

# PCH Paranoá

## Plano de Segurança de Barragem

### Volume IV - Plano de Ação de Emergência

#### Seção I – Informações Gerais do PAE e da Barragem

##### Revisão



##### Produção



##### REVISÃO

Revisão	Descrição	Execução	Verificação	Aprovação	Data
A	Emissão	GBA / MDM	JDL	HLR	20/03/2017
0	Atendimento	GBA	HLR	PGL	06/04/2017
1	Atualização	CEB G	CEB G	CEB G	28/02/2019
2	Atualização	CEB G	CEB G	CEB G	05/06/2019

## APRESENTAÇÃO

Este documento corresponde ao Plano de Ação de Emergência da Barragem Paranoá, atendendo à Lei Federal nº 12.334/2010, referente à Política Nacional de Segurança de Barragens, e Resolução nº 696/2015 da ANEEL, que estabelece os procedimentos necessários para prevenir a ocorrência e/ou minimizar os danos causados nas áreas e arredores do reservatório, decorrentes de situações críticas que possam vir a ocorrer em virtude de riscos hidrológicos ou da ruptura da barragem.

No presente relatório será abordada a Seção I do PAE da PCH Paranoá, sendo que as demais seções, bem como seus códigos, encontram-se especificadas abaixo.

<b>Seção I</b>	<b>Informações Gerais do PAE e da Barragem</b>	<b>312-PCHPA-RT-PAE-001</b>
Seção II	Situações de Emergência	312-PCHPA-RT-PAE-002
Seção III	Procedimentos de Notificação e Sistema de Alerta	312-PCHPA-RT-PAE-003
Seção IV	Responsabilidades Gerais no PAE	312-PCHPA-RT-PAE-004
Seção V	Formulários e Treinamentos	312-PCHPA-RT-PAE-005
Seção VI	Ações de Implantação do PAE	312-PCHPA -RT-PAE-006



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>DOCUMENTOS UTILIZADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E ESTRUTURAS ASSOCIADAS .....</b>	<b>12</b>
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM PARANOÁ .....	12
4.2	LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	18
4.3	APROVEITAMENTOS NA CASCATA DO RIO PARANOÁ.....	20
4.4	ARRANJO GERAL .....	22
4.5	RESERVATÓRIO .....	25
4.5.1	Cota x Área x Volume.....	25
4.5.2	Borda livre .....	26
4.5.3	Estudo de remanso do reservatório .....	26
4.5.4	Estudo de sedimentação e vida útil do reservatório.....	26
4.6	TOMADA D'ÁGUA.....	26
4.7	CASA DE FORÇA .....	30
4.8	GALERIA DO CANAL DE DESVIO.....	32
4.9	VERTEDOURO .....	33
4.10	ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO .....	35
4.11	INSTRUMENTAÇÃO DO BARRAMENTO .....	36
4.11.1	Drenos.....	37
4.11.2	Marco Básico (MB) .....	37
4.11.3	Marco Superficial (MS) .....	37
4.11.4	Medidor de Vazão (MV).....	37
4.11.5	Piezômetro de Tubo (PZ) .....	38
4.11.6	Poços de Alívio (PA) / Poços Drenantes (PD) .....	38
4.11.7	Medidor de Nível de Água (MNA) .....	38
4.11.8	Medidor de Nível de Água (NA) .....	39
<b>5</b>	<b>RECURSOS MATERIAIS E LOGÍSTICOS NA BARRAGEM .....</b>	<b>39</b>
5.1	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO .....	39
5.2	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA .....	39
5.3	RECURSOS MATERIAIS MOBILIZÁVEIS EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA ...	39
<b>6</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....</b>	<b>40</b>
6.1	REGIÃO EM ESTUDO .....	44
6.2	PEDOLOGIA .....	44
6.3	GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E HIDROGEOLOGIA .....	45
6.4	SISMOLOGIA .....	51



---

6.5	HIDROMETEOROLOGIA .....	53
6.5.1	Caracterização Climática .....	53
6.5.2	Vazão média anual .....	53
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Barragem Paranoá.....	12
Figura 2. Mapa de Localização.....	17
Figura 3. Mapa de acessos da PCH Paranoá.....	19
Figura 4. Aproveitamentos no rio Paranoá.....	21
Figura 5. Conformação do barramento da PCH Paranoá.....	22
Figura 6. Vista geral do empreendimento.....	23
Figura 7. Canal de Fuga.....	24
Figura 8. Reservatório da PCH Paranoá.....	25
Figura 9. Paramento montante da tomada d'água Barragem Paranoá.....	27
Figura 10. Segmento da tubulação de adução.....	28
Figura 11. Estrutura da chaminé de Equilíbrio.....	29
Figura 12. Tubulação do Conduto Forçado.....	30
Figura 13. Geradores e Sala de Controle.....	31
Figura 14. Eixo da Turbina Francis e visão da Casa de Força.....	31
Figura 15. Canal de Fuga.....	32
Figura 16. Galeria do canal de desvio.....	33
Figura 17. Vãos do vertedouro (E) e Paramento jusante da comporta segmento (D).....	34
Figura 18. Região de dissipação da água do vertedouro da PCH Paranoá.....	35
Figura 19. Estação telemétrica instalada no barramento da PCH Paranoá.....	36
Figura 20. Medidor ultrassônico e Régua Limnimétrica.....	38
Figura 21. Unidades de Conservação.....	42
Figura 22. Assentamentos e Quilombos.....	43
Figura 23. Mapa Pedologia.....	47
Figura 24. Mapa Geomorfologia.....	48
Figura 25. Mapa Geologia.....	49
Figura 26. Mapa Hidrogeologia.....	50
Figura 27. Sismos.....	52
Figura 28. Histograma de vazões afluentes e precipitações médias mensais do lago Paranoá.....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do barramento.....	24
Tabela 2. Características do vertedouro.....	35
Tabela 3. Cadastros dos assentamentos na região de estudo. ....	40
Tabela 4. Habitantes por região afetada.....	44
Tabela 5. Vazões médias mensais afluentes (m <sup>3</sup> /s) ao Lago Paranoá. ....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Ficha Técnica da PCH Paranoá.....	13
Quadro 2. Situação dos aproveitamentos na cascata.....	20
Quadro 3. Instrumentação das estruturas.....	36
Quadro 4. Cadastros das áreas de proteção ambiental.....	41



## GLOSSÁRIO<sup>1</sup>

**Bacia de Contribuição:** Área da superfície que é drenada para um ponto específico, tal como um reservatório, também conhecida como bacia hidrográfica ou área da bacia hidrológica.

**Barragem:** Estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue com a finalidade de obter a elevação do seu nível d'água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água seja de regulação das vazões do rio, seja de outro fluido.

**Borda Livre:** Distância vertical entre a maior cota da superfície da água junto à barragem e a cota mais baixa do topo de uma barragem ou outra estrutura de contenção.

**Capacidade do Reservatório:** Capacidade bruta total do reservatório em seu nível máximo de armazenamento.

**Crista da Barragem:** Cota da superfície superior da barragem, não se levando em conta qualquer abaulamento, meio-fio, parapeitos, defensas ou outras estruturas que não sejam parte da estrutura principal do barramento de água.

**Crista do Vertedouro:** Parte superior da seção vertente do vertedouro.

**Emergência:** Em termos de operação de barragens, qualquer condição que coloque em risco a integridade da barragem e de vidas ou propriedades a jusante, e requeira uma intervenção imediata.

**Estruturas Associadas:** Estruturas e equipamentos locais, que não façam parte da barragem propriamente dita. Incluem estruturas tais como torres de tomada d'água, a casa de força, túneis, canais, condutos forçados, descargas de fundo, bacias de amortecimento, poços, galerias, mecanismos de acionamento de comportas, etc.

**Fundação:** Maciço de rocha e/ou solo que forma a base de assentamento para uma barragem, dique e suas estruturas associadas.

**Ombreira:** Parte da encosta contra a qual a barragem é construída.

**Pé da Barragem:** Junção da face jusante (ou montante) da barragem, com a superfície de fundação.

---

<sup>1</sup> Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.



**Plano de Ação de Emergência (PAE):** Documento que contém os procedimentos para atuação em situações de emergência, bem como os meios de comunicação e os mapas de inundação que mostrem os níveis d'água de montante e jusante e os tempos de chegada das ondas de cheia, que poderiam resultar da ruptura da barragem ou de suas estruturas associadas.

**Zona de Autossalvamento:** Região, imediatamente a jusante da barragem, em que se considera não haver tempo suficiente para uma adequada intervenção dos serviços e agentes de proteção civil em caso de acidente. A Zona de Autossalvamento é definida pela maior das seguintes distâncias: 10 km ou a extensão que corresponda ao tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.



## 1 INTRODUÇÃO

A potencialidade de recursos hídricos brasileira faz do represamento de cursos d'água uma prática comum no território nacional. Embora agreguem diversos benefícios à sociedade, estes aproveitamentos devem constituir objeto de estudo e avaliação crítica, uma vez que não estão livres de acontecimentos diversos, podendo ocasionar comprometimentos à estabilidade de suas estruturas e levá-las a uma condição de ruptura.

Neste contexto, no dia 20 de setembro de 2010 foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens, Lei Federal nº 12.334/2010. Esta legislação tem como objetivo garantir a observância de padrões mínimos de segurança de barragens, de forma a possibilitar a redução de acidentes e suas consequências, visando à proteção da população e do meio ambiente.

A Lei nº 12.334/2010 aplica-se às barragens destinadas à acumulação d'água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem, pelo menos, uma das seguintes características:

- (i) Altura do maciço maior ou igual a 15 m;
- (ii) Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 hm<sup>3</sup>;
- (iii) Reservatório que contenha resíduos perigosos;
- (iv) Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perdas de vidas humanas.

Dentre os instrumentos citados pela referida legislação, tem-se o Plano de Segurança de Barragens, do qual faz parte o Plano de Ação de Emergência (PAE). Este tem como intuito identificar e compilar os principais procedimentos e ações a serem realizados para a prevenção e mitigação dos danos e riscos potenciais, respondendo de forma satisfatória às situações de emergências que possam comprometer a segurança da barragem e sua área de influência, bem como os agentes a serem notificados na ocasião dessas ocorrências.

O Plano de Ação de Emergência (PAE) caracteriza uma importante ferramenta de gestão e gerenciamento do empreendimento, devendo ser atualizado anualmente em relação às fases de vida da obra, às circunstâncias de operação e suas condições de segurança. Consoante exposto no Art. 12 da Lei 12.334/2010, o PAE deve conter, no mínimo, os seguintes itens:

- (i) Identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- (ii) Procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;



- (iii) Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; e
- (iv) Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Desta forma, o presente documento fez uso das informações expostas na Lei Federal 12.334/2010, no Volume IV do Manual do Empreendedor da ANA<sup>2</sup>, na Resolução ANA nº 236/2017 e na Resolução ANEEL nº 696/2015.

Composto por cinco seções, o PAE da Barragem Paranoá encontra-se disposto nos seguintes capítulos:

- i. Seção I: Apresenta informações para a elaboração do PAE, bem como a caracterização do barramento da usina;
- ii. Seção II: Define critérios para a identificação de anomalias, condições potenciais de ruptura da barragem junto aos mapas de inundação da cheia induzida, bem como os procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência;
- iii. Seção III: Apresenta os procedimentos de notificação e o sistema de alerta, necessários para notificar as entidades intervenientes na gestão de emergências, bem como as pessoas potencialmente afetadas;
- iv. Seção IV: Define as responsabilidades, identificando os principais intervenientes no processo de gestão de emergência;
- v. Seção V: Apresenta os formulários, relações de autoridades públicas com cópia do PAE e plano de treinamento.
- vi. Seção VI: Apresenta as ações que foram tomadas para implantação do PAE.

Sabendo que a abrangência do PSB está condicionada à categoria de risco e ao dano potencial associado ao qual a barragem se enquadra, a realização de um Plano de Ação de Emergência para a PCH Paranoá justifica-se pelo seu enquadramento na Classe B. Esta interpretação está em comum acordo com o estabelecido pela Resolução Normativa N°696, da ANEEL, Art. 13 §1º, na qual o PAE constitui peça obrigatória para o aproveitamento.

---

<sup>2</sup> Manual do Empreendedor – Volume IV. Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE/ Agência Nacional de Águas, Brasília: ANA, 2015. 169p.



## 2 OBJETIVO

São objetivos deste Plano de Ação de Emergência, apresentar situações de emergência que possam colocar em risco a integridade das estruturas componentes da PCH Paranoá, bem como definir ações e responsabilidades dos operadores da usina e instituições envolvidas, corroborando com a prevenção e mitigação dos desastres ocasionados por adversidades, às quais estão sujeitas o empreendimento em estudo.

## 3 DOCUMENTOS UTILIZADOS

Para esta etapa, fez-se uso de materiais fornecidos pela CEB Geração, entre os dias 17JAN2017 e 19JAN2017. Os documentos utilizados encontram-se listados abaixo.

- Avaliação do Comportamento – UHE Paranoá. RJC/CEB - 24/11 Ruben José Ramos Cardia, Nº 003/2011 – CEB G, 2011, 114 f.;
- Barragem do Paranoá, Instrumentação – Planta e Quadros. Nº UPA-D-009. Domus Engenharia Consultoria e Projetos Geotécnicos Ltda, abril de 2002, 1f.;
- Barragem do Paranoá, Instrumentação – Marco de Desloc. Superficial e B. Mark. – Planta, Detalhes e Quadro. Nº UPA-D-018. Domus Engenharia Consultoria e Projetos Geotécnicos Ltda, abril de 2002, 1f.;
- Diagnóstico das Condições de Segurança das Estruturas Civas – Aproveitamento do Paranoá – Preliminar. Domus Engenharia Consultiva e Projetos Geotécnicos Ltda, Nº 0071/2001-CRB, 2006, 41 f.;
- Ficha Técnica – Usina do Paranoá, 4f.;
- Inspeção de Segurança Regular – PCH Paranoá Nº 312-PCHPA-RT-ISS-001. Fractal Engenharia Meio Ambiente e Inovação SS, Revisão A, janeiro de 2017, 35f.;
- Planta e Seções – Barragem Paranoá. Nº PAR-GD-001. PROGEA Engenharia e Estudos Ambientais, SET/1991.;
- Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014, 200 f.



## 4 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E ESTRUTURAS ASSOCIADAS

### 4.1 DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM PARANOÁ

Situada na porção centro-oeste do Brasil, no Distrito Federal, a bacia do Rio Paranoá faz parte da bacia hidrográfica do Rio Paraná (Bacia 6). Com uma área de drenagem equivalente a 1.004,08 km<sup>2</sup>, no eixo da barragem Paranoá, o aproveitamento encontra-se na Capital Federal, Brasília, DF, nas coordenadas 15°47'44" de latitude sul e 47°46'51" de longitude oeste (Figura 2).

Executada em terra com núcleo de argila, possui enrocamento na face montante e gramínea na face jusante. Datada de 1962, a PCH Paranoá é empregada para fins de geração de energia elétrica e paisagismo. Com 30 MW de potência nominal instalada, o aproveitamento pertencente a CEB Geração S.A. possui barramento com altura máxima de 48,00 m e 630,00 m de comprimento, sendo 600,00 de terra e enrocamento e 30,00 m de concreto na ponte rodoviária sobre o vertedouro. Seu reservatório possui, aproximadamente, 40,00 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação 498 hm<sup>3</sup>.



**Figura 1. Barragem Paranoá.**  
**Fonte: CEB GERAÇÃO S/A (25FEV2019).**

No Quadro 1 são apresentadas as principais informações estruturais, hidráulicas, hidrológicas e do reservatório, as quais devem ser mantidas atualizadas e validadas pela equipe de operação e manutenção da CEB Geração S.A, segundo condições operacionais e comportamento atuais das estruturas do aproveitamento.

Cabe salientar que, devido à ocorrência de processos de transporte de sedimentos, o volume do reservatório Paranoá possa ter sofrido modificações. A atualização destes dados torna-se importante, à medida que busca garantir e atestar a precisão dos estudos de ruptura da barragem, quanto à delimitação das áreas atingidas.

**Quadro 1. Ficha Técnica da PCH Paranoá.**

<b>(1) Reservatório</b>	
NA Montante – Reservatório:	
- Máximo Maximorum [m]	1.000,80
- Máximo Normal [m]	1.000,65
- Mínimo Normal [m]	999,80
NA Jusante	
- Máximo Maximorum [m]	894,50
- Máximo Normal [m]	n/d
- Mínimo Normal [m]	n/d
Áreas Inundadas:	
- No NA Máximo Maximorum [km <sup>2</sup> ]	40,00
Volume do Reservatório:	
- No NA Máximo Maximorum [hm <sup>3</sup> ]	498,00
- No N.A. Mínimo Normal [hm <sup>3</sup> ] <sup>3</sup>	474,75
<b>(2) Barragem Principal<sup>4</sup></b>	
Tipo	Terra e Enrocamento
Comprimento Aprox. da Crista [m]	600,00
Altura Máxima Aprox.[m]	48,00

<sup>3</sup> Cadastrado no Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), pertencente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>, acesso em 30JAN2017.

