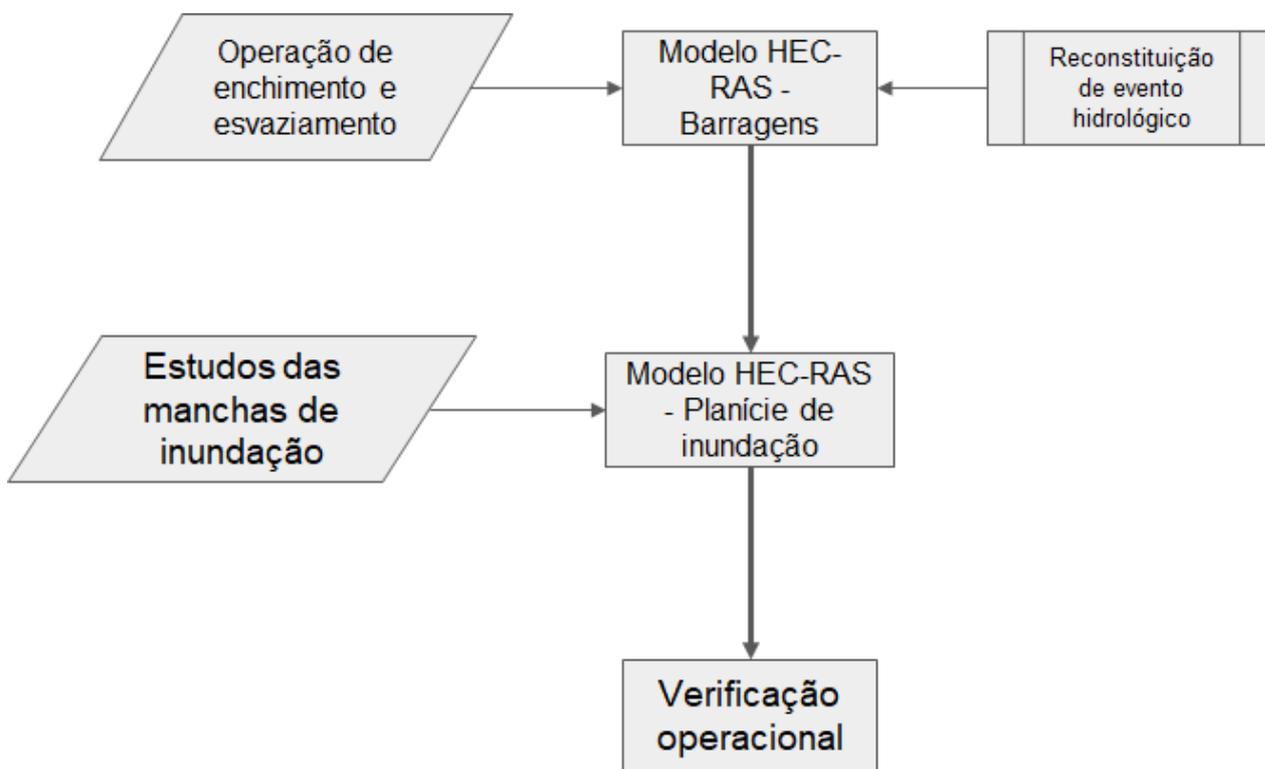


Figura 121. Simulação hidrológico e hidráulica da operação da Barragem Norte.

4.5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Os cenários identificados para determinar as regras de operação da Barragem Norte foram determinados a partir das simulações hidrológicas em função das chuvas de projeto:

- Período de retornos de 2 anos;
- Período de retornos de 5 anos;
- Período de retornos de 10 anos;
- Período de retornos de 20 anos;
- Período de retornos de 25 anos;
- Período de retornos de 50 anos;
- Período de retornos de 80 anos;
- Período de retornos de 100 anos;
- Período de retornos de 150 anos; e,
- Período de retornos de 200 anos.

Os hidrogramas afluentes ao reservatório da Barragem Norte estão ilustrados na Figura 26¹³.

¹³ Os hidrogramas gerados na modelagem chuva-vazão podem resultar em magnitudes superiores ao período de retorno da chuva. Devido a não-linearidade da resposta hidrológica, principalmente na bacia do Rio Itajaí.

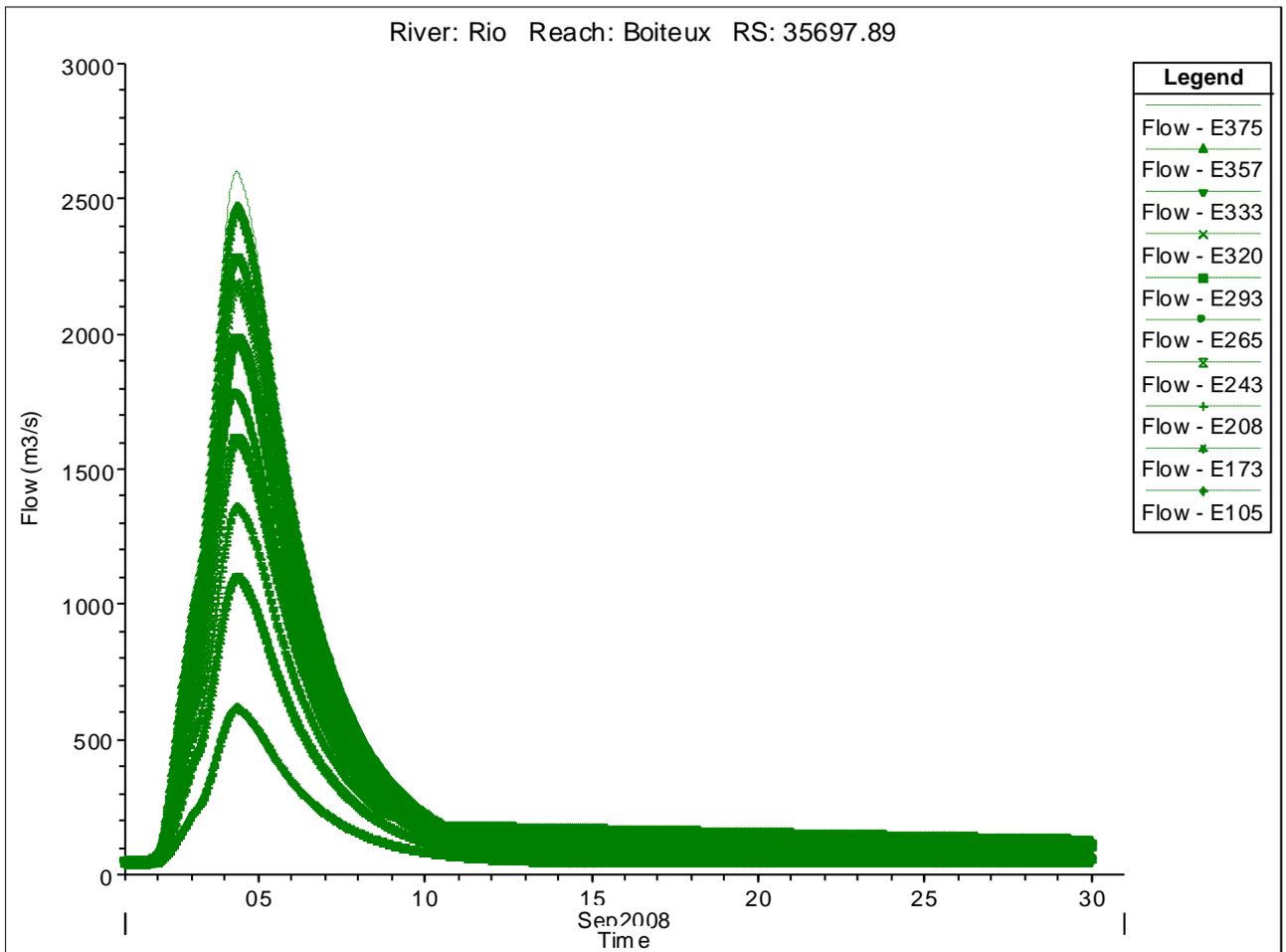


Figura 122. Hidrogramas de projeto afluentes ao reservatório da Barragem Norte.

4.5.2 SIMULAÇÃO DE ENCHIMENTO

Nas figuras abaixo estão resumidas as análises, associada a cada chuva de projeto, de enchimento do reservatório¹⁴ da Barragem Norte com indicação da vazão de pico do hidrograma afluente e defluente, volume armazenamento e cota d'água no reservatório.

¹⁴ Os volumes de armazenamento apresentados nos resultados contemplam o efeito hidráulico do movimento da água, podendo diferir com valores maiores em relação aos volumes da Curva Cota-Volume. A Curva Cota-Volume representa a água parada, hidrostática, tendendo à relação volume e cota topográfica.

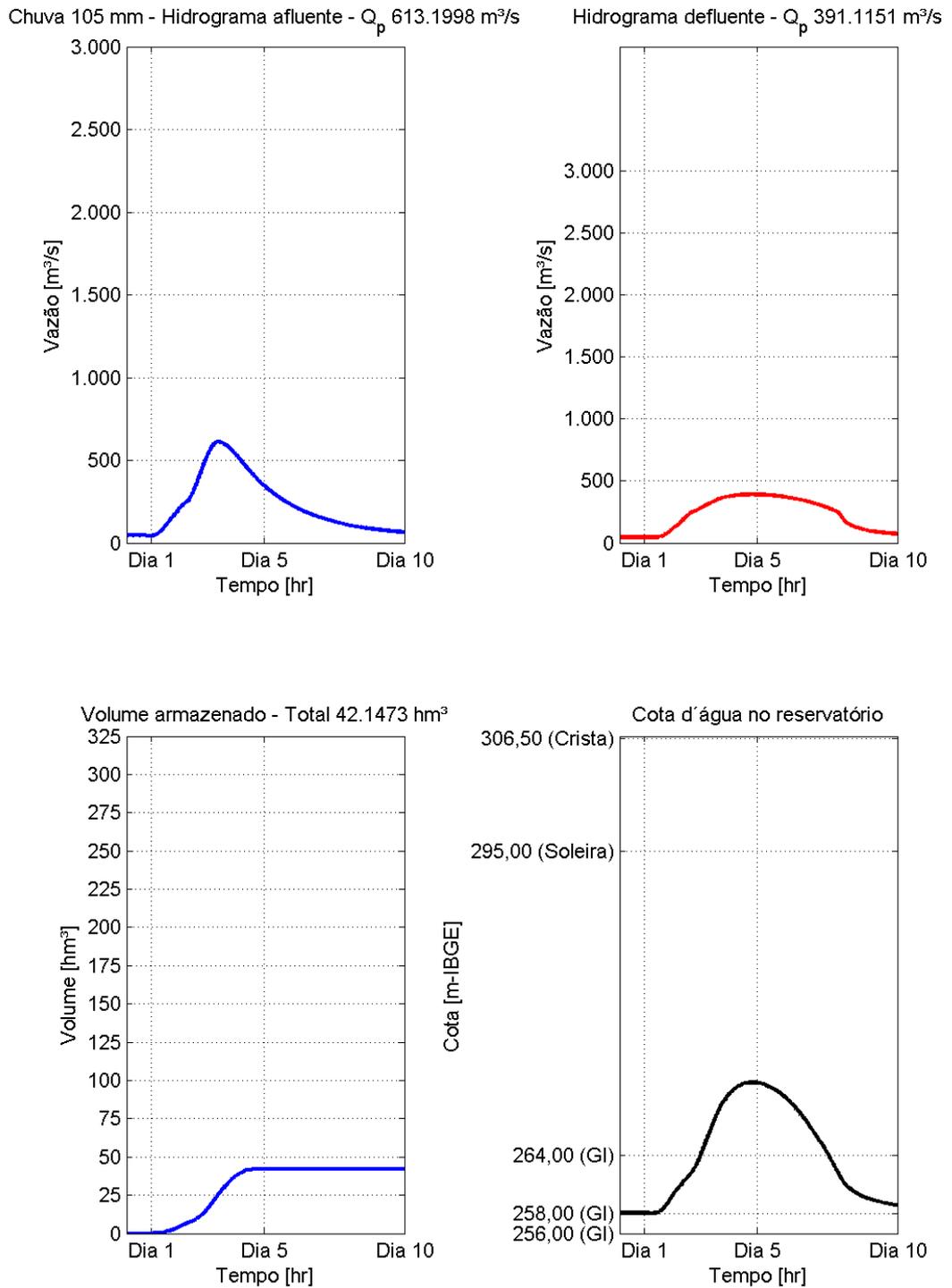


Figura 123. Chuva de 4 dias com 105 mm acumulados. Abatimento de 36%.

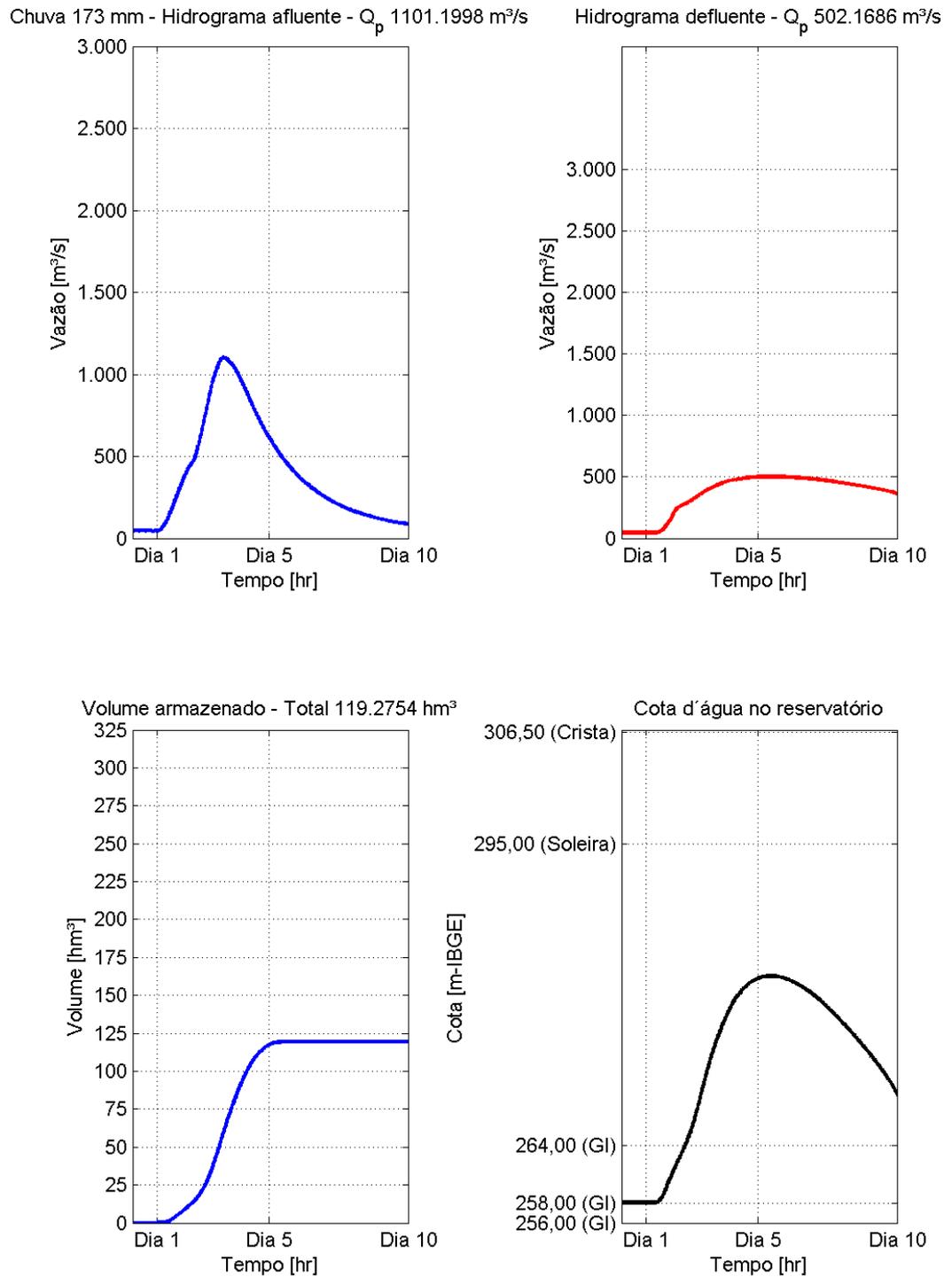


Figura 124. Chuva de 4 dias com 173 mm acumulados. Abatimento de 54 %.

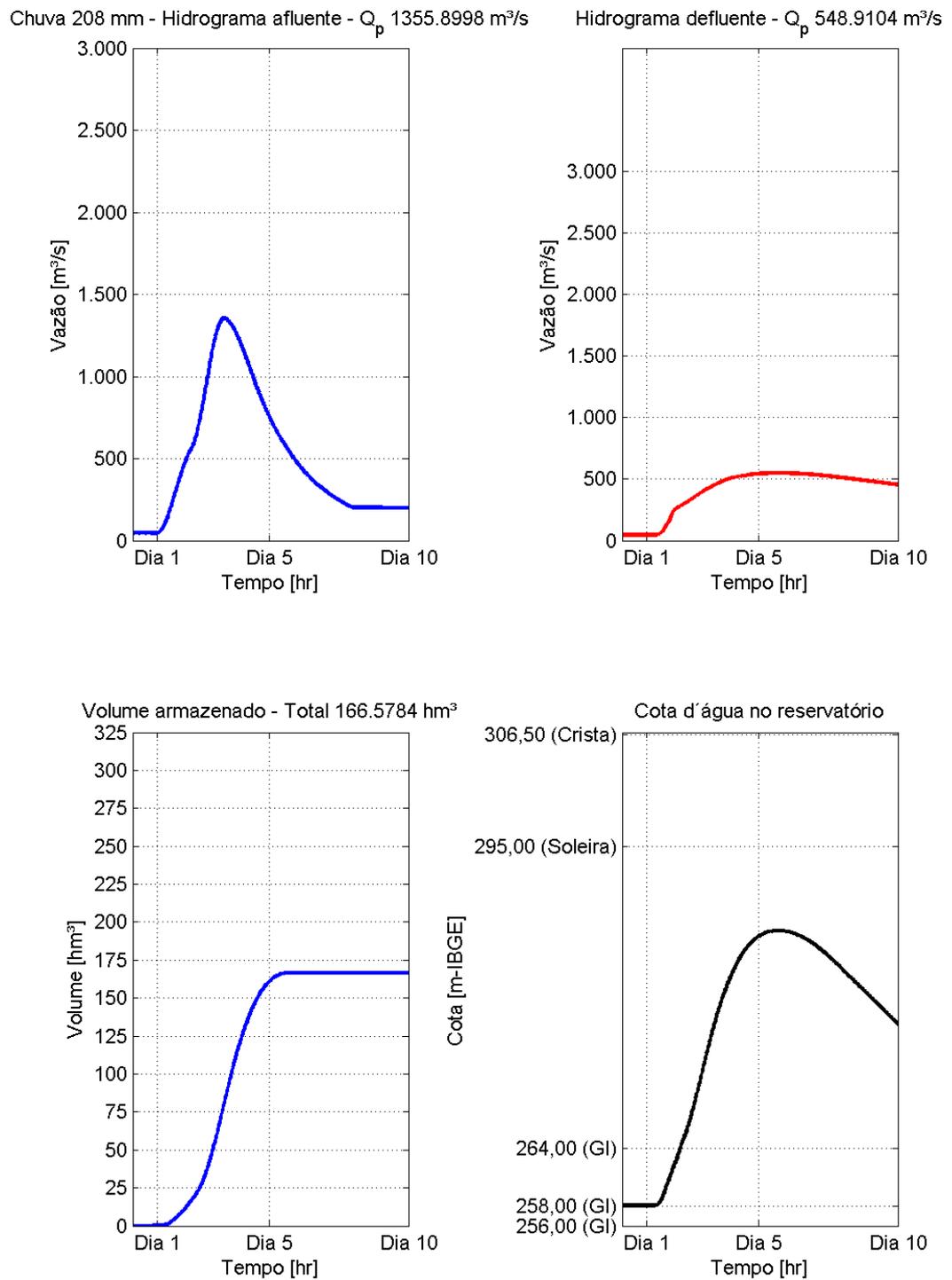
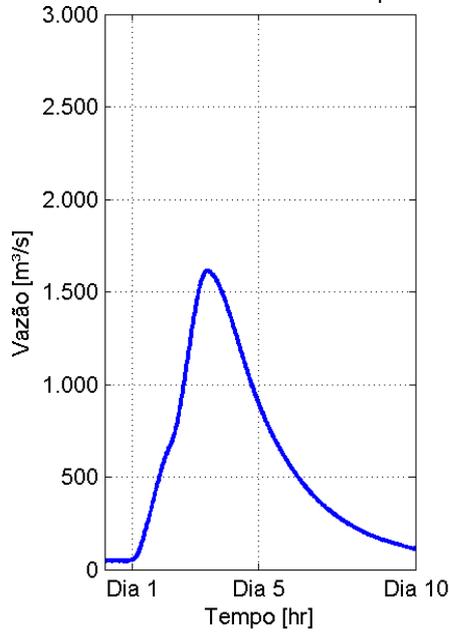
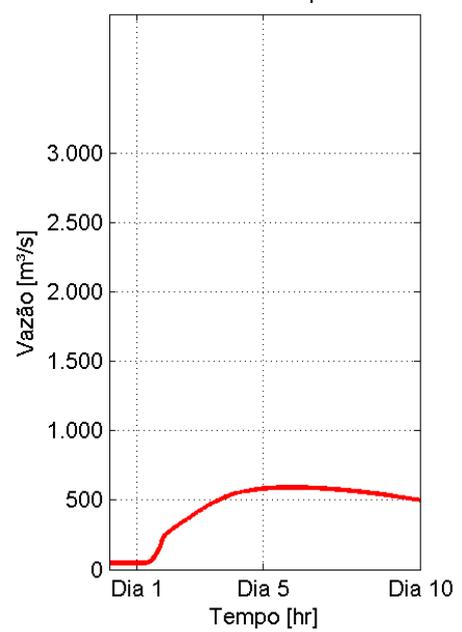


Figura 125. Chuva de 4 dias com 208 mm acumulados. Abatimento de 59 %.

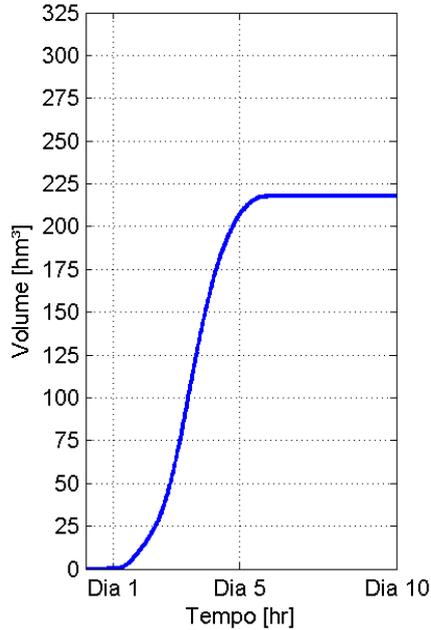
Chuva 243 mm - Hidrograma afluente - Q_p 1614.2997 m³/s



Hidrograma defluente - Q_p 590.9111 m³/s



Volume armazenado - Total 217.7685 hm³



Cota d'água no reservatório

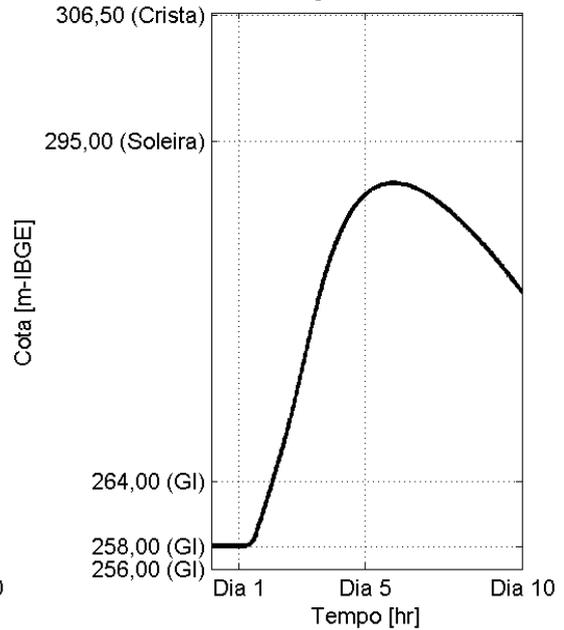


Figura 126. Chuva de 4 dias com 243 mm acumulados. Abatimento de 63 %.

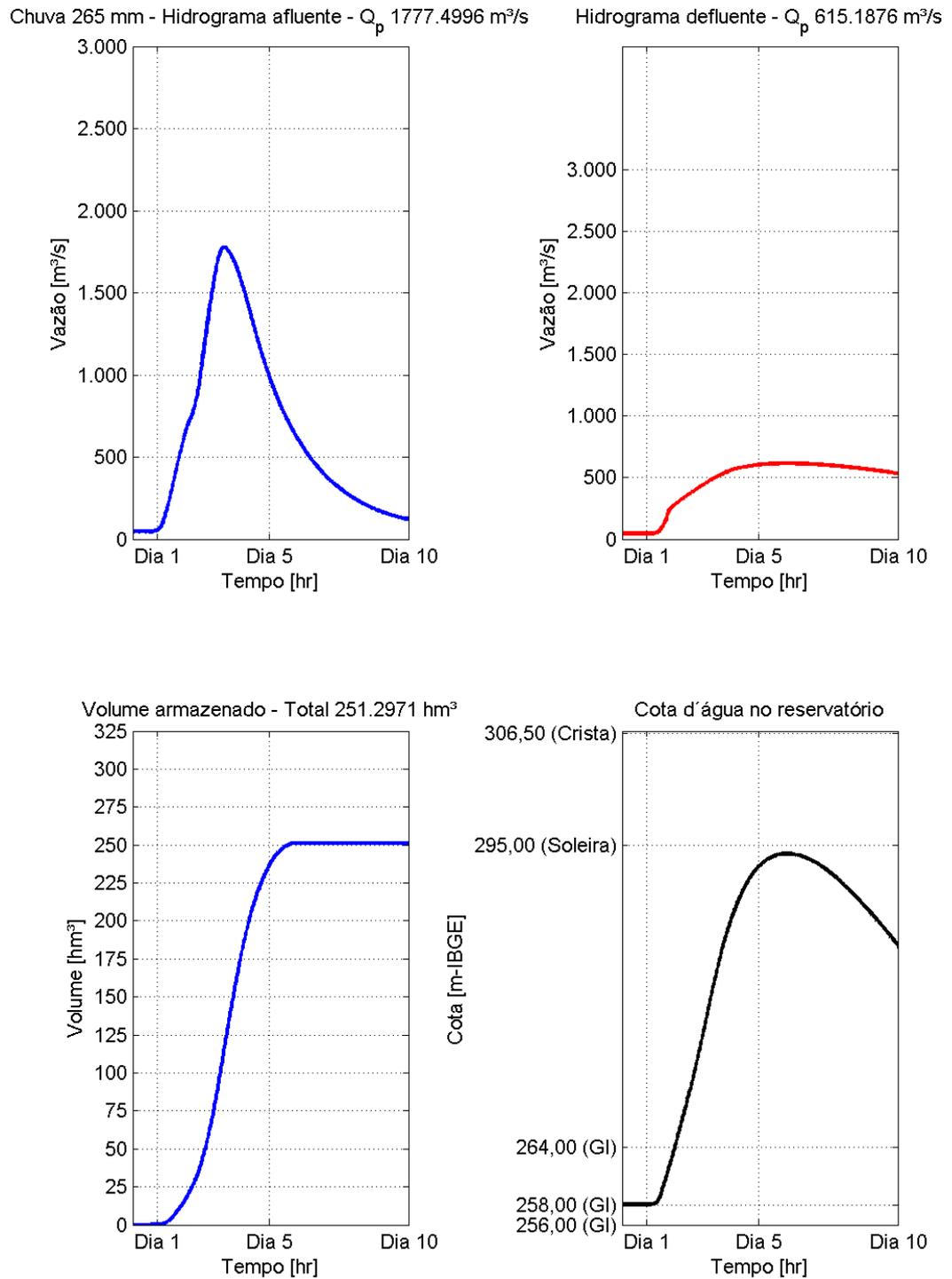


Figura 127. Chuva de 4 dias com 265 mm acumulados. Abatimento de 65 %.

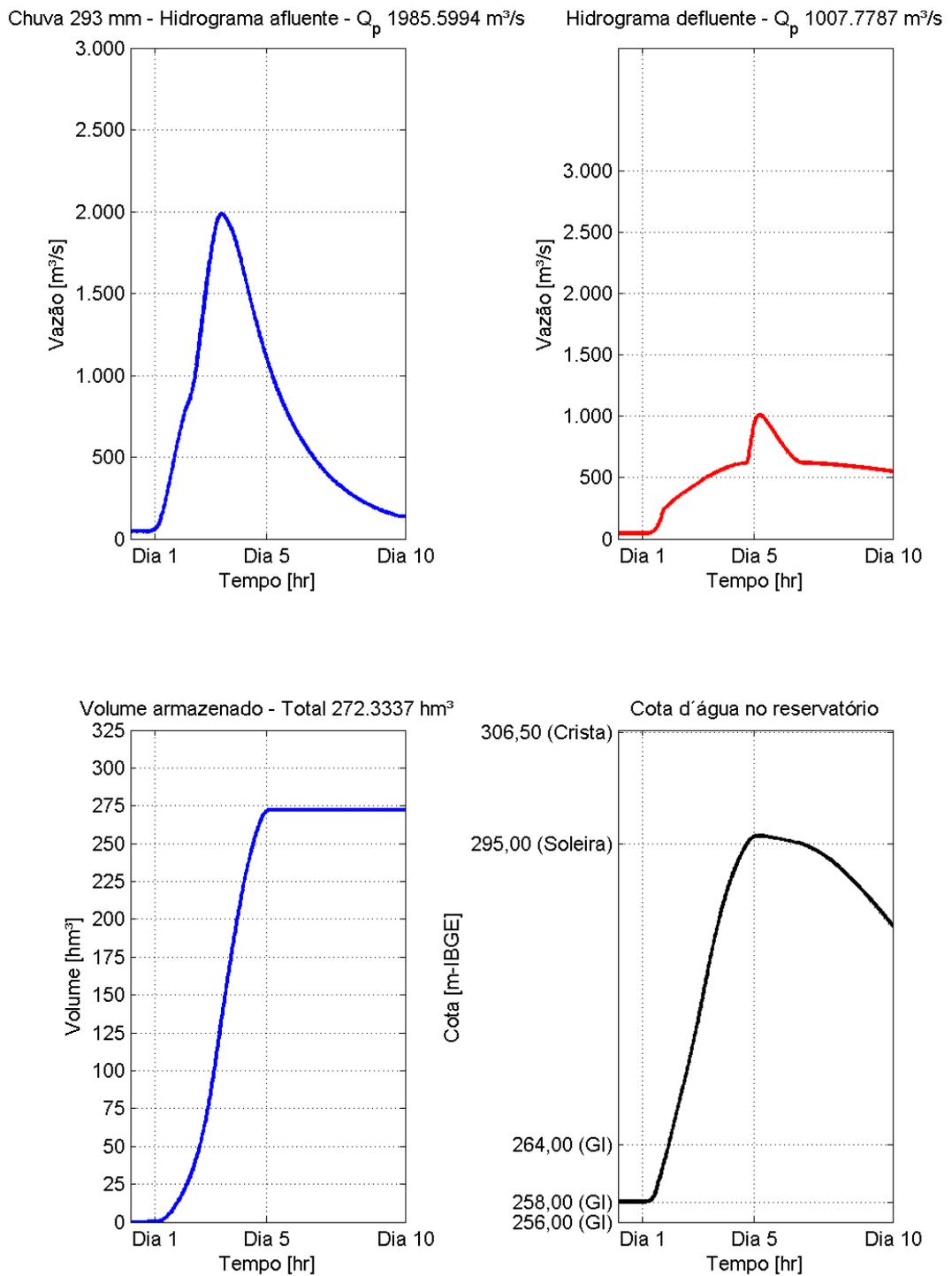


Figura 128. Chuva de 4 dias com 293 mm acumulados. Abatimento 49 %.