<sup>4</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



Cota da Crista [m]	1.003,80
<b>(3) Sistema Extravasor</b>	
Vertedouro de Superfície - Controlado	
Vazão de Projeto [m <sup>3</sup> /s] (TR – Decamilenar)	543,00
<b>(3) Sistema Extravasor</b>	
Cota da soleira [m] <sup>5</sup>	993,50
Comprimento da Calha [m]	140,00
Número de Vãos	3
Dissipação de Energia	dentes de dissipação combinados com o patamar de rochas
Comportas	
Tipo	Segmento
Quantidade	3
Comprimento [m]	9,40 <sup>6</sup>
Altura [m]	7,50
Acionamento	Mecânico-Motorizado
Vazão máxima total (cada comportas) [m <sup>3</sup> /s]	150,00
<b>(4) Sistema Adutor</b>	
Tipo	Gravidade
Número de tomadas	1
Largura [m]	8,00
Comprimento [m]	13,50
Comporta	Tipo serviço
Conduto de Adução	Concreto/ Metálico
Comprimento Total Aprox. [m]	1.300,00
Material nos primeiros 150 m	Concreto
Diâmetro Interno nos primeiros 150 [m]	3,00
Material após 150 m	Aço

<sup>5</sup> Diagnóstico das Condições de Segurança das Estruturas Civas – Aproveitamento do Paranoá – Preliminar. Domus Engenharia Consultiva e Projetos Geotécnicos Ltda, Nº 0071/2001-CRB, 2006, 41 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.

<sup>6</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



Diâmetro Interno após 150 m [m]	3,00
<b>Chaminé de Equilíbrio</b>	
Altura [m]	20,00
Diâmetro [m]	8,00
<b>Chaminé de Equilíbrio</b>	
Material da Estrutura	Metálico
<b>Conduto forçado</b>	
Número de unidades	1
Comprimento Total Aprox [m]	255,00
Diâmetro Interno [m]	2,60
Desnível [m]	93,54
Material	Metálico
<b>(5) Casa de Força</b>	
Tipo	Semi-exposta
Número de Unidades Geradoras	3,00
Largura [m]	n/d
Comprimento [m]	n/d
<b>(6) Turbinas Hidráulicas</b>	
Tipo	Francis eixo vertical
Número de Turbinas	3,00
Potência Nominal Unitária [CV]	12.675
Rotação Nominal [rpm]	514,3
Engolimento Máximo Unitário [m³/s]	10,34
Queda Bruta Máxima [m]	105,00 <sup>7</sup>
<b>(7) Geradores</b>	
Potência Nominal Unitária [MVA]	8,7/10
Tensão Nominal [kV]	13,20
Frequência [Hz]	60,00
Fator de Potência	0,90

<sup>7</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



**(8) Energia**

Potência da Usina [MW]	30
Energia Firme [MW médios]	13

**(9) Bacia Hidrográfica**

Área de contribuição do reservatório [km <sup>2</sup> ]	1.004,08
Declividade média [m/km]	4,87
Comprimento aprox. do rio Paranoá [km]	35,00

**(10) Dados Hidrometeorológicos<sup>8</sup>**

Precipitação Média Anual [mm]	1.415,5
Evapotranspiração Média Anual [mm]	1.195,7

<sup>8</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.





**Figura 2. Mapa de Localização.**



## 4.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Partindo do Aeroporto Internacional de Brasília (BSB) deve-se seguir pela Estrada Parque Aeroporto (EPAR) durante, aproximadamente, 1,90 km, mantenha-se à direita na bifurcação para continuar na rodovia DF-047. Na rotatória, pega-se a 1ª saída para a rodovia DF-025 (Estrada Parque Dom Bosco, EPDB), percorridos 23 km até a rodovia DF-001 (Estrada Parque Contorno, EPCT), chega-se a Barragem Paranoá pela margem direita. Como alternativa, após percorrer a DF-025 por cerca de 15 km, faz-se o desvio pela direita na rodovia DF-035. Percorridos, aproximadamente, 4 km pega-se a 3ª saída da rotatória, acessando a DF-001. Feito isto, percorre-se 10 km até chegar ao barramento.

O acesso a margem direita da PCH Paranoá pode ser realizado, também, partindo-se da Praça dos Três Poderes. Siga pela avenida Eixo monumental, por volta de 1,20 km, até acessar a rodovia DF-004, conhecida como Estrada Parque das Nações. Após 120 m pegue a saída em direção a Paranoá. Mantenha-se a esquerda, seguindo as indicações para a rua Setor de Clubes Esportivos Sul (SCES). Continue nesta via por cerca de 5 km até a SHIS QI 26, passando pela Ponte Juscelino Kubitschek (JK) até o eixo de intersecção rodoviária. Neste local há uma alça de contorno que apresenta a indicação da direção Paranoá. Seguindo pela DF-025 e pela DF-001 por, aproximadamente, 6,50 Km chega-se a margem direita da usina.

Para a rota de acesso ao empreendimento pela margem esquerda, definiu-se como ponto de partida Planaltina, que é uma das regiões administrativas do Distrito Federal. Partindo deste local, segue-se pela rodovia DF-130, por volta de 9,30 km, até o eixo rodoviário de intersecção com a rodovia DF-250, neste local deve-se acessar a alça em direção a Paranoá. Seguindo pela rodovia DF-250 por, aproximadamente, 14,20 km, chega-se a rotatória que faz intersecção com a rodovia DF-001. Neste ponto, deve-se atentar-se as placas de trânsito indicando a direção da Barragem Paranoá. Partindo da rotatória, prosseguindo por volta de 5,20 km, é possível acessar a margem esquerda da usina.

A Figura 3 apresenta as principais vias de acesso ao local do empreendimento.



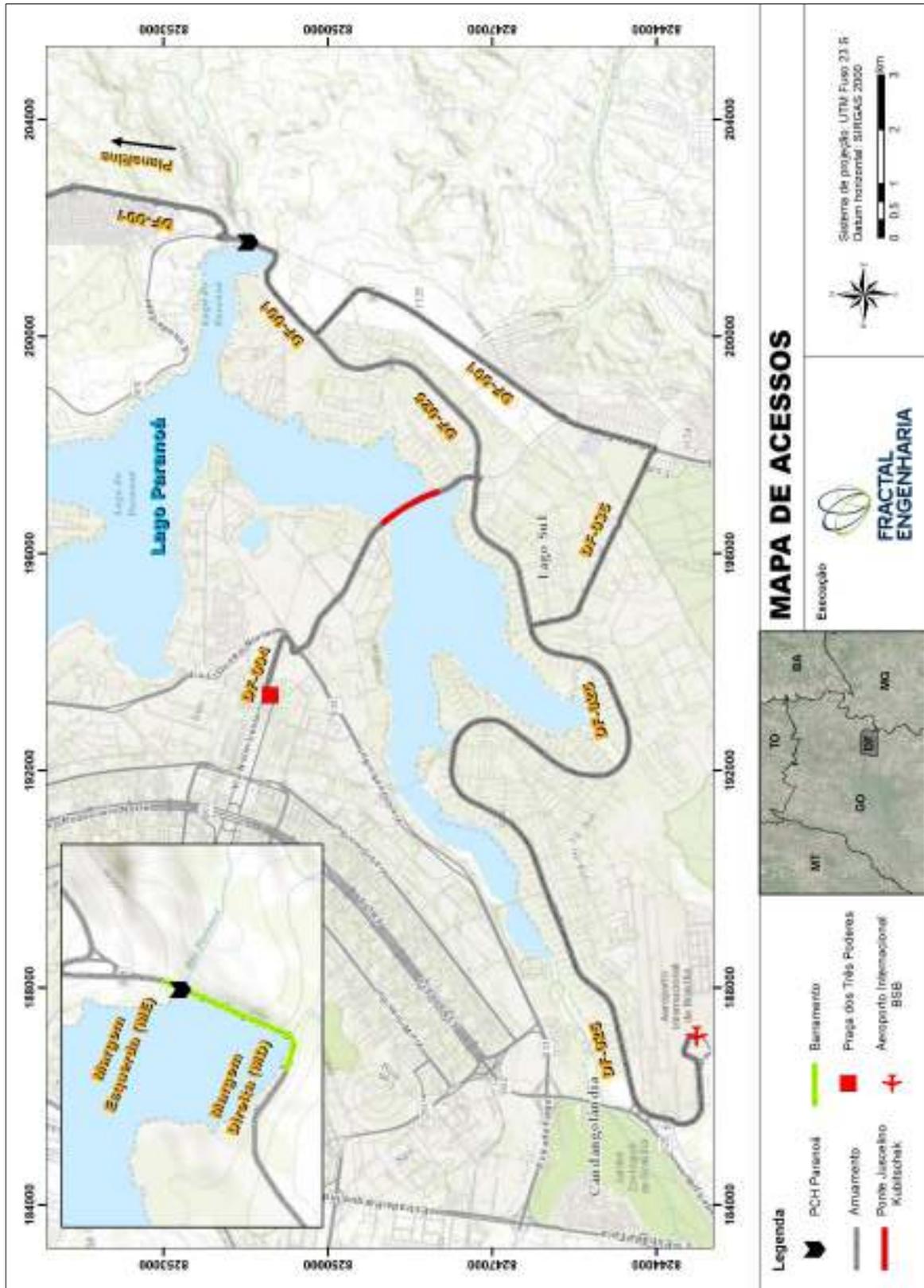


Figura 3. Mapa de acessos da PCH Paranoá.

#### 4.3 APROVEITAMENTOS NA CASCATA DO RIO PARANOÁ

A bacia hidrográfica do rio Paranoá está situada na porção central do Distrito Federal. Esta é responsável por drenar uma área aproximada de 1.063,2 km<sup>2</sup>, sendo a única bacia totalmente inserida no Distrito Federal. Por sua vez, a bacia delimitada pelo barramento conta com 1.004,08 km<sup>2</sup> de área de drenagem e declividade média de 4,90 m/km.

O rio Paranoá possui 1 (um) aproveitamento hidrelétrico cadastrado em seu percurso<sup>9</sup>. De propriedade da CEB Geração S.A., a PCH Paranoá encontra-se localizada a, aproximadamente, 15,30 km a montante da foz do rio Paranoá, município de Brasília, DF.

O resumo desse aproveitamento pode ser visualizado no Quadro 2, enquanto a Figura 4 apresenta a disposição do empreendimento presente na cascata.

**Quadro 2. Situação dos aproveitamentos na cascata.**

Aproveitamento	Potência Instalada (MW)	Município	Proprietário	Rio	Situação
PCH Paranoá	30,00	Brasília	CEB Geração S.A.	Paranoá	Operação

Fonte: SIGEL/ANEEL (Acesso 17JAN2017).

Cabe salientar que não foram identificadas barragens de outros usos na cascata do rio Paranoá<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Cadastrados no Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), pertencente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>, acesso em 17JAN2017.

<sup>10</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Cadastro de Barragens. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/Barragens/Visualiza.aspx>>, acesso em 30JAN2017.



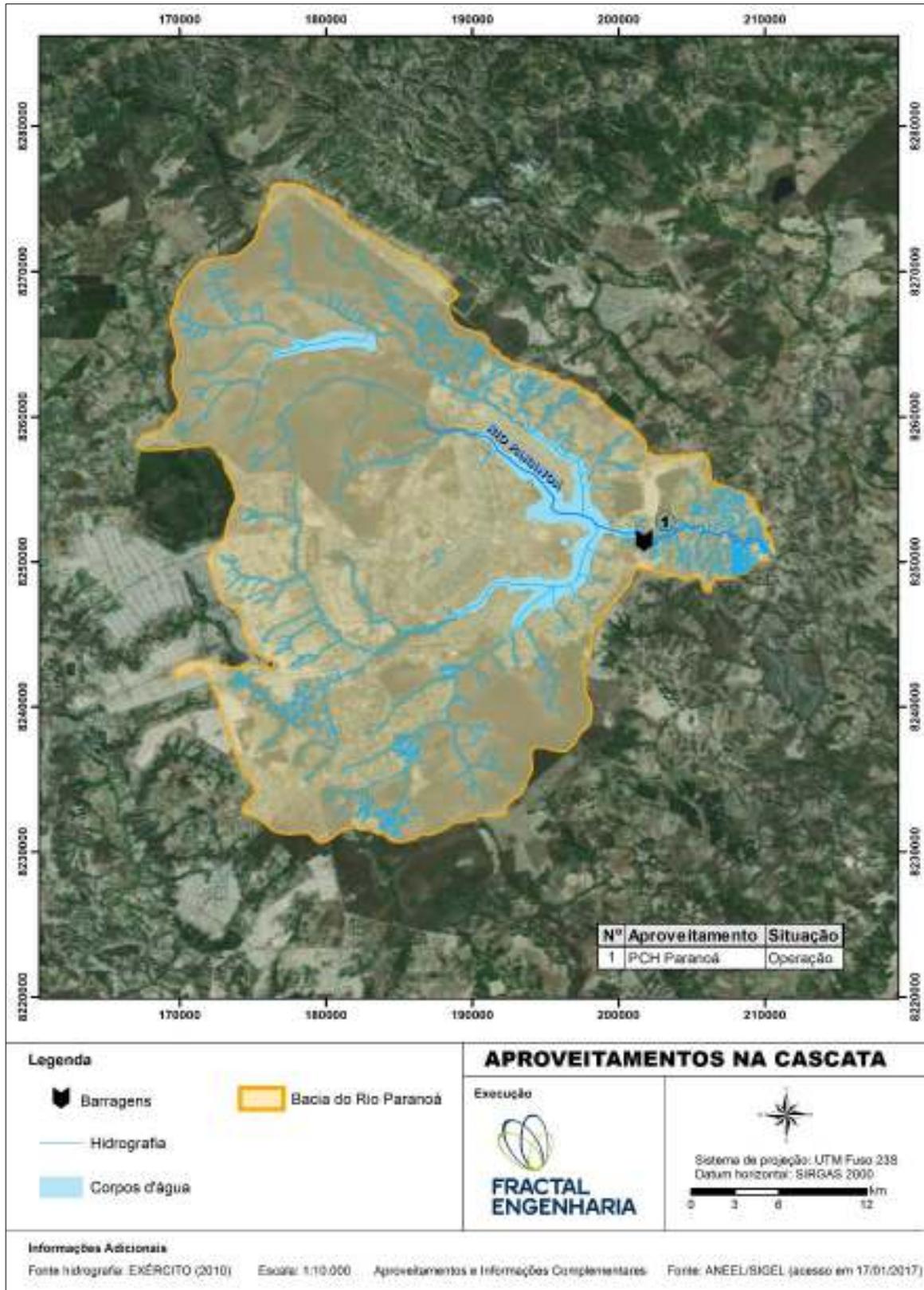


Figura 4. Aproveitamentos no rio Paranoá.



#### 4.4 ARRANJO GERAL

O aproveitamento pertencente à CEB Geração S.A possui 30 MW de potência nominal instalada, sendo composto por barramento de terra com núcleo de argila, enrocamento na face montante e gramínea na face jusante. Acoplado ao barramento, tem-se uma estrutura de concreto convencional, onde estão localizadas a tomada d'água e o vertedouro de soleira controlada.

O barramento da PCH Paranoá é composto de:

- Ombreira Direita (OD);
- Barragem de Terra e Enrocamento (BTE);
- Muros de Aproximação;
- Vertedouro de Superfície – Controlado (VS);
- Tomada d'água (TA);
- Ombreira Esquerda (OE);

Fazem parte do aproveitamento, as estruturas:

- Conduto de Adução (CA);
- Chaminé de Equilíbrio (CE);
- Conduto Forçado (CF);
- Casa de Força;

O arranjo geral do empreendimento é composto por barramento de Terra e Enrocamento em sua margem direita, seguido pelas estruturas do vertedouro e tomada d'água. Por sua vez, a casa de força localiza-se a jusante do barramento na margem esquerda do rio Paranoá (Figura 5).

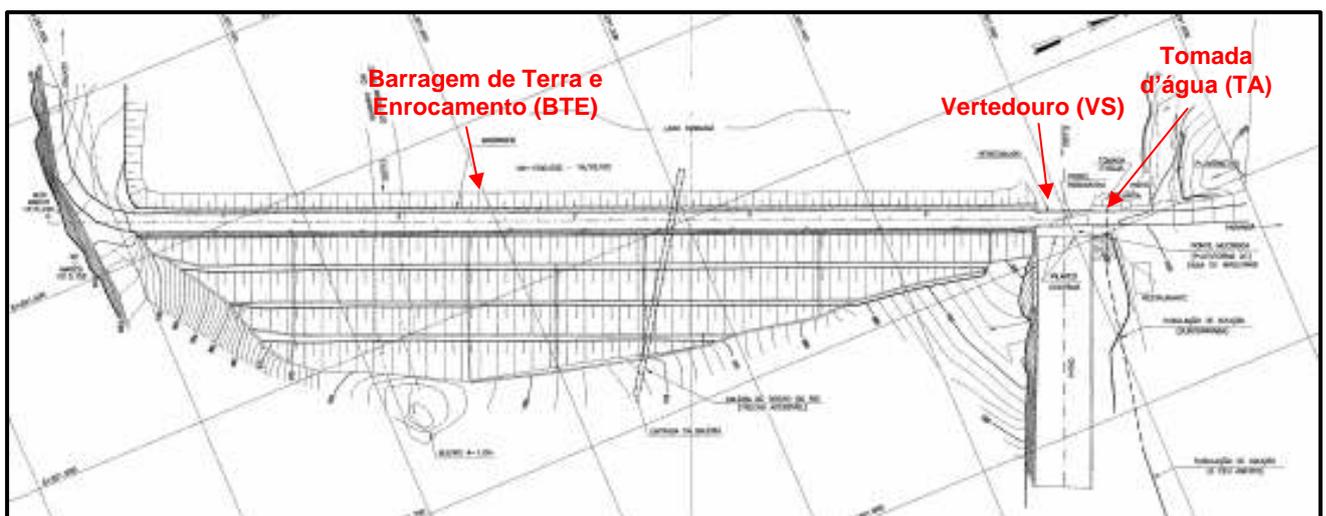


Figura 5. Conformação do barramento da PCH Paranoá.  
Fonte: Barragem do Paranoá – Planta – Arranjo (UPA-D-001).





**Figura 6. Vista geral do empreendimento.**  
**Fonte: CEB Geração S.A. (2011)**

Localizado na margem esquerda do rio Paranoá, o sistema extravasor é composto por 1 (um) vertedouro de superfície, dotado de 3 (três) vãos de 9,00 m de largura cada, controlados por comportas tipo segmento. Considerando as três comportas, esta estrutura pode descarregar uma vazão máxima de 543 m<sup>3</sup>/s.

Na sequência do vertedouro, tem-se a tomada d'água. O sistema adutor é composto por 1 (uma) tomada d'água do tipo gravidade, 1 (um) conduto de adução, 1 (uma) chaminé de equilíbrio e 1 (um) conduto forçado.

Desta forma, a água captada é aduzida, via tubulação adutora, até a chaminé de equilíbrio. Na sequência, tem-se início o trecho de conduto forçado, o qual transportará a água captada até a unidade geradora. A tubulação de adução da usina divide-se em dois tipos, sendo os primeiros 150 m formado por conduto subterrâneo de concreto, seguido por 1.150,00 m de conduto de aço a céu aberto. Por sua vez, o conduto forçado de aço possui 255,00 m de comprimento, alimentando 3 (três) turbinas hidráulicas e vencendo uma queda de 105,00 m.

A casa de força é do tipo semi-exposta, dotada de 3 (três) unidades geradoras com turbinas tipo Francis de eixo vertical. A restituição da vazão turbinada se dá pelo canal de fuga (Figura 7).

A Tabela 1 resume as características básicas do barramento.

**Tabela 1. Características do barramento.<sup>11</sup>**

<b>Estrutura/ Descrição</b>	<b>Barragem de Terra (BT)</b>
Material	Terra e Enrocamento
Paramento de montante	2H:1V
Paramento de jusante	1,90H:1V e 2H:1V
Comprimento total aprox. (m)	600,00
Largura da crista (m)	16,00
Cota da crista (m-IBGE)	1.003,80



**Figura 7. Canal de Fuga.**

**Fonte: Fractal Engenharia (17JAN2017 – IMG\_6620).**

<sup>11</sup> Planta e Seções – Barragem Paranoá. Nº PAR-GD-001. PROGEA Engenharia e Estudos Ambientais, SET/1991. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



#### 4.5 RESERVATÓRIO

O nível d'água Máximo Maximorum no reservatório Paranoá foi fixado na El. 1.000,80 [m]. Nesta cota, o reservatório possui capacidade de acumular um volume na ordem de 498,00 hm<sup>3</sup> e ocupar uma área de 40,00 km<sup>2</sup>. Por sua vez, o nível Máximo Normal é definido pelo início da abertura das comportas, correspondendo à El. 1.000,65 m.

A Figura 8 apresenta o reservatório da PCH Paranoá juntamente com as linhas de boias de proteção das estruturas de concreto do empreendimento.



**Figura 8. Reservatório da PCH Paranoá.**  
**Fonte: Fractal Engenharia (18JAN2017 – IMG\_6734 HLR).**

##### 4.5.1 Cota x Área x Volume

Foram observadas incoerências nas Curvas Cota x Área e Cota x Volume da PCH Paranoá, sendo aconselhada sua reformulação. Estes gráficos podem ser observados no Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental da usina.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.

Cabe salientar que conforme informações fornecidas pela equipe da CEB Geração a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) é responsável pela confecção e atualização destes dados.

#### **4.5.2 Borda livre**

Com base no relatório de Avaliação do Comportamento da PCH Paranoá<sup>13</sup> disponibilizada pela CEB Geração S.A. (CEB), o barramento conta com 3,00 m de borda livre, estando sua crista fixada na El. 1.003,80 [m].

Segundo USBR (1987), a recomendação é de, no mínimo, 1 m de borda livre em condição excepcional determinada em projeto. Segundo informações de projeto o N.A Máximo Maximorum está na cota El. 1.000,80 [m]. Logo, o barramento possui risco mínimo de transbordamento na eventual de ocorrência de cheias excepcionais não absorvidas pelo vertedouro.

#### **4.5.3 Estudo de remanso do reservatório**

Durante o ciclo de atividades deste projeto, não se teve acesso ao estudo de remanso do reservatório Paranoá.

#### **4.5.4 Estudo de sedimentação e vida útil do reservatório**

A análise de sedimentação do reservatório Paranoá foi realizada pela YKS Serviços Ltda<sup>14</sup>, em 2014. Para a realização deste estudo foram executados levantamentos batimétricos no reservatório, compreendendo uma faixa de 200 m a montante do barramento, e topográficos numa faixa de 100 m a jusante da barragem. Desta forma, identificou-se que entre as cotas 970 e 980 m, ocorrem as maiores concentrações de sedimentos depositados, já a região do vertedouro apresentou níveis menores sedimentados, variando entre as cotas 950 e 970 m. Neste contexto, estimou-se que o tempo de vida útil do empreendimento é de 100 anos.

### **4.6 TOMADA D'ÁGUA**

A tomada d'água da PCH Paranoá é composta por uma estrutura de gravidade, monolítica, com 13,50 m de comprimento e 8,00 m de largura (Figura 9). A partir desta estrutura, o fluxo d'água é conduzido, por tubulações, até a casa de força, passando pela chaminé de equilíbrio.

---

<sup>13</sup> Avaliação do Comportamento – PCH Paranoá. RJC/CEB - 24/11 Ruben José Ramos Cardia, Nº 003/2011 – CEB G, 2011, 114 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.

<sup>14</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



A Figura 9 apresenta o paramento montante da tomada d'água, sendo que esta estrutura dispõe de uma comporta de serviço e uma de manutenção, além da existência de grades de proteção para retenção dos detritos.



**Figura 9. Paramento montante da tomada d'água Barragem Paranoá.**  
**Fonte: Fractal Engenharia (18JAN2017 - E – IMG\_6741 e D- IMG6873).**

A água captada é aduzida até a chaminé de equilíbrio mediante 1 (um) conduto adutor de 1.300 m de comprimento, dividido em dois trechos distintos, sendo os primeiros 150 m formado por conduto subterrâneo de concreto, seguido por 1.150,00 m de tubulação de aço a céu aberto.

Um trecho do trajeto da tubulação de adução pode ser visualizado na Figura 10.



**Figura 10. Segmento da tubulação de adução.**  
**Fonte: Fractal Engenharia (19JAN2017 – IMG\_7102 HLR).**

Localizada na El. 985,04 [m], a chaminé de equilíbrio é caracterizada pela sua forma cilíndrica de material metálico, apresentando diâmetro interno de 8,00 m. Esta estrutura é utilizada para absorver os possíveis impactos provenientes de golpes de Aríete, sendo que estes, podem ser causados por manobras súbitas de operação de válvulas e comportas, que estas por sua vez, estão instaladas na tubulação do Conduto Forçado e Casa de Força (Figura 11).



**Figura 11. Estrutura da chaminé de Equilíbrio.**  
**Fonte: CEB GERAÇÃO S/A (25FEV2019).**

Na sequência, a água aduzida é encaminhada até a casa de força através de 1(um) conduto forçado de aço de 255 m de comprimento e 2,60 m de diâmetro interno.

A estrutura do conduto forçado conta com apoios deslizantes, que favorecem a transmissão dos esforços do conduto para os apoios fixos, evitando a geração de esforços solicitantes elevados e inadequados.

Na Figura 12 é possível visualizar um trecho da tubulação do conduto forçado.





**Figura 12. Tubulação do Conduto Forçado.**  
**Fonte: CEB GERAÇÃO S/A (25FEV2019).**

#### 4.7 CASA DE FORÇA

Localizada a jusante do barramento, a Casa de Força da PCH Paranoá abriga 3 (três) unidades de potência nominal 10 MWA cada, com turbinas tipo Francis de eixo vertical. Destas unidades, duas foram fabricadas pela J. M. Voith, unidades 1 e 2, e a outra, unidade 3, pela Mecânica Pesada<sup>15</sup>.

A configuração da Casa de Força é determinada como semi-exposta por apresentar em seu patamar superior equipamentos que se encontram descobertos, como as unidades geradoras de energia (Figura 13).

A Figura 14 apresenta como são mantidas as condições dos eixos de rotação das turbinas Francis de eixo vertical e o interior da Casa de Força.

---

<sup>15</sup> Ficha Técnica – Usina do Paranoá. 4 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A., mediante correio eletrônico, entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



**Figura 13. Geradores e Sala de Controle.**  
Fonte: Fractal Engenharia (17JAN2017 E - IMG\_ 6622 e D - IMG\_ 6639).



**Figura 14. Eixo da Turbina Francis e visão da Casa de Força.**  
Fonte: Fractal Engenharia (17JAN2017 – E - IMG\_ 6664 HLR e D -4175 RJC).

A restituição da vazão turbinada se dá pelo canal de fuga (Figura 15).



**Figura 15. Canal de Fuga**  
**Fonte: Fractal Engenharia (17JAN2017 - IMG\_ 6619)**

#### 4.8 GALERIA DO CANAL DE DESVIO

A galeria do canal de desvio é acessada pelo “pé” da Barragem de Terra e Enrocamento (BTE), no seu patamar de jusante. Esta estrutura foi utilizada no estágio da construção do empreendimento, servindo de desvio do fluxo natural do rio Paranoá. As condições adequadas de estanqueidade desta estrutura apresentam parâmetros importantes para a segurança do empreendimento.

A Figura 16 ilustra as condições das estruturas da galeria de desvio, sendo que nestas regiões é possível ter acesso as execuções realizadas no período de tamponamento da estrutura.



**Figura 16. Galeria do canal de desvio.**  
**Fonte: CEB GERAÇÃO S/A (25FEV2019).**

#### 4.9 VERTEDOURO

O sistema vertente da PCH Paranoá é composto por vertedouro de superfície, dotado de 3 (três) vãos de soleira controlada. O controle de nível é realizado mediante a operação das comportas segmento de 9,40 m de comprimento e 7,50 m de altura. De modo a auxiliar a manutenção desta estrutura, cada vão conta com 1 (um) stop log (Figura 17).

A soleira do vertedouro está posicionada na cota 993,50 m, sendo limitada por dois muros laterais e dois pilares centrais. A abertura máxima das comportas é em média de 3,5 m, considerando as três comportas.

Na Figura 17E é possível averiguar a configuração dos vãos do vertedouro de superfície controlada, com as comportas na posição de manobra fechada. Já na Figura 17D é apresentada a face jusante de umas das três comportas segmento que compõe a estrutura do vertedouro.



**Figura 17. Vãos do vertedouro (E) e Paramento jusante da comporta segmento (D)**  
**Fonte: Fractal Engenharia (18JAN2017 E - IMG\_ 6877 e D - IMG\_ 6657).**

No processo da manobra de abertura das comportas, o fluxo d'água passa pela calha do mesmo, e segue para região de dissipação da energia cinética. A estrutura da calha do vertedouro possui 18 m de largura e cerca de 140 m de extensão (Figura 18).

A dissipação da energia cinética, ocorre pelo combinado das conchas de lançamento, de duplo efeito, com blocos de dissipação ("Dentes dissipador" no final da calha do vertedouro) e o patamar de rochas aflorantes da região. O salto gerado pela estrutura no final da calha do vertedouro é importante para que não haja o impacto direto do escoamento com o patamar natural de jusante.

Por apresentar dissipação de energia em rocha sã, aconselha-se a realização de novos estudos litológicos, a cada 30 anos, que provenham contribuições adequadas para que a dissipação de energia se mantenha em condições adequadas.



**Figura 18. Região de dissipação da água do vertedouro da PCH Paranoá.**  
**Fonte: Fractal Engenharia (18JAN2017 – IMG\_6936 HLR).**

Quando o sistema vertente da PCH Paranoá não está em uso, o aproveitamento conta com o fluxo de saída d'água realizado via tomada d'água.

Sobre o vertedouro tem-se 1 (uma) autopista de 10,50 m de largura, 2 (duas) passarelas de 1,00 m de largura cada e uma ponte mecânica para acionamento dos guinchos dos stop log.

A Tabela 2 resume as especificações de projeto do vertedouro da PCH Paranoá.

**Tabela 2. Características do vertedouro.**

<b>Tipo</b>	<b>Superfície Controlado</b>
Número de vãos	3
Vazão de projeto (TR = Decamilenar)	543,00 m <sup>3</sup> /s
Comprimento total da calha	140,0 m
Cota da soleira vertente	993,50 m
Acionamento	Mecânico (motor/corrente)

#### 4.10 ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

A PCH Paranoá possui 04 (quatro) estações telemétricas. Os seguintes códigos referem-se as estações cadastradas no sistema da Agência Nacional de Águas (ANA): UHE Paranoá Barramento



(60479270), UHE Paranoá Jusante (60479280 e 1547035) e UHE Paranoá Córrego Cabeça de Veado (60478610 e 1547096), UHE Paranoá Bananal (60477607 e 1547097).



Figura 19. Estação telemétrica instalada no barramento da PCH Paranoá.  
 Fonte: CEB GERAÇÃO S/A (25FEV2019).

#### 4.11 INSTRUMENTAÇÃO DO BARRAMENTO

Com início de operação em 11SET1962, a PCH Paranoá conta com 52 (cinquenta e dois) instrumentos de auscultação. Esses, por sua vez, encontram-se distribuídos ao longo do paramento de jusante e montante do barramento da usina.

O controle da segurança estrutural da Barragem Paranoá é realizado mediante 9 (nove) tipos de instrumentos distintos. O resumo destes instrumentos encontra-se no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 3. Instrumentação das estruturas

Instrumento	Funções	Qt d
<b>Drenos (DR) - Galeria de Desvio</b>	Drenagem interna do empreendimento	05
<b>Dreno Horizontal Profundo (DHP) - Ombreira Direita (cj)</b>	Drenar a água do solo proveniente da percolação	06
<b>Marco Básico (MB)</b>	Controle dos deslocamentos	01
<b>Marco Superficial (MS)</b>	Controle de movimentos horizontais	08
<b>Medidor de Vazão (MV) - Calhas Parshall - canaletas</b>	Medir a vazão	02



<b>Medidor de Nível de Água (MNA)</b> - Ultrassônico, régua fixa e régua com bóia	Medir o Nível D'água do Reservatório	03
<b>Medidor de Nível de Água (NA)</b>	Medir o Nível D'Água subterrâneo no Pé da Barragem	06
<b>Piezômetro de Tubo (PZ)</b>	Subpressão ou cota Piezométrica	15
<b>Poços de Alívio (PA) / Poços Drenantes</b>	Aliviar as pressões excessivas Drenar a água do solo proveniente da percolação	06

#### 4.11.1 Drenos

Os drenos são utilizados para a drenagem interna do empreendimento, evitando que a água percolada, por dentro da estrutura, desenvolva forças de percolação e pressões maiores que as recomendadas em projeto. Sendo assim, o aproveitamento conta com 11 (onze) drenos distribuídos entre a galeria do canal de desvio e a ombreira direita. Informações técnicas de posicionamento e histórico dos drenos podem ser verificadas no relatório de inspeções da Barragem Paranoá – PROMON.

São 06 (cinco) drenos horizontais profundos na ombreira direita e 05 (cinco) drenos com saídas na Galeria de Desvio. Estes instrumentos são utilizados para drenar a água proveniente da percolação interna do maciço, minimizando o carregamento sobre o maciço e talude da margem direita.

#### 4.11.2 Marco Básico (MB)

O Marco Básico topográfico é um instrumento de auscultação utilizado no controle de deslocamentos dos marcos superficiais. A PCH Paranoá conta 1 (um) marco superficial instalado na sua Ombreira Direita (OD).

#### 4.11.3 Marco Superficial (MS)

Os Marcos Superficiais, por sua vez, estão instalados ao longo do talude jusante da barragem de terra, sendo que estes têm a função de auxiliar nas avaliações de movimentações horizontal da estrutura.

#### 4.11.4 Medidor de Vazão (MV)

Com o intuito de mensurar a água infiltrada pelo sistema de drenagem, foram instalados 2 (dois) medidores de vazão.



#### 4.11.5 Piezômetro de Tubo (PZ)

Com intuito de monitorar as cargas piezométricas no empreendimento, foram instalados 15 (quinze) piezômetros de tubo aberto (PZ) distribuídos ao longo dos taludes da barragem de terra e na ombreira direita. A espacialização destes instrumentos pode ser verificada na planta da Barragem do Paranoá – Instrumentação (UPA-D-009\_REV01).