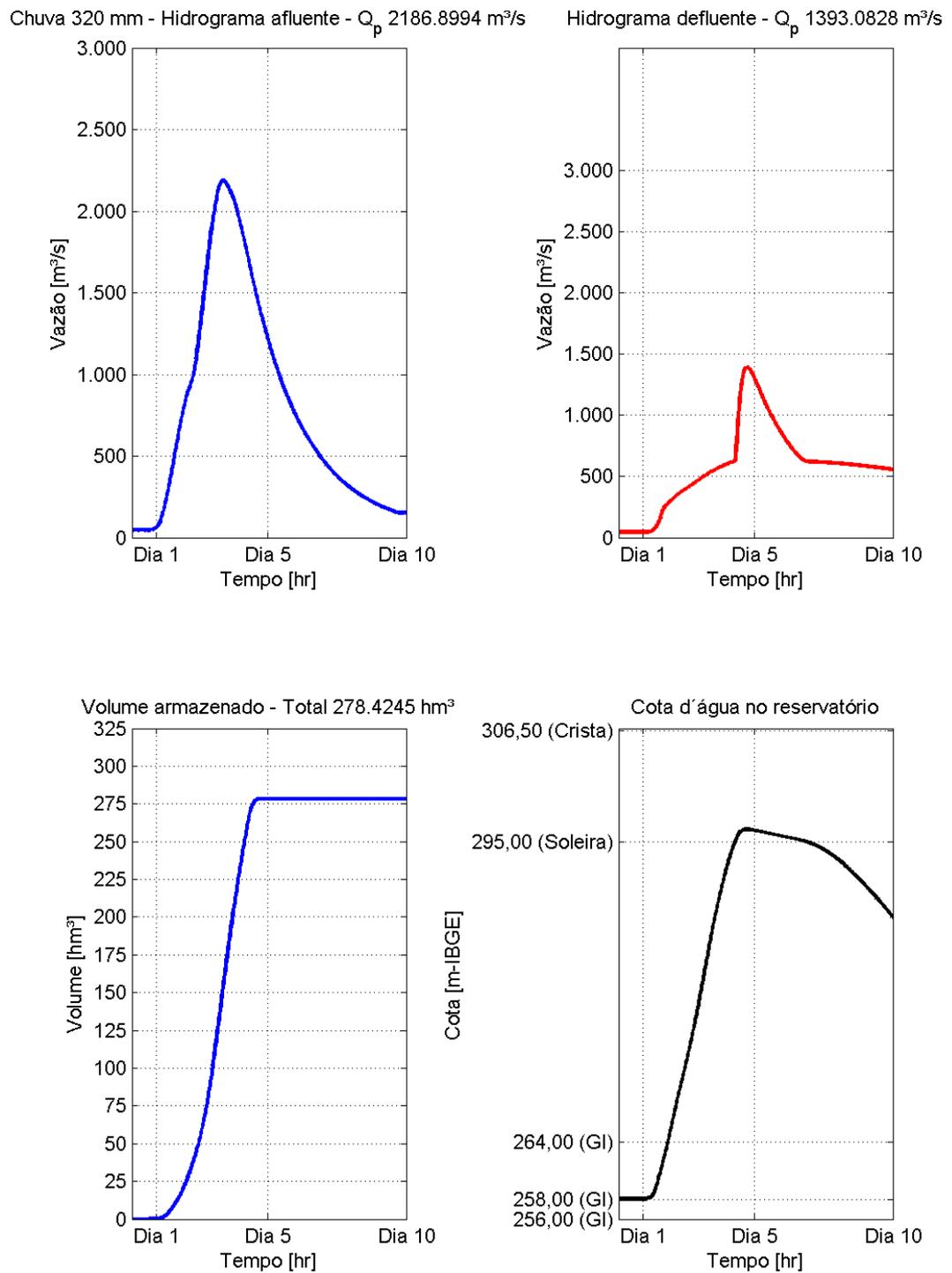


Figura 129. Chuva de 4 dias com 320 mm acumulados. Abatimento de 36 %.

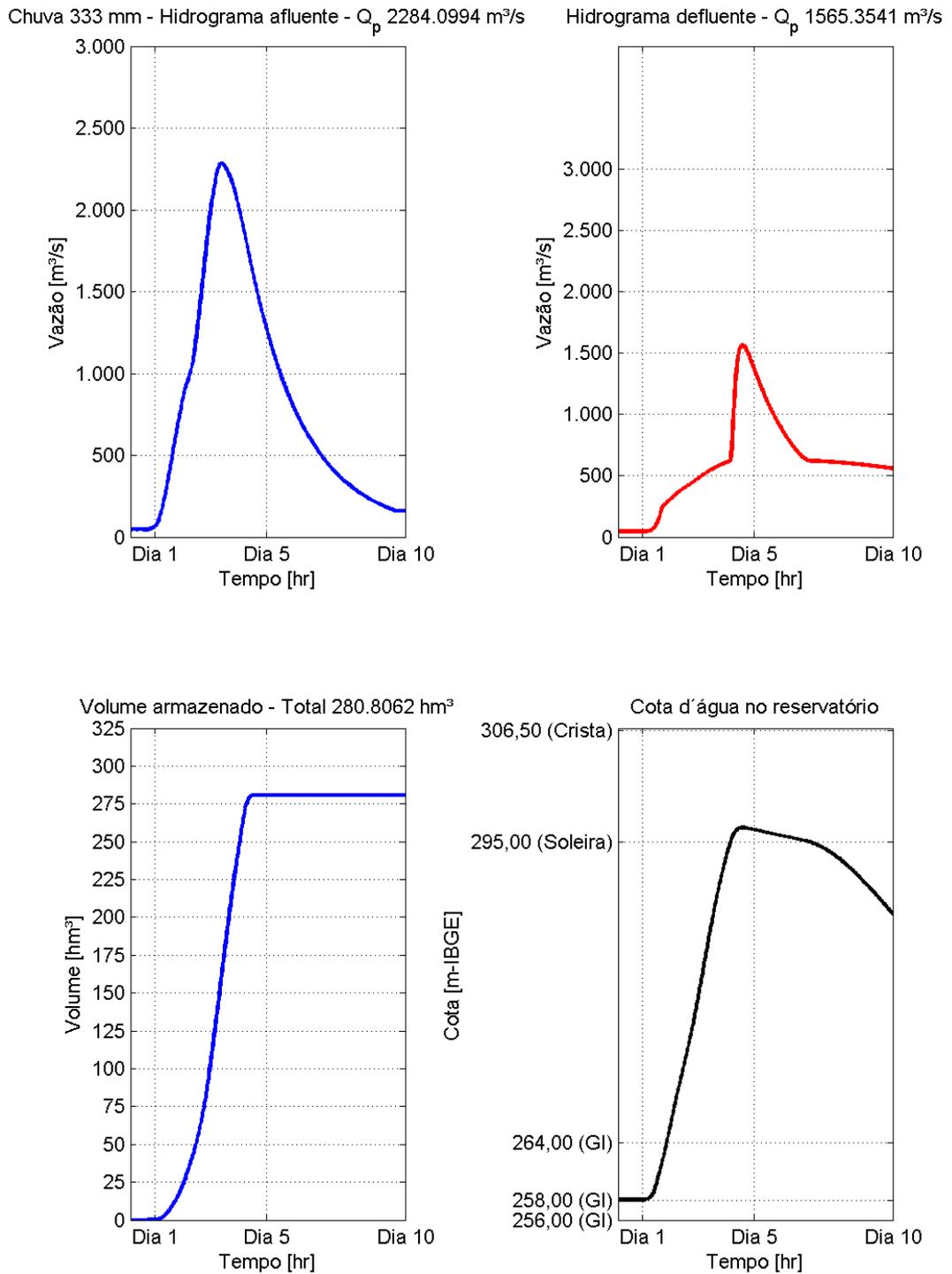


Figura 130. Chuva de 4 dias com 333 mm acumulados. Abatimento de 31 %.

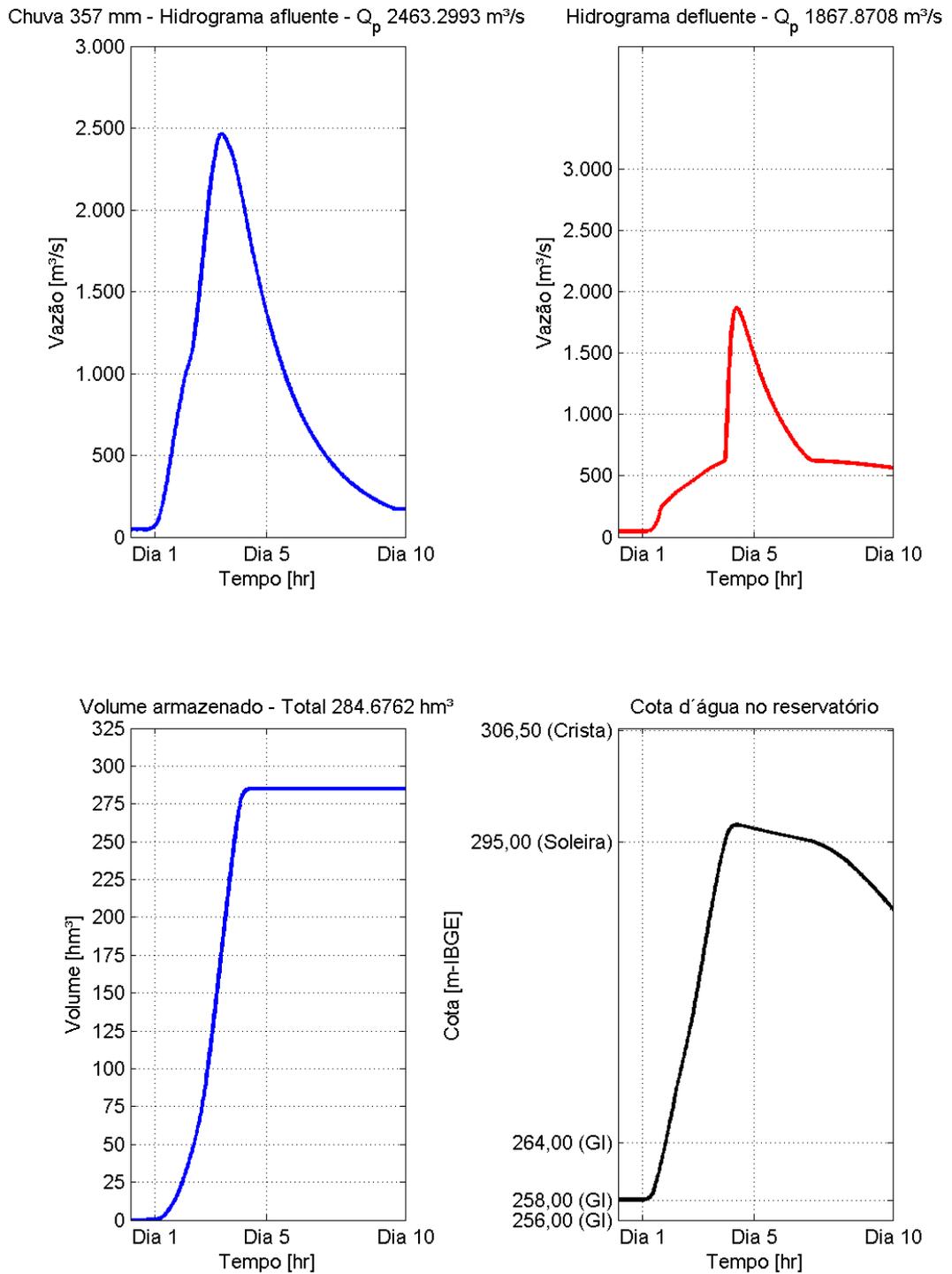


Figura 131. Chuva de 4 dias com 357 mm acumulados. Abatimento de 24 %.

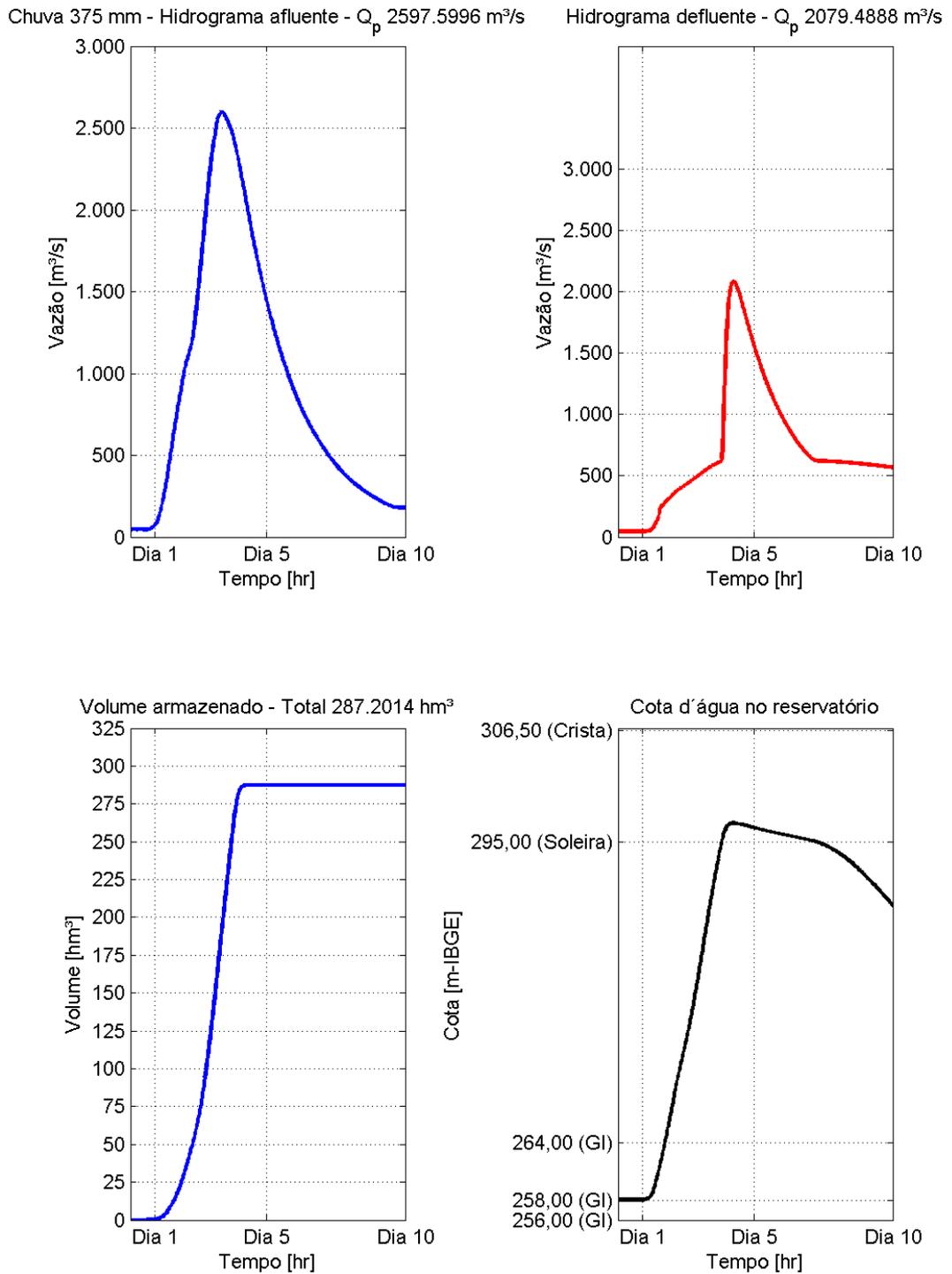


Figura 132. Chuva de 4 dias com 375 mm acumulados. Abatimento de 20 %.

Com a análise de enchimento, a variável de precipitação determina a interpretação do evento e o comportamento do armazenamento da água no reservatório. A chuva passa a ser o limiar para classificado do evento hidrológico e definição do nível de criticidade.

O limiar de 265 mm passa a ser considerado como o limite para início de uma situação de vertimento do reservatório. Para os eventos analisados, mesmo sob condição de vertimento, a Barragem Norte abate até 50% da vazão de pico com a mesma proporção de contenção de volume total do hidrograma afluente.

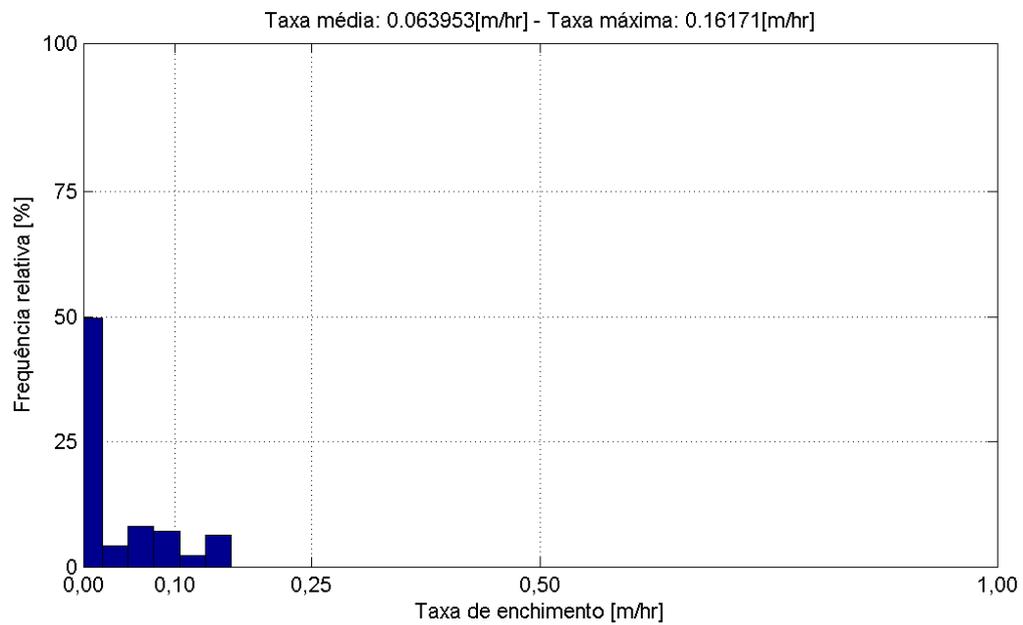
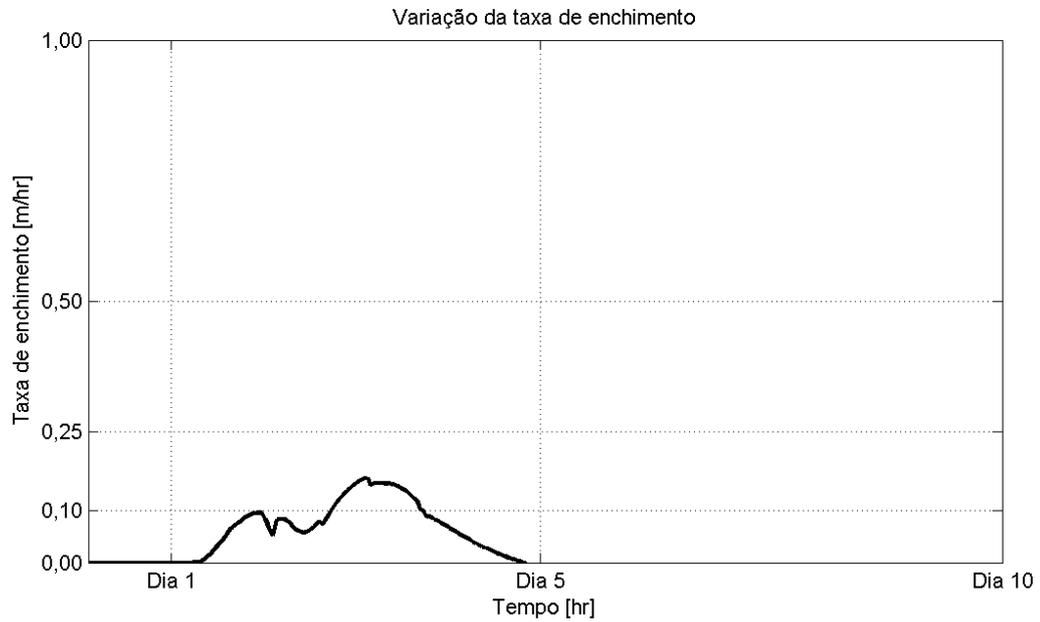


Figura 133. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 105 mm.

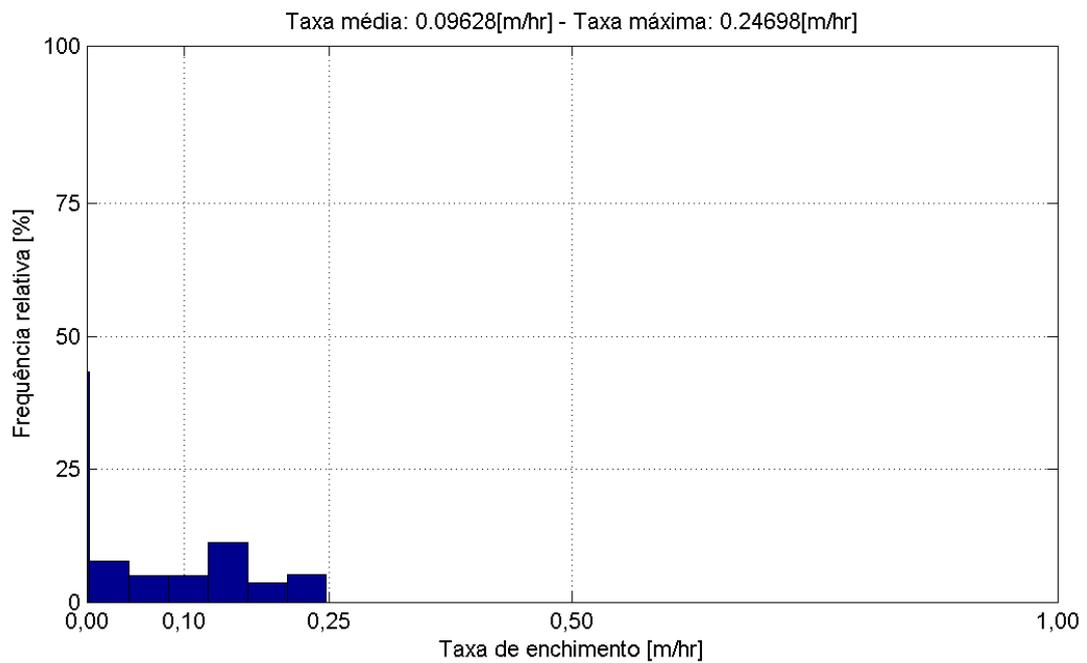
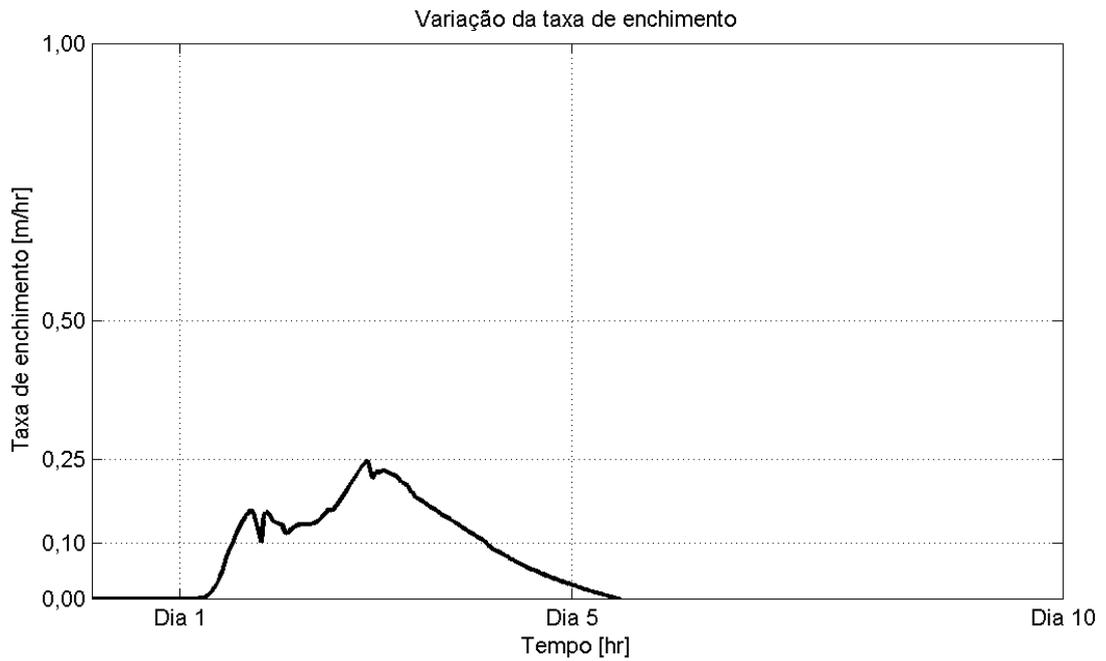


Figura 134. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 173 mm.

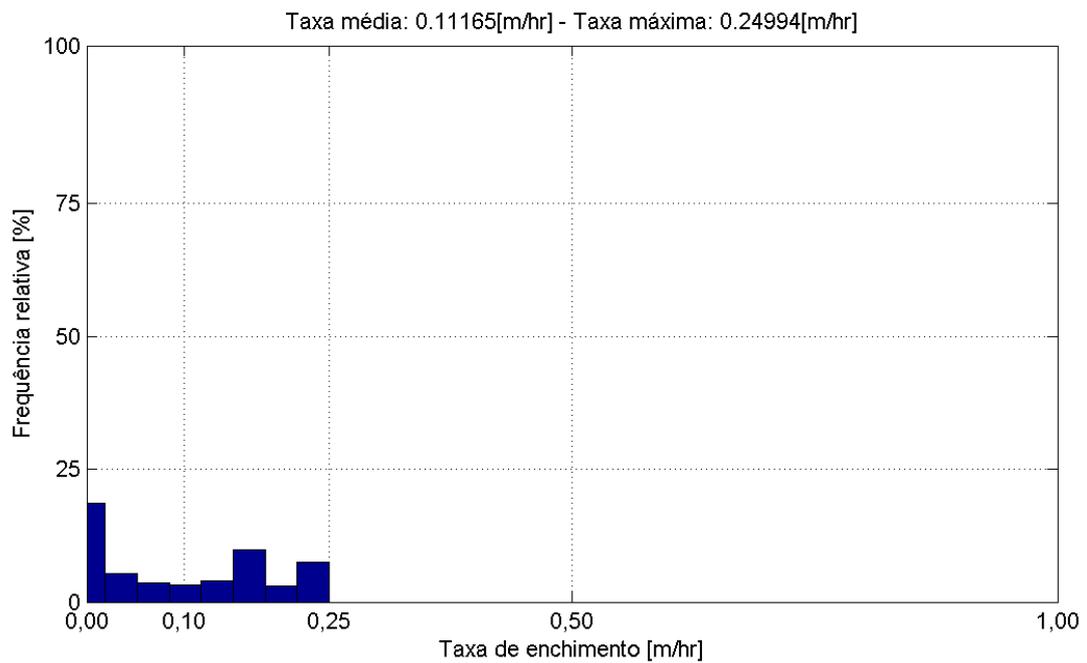
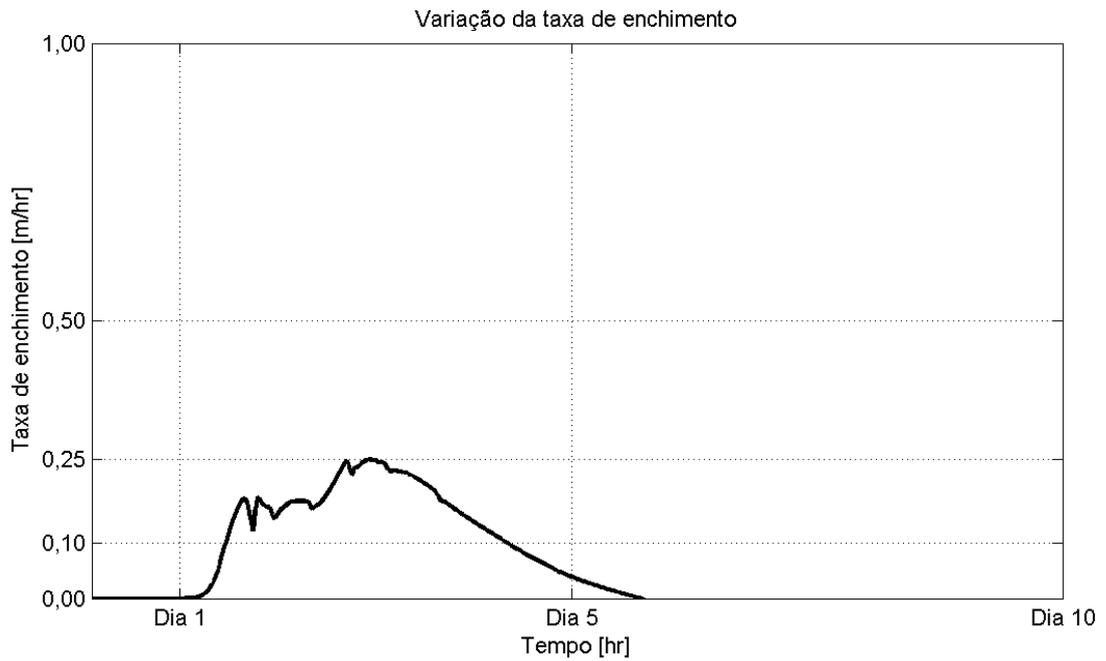


Figura 135. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 208 mm.