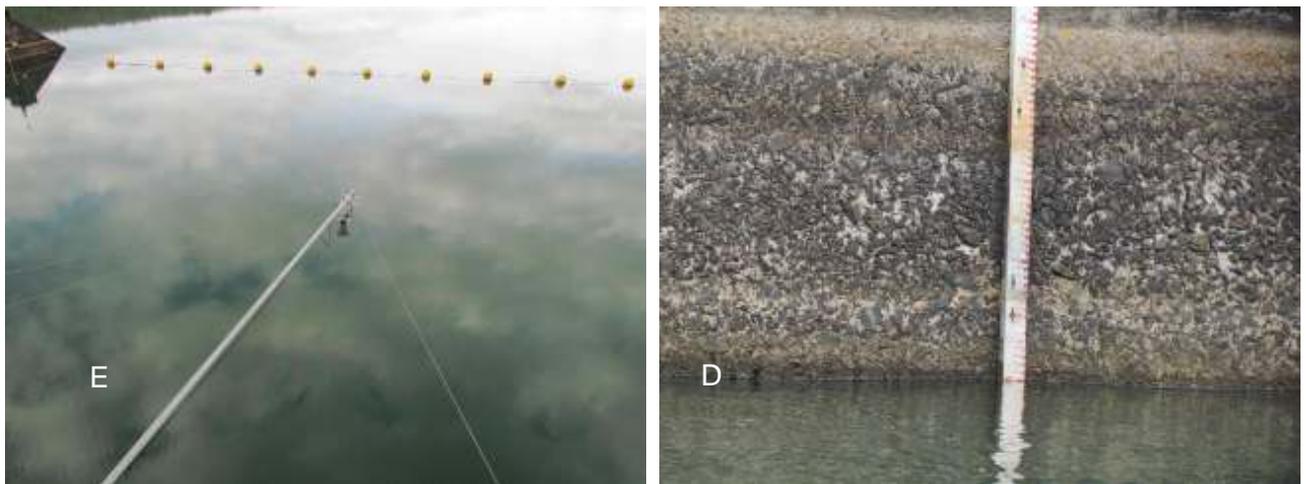
#### 4.11.6 Poços de Alívio (PA) / Poços Drenantes (PD)

Foram instalados no barramento, ao longo das bermas do talude jusante da barragem de terra, 06 (seis) poços de alívio / poços drenantes com o intuito de aliviar as pressões excessivas e drenar a água do solo proveniente da percolação, que podem gerar condições inadequadas nas estruturas da barragem de terra.

#### 4.11.7 Medidor de Nível de Água (MNA)

A medição do nível d'água é uma das principais ferramentas operacionais do empreendimento, sendo que a PCH Paranoá conta com 2 (duas) réguas limnimétricas, uma instalada no muro lateral direito ao vertedouro e a outra na face esquerda da estrutura da tomada d'água, sendo esta a régua na qual os vigias fazem a leitura e passam para a operação.

A PCH Paranoá conta também com 1 (um) medidor ultrassônico de nível, instalado sobre a barragem de concreto. Estes instrumentos são identificados no relatório de inspeção de segurança (312-PCHPA-RT-ISS-001). A Figura 20 mostra os medidores de nível de água.



**Figura 20. Medidor ultrassônico e Régua Limnimétrica.**  
Fonte: Fractal Engenharia (18JAN2017 - E – IMG\_6725 e D- IMG6878).

#### 4.11.8 Medidor de Nível de Água (NA)

Com o intuito de mensurar o nível d'água no pé da barragem, foram instalados 6 (seis) medidores de nível d'água no local.

### 5 RECURSOS MATERIAIS E LOGÍSTICOS NA BARRAGEM

A qualidade da resposta da usina, frente as situações de emergência, está condicionada a existência de materiais fixos e mobilizáveis, destacando-se os meios de comunicação, transporte, fornecimento de energia, entre outros. Isto é válido, uma vez que estes recursos facilitam o atendimento imediato da anomalia, possibilitando um ganho de tempo para a ação das autoridades competentes.

#### 5.1 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

A comunicação interna da PCH Paranoá é realizada via rádio frequência, abrangendo todas as áreas da barragem, guarita e operação. Os vigias, encarregados pela segurança do barramento, dispõem de telefonia móvel para comunicação de qualquer ocorrência ao seu supervisor.

Por sua vez, a comunicação externa conta com sistema de telefonia fixa, composto por uma linha de telefone VOIP (Voice over Internet Protocol) de fibra ótica e linha convencional.

#### 5.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA

O aproveitamento deve possuir capacidade de restabelecer o funcionamento normal da usina, caso ocorra parada de geração de energia.

Nos casos em que houver perda da alimentação do empreendimento, a PCH Paranoá passa a ser alimentada por um dos rabichos instalados junto aos geradores (G1 ou G2). Na falta dos sistemas citados anteriormente, o empreendimento conta com um gerador de emergência estacionário, que é utilizado para a alimentação das cargas essenciais de trabalho da PCH Paranoá.

#### 5.3 RECURSOS MATERIAIS MOBILIZÁVEIS EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

A existência de materiais mobilizáveis para uso em situações de emergência, pode influenciar a qualidade de resposta da usina. Dentre estes recursos, ressalta-se a importância dos seguintes itens:

- i) Meios de transporte terrestres, utilizados, em especial, para operação de alertas nas Zonas de Autossalvamento (ZAS);
- ii) Meios de transporte fluvial;
- iii) Meios de transporte aéreo;



- iv) Equipamentos de segurança, móveis, projetores, material de iluminação, bem como meios de comunicação portáteis e suplementares; e
- v) Equipamentos diversos, como guas, caminhões e retroescavadeiras.

A CEB Geração S/A possui como recursos móveis disponíveis para situação de emergência dois veículos (01 S-10 e 01 Pálio Weekend) e 01 gerador móvel de 40 KVA.

## 6 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Situada na porção central do Distrito Federal, a bacia do Rio Paranoá faz parte da bacia hidrográfica do Paraná (Bacia 6). A bacia delimitada pelo aproveitamento conta com uma área de drenagem de 1.004,08 km<sup>2</sup> e, aproximadamente, 4,9 m/km de declividade média.

A PCH Paranoá está localizada a uma distância aproximada de 15,30 km da foz do Rio Paranoá, sendo este caracterizado por apresentar profundidades máximas de 40 m e médias de 13 m. Com cerca de 34,90 km de extensão, o rio Paranoá nasce em Brasília, estando totalmente inserido no Distrito Federal.

Dentro dos limites da bacia hidrográfica foram identificadas apenas áreas de proteção ambiental federais (Figura 21). Além destas áreas, foram identificados, também, regiões de assentamentos rurais e comunidades quilombolas (Figura 22). Não foram identificadas demarcações de terras indígenas próximas a bacia hidrográfica do rio Paranoá.

Assentamento rural é um conjunto de unidades agrícolas, instaladas pelo INCRA, onde originalmente existia um imóvel rural que pertencia a um único proprietário. Essas propriedades são entregues pelo INCRA às famílias que apresentem condições financeiras limitadas. As áreas de cada assentamento são variáveis, dependendo do local a ser instalado, bem como condições climáticas e de solo.

Na Tabela 3 são apresentadas características dos assentamentos, como o número de famílias, área e município ao qual pertencem.

**Tabela 3. Cadastros dos assentamentos na região de estudo.**

<b>Nome</b>	<b>Município</b>	<b>Nº de Famílias</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
PA Cunha	Cidade Ocidental	53	10,14
PA Colônia	Padre Bernardo	23	5,94
PA Colônia II	Padre Bernardo	23	5,76
PA Contagem	Planaltina	44	9,01
PA Rio Maranhão	Planaltina	31	7,90



As unidades de conservação ambiental são regiões que apresentam a função de proteger e conservar a qualidade dos recursos ambientais. No Quadro 4 são apresentadas as áreas de proteção ambiental delimitadas no entorno da bacia hidrográfica, bem como a identificação da esfera reguladora e o Órgão legislador.

**Quadro 4. Cadastros das áreas de proteção ambiental.**

<b>Nome</b>	<b>Esfera</b>	<b>Órgão Legislador</b>
Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio São Bartolomeu - APA	Federal	Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA
Área de Relevante Interesse Ecológico Capetinga – Taquara - Arie	Federal	Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA
Floresta Nacional de Brasília - Flona	Federal	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA
Parque Nacional de Brasília	Federal	Serviço Florestal do Ministério da Agricultura.
Área de Proteção Ambiental do Planalto Central - APA	Federal	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA
Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto - APA	Federal	Secretaria Especial do Meio Ambiente - SEMA
Reserva Biológica da Contagem	Federal	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA

Observa-se apenas uma comunidade Quilombola no entorno da bacia hidrográfica, estando localizada na Cidade Ocidental, no Estado de Goiás. A comunidade de Mesquita abrange uma área de aproximadamente 43,00 Km<sup>2</sup> compreendendo cerca de 785 famílias.



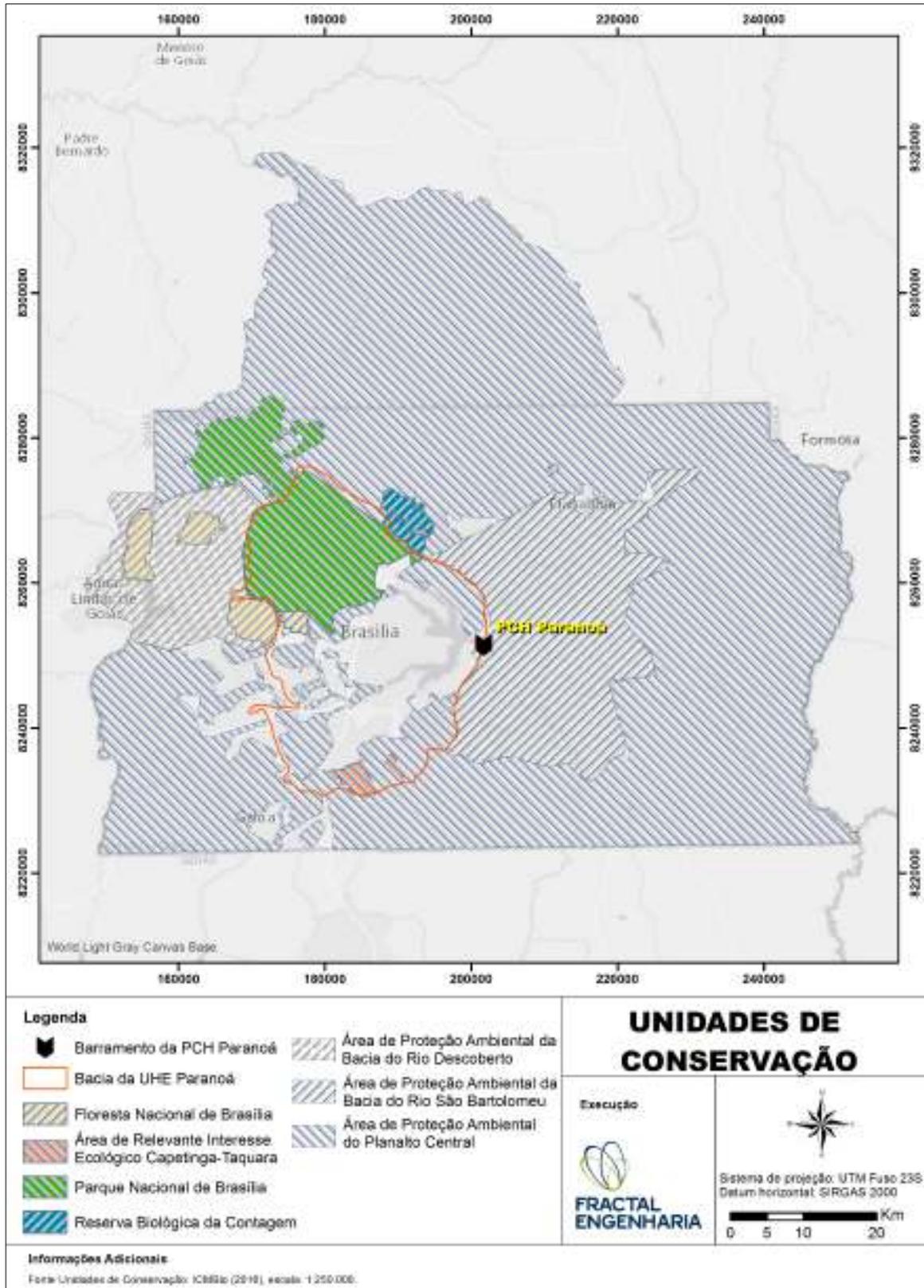


Figura 21. Unidades de Conservação.



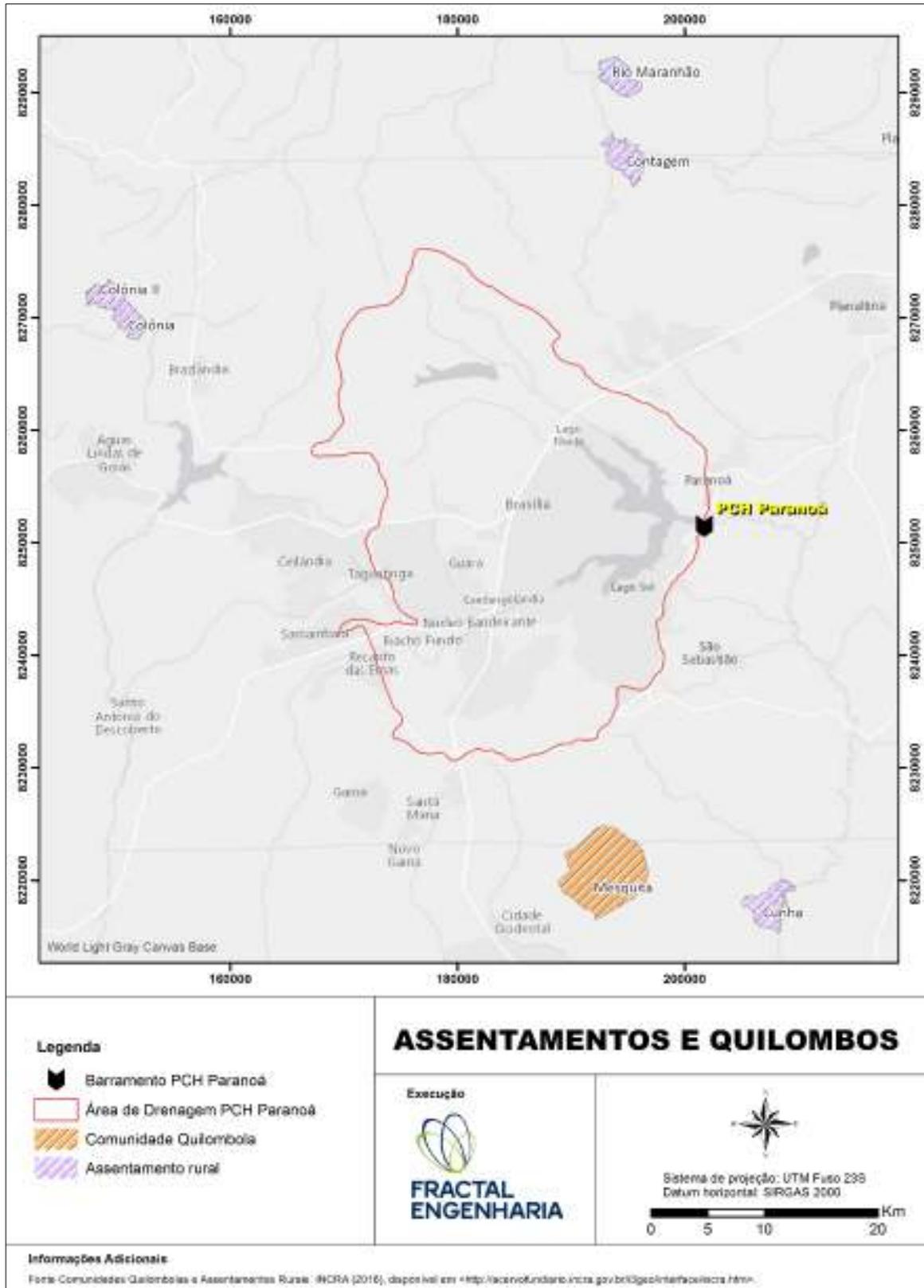


Figura 22. Assentamentos e Quilombos.



## 6.1 REGIÃO EM ESTUDO

O trecho a jusante do aproveitamento hidrelétrico é composto pelas Regiões Administrativas de Paranoá, Planaltina, São Sebastião, Jardim Botânico, Lago Norte e Lago Sul. Nestas regiões a principal atividade econômica está ligada ao setor de serviços, seguida da administração pública e comércio.

Na Tabela 4 encontra-se o número de habitantes por região, considerando dados expostos pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan).

Tabela 4. Habitantes por região afetada.

Região	População 2013 (hab)
Paranoá	46.256
Planaltina	185.591
São Sebastião	98.120
Jardim Botânico	25.335
Lago Norte	34.300
Lago Sul	31.472

**Fonte: Codeplan (2017). Disponível em < <http://brasiliaemnumeros.codeplan.df.gov.br/main.html>>, acesso em 15 fev. 2017.**

A PCH Paranoá é acessada pela rodovia DF-001, que passa sobre o barramento. No trecho à jusante da barragem, até o encontro do Rio Paranoá com o Rio São Bartolomeu, não são encontradas pontes.

## 6.2 PEDOLOGIA

Os tipos de solos presentes na Bacia do Rio Paranoá são o latossolo e o cambissolo (Figura 23). Os latossolos são solos minerais que apresentam alto grau de intemperismo, isto é, são solos bem desenvolvidos<sup>16</sup>. De forma geral, este tipo de solo coincide com os domínios de chapadas de platôs, degraus estruturais e rebordos erosivos, bem como planícies fluviais e lacustres. Nestes ambientes, o solo é espesso e bem drenado, em geral com baixa a moderada suscetibilidade à erosão<sup>17</sup>. Já na porção mais próxima à foz, onde há o domínio do cambissolo, os solos são rasos,

<sup>16</sup> ALMEIDA, L. de et al. **Hidrogeologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal**. Goiânia: Goiás (estado), Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 231 p.