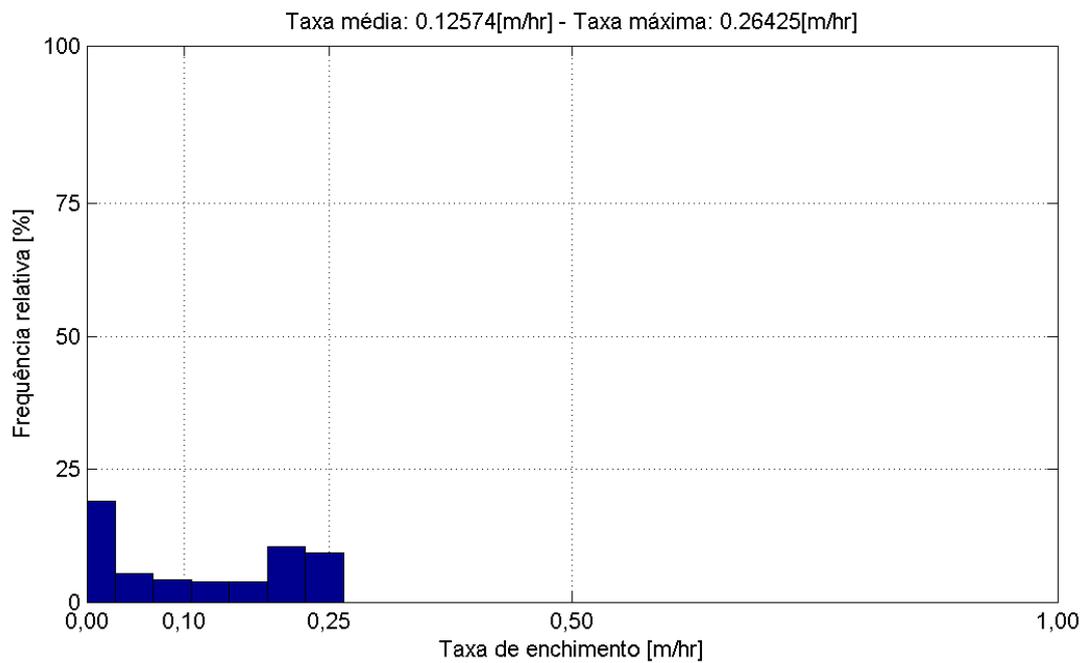
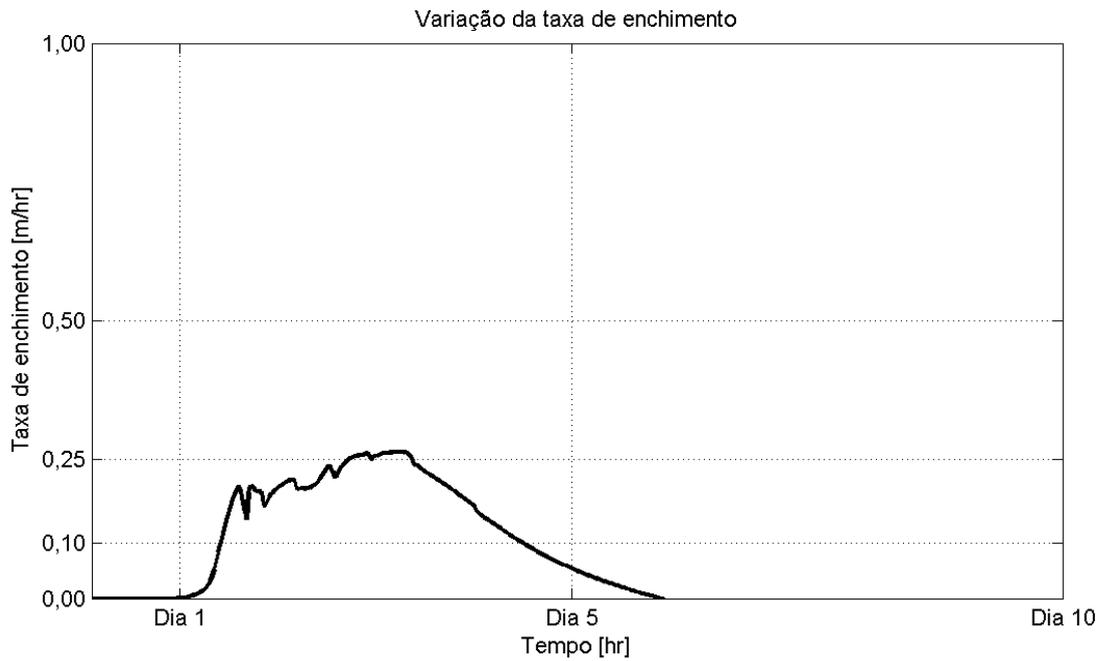


Figura 136. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 243 mm.

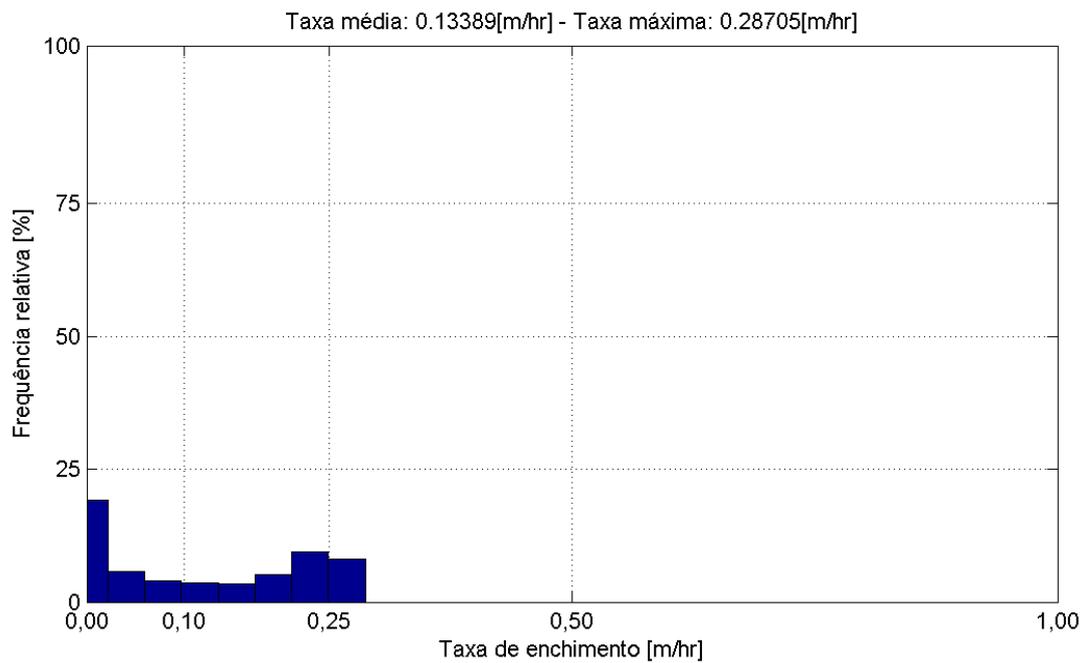
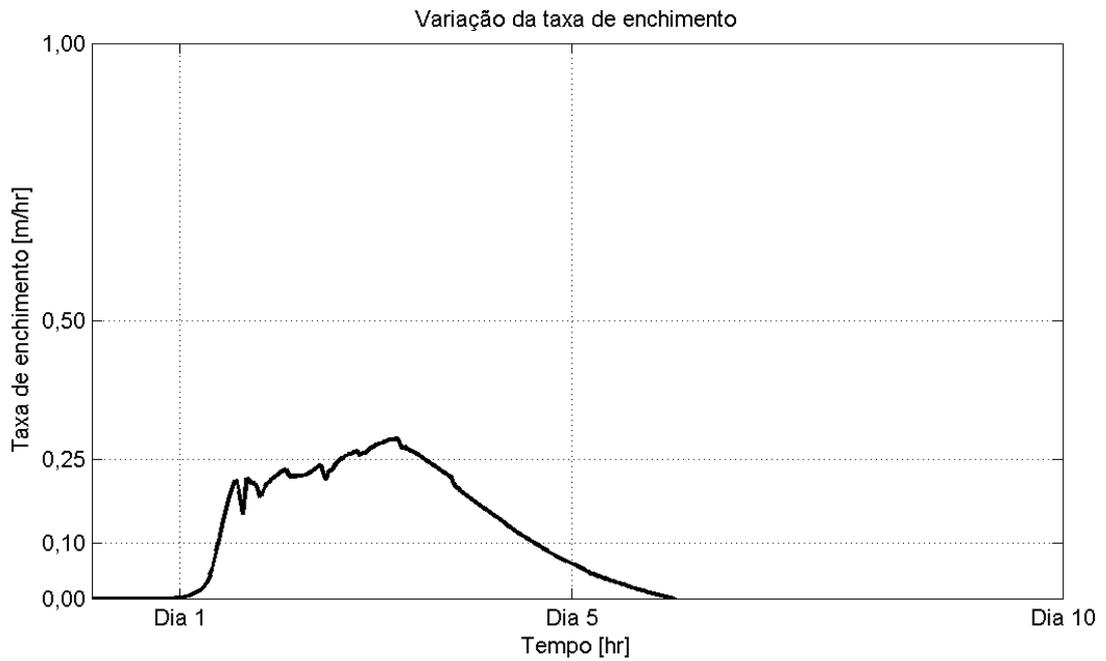


Figura 137. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 265 mm.

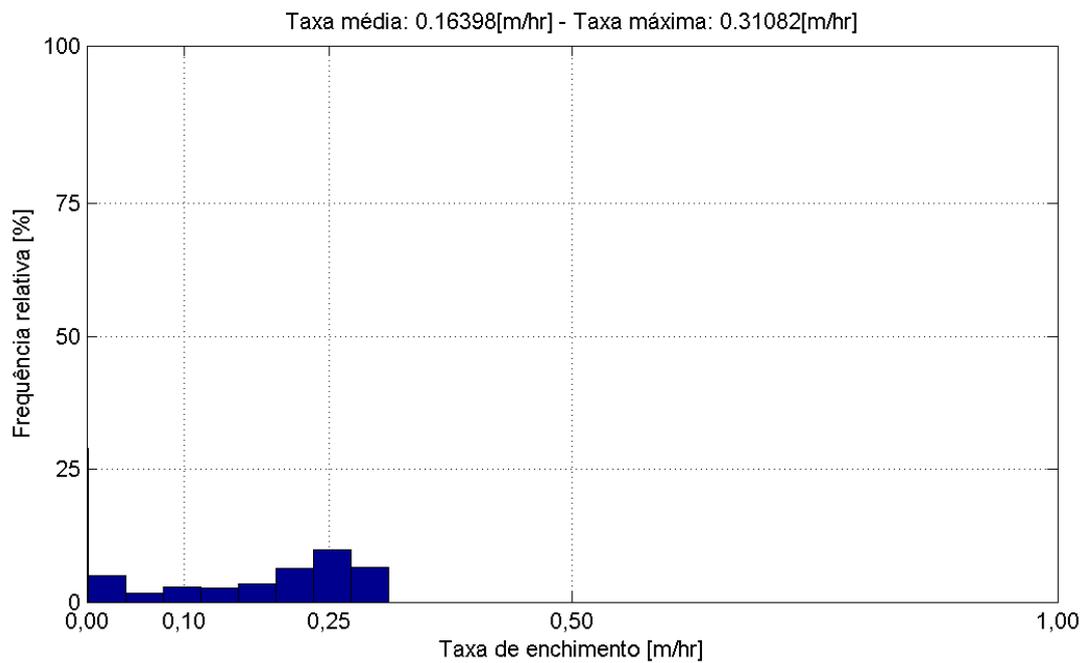
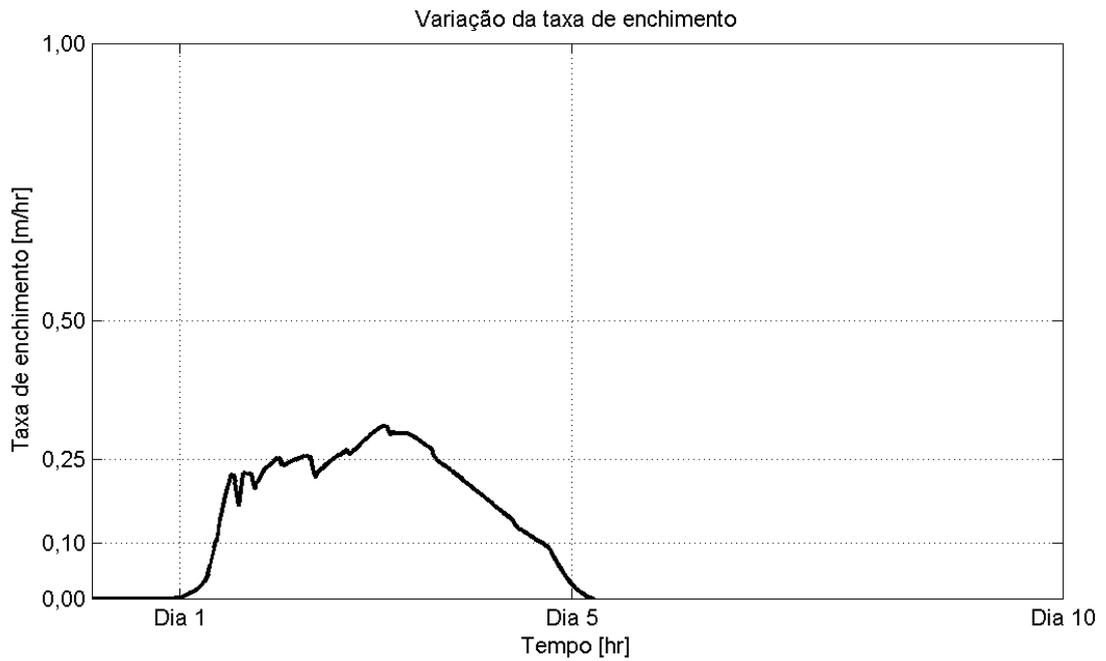


Figura 138. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 293 mm.

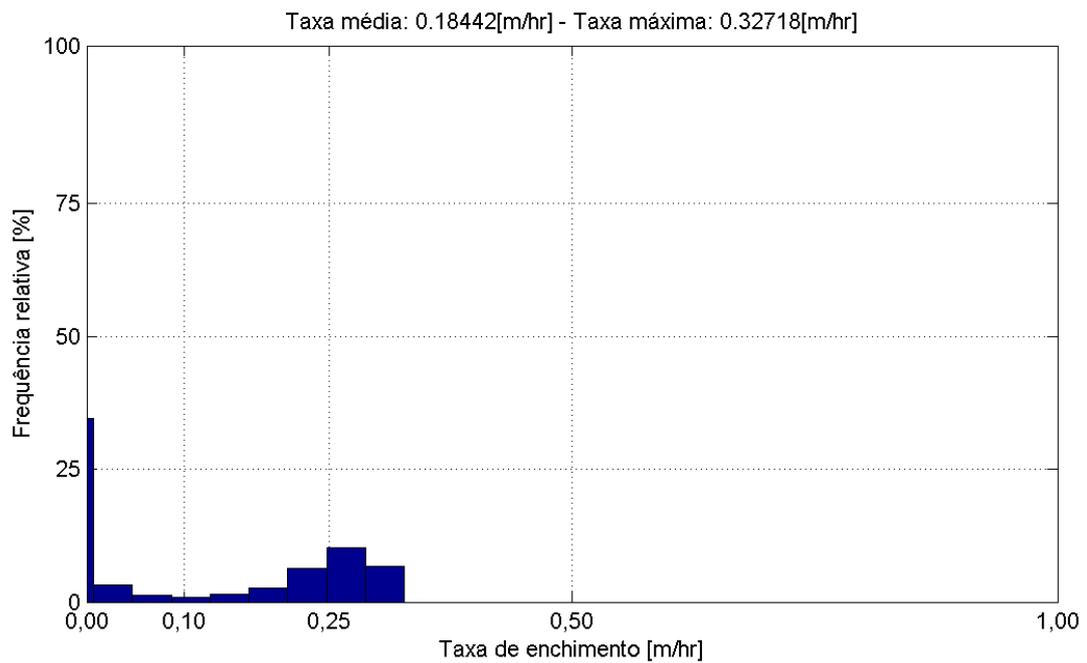
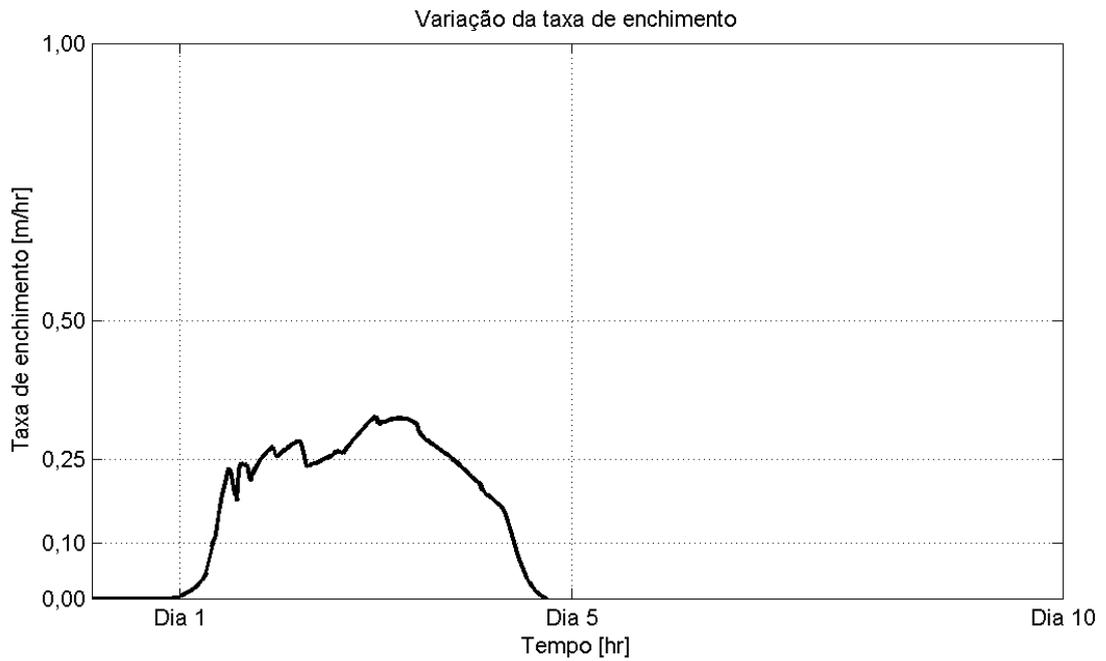


Figura 139. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 320 mm.

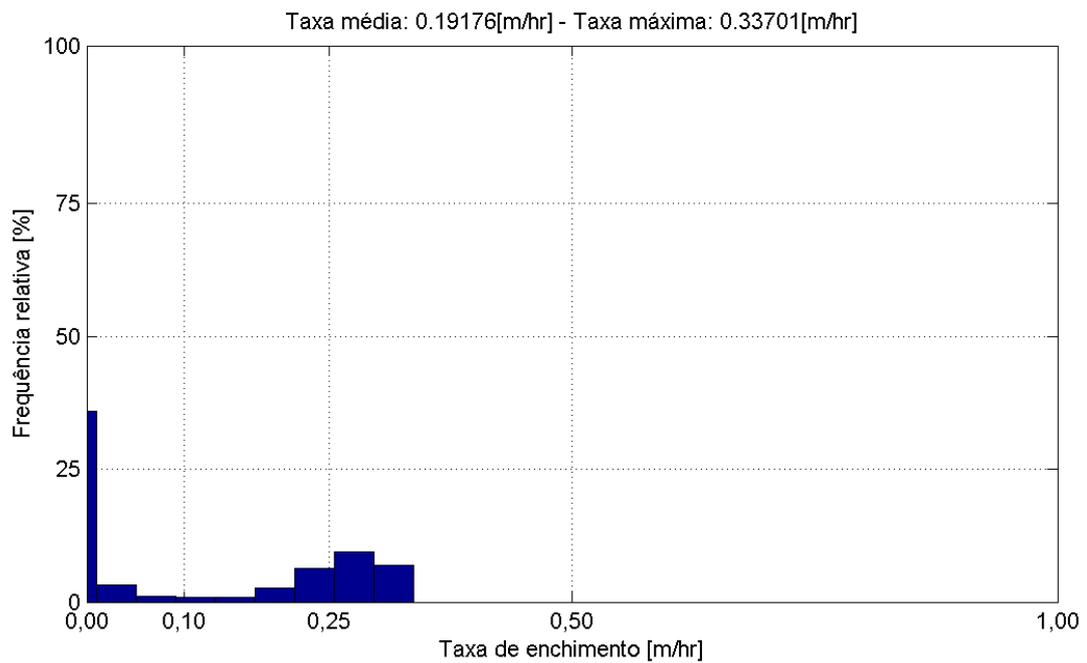
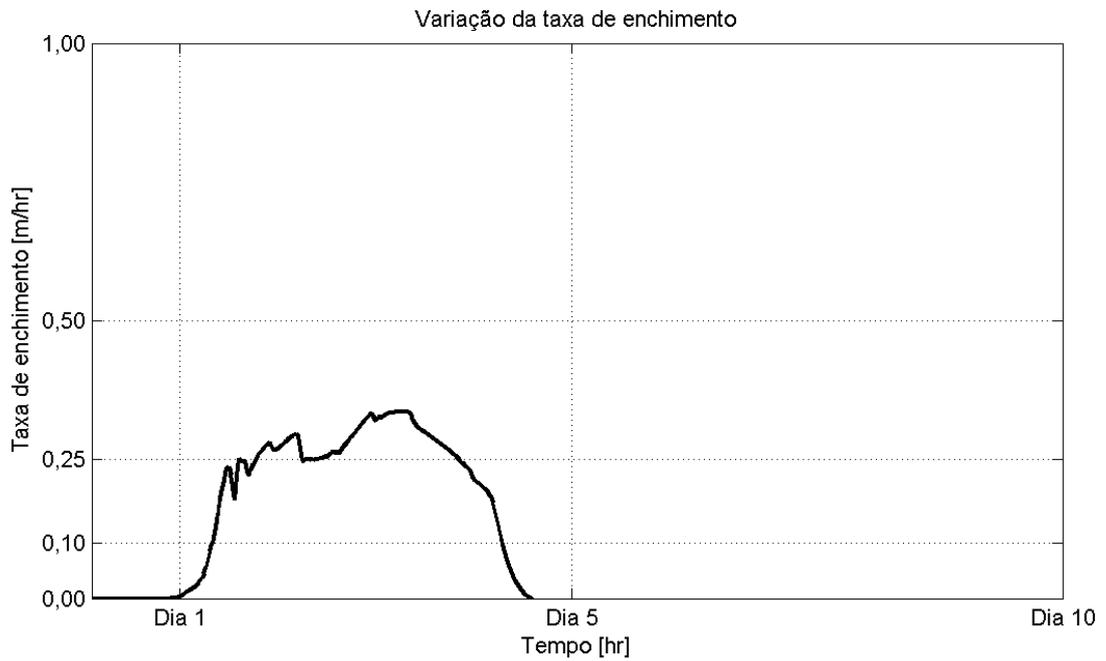


Figura 140. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 333 mm.

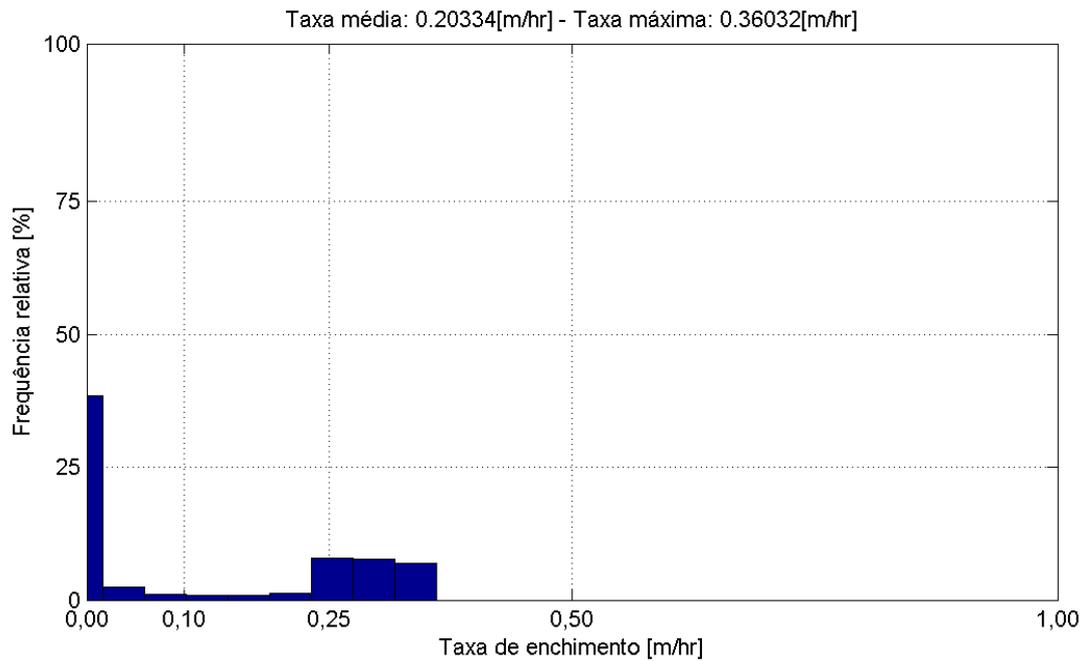
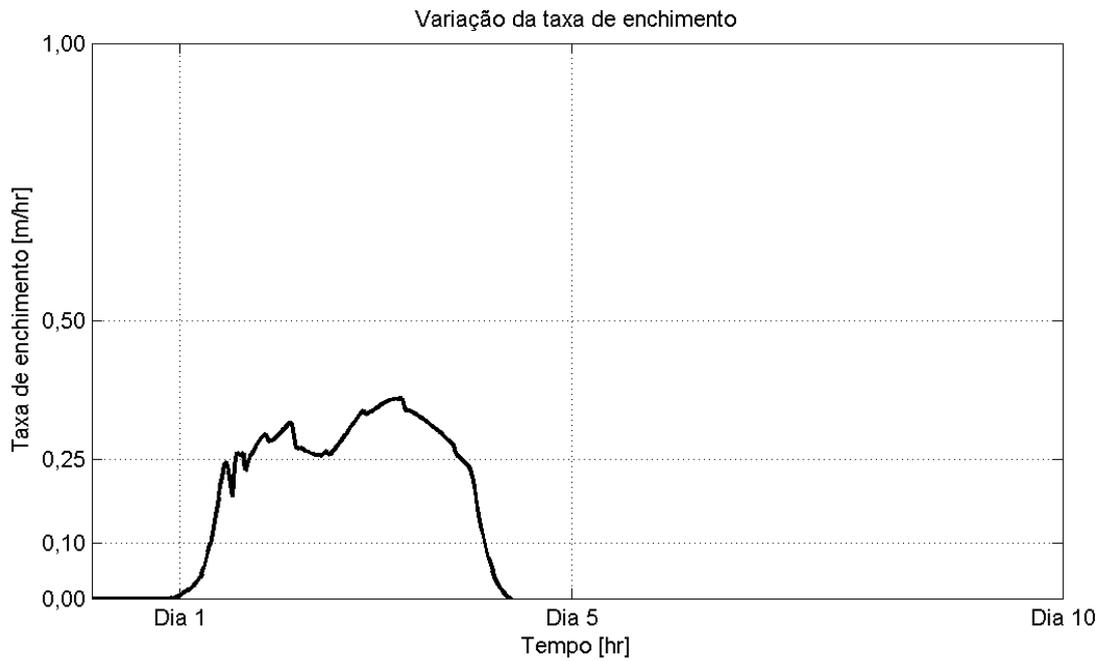


Figura 141. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 357 mm.

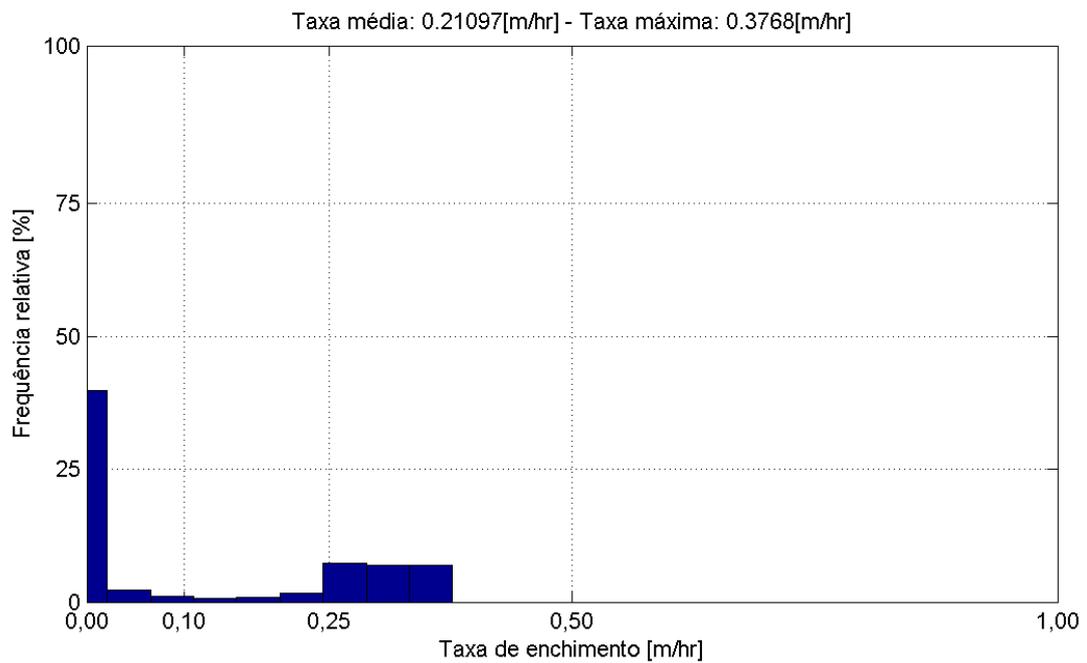
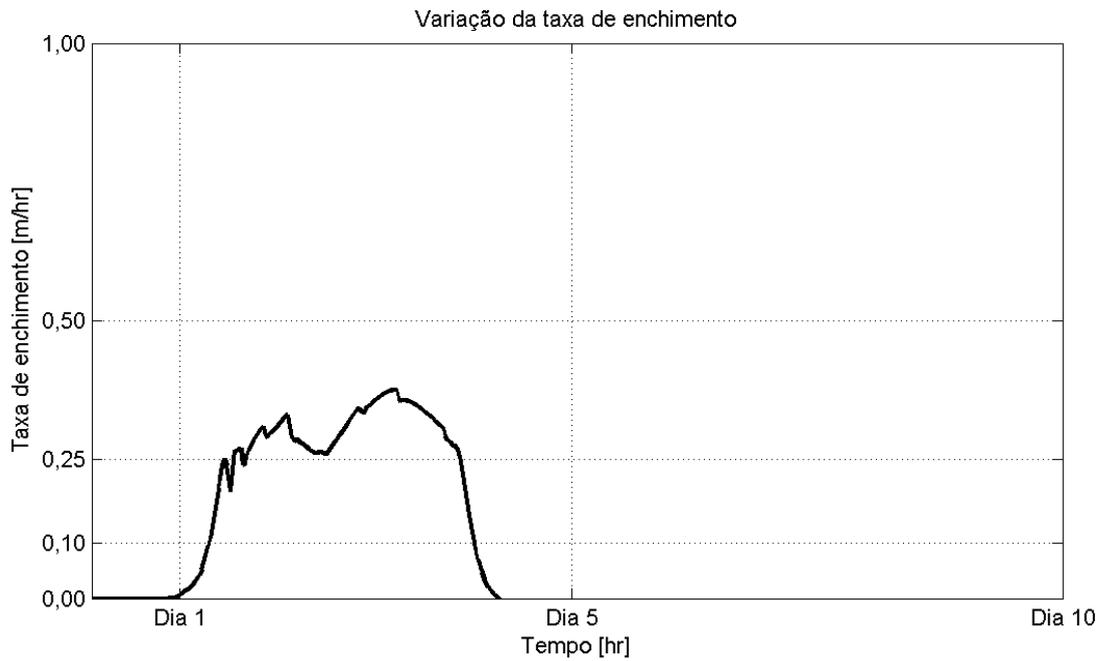


Figura 142. Taxa de enchimento do reservatório para chuva de projeto de 375 mm.

4.5.3 SIMULAÇÃO DE Esvaziamento

Com uso do modelo numérico hidráulico, as taxas de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte são apresentadas para cada estado hidráulico esperado do reservatório em relação à chuva de projeto. Na Tabela 6 está o resumo dos resultados operacionais.

Tabela 10. Esvaziamento do reservatório da Barragem Norte.

Chuva	Cota d'água [m-IBGE]	Média [m/hr]	Máxima[m/hr]	Tempo Total [d]
105	272,00	0,01	0,12	5
173	281,40	0,01	0,18	6
208	286,00	0,01	0,16	8
243	291,00	0,01	0,16	8
265	294,00	0,02	0,15	9
293	295,00	0,02	0,13	9
320	295,00	0,02	0,14	9
333	295,00	0,02	0,14	9
357	295,00	0,02	0,13	9
375	295,00	0,02	0,13	9

Na Figura 47 estão ilustrados os períodos de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte, considerando uma margem de 2 dias corridos em caso de situação anormal.