<sup>17</sup> Idem.



menos desenvolvidos, bem drenados e geralmente pedregosos. Na bacia, estes se apresentam em terrenos muito acidentados com suscetibilidade à erosão e movimentos de massa.

### 6.3 GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A morfologia do relevo, sob domínio da Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá, é pouco diversificada. Apesar de o Estado de Goiás e o Distrito Federal apresentarem uma grande variedade de rochas, a bacia em questão está contida em um cinturão de cerca de 1.000 km de extensão no sentido norte-sul. O Rio Paranoá percorre uma bacia com baixa declividade e grande parte do seu domínio coincide com o Lago Paranoá. A partir do barramento da PCH Paranoá, o rio percorre um trecho de aproximadamente 15,30 km até desaguar no rio São Bartolomeu.

A morfologia do relevo da Bacia do Rio Paranoá envolve chapadas, platôs, colinas dissecadas, degraus estruturais e planícies fluviais ou flúviolacustres<sup>18</sup>. A maior parte da bacia encontra-se sobre chapadas e platôs, caracterizadas por superfícies aplainadas tabulares. Algumas porções dos cursos d'água perenes costeiam degraus estruturais e rebordos erosivos, representando relevo de transição entre duas superfícies distintas com cotas altimétricas diferentes. Há, ainda, alguns ambientes de deposição atual, caracterizados por planícies de inundação ou inundáveis. Próximo a foz do rio Paranoá, são encontradas colinas dissecadas e morros baixos, indicando a interface com um novo tipo de modelado. A Figura 24 ilustra os domínios geomorfológicos da região.

As unidades geológicas predominantes na bacia (Figura 25), bem como sua organização estrutural e cronológica, apresentam estruturas do Grupo Paranoá (unidades Paranoá 2, 3 e 4) e do Grupo Canastra (Formação Serra do Landim), partes da Faixa Brasília. Há, ainda, formações superficiais recentes: depósitos aluvionares e coberturas detrito-lateríticas ferruginosas. As unidades do Grupo Paranoá predominam na área da bacia e se caracterizam por rochas metassedimentares (baixo grau de metamorfismo) de diferentes composições<sup>19</sup>:

- Paranoá 2: feições sílico-ardosianas compostas por metassiltitos, quartzitos com intercalação de filito carbonoso, ardósia e lentes de dolomito;
- Paranoá 3: feições quartzíticas compostas por quartzito fino a médio com intercalações de filito e raras lentes de conglomerado;

<sup>18</sup> MORAES, J. M. (Org.). Geodiversidade do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Goiânia: CPRM, 2014. 131 p.

<sup>19</sup> BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Brasília. 2000. Escala 1:5000.000.



- Paranoá 4: feições pelito-carbonatadas compostas por metassiltitos, metargilito, filito carbonoso rítmico, ardósia, entre outros.

Predominam, em segundo lugar, as coberturas detrito-lateríticas ferruginosas que são compostas por sedimentos aluviais ou coluviais representados por conglomerados. A formação Serra do Landim apresenta-se nas porções da bacia mais próximas à foz, bem como o relevo de colinas e morros baixos, sendo formada basicamente por calcita.

As formações predominantemente sedimentares e metassedimentares apresentam diferentes comportamentos do ponto de vista da estabilidade do talude, permeabilidade, fraturamento e composição do solo<sup>20</sup>. As porções de chapadas de platôs apresentam baixa erosividade natural e boa estabilidade em taludes de corte, bem como boa taxa de infiltração d'água. Já os degraus estruturais e os rebordos erosivos apresentam alto grau de fraturamento com soltura de placas em taludes de corte e boa taxa de infiltração d'água.

As informações dos documentos disponibilizados pela equipe da CEB Geração S.A.<sup>21</sup> indicam que nas fundações da obra na ombreira direita ocorrem quartzitos e metassiltitos arrançados em camadas que variam de centímetros até cerca de dois metros. O quartzito presente no local se apresenta muito friável e os metassiltitos bastante alterados. Por fim, o barramento de terra funda-se sobre solo residual e rocha alterada. Não foram disponibilizadas informações a respeito das sondagens ao longo do eixo do barramento como um todo.

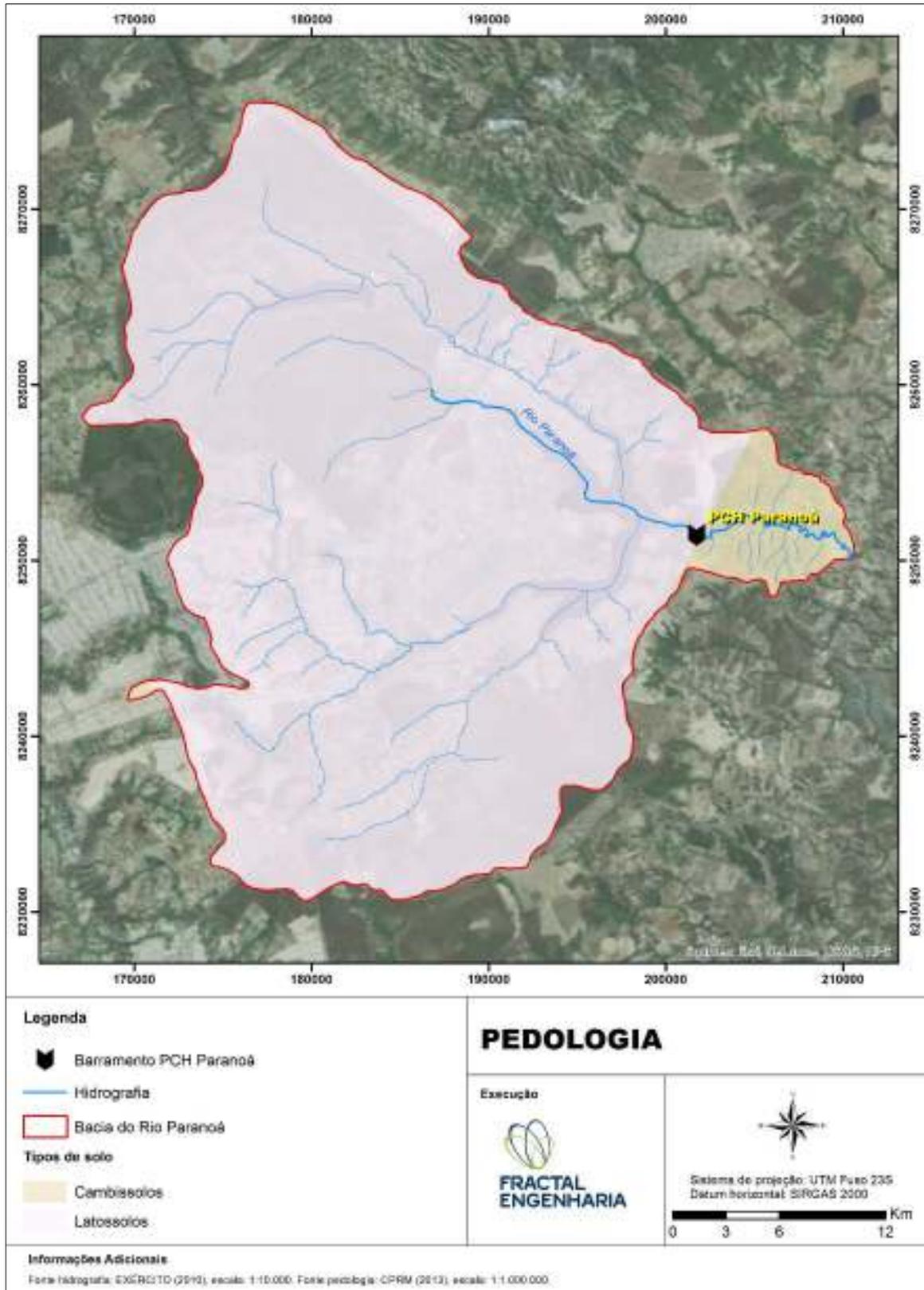
A hidrogeologia local demonstra uma baixa produtividade aquífera (Figura 26). A bacia do Rio Paranoá, pertence ao Domínio Aquífero Fraturado, correspondente ao Sistema Aquífero Paranoá. Formada em maior parte pelo Grupo Paranoá, este sistema possui, geralmente, formação de baixa produtividade, porém localmente moderada. No final da bacia, na foz do rio Paranoá, é encontrada o Embasamento Fraturado Indiferenciado de produtividade, geralmente, muito baixa, sendo localmente baixa.

---

<sup>20</sup> BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geodiversidade do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Brasília. 2013. Escala 1:1.000.000

<sup>21</sup> Seções Geológicas geotécnicas E-E, F-F e G-G. DOMUS Engenharia Consultiva e Projetos Geotécnicos LTDA. UPA-D-006. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017





**Figura 23. Mapa Pedologia.**



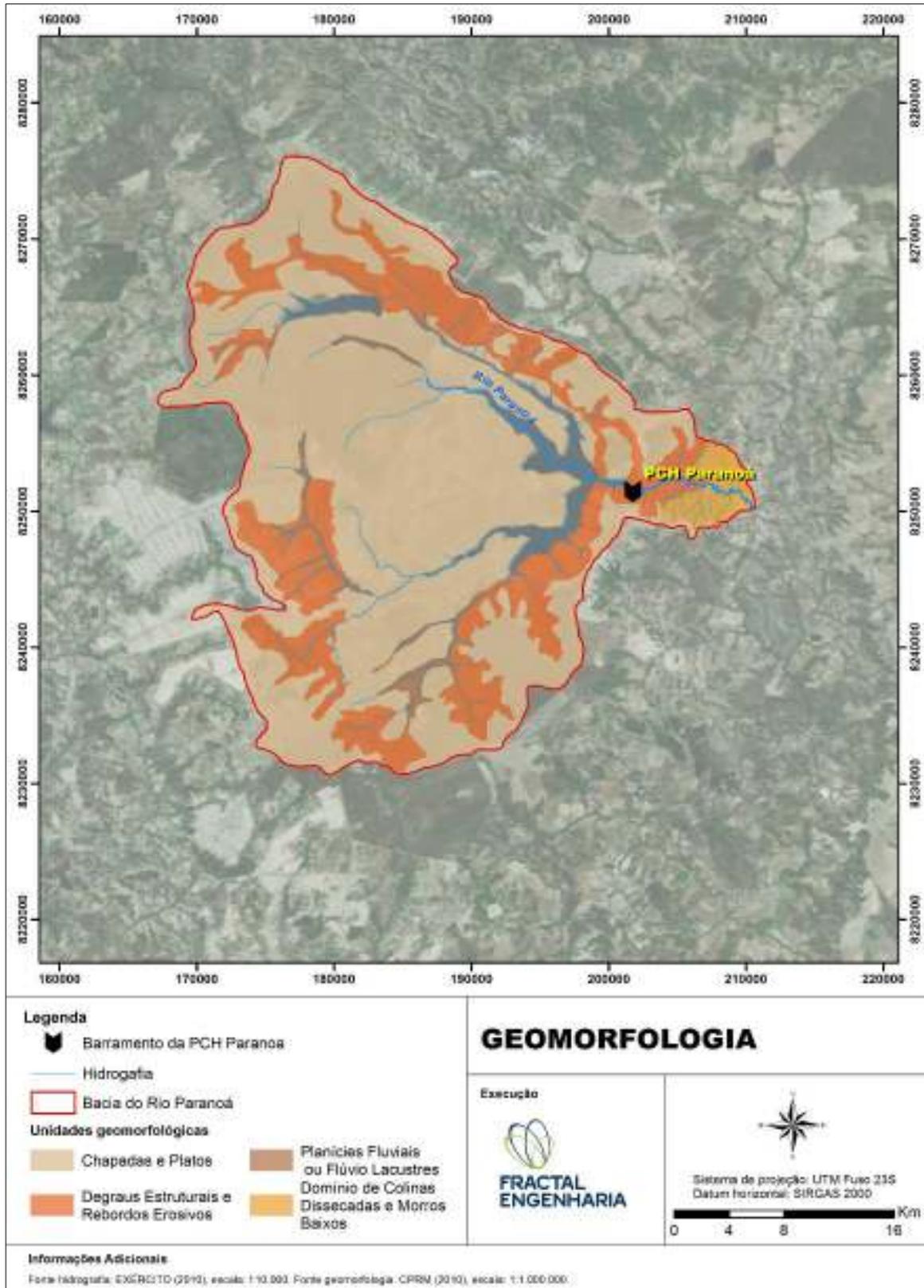
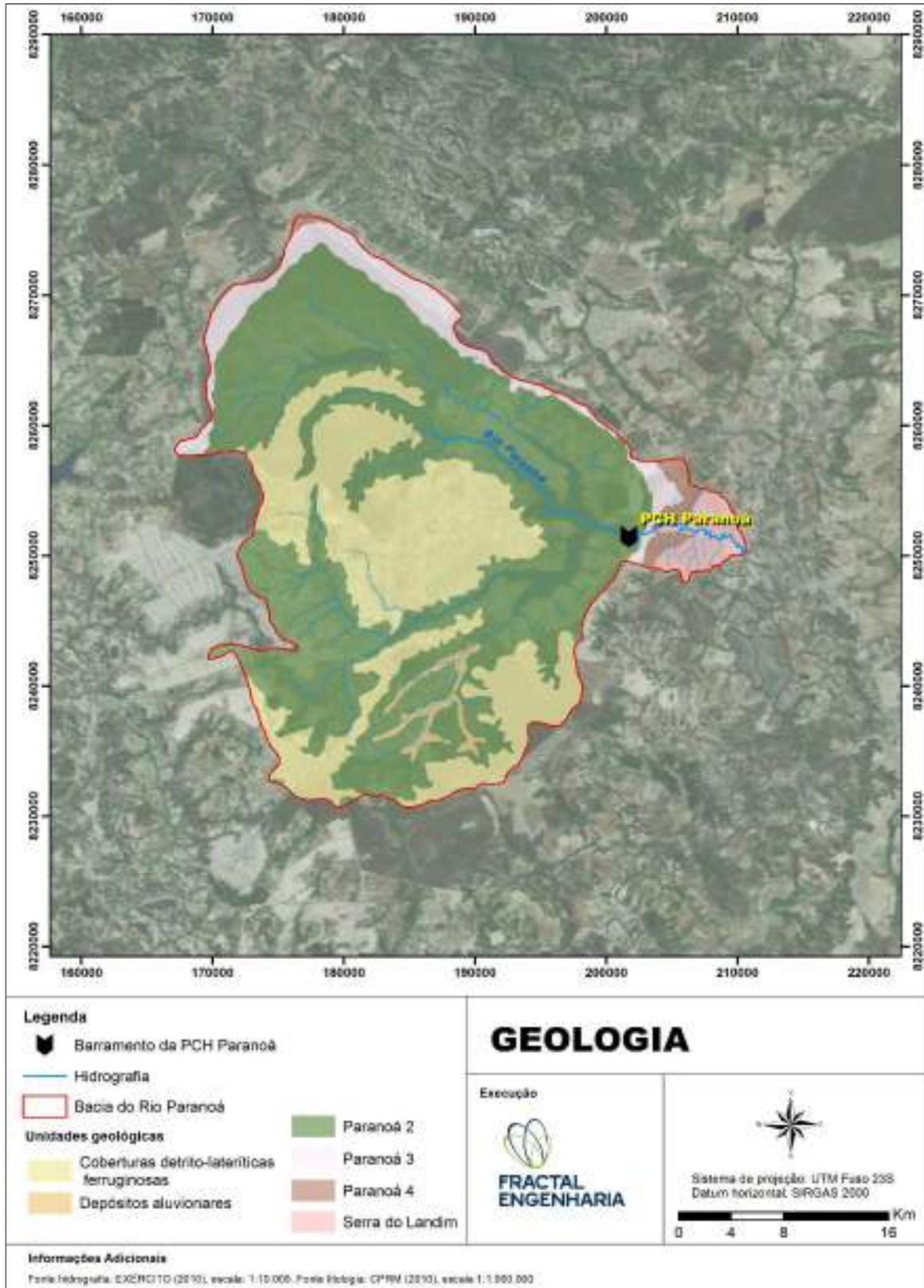


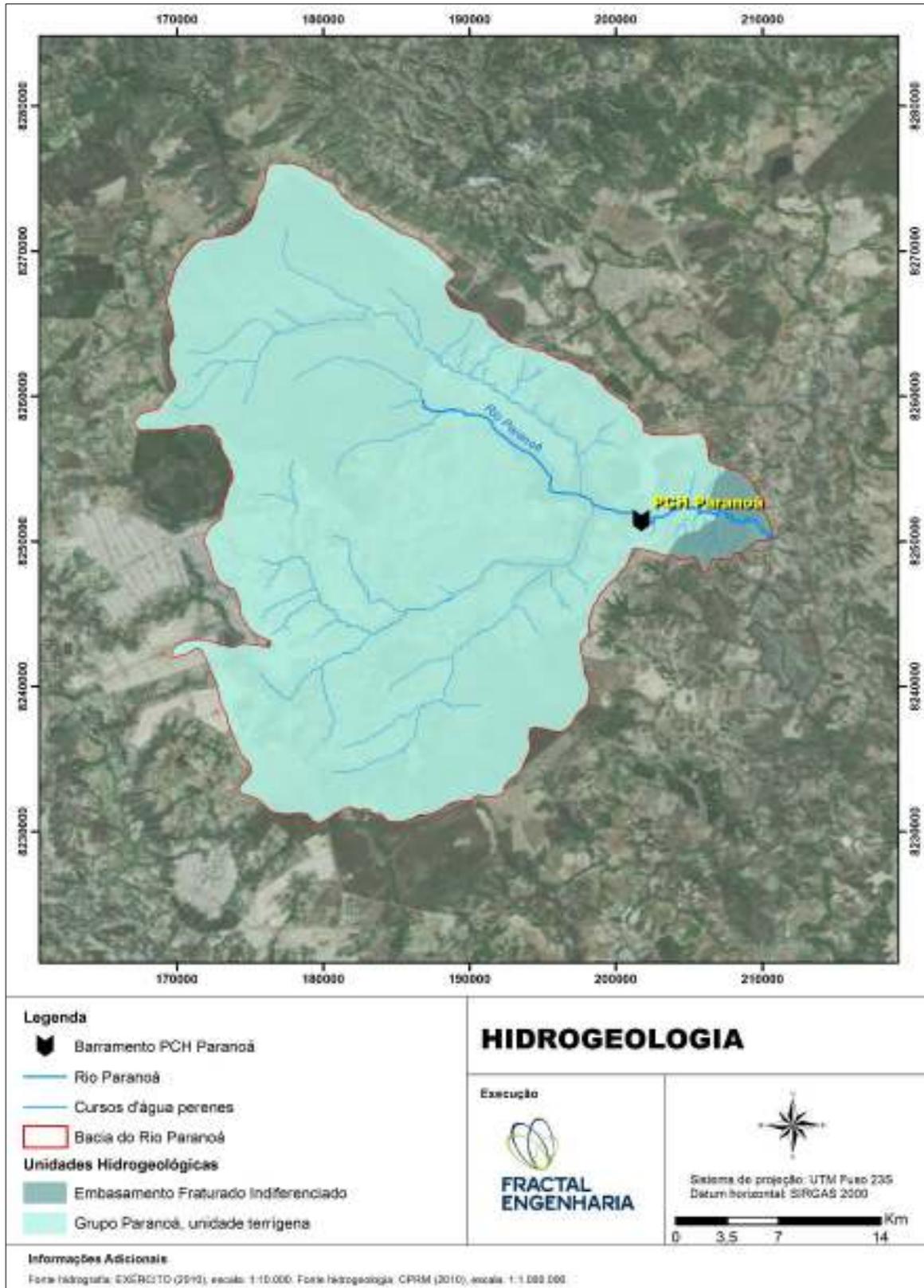
Figura 24. Mapa Geomorfologia.





**Figura 25. Mapa Geologia.**





**Figura 26. Mapa Hidrogeologia.**



#### 6.4 SISMOLOGIA

O Brasil conta com três instituições nacionais e cinco da rede mundial, contribuindo diretamente para a confecção do mapa de sismicidade brasileira, assegurando sua confiabilidade (França, 2006). Sendo assim, de acordo com registros históricos obtidos pela Rede Sismográfica Brasileira<sup>22</sup>, observa-se que a região da PCH Paranoá apresenta abalos sísmicos datados entre os anos de 2000 e 2003.

A série histórica da região aponta 3 (três) registros sismográficos até o ano de 2003. Destes, a maior magnitude foi registrada no ano de 2000, atingindo 4,20 graus na escala Richter. Salienta-se, que a última medição, que se apresenta catalogada, ocorreu no ano de 2003, atingindo a magnitude de 2,50 graus na escala Richter.

A espacialização dos registros históricos dos sismos está apresentada na Figura 27.

---

<sup>22</sup> Catálogo/ Boletim Sísmico Brasileiro v2014.06. Disponível em: <[http://rsbr.gov.br/catalogo\\_sb.html](http://rsbr.gov.br/catalogo_sb.html)>. Acesso em: 13/FEV/2017.



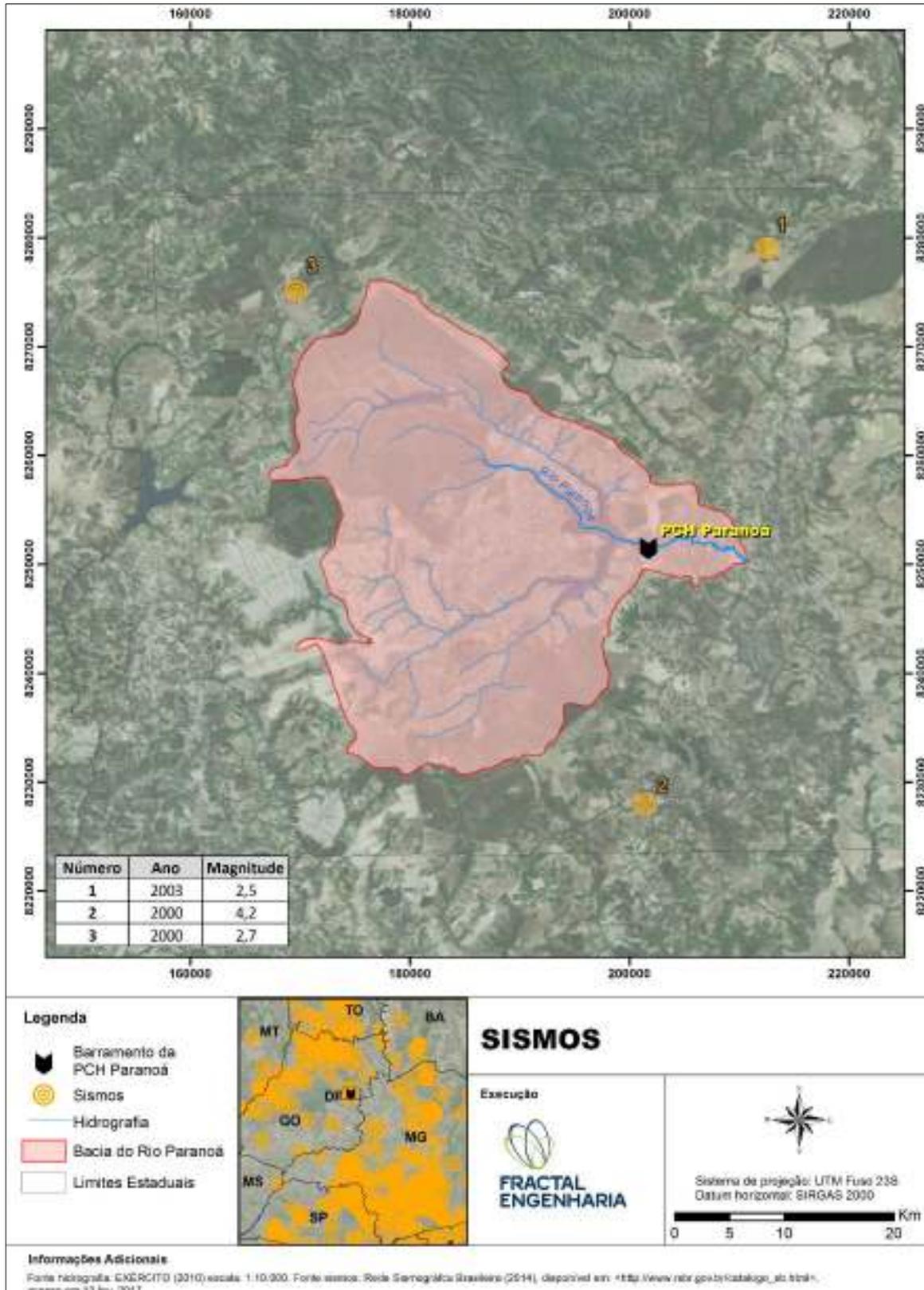


Figura 27. Sismos.



## 6.5 HIDROMETEOROLOGIA

### 6.5.1 Caracterização Climática

De acordo com a classificação climática de Köppen, a bacia hidrográfica em estudo apresenta clima de savana com baixa umidade do ar (Aw), bem como clima tropical de altitude (Cwa). Como característica desta região, destacam-se verões quentes e invernos secos. As temperaturas máximas médias apresentam variações entre 22°C e 28°C, já as temperaturas mínimas médias tem registrados valores entre 8°C e 17°C<sup>23</sup>.

A precipitação média anual no Lago Paranoá gira em torno de 1400 mm/ano. Sendo que os meses de maiores concentrações pluviométricas são registrados entre outubro e abril, com padrões constantes, enquanto o período de maio a setembro apresenta os menores valores médios mensais, representando a estação seca. Por sua vez, a evaporação média anual encontra-se em torno de 1200 mm, sendo as máximas registradas nos meses de agosto e setembro e as mínimas em novembro e dezembro.

### 6.5.2 Vazão média anual

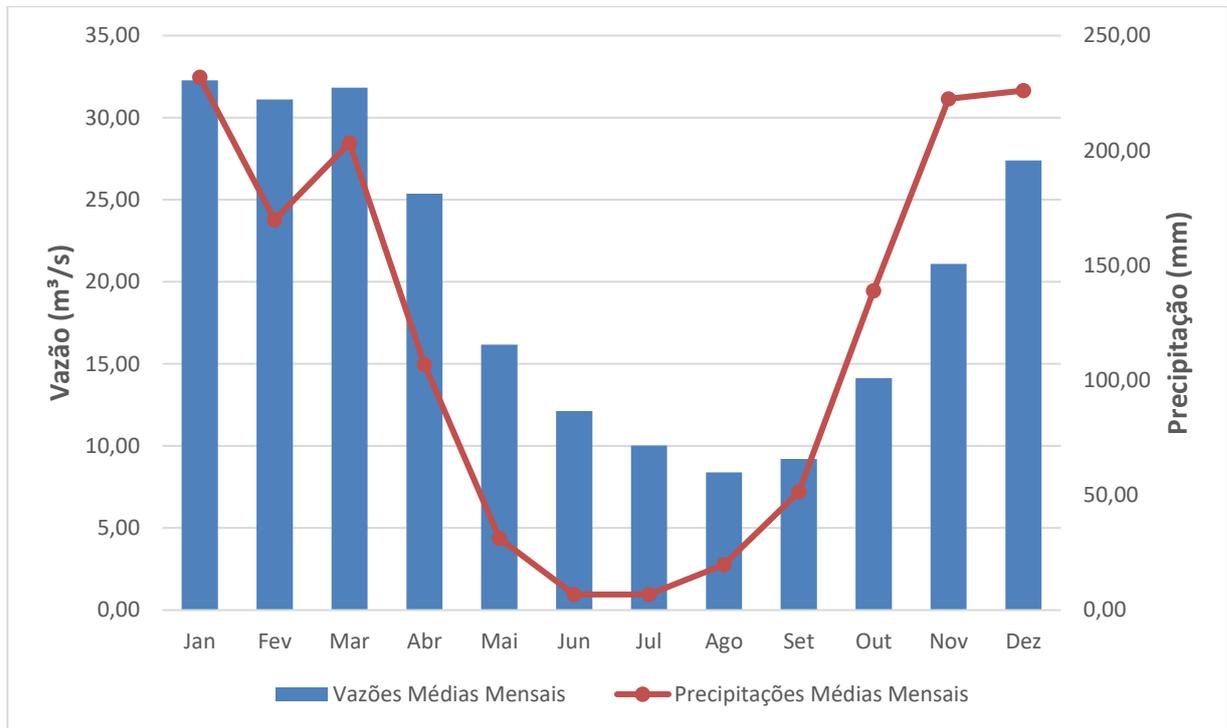
O regime fluviométrico afluente ao Lago Paranoá apresenta comportamento similar ao regime pluviométrico dominante na região. Conforme apresentado na Tabela 5 e na Figura 28, é possível identificar sazonalidade das vazões afluentes ao lago Paranoá, constatando que os meses entre dezembro e março, são determinados como os períodos de cheia. Em contrapartida, os meses entre maio e setembro, representam o período de seca.

**Tabela 5. Vazões médias mensais afluentes (m<sup>3</sup>/s) ao Lago Paranoá.**

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Mínimo</b>	11,80	9,09	16,07	9,19	7,60	4,80	3,77	3,82	3,74	5,27	11,43	12,81
<b>Médio</b>	32,27	31,11	31,83	25,37	16,17	12,12	10,03	8,39	9,20	14,13	21,09	27,40
<b>Máximo</b>	75,29	75,08	55,41	41,06	28,28	20,96	17,94	14,44	16,91	42,59	53,04	80,39

<sup>23</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.





**Figura 28. Histograma de vazões afluentes e precipitações médias mensais do lago Paranoá.**  
 Fonte: Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental, 2014<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – Usina Hidrelétrica do Paranoá. YKS Serviços LTDA, setembro de 2014. 200 f. Disponibilizado pela CEB Geração S.A. entre as datas 17JAN2017 e 19JAN2017.



## 7 REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Modelo de Plano de Ação de Emergência. Audiência Pública para coletar contribuições e subsídios para a Regulamentação do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 que trata da Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. 15 de março de 2013. Brasília: ANA.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual do Empreendedor – Volume V. Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE. Brasília: ANA, 2015. 169p.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acesso em 07NOV2016.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n. 696, de 15 de dezembro de 2015. Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.
- BRASIL. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.
- FRANÇA, G. S. Brazil Seismicity. Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Japão, v. 40, p. 23-36, 2006.
- MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.



# PCH Paranoá

## Plano de Segurança de Barragem

### Volume IV - Plano de Ação de Emergência

#### Seção II – Situações de Emergência

Revisão



Produção



#### REVISÃO

Revisão	Descrição	Execução	Verificação	Aprovação	Data
A	Emissão	JDL	PGL	HLR	27/04/2017
0	Atendimento	JDL	RBX	PGL	07/06/2017
1	Atualização	CEB G	CEB G	CEB G	28/02/2019
2	Atualização	CEB G	CEB G	CEB G	05/06/2019

## APRESENTAÇÃO

O presente documento é parte integrante do Plano de Ação de Emergência da Barragem Paranoá (Volume IV do Plano de Segurança de Barragens), juntamente com os seguintes materiais:

Seção I	Informações Gerais do PAE e da Barragem	312-PCHPA-RT-PAE-001
<b>Seção II</b>	<b>Situações de Emergência</b>	<b>312-PCHPA-RT-PAE-002</b>
Seção III	Procedimentos de Notificação e Sistema de Alerta	312-PCHPA-RT-PAE-003
Seção IV	Responsabilidades Gerais no PAE	312-PCHPA-RT-PAE-004
Seção V	Formulários e Treinamentos	312-PCHPA-RT-PAE-005
Seção VI	Ações de Implantação do PAE	312-PCHPA -RT-PAE-006



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA.....</b>	<b>5</b>
1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE SEGURANÇA .....	6
1.1.1	Nível 0 (Verde) - Normal.....	7
1.1.2	Nível 1 (Amarelo) – Atenção.....	7
1.1.3	Nível 2 (Laranja) – Alerta.....	8
1.1.4	Nível 3 (Vermelho) – Emergência.....	8
1.2	ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA.....	9
1.2.1	Galgamento.....	10
1.2.2	Rompimento por colapso estrutural .....	11
1.2.3	Piping/ Erosão .....	11
1.3	ESTRUTURAS VULNERÁVEIS.....	12
1.4	DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DAS SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA .....	13
1.4.1	Indicadores Qualitativos .....	15
1.4.2	Indicadores Quantitativos .....	17
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM.....</b>	<b>19</b>
2.1	DADOS UTILIZADOS.....	20
2.2	DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS .....	21
2.2.1	Amostragem das brechas.....	21
2.2.2	Hidráulico .....	21
2.3	FLUXOGRAMA .....	22
2.4	FORMAÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA .....	23
2.5	POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA.....	24
2.6	PROPAGAÇÃO HIDRÁULICO DA ONDA DE RUPTURA .....	25
2.7	CARTAS DE INUNDAÇÃO.....	26
2.7.1	Zona de Autossalvamento (ZAS).....	26
2.7.2	Área atingida .....	27
2.8	RESTRIÇÕES LOCAIS .....	28
2.9	ESTRATÉGIA, RECURSOS E MEIO DE DIVULGAÇÃO E ALERTA .....	29
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>33</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Conformação do barramento da PCH Paranoá. ....	12
Figura 2. Vista geral do empreendimento. ....	13
Figura 3. Sistema de gestão de emergências. ....	14
Figura 4. Diagrama de Operação do reservatório Paranoá. ....	19
Figura 5. Representação esquemática do modelo HEC-RAS truncado e MCBreach. ....	23
Figura 6. Representação esquemática do modelo HEC-RAS completo. ....	23
Figura 7. Cenários de ruptura da Barragem Paranoá. ....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número aproximado de atingidos (economias). ....	27
Tabela 2. Número aproximado de atingidos (habitantes). ....	27

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1. Cores padrões dos níveis de segurança. ....	6
Quadro 2. Levantamento de Informações. ....	9
Quadro 3. Rompimento por galgamento. ....	10
Quadro 4. Rompimento por Piping/ Erosão. ....	11
Quadro 5. Situações de Emergência. ....	15
Quadro 6. Resumo de dados empregados no estudo de ruptura hipotética da Barragem. ....	21
Quadro 7. Consequências em função do perigo hidrodinâmico. ....	25
Quadro 8. Graduação do perigo hidrodinâmico para seres humanos. ....	25
Quadro 9. Vias potencialmente atingidas. ....	28



## 1 SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

Para a elaboração do PAE da Barragem Paranoá, levou-se em consideração as principais situações de emergência passíveis de ocorrência na barragem, segundo informações de projeto, operacionais e de vistoria das estruturas. O presente documento expõe meios de descrever, avaliar e classificar os níveis de segurança das situações de emergência.