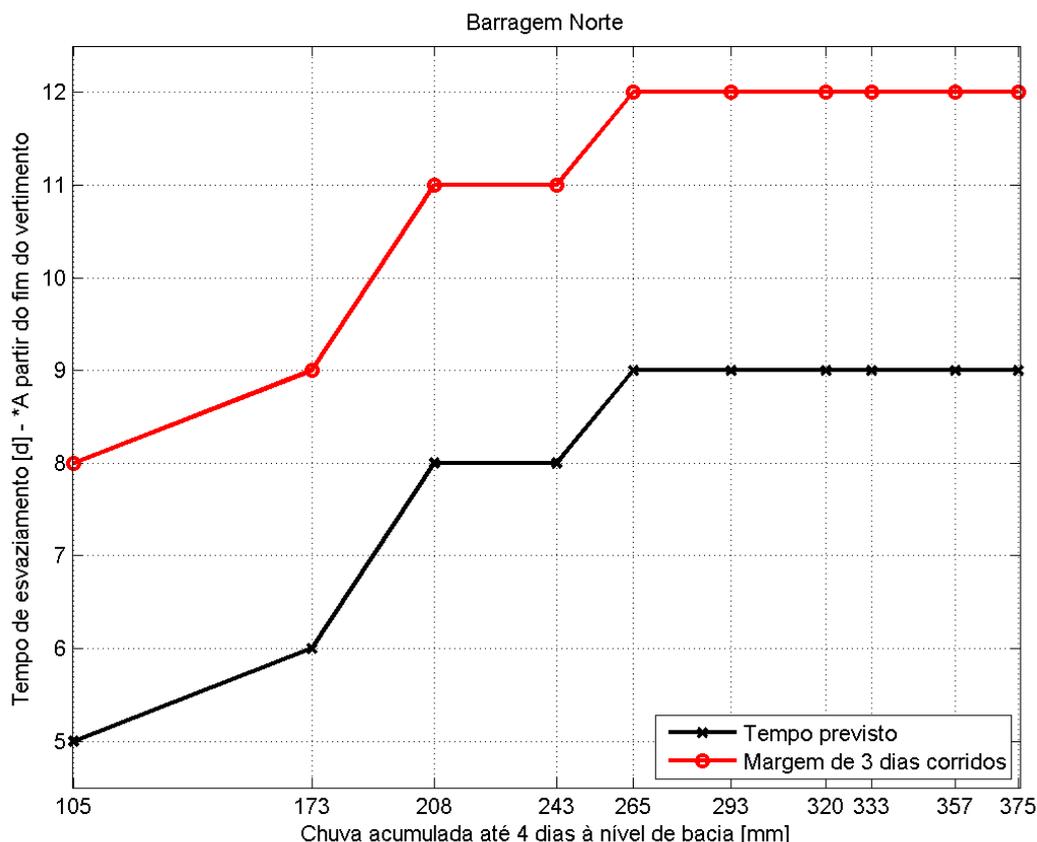


Figura 143. Período de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte.

A análise numérica de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte foi desenvolvida para a passagem completa do evento hidrológico. Os critérios de início de esvaziamento foram a vazão igual ou menor do que 2.000 m³/s na seção de Blumenau e vertimento nulo pela soleira livre do vertedor. Nas figuras abaixo estão resumidas as simulações de esvaziamento do reservatório para as chuvas de 105 mm, 173 mm, 208 mm, 265 mm, 293 mm e 375 mm

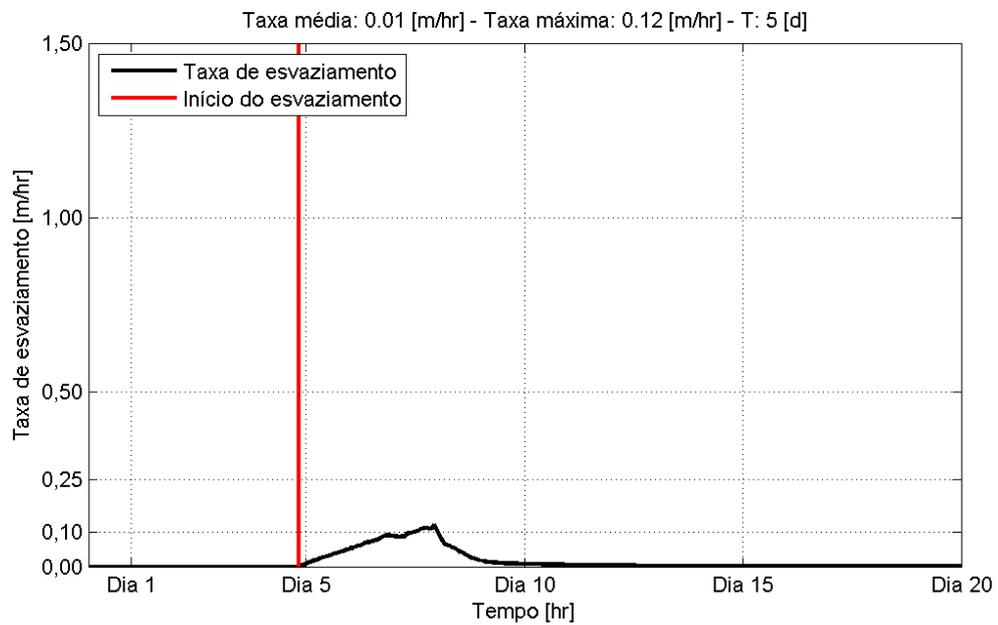
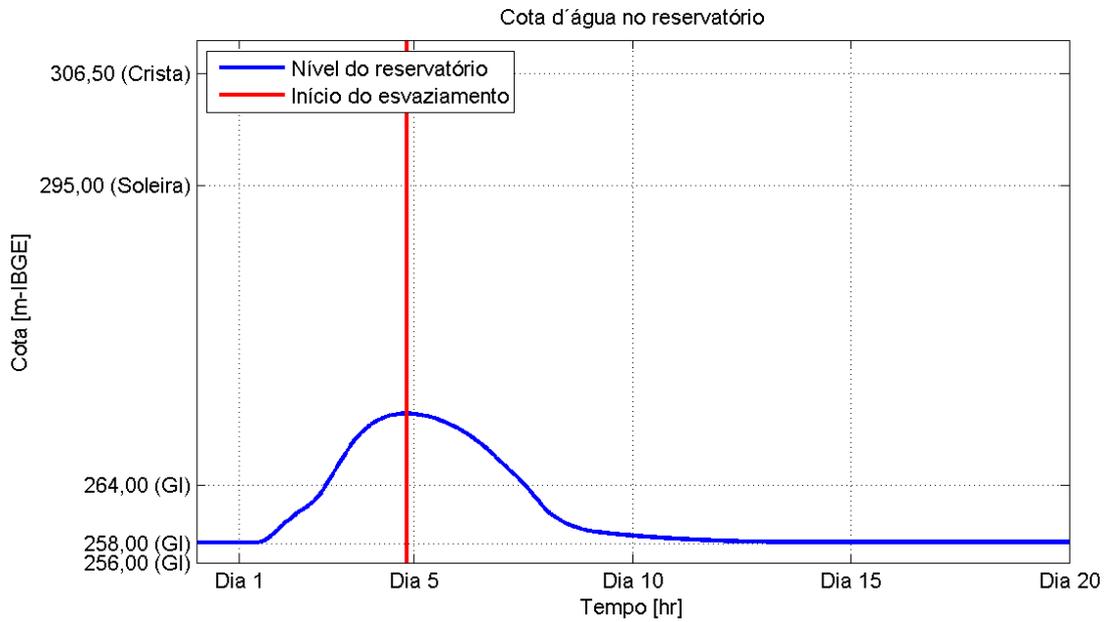


Figura 144. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 105 mm.

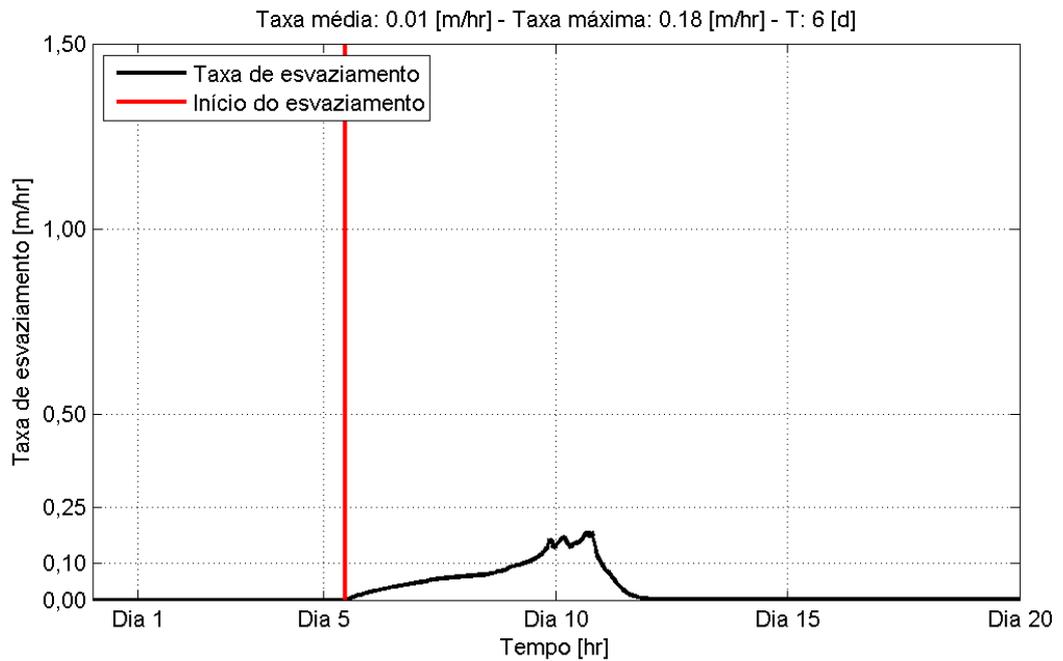
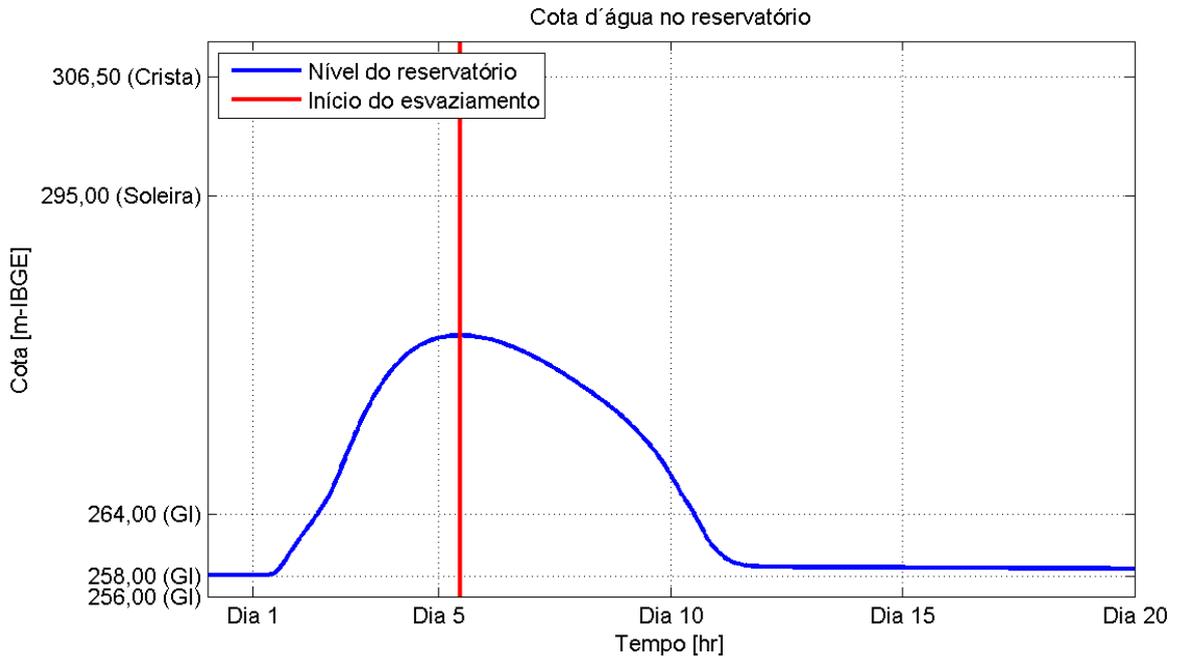


Figura 145. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 173 mm.

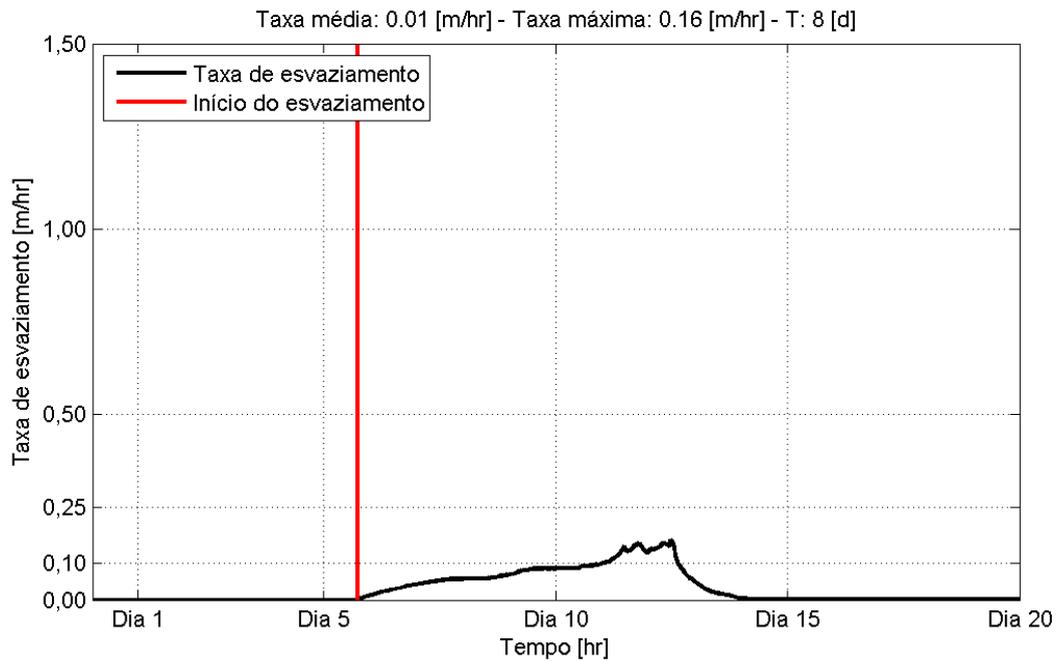
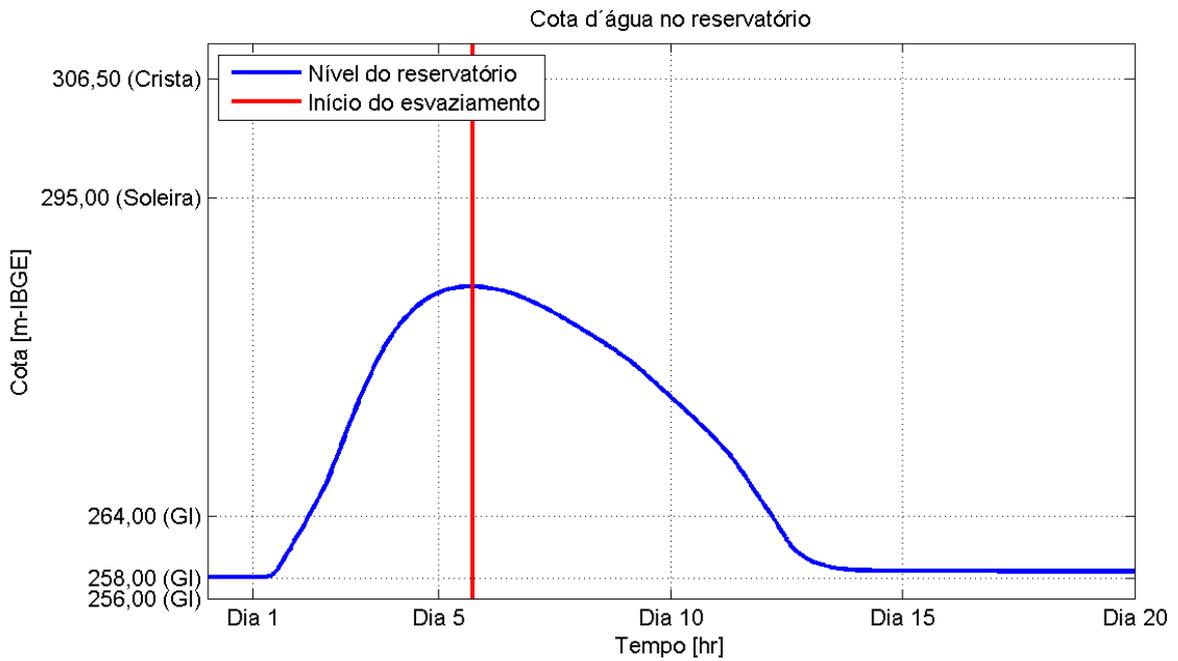


Figura 146. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 208 mm.