Sabendo que estas situações podem variar de acordo com as características da barragem em estudo, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA)<sup>1</sup>, devem ser consideradas, em geral, as seguintes ocorrências:

- Eventos anormais naturais, exteriores à barragem, como: tempestades, sismos, cheias provocadas por precipitações intensas ou por ruptura de barragens a montante, bem como por ondas induzidas pelo deslizamento de encostas no reservatório;
- Eventos excepcionais provocados pelo homem, exteriores à barragem, tais como: atos de guerra ou sabotagem;
- Circunstâncias anômalas de comportamento que derivam de deteriorações no corpo da barragem e/ou sua fundação, nos órgãos extravasores e seu equipamento de operação (eventos internos); e que são consequência das características da estrutura e do seu estado de manutenção, podendo incluir valores excessivos de variáveis, tais como as variações do volume do concreto ou as alterações de natureza físico-química das propriedades dos materiais;
- Outras situações internas à barragem relacionadas com a exploração e operação que derivam da operação dos respectivos órgãos extravasores, ou ainda situações que podem ocorrer nas instalações da barragem, tais como incêndios, inundações e atos de vandalismo.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), considera-se iniciada uma situação de emergência quando:

- For observada uma situação que possa comprometer a segurança da barragem a qualquer momento;
- For observado mau funcionamento de dispositivos de descarga que propicie inundação de área a jusante a qualquer momento;
- For constatada, a qualquer momento, anomalia que resulte na pontuação maior ou igual a 10 (dez) pontos na matriz de Estado de Conservação, referente a Categoria de Risco da barragem de acumulação d'água<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual do Empreendedor – Volume IV. Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE. Brasília: ANA, 2015.



O operador e o responsável da barragem devem estar atentos aos três pontos supracitados, em relação ao início de uma situação de emergência.

## 1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE SEGURANÇA

A avaliação e classificação das situações de emergência baseiam-se em quatro níveis de alerta gradualmente crescentes. Os níveis de segurança obedecem a um código de cores padrão (Quadro 1).

**Quadro 1. Cores padrões dos níveis de segurança.**

<b>Nível 0</b> (Verde) Normal	Situações normais e/ou pequenas ocorrências anômalas ou eventos externos à barragem que não comprometem sua segurança, devendo ser controladas e monitoradas ao longo do tempo. Fazem parte do cotidiano da equipe de segurança de barragens da empresa, necessitando, apenas, de notificação interna adequada.
<b>Nível 1</b> (Amarelo) Atenção	Situações anômalas ou eventos externos à barragem que não comprometem sua segurança no curto prazo, devendo ser controladas, monitoradas e reparadas ao longo do tempo. A equipe de segurança de barragens da empresa deve providenciar notificações internas e externas, conforme necessidade.
<b>Nível 2</b> (Laranja) Alerta	Situações anômalas ou eventos externos à barragem que representam, no curto prazo, risco à sua segurança, devendo ser tomadas, de imediato, as devidas providências para sua extinção. A equipe de segurança de barragens da empresa deve providenciar notificações internas e externas, conforme necessidade.
<b>Nível 3</b> (Vermelho) Emergência	Situações anômalas ou eventos externos à barragem que representam risco de ruptura iminente, devendo ser tomadas as devidas providências para reduzir danos humanos e materiais, decorrentes de seu colapso. Deve ser efetuado o alerta antecipado.

Fonte: adaptado de ANA (2015).

A classificação quanto aos níveis de segurança baseia-se na análise de eventos e irregularidades passíveis de ocorrência no empreendimento. Em geral, esta classificação não implica em uma ocorrência sequencial, podendo existir uma situação de nível de emergência sem que o mesmo implique na passagem por níveis de segurança inferiores.

Estabelecidos critérios de apoio à decisão e realizada a classificação quanto aos níveis de segurança e risco de ruptura, o Coordenador do PAE deve declarar, para os níveis superiores a

<sup>2</sup> De acordo com Anexo I da Resolução MMA/CNRH nº143, de 10 de julho de 2012.



zero, Estado de Atenção, Alerta ou Emergência, bem como executar as ações previamente descritas no PAE para cada nível.

O coordenador do PAE deverá ser um profissional treinado e capacitado para o desempenho da função, designado pelo empreendedor da usina, com conhecimento total sobre as estruturas da barragem, autonomia e autoridade para mobilização de equipamentos, materiais, mão-de-obra e suprimentos diversos.

Com o presente documento, o coordenador do PAE tem subsídio para identificar as situações de emergência, para então, na Seção III (312-PCHPA-RT-PAE-003), buscar o procedimento de notificação adequado, bem como a definição dos responsáveis.

### **1.1.1 Nível 0 (Verde) - Normal**

O nível mínimo de alerta (Nível 0) configura uma situação normal de rotina, onde a probabilidade de acidente grave é desprezível. Isto é, os eventos diversos e as irregularidades operacionais e gerenciais detectadas no aproveitamento não afetam a segurança da barragem, somente sua funcionalidade.

Enquadram-se neste nível, os eventos e irregularidades estáveis, sem consequências nocivas ao vale a jusante ou com lenta evolução temporal, bem como as anomalias passíveis de controle pelo empreendedor.

Neste caso, as notificações devem ser internas, uma vez que a situação pode ser resolvida internamente, cabendo a responsabilidade ao proprietário do empreendimento. Normalmente, são monitoradas pela equipe de segurança de barragens da empresa, até que, em curto ou médio prazo, seja efetuada a manutenção e reparo.

### **1.1.2 Nível 1 (Amarelo) – Atenção**

O nível de atenção (Nível 1) corresponde a primeira escala de situações não normais, sendo caracterizado pela existência de uma situação adversa com possibilidade de comprometimento da segurança estrutural da barragem e ocorrência de danos ao vale a jusante.

Neste nível, as notificações ainda devem ser internas, uma vez que a situação pode ser controlada internamente pelos próprios funcionários. Com exceção da entidade fiscalizadora (ANEEL), que deverá ser notificada, e dos empreendimentos a montante e jusante, quando houver.

Deve-se estabelecer, com declaração por escrito, mediante formulário adequado, a mudança de nível para o ESTADO DE ATENÇÃO na barragem. Para mais informações, consultar as fichas de emergência Nível 1 (Apêndice 2).



### 1.1.3 Nível 2 (Laranja) – Alerta

O nível de alerta (Nível 2) configura uma situação adversa identificada no Nível 1, mas não extinta ou não controlada, continuando a afetar a segurança da barragem. Neste caso, pode ocorrer um acidente a qualquer momento, uma vez que a integridade e operacionalidade da estrutura é afetada.

Enquadram-se neste nível, os eventos ou irregularidades com rápida evolução temporal, onde a tomada de decisão é realizada de forma imediata, não havendo tempo hábil para um estudo aprofundado da situação. Ressaltam-se também, situações anormais onde não há possibilidade de controle, tornando-se indispensável a intervenção de entidades externas, bem como anomalias passíveis de agravamento, com ocorrência de graves consequências ao vale a jusante.

Devido ao risco iminente, as notificações devem ser internas e externas. Os principais agentes e órgãos a serem alertados são: (i) a população na ZAS; (ii) a entidade fiscalizadora (ANEEL); (iii) os empreendimentos de montante e jusante, quando houver; e (iv) os órgãos integrantes do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). Consultar Seção III (312-PCHPA-RT-PAE-003).

Deve-se estabelecer, com declaração por escrito, mediante formulário adequado, ESTADO DE ALERTA na barragem, na Zona de Autossalvamento (ZAS) e em possíveis áreas impactadas a jusante. Para mais informações, consultar as fichas de emergência Nível 2 (Apêndice 2).

### 1.1.4 Nível 3 (Vermelho) – Emergência

O nível de emergência (Nível 3) configura uma situação adversa de ruptura iminente. Neste caso, um acidente é inevitável, fugindo do controle dos responsáveis e afetando de maneira severa e irreversível a segurança da barragem.

Caracterizando uma catástrofe inevitável, as notificações devem ser internas e externas. Os principais agentes e órgãos a serem alertados são: (i) a população na ZAS; (ii) a entidade fiscalizadora (ANEEL); (iii) os empreendimentos de montante e jusante, quando houver; e (iv) os órgãos integrantes do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). Consultar Seção III (312-PCHPA-RT-PAE-003).

Deve-se estabelecer, com declaração por escrito, mediante formulário adequado, ESTADO DE EMERGÊNCIA na barragem, na Zona de Autossalvamento (ZAS) e em possíveis áreas impactadas a jusante. Para mais informações, consultar as fichas de emergência Nível 3 (Apêndice 2).



## 1.2 ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA

De acordo com a Federal Energy Regulatory Commission (2005)<sup>3</sup>, a Análise dos Potenciais Modos de Ruptura (APMR) subsidia a identificação das estruturas susceptíveis à falhas estruturais da barragem. É um procedimento informal que pode ser feito a qualquer momento pelo proprietário, em conjunto, ou não, com terceiros, a fim de debater maneiras de como a barragem poderia romper.

A APMR consistiu, basicamente, no levantamento de todas as informações disponíveis sobre a Barragem Paranoá. Tal levantamento de informações buscou documentos e projetos sumarizados no Quadro 2.

**Quadro 2. Levantamento de Informações.**

<b>Informações/Projeto</b>	<b>Qualidade</b>
Análise dos projetos básico e executivo das estruturas da barragem.	Plantas da Barragem Paranoá.
Banco de dados da auscultação.	Operante
DATUM vertical e horizontal georreferenciado do projeto.	CEB Geração S.A.
Estudos hidrológicos.	CEB Geração S.A.
Séries temporais de monitoramento pluviométrico e fluviométrico da área de drenagem da barragem, bem como da própria barragem.	CEB Geração S.A.
Histórico operacional ou séries temporais da operação do reservatório e dispositivos de descarga.	CEB Geração S.A.
Registros de atividade sísmica recente.	Rede Sismográfica Brasileira
Relatório de acidentes.	CEB Geração S.A.
Caracterização demográfica ao longo do vale a jusante da barragem.	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Ministério do Meio Ambiente (MMA)

Com o desenvolvimento da APMR, a identificação das estruturas da barragem susceptíveis à falha foi subsidiada por inspeção visual e revisão documental do empreendimento. As seguintes questões fundamentam a APMR:

<sup>3</sup> FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. Dam Safety Performance Monitoring Program. FERC, USA, 2005.

- Como e onde a barragem poderia romper?
- O que acontece se a barragem romper?
- Estão identificados os potenciais modos de ruptura e estão sendo apropriadamente monitorados por inspeções visuais e auscultação?
- Quais ações poderiam ser tomadas para reduzir áreas atingidas pelo rompimento da barragem ou mitigar as consequências desse evento catastrófico?

Em relação à Barragem Paranoá, foram realizadas vistorias em campo para reconhecimento das estruturas e determinação dos potenciais modos de ruptura. Características da barragem foram analisadas através de registros da inspeção visual e revisão documental do empreendimento. Identificando pontos estruturalmente vulneráveis, os potenciais modos de ruptura são padronizados e compõem os cenários das manchas de inundação.

Conforme as diretrizes de FERC (2005), as perguntas “Como a barragem poderia romper?” e/ou “Como a barragem pode chegar a uma situação de emergência?” balizaram a composição dos modos de ruptura e emergência da Barragem Paranoá.

Desta forma, 3 (três) modos de ruptura foram identificados. Esses prováveis modos de ruptura determinaram as formas que a barragem poderá romper segundo situações de emergência, as quais estão detalhadas nas fichas de ação do Apêndice 2. A descrição dos modos está detalhada nos próximos subitens.

### 1.2.1 Galgamento

Quadro 3. Rompimento por galgamento.

Modo de ruptura	Causa	Evidência/consequência
<b>Modo RPB1 – Rompimento por galgamento, vertendo a vazão Milenar.</b>	Evento de magnitude excepcional.	Ocorrência de eventos naturais de chuvas intensas.
	Obstrução de comportas por perda de comando, falta de energia, sabotagem, colapso do sistema de acionamento das comportas, reação álcali agregado, etc.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ausência de fonte de energia;</li><li>• Impedimento do movimento da comporta;</li><li>• Desalinhamento ou emperramento de comportas;</li><li>• Galgamento e ruptura de aterro.</li></ul>
	Obstrução dos vãos do vertedouro;  Comporta inoperante.	Presença de detritos e troncos de madeira flutuantes.

### 1.2.2 Rompimento por colapso estrutural

Modo de ruptura	Causa	Evidência/Consequência
<b>Modo RDC3 – Rompimento do vertedouro ou sistema de comportas por problemas de acionamento e abertura ou colapso do munhão em Condição de Carregamento Normal (CCN).</b>	Falha de tratamento da fundação com surgimento de plano de deslizamento no maciço.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surgimento de pontos de ruptura do concreto;</li> <li>• Reação álcali agregado;</li> <li>• Deslizamento diferencial entre blocos;</li> <li>• Aparecimento ou intensificação de infiltrações de água nas estruturas;</li> <li>• Ruptura de bloco de concreto.</li> </ul>
	Falha de concretagem por erro de dosagem, controle de temperatura, oxidação e/ou falha de armadura e de tendões protendidos, entre outros.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reação álcali agregado;</li> <li>• Fissuramento, trincas e rachaduras;</li> <li>• Desalinhamento ou emperramento de comportas;</li> <li>• Ruptura da viga munhão.</li> </ul>
	Ocorrência de combinação de carregamentos que favoreçam o arrancamento da estrutura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentação da estrutura;</li> <li>• Desalinhamento ou emperramento de comportas.</li> <li>• Ruptura da viga munhão, arrancamento de comporta e/ou destruição de parte do pilar e escoamento descontrolado de água.</li> </ul>

### 1.2.3 Piping/ Erosão

Quadro 4. Rompimento por Piping/ Erosão.

Modo de ruptura	Causa	Evidência/Consequência
<b>Modo RPB2 – Rompimento por erosão interna com formação de piping, vertendo vazão Q50%</b>	Falha do sistema de drenagem interna.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surgência d'água;</li> <li>• Carreamento de partículas;</li> <li>• Aumento de poropressão (leitura dos piezômetros);</li> <li>• Redução de vazão (leitura dos medidores de vazão);</li> <li>• Subsidência;</li> <li>• Vazão descontrolada e ruptura do aterro e/ou fundação.</li> </ul>
	Fluxo concentrado no contato/interface com estrutura de concreto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surgência de água;</li> <li>• Carreamento de partículas;</li> <li>• Aumento ou redução de</li> </ul>



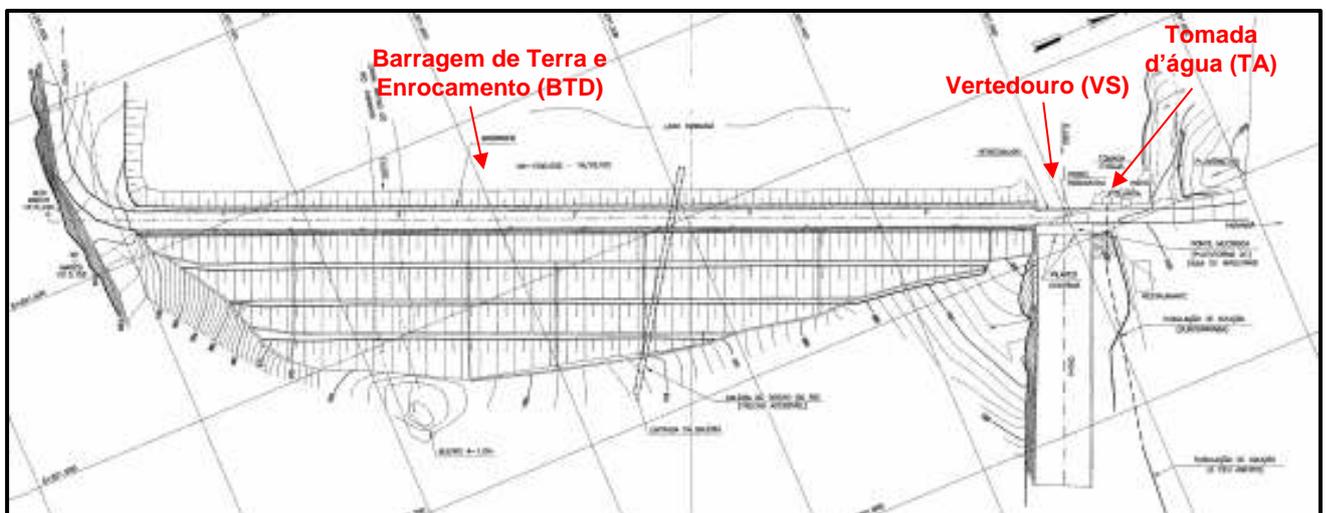
Fluxo preferencial criado por vegetação e/ou animais.	poropressão (leitura dos piezômetros); <ul style="list-style-type: none"><li>• Formação de trincas no contato entre as estruturas;</li><li>• Subsidência;</li><li>• Vazão descontrolada e ruptura do aterro e/ou fundação.</li></ul>
---	--

### 1.3 ESTRUTURAS VULNERÁVEIS

Com o desenvolvimento da APMR foram identificadas as estruturas civis da Barragem Paranoá, conforme vistoria das estruturas:

- Ombreira Direita (OD);
- Barragem de Terra e Enrocamento (BTD);
- Muros de Aproximação;
- Vertedouro de Superfície – Controlado (VS);
- Tomada d’água (TA); e
- Ombreira Esquerda (OE).

Detalhes construtivos e geométricos destas estruturas encontram-se descritos e ilustrados na Seção I do Volume IV do PSB (312-PCHPA-RT-PAE-001), referente ao PAE, conforme Figura 1.