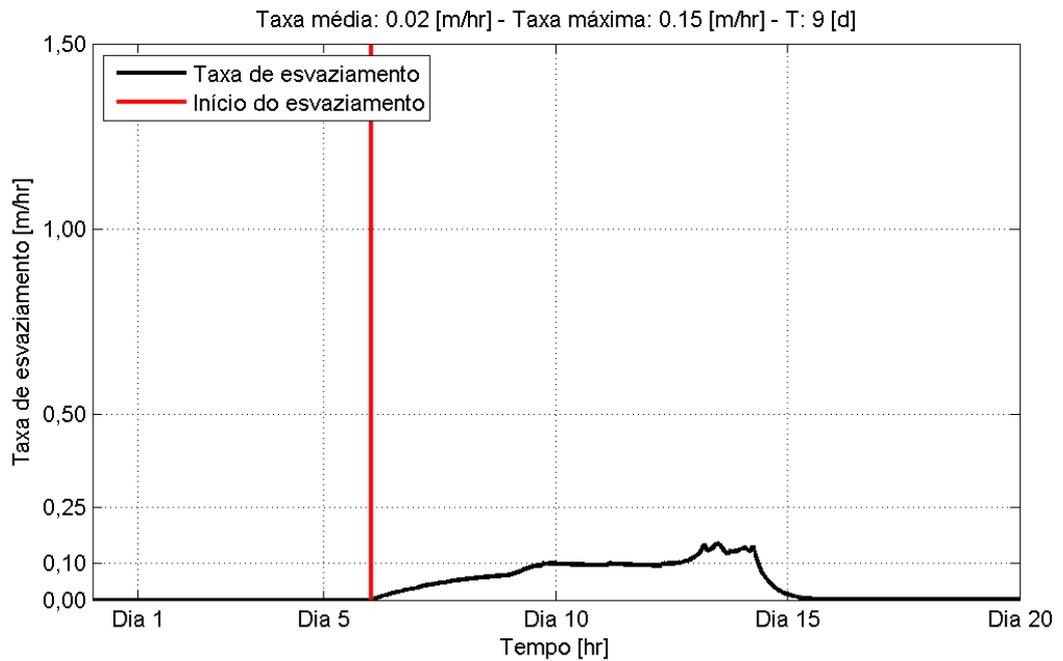
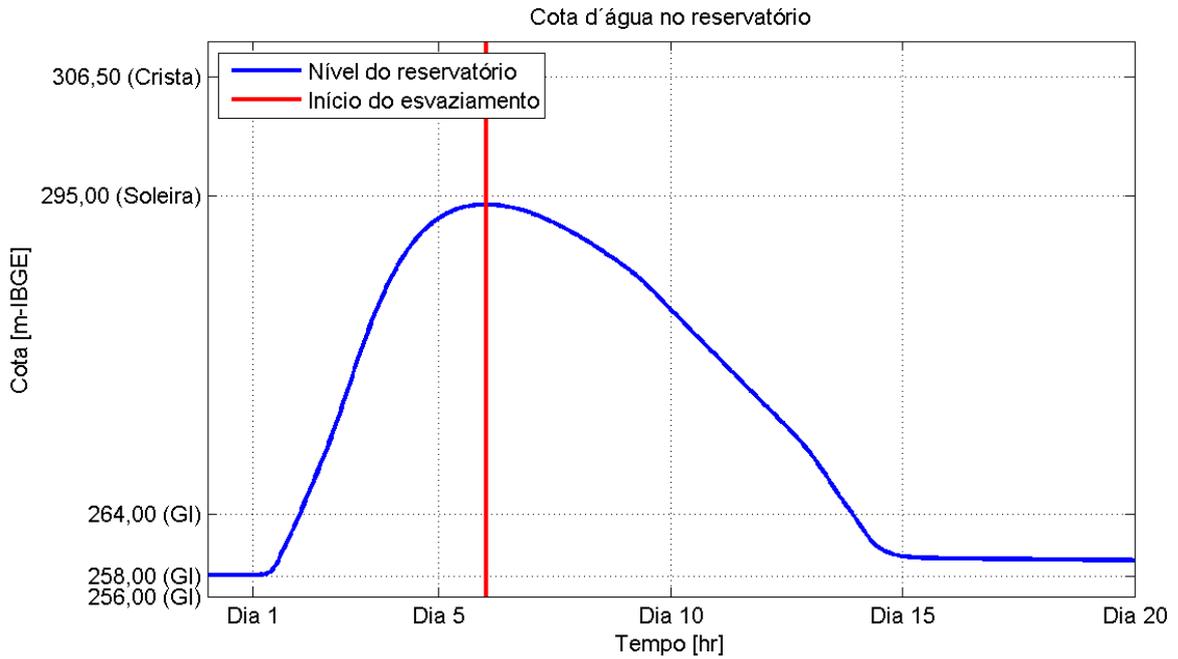


Figura 147. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 265 mm.

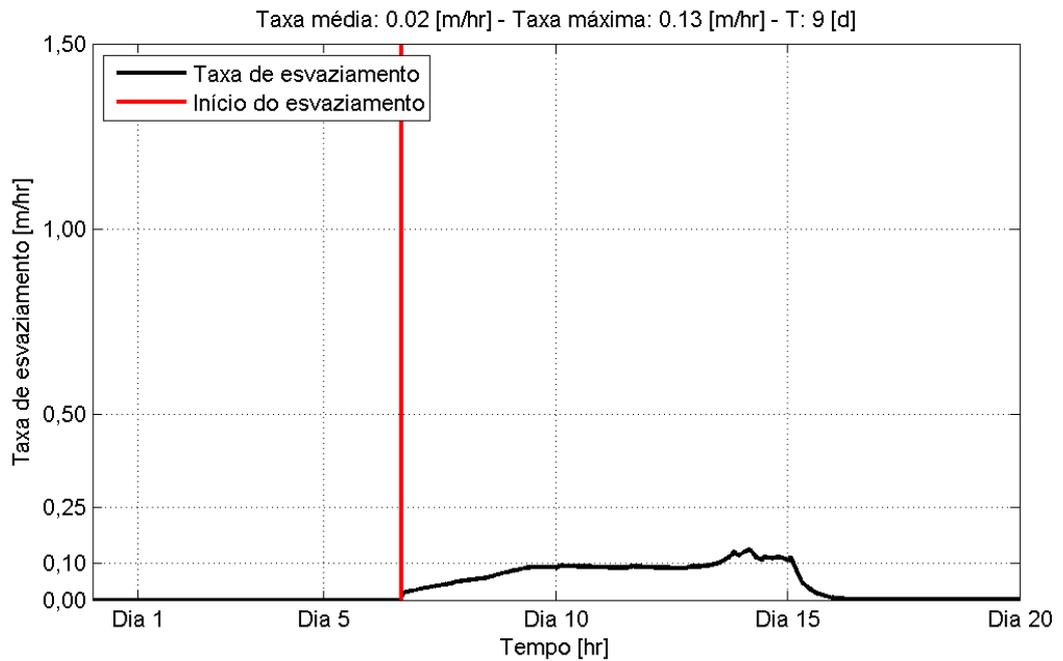
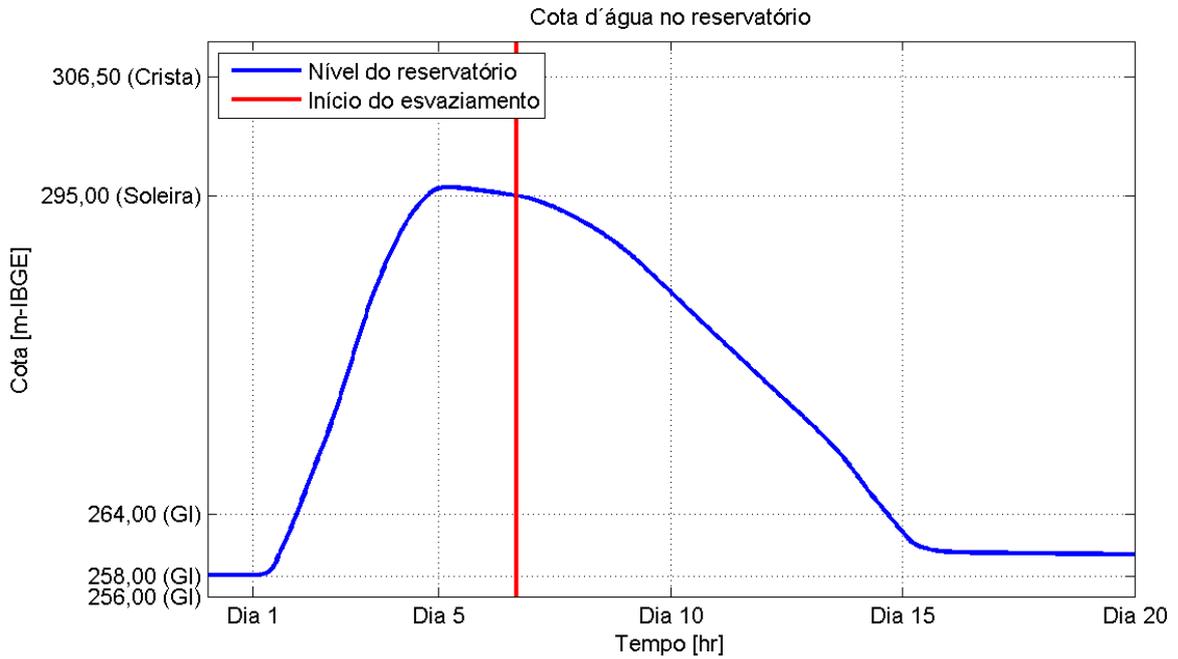


Figura 148. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 293 mm.

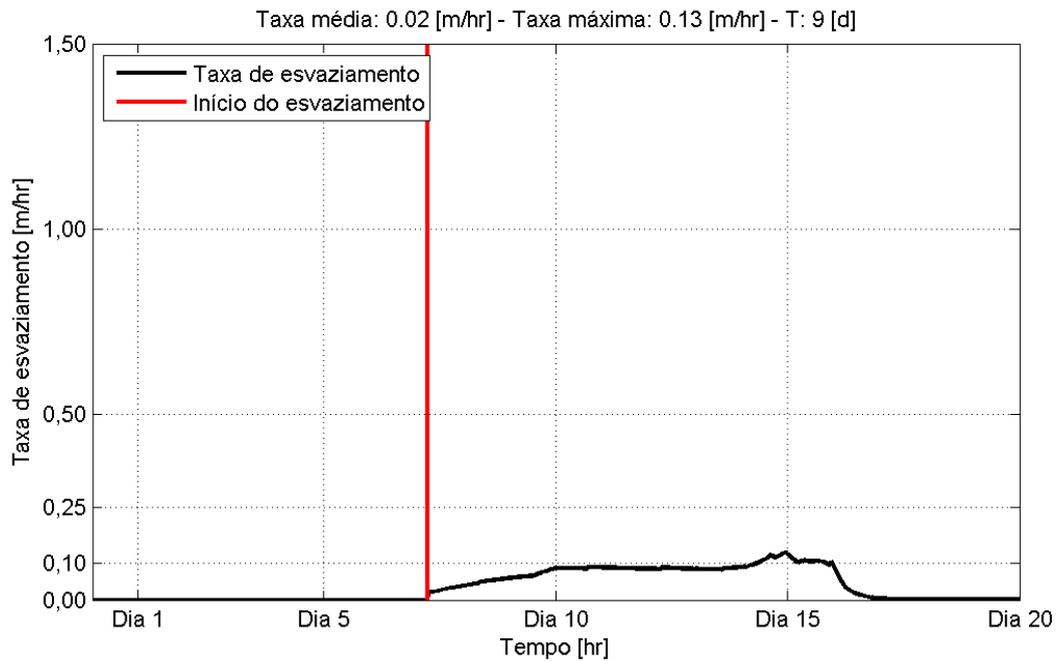
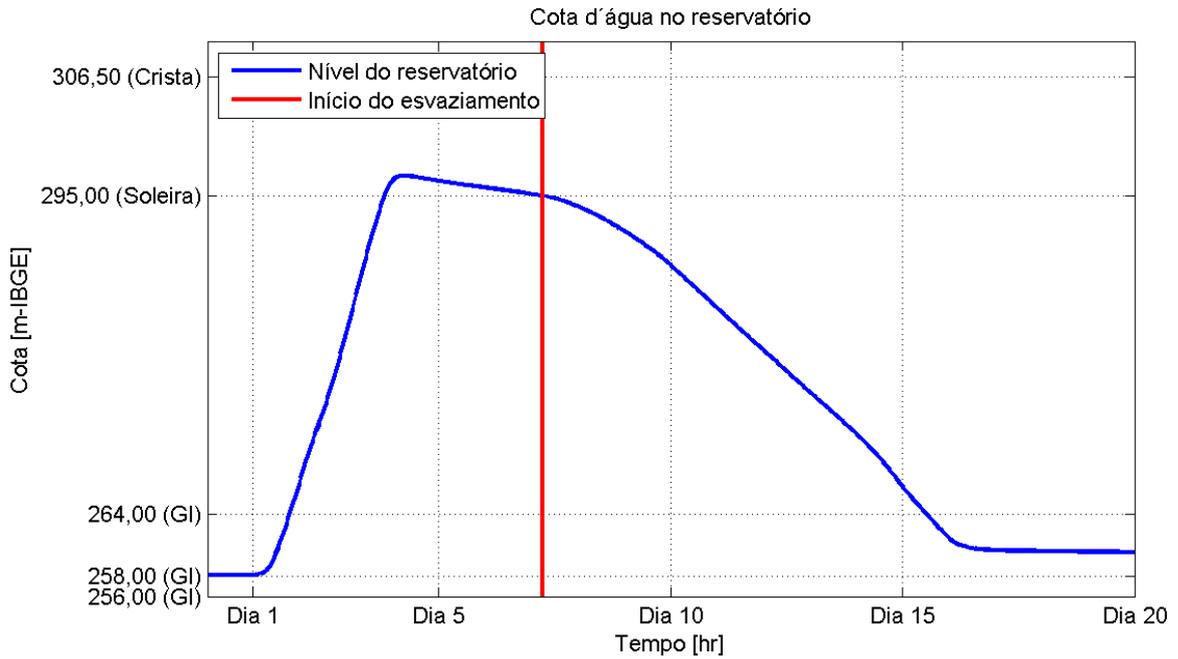


Figura 149. Simulação de esvaziamento do reservatório da Barragem Norte. Chuva 375 mm

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE COOPERAÇÃO INTERNACIONAL DO JAPÃO (JICA). Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do Rio Itajaí. Relatório Final. 2011.

CHOW, V.T. 1959. Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 p.

FREAD, D.L., JIN, M., LEWIS, J. M. An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation. In: "Proceedings of North American Water and Environment Congress '96, ASCE", Anaheim, California, June, 1996, pp. 22-28.

JARRETT, R.D. Hydraulics of High-gradient Streams. ASCE, Journal of Hydraulics, Volume 110, No. HY 11, pages 1519 – 1539, 1984.

LOPES, J.D. Influência de dados topobatimétricos detalhados na modelagem hidrodinâmica de canais: UHE Tucuruí – PA. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, SC, 2015. 109p.

MIROSLAW-SWIATEK, D. Unsteady 1D Flow Model of Natural Rivers with Vegetated Floodplain – An Application to Analysis of Influence of Land Use on Flood Wave Propagation in the Lower Biebrza Basin. Water Resources Management and Modeling. Purna Nayak (Ed.), InTech. 2012.

SINGH, K.P. & SNORRASON, A. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam parameters and simulation models. Journal of Hydrology, Vol 68, pp. 295-310. 1984.

USACE-HEC. River Analysis System, HEC-RAS v4.1 – Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 351p, USA, 2010.