**Figura 1. Conformação do barramento da PCH Paranoá.**  
Fonte: Barragem do Paranoá – Planta – Arranjo (UPA-D-001).



**Figura 2. Vista geral do empreendimento.**

Fonte: CEB Geração S.A. (2011)

Os possíveis locais de formação da brecha de ruptura da Barragem Paranoá estão listados abaixo, tendo sido selecionadas as estruturas de maior altura do barramento. A escolha por estes pontos foi realizada mediante informações da planta do arranjo geral.

- Barragem de terra da margem direita (OD); e,
- Vertedouro controlado por comportas.

A altura da brecha variou, aproximadamente, entre 33,00 m e 36,00 m, alcançando seu valor máximo em 35,80 m.

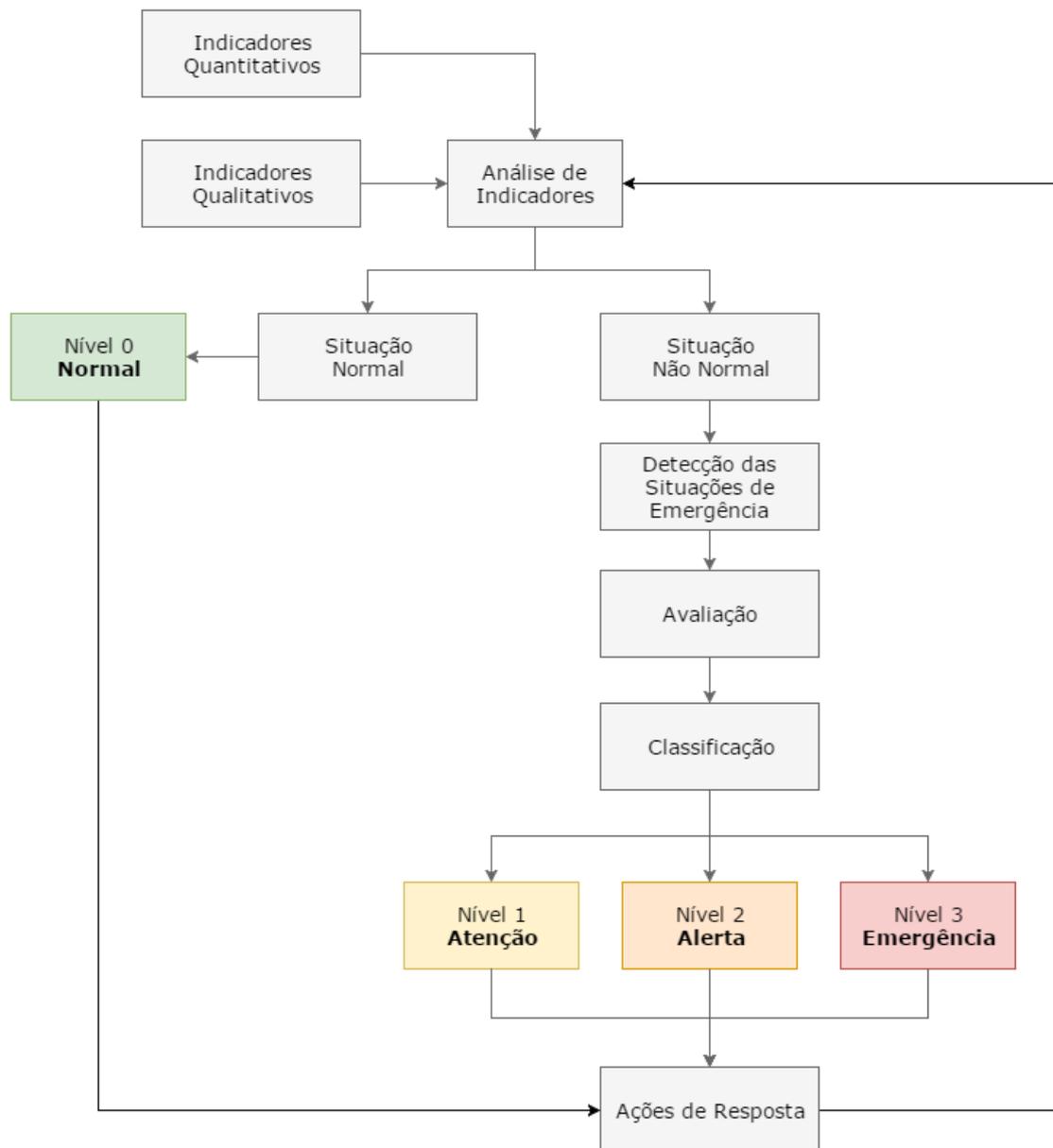
#### 1.4 DETECÇÃO E AVALIAÇÃO DAS SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

Com a apresentação dos níveis de segurança e da APMR, a operacionalização do PAE tem início pela detecção das potenciais situações de risco passíveis de ocorrência na barragem em estudo. Para tanto, faz-se uso de monitoramentos periódicos, devendo ser realizadas inspeções de segurança regular nas estruturas do empreendimento, bem como a análise dos resultados da instrumentação da barragem e do reservatório.

Junto às inspeções de segurança regular, deve-se manter todo o procedimento de inspeção visual rotineira, bem como leitura dos equipamentos de auscultação com periodicidade adequada.

A manutenção e o funcionamento adequado dos equipamentos de auscultação são fatores imprescindíveis à segurança das estruturas da barragem

A Figura 3 sumariza os níveis apresentados anteriormente, inserindo-os dentro de um sistema de Gestão de Segurança, desde o procedimento de inspeção e detecção com classificação dos níveis de emergência até as ações de resposta.



**Figura 3. Sistema de gestão de emergências.**

De forma a facilitar a avaliação das situações de emergência e classificação quanto ao seu nível de segurança, são definidos indicadores qualitativos e quantitativos baseados nas características da Barragem Paranoá. Dessa forma, consideram-se indicadores qualitativos ou evidências, todos os eventos naturais e anomalias que possam vir a contribuir para o prejuízo da segurança das estruturas da obra, bem como do vale a jusante. Por sua vez, os indicadores



quantitativos são definidos com base na variação numérica das grandezas consideradas essenciais para a boa operacionalidade da obra.

Sabendo que o monitoramento, análise e classificação das situações de emergência são de suma importância para o bom desenvolvimento do Plano de Ação de Emergência da Barragem Paranoá, os formulários das inspeções de segurança da barragem devem estar disponíveis junto ao PAE, facilitando a consulta aos critérios de caracterização dos níveis de emergência.

Os principais modos de falha com potencial para geração de situações de emergência, os indicativos qualitativos e quantitativos para cada uma dessas situações, assim como a classificação quanto aos níveis de emergência, estão sintetizados nos itens a seguir. Cabe salientar que, eventualmente, possam vir a ocorrer situações diferentes das apresentadas, por dificuldade de previsão antecipada de sua ocorrência. Estes cenários podem ser identificados durante as atividades de rotina dos operadores do aproveitamento e/ou por meio das inspeções periódicas.

#### 1.4.1 Indicadores Qualitativos

O Quadro 5 expõe as situações de emergência detectáveis para a Barragem Paranoá, caracterizando-as quanto ao seu modo de falha, suas classificações quanto ao nível de segurança e respectiva ficha de emergência. As inspeções rotineiras devem ser balizadas pelas fichas de ação, conforme interpretação visual, auxiliando a detecção da situação emergente. Estas podem ser acessadas no Apêndice 2.

**Quadro 5. Situações de Emergência.**

TERRA/ ENROCAMENTO			
Ocorrência	Situação	Nível	Ficha
Sismos	Na ocorrência de sismos deve-se percorrer toda a barragem, inspecionando suas estruturas e identificando possíveis anomalias, tais como: ocorrência de cheias, trincas, depressões ou abatimentos, surgência, vazamento e umidade. Identificada a anomalias, deve-se avaliar sua magnitude e adotar as ações propostas na respectiva ficha.		
Cheia	Evento de cheia associado à dispositivos de descarga operativos e cota controlada, abaixo do NA Maximo Maximorum.	0	3
	Evento de cheia associado à dispositivos de descarga inoperantes e/ou operantes e nível do reservatório subindo, mas ainda abaixo do NA Maximo Maximorum.	1	9
	Evento de cheia associado à dispositivos de descarga inoperantes e/ou operantes, mas com galgamento da barragem iminente.	2	15
	O processo evoluiu causando formação de brecha de ruptura. A ruptura está em avanço ou já ocorreu.	3	19
Trincas, depressões ou abatimentos	Trincas/depressões/abatimentos, monitoradas ou não, documentados ou não, mas somente superficiais.	0	2
	Trincas/depressões/abatimentos, profundos e/ou que não se estabilizam; com percolação de água; com identificação de surgências a jusante nos locais das trincas; transversais atravessando todo o corpo da barragem de montante para jusante	1	8



TERRA/ ENROCAMENTO			
Ocorrência	Situação	Nível	Ficha
	Trincas/depressões/abatimentos, profundos e/ou que não se estabilizam apresentando percolação e transporte de material e/ou possibilidade de galgamento e/ou erosão interna	2	14
	O processo evoluiu causando formação de brecha de ruptura. A ruptura está em avanço ou já ocorreu.	3	19
Surgência/Vazamento/ Umidade	Surgência/vazamento/umidade nos taludes ou ombreiras, não documentadas, mas sem pressão de água e/ou transporte de material	0	1
	Surgência/vazamento/umidade nos taludes ou ombreiras, documentadas ou não, com alteração de coloração do fluido, aumento de área e/ou vazão	1	7
	Surgência/vazamento/umidade nos taludes ou ombreiras com vazão elevada e grande quantidade de transporte de material evidenciando processo de erosão interna em andamento	2	13
	O processo evoluiu causando formação de brecha de ruptura. A ruptura está em avanço ou já ocorreu.	3	19
Escorregamento de taludes	Escorregamentos em forma de cunha e/ou plano superficial de pequena profundidade ou extensão.	0	4
	Escorregamentos em forma de cunha/plano/circular chegando próximo ao núcleo ou afetando menor parte do talude.	1	10
	Escorregamentos em forma de cunha/plano/circular instabilizando núcleo e/ou maior parte do talude	2	16
	O processo evoluiu causando formação de brecha de ruptura. A ruptura está em avanço ou já ocorreu.	3	19

CONCRETO			
Ocorrência	Situação	Nível	Ficha
Sismos	Na ocorrência de sismos deve-se percorrer a barragem, inspecionando suas estruturas e identificando possíveis ocorrências de movimentação da barragem de concreto, fissuras, trincas e rachaduras. Identificada a anomalias, deve-se avaliar sua magnitude e adotar as ações propostas na respectiva ficha.		
Movimentação Barragem de Concreto	Deslizamento e/ou tombamento e/ou abertura e/ou afundamento dentro dos limites de projeto	0	5
	Deslizamento e/ou tombamento e/ou abertura e/ou afundamento próximo aos limites de projeto	1	11
	Deslizamento e/ou tombamento e/ou abertura e/ou afundamento ultrapassaram os limites de projeto e a estrutura se apresenta aumento constante de movimentação.	2	17
	O processo evoluiu causando deslizamento e/ou tombamento e/ou ruptura de um ou mais blocos, ou de estruturas de extravasamento	3	20
Fissuras, Trincas e Rachaduras	Fissuras/Trincas/Rachaduras estáveis e/ou superficiais.	0	6
	Fissuras/Trincas/Rachaduras profundas que não se estabilizam; com a percolação de água com baixa vazão ou pressão.	1	12
	Fissuras/Trincas/Rachaduras profundas que não se estabilizam; com a percolação de água com elevada pressão e/ou lixiviação de material. Expansão do concreto trazendo problemas à operação de equipamentos mecânicos.	2	18



CONCRETO			
Ocorrência	Situação	Nível	Ficha
	O processo evoluiu causando deslizamento e/ou tombamento e/ou ruptura de um ou mais blocos, ou de estruturas de extravasamento	3	20

#### 1.4.2 Indicadores Quantitativos

Os indicadores quantitativos auxiliam a gestão da situação de risco, através do monitoramento hidrométrico do reservatório, geotécnico e estrutural da barragem.

Estes indicadores devem definir os níveis de segurança para o monitoramento hidrométrico e de auscultação do barramento. Isto permitirá que, ao ser constatada uma anomalia, estejam previstas manobras e ações a serem executadas, preservando a integridade e o funcionamento das estruturas.

A PCH Paranoá conta com Sistema de Auscultação operante, sendo realizadas leituras quinzenais.

##### 1.4.2.1 Instrumentação da barragem

O monitoramento das anomalias no barramento Paranoá é realizado com o auxílio de 11 (onze) Drenos, 15 (quinze) Piezômetros de Tubo, 6 (seis) Poços de Alívio / Poços de Dreno e 9 (nove) Medidores de nível d'água.

Todavia, durante o ciclo de atividade deste projeto, não se teve acesso aos valores limites de projeto estipulados para cada equipamento. Estas informações são importantes, uma vez que a análise conjunta destes instrumentos auxiliará a classificação do estado de segurança da barragem.

##### 1.4.2.2 Reservatório

Por intermédio do nível de montante é definido o estado hidráulico do reservatório. Analisando este estado e as condições dos equipamentos eletromecânicos, que influenciam diretamente no controle hidráulico, identifica-se a correspondente situação de operação do reservatório, sendo estas subdivididas entre "Normal", "Alerta" ou "Emergência". As definições de situações operativas do reservatório devem ser sempre interpretadas em separado dos níveis de segurança da estrutura, ou seja, a condição de emergência para a operação do reservatório, não significa estado de emergência para a estrutura. Para fins de declaração de situação do PAE, deve-se sempre utilizar as informações contidas no item 1.4.1. A seguir são apresentadas as características e os fatores caracterizadores destas situações operativas:

##### i. Situação Normal



O nível mínimo de alerta configura uma situação normal com o reservatório operando no período seco (maio e novembro).

Denominada como Região A, esta situação classifica-se por apresentar:

**NORMAL**

- N.A. do reservatório  $999,80 \text{ m} \leq \text{N.A} \leq 1.000,60 \text{ m}$  (Período Seco).

ii. Alerta

O Nível de Alerta corresponde a uma situação onde há indicativo de violação das restrições operacionais do reservatório. Esta pode ocorrer com o reservatório operando tanto no período seco (maio a novembro) quanto úmido (dezembro a abril).

Denominada como Região B, esta situação classifica-se por apresentar:

**ALERTA**

- N.A. do reservatório  $1.000,60 \text{ m} < \text{N.A} \leq 1.000,75 \text{ m}$  (Período Seco).
- N.A. do reservatório  $999,80 \text{ m} \leq \text{N.A} \leq 1.000,60 \text{ m}$  (Período Úmido).

iii. Emergência

Definida como Região C, o nível de Emergência representa a última situação operativa contemplada pelo reservatório Paranoá. Esta pode ocorrer com o reservatório operando tanto no período seco (maio a novembro) quanto úmido (dezembro a abril). Suas restrições operacionais são:

**EMERGÊNCIA**

- N.A. do reservatório  $1.000,60 \text{ m} < \text{N.A} \leq 1.000,75 \text{ m}$  (Período Úmido).
- N.A. do reservatório  $1.000,75 < \text{N.A} \leq 1.000,80 \text{ m}$  (Ambos os Períodos).

Qualquer uma das situações anteriormente descritas, caracterizam a situação do barramento como Emergência.

**a) Diagrama de Operação**

O Diagrama de Operação é a representação gráfica da escala de valores de referência para a delimitação das situações de operação hidráulica do reservatório. Nela estão representadas as 3 (três) situações possíveis, definidas dentro das características locais e em função do nível do reservatório, da vazão afluente de referência e da curva de descarga total do vertedouro (Figura 4).

A fim de facilitar a leitura e a interpretação do Diagrama de Operação, as 3 (três) situações operativas são representadas em cores, assim padronizadas:

 SITUAÇÃO NORMAL – região verde

 SITUAÇÃO DE ALERTA – região amarela



 SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA – região vermelha

Reservatório do Lago Paranoá			
Nível Altimétrico (m)	Período do ano definido pela ANEEL		Limites
	Seco (maio a novembro)	Úmido (dezembro a abril)	
999,80	<b>REGIÃO A NORMAL</b>	<b>REGIÃO B ALERTA</b>	Minimo Operativo
999,85			
999,90			
999,95			
1.000,00			
1.000,05			
1.000,10			
1.000,15			
1.000,20			
1.000,25			
1.000,30			
1.000,35			
1.000,40			
1.000,45			
1.000,50			
1.000,55	<b>REGIÃO B ALERTA</b>	<b>REGIÃO C EMERGÊNCIA</b>	Máximo Operativo
1.000,60			
1.000,65			
1.000,70	<b>REGIÃO C - EMERGÊNCIA</b>	<b>REGIÃO C - EMERGÊNCIA</b>	
1.000,75			
1.000,80			Coroamento

Figura 4. Diagrama de Operação do reservatório Paranoá  
 Fonte: CEB Geração S.A.<sup>4</sup>

## 2 ANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM

A análise computacional da ruptura hipotética de barragem é um procedimento necessário em estudos de segurança de barragens. A delimitação da mancha de inundação passa a ser um elemento importante na quantificação das áreas possivelmente atingidas ao longo do vale a jusante.

<sup>4</sup> Instrução Normativa para Controle de Vazões no Lago Paranoá. Revisão 2. 07/10/2014. CEB Geração S.A. 11p. Disponibilizado pela CEB Geração S.A, entre os dias 17JAN2017 e 19JAN2017, via correio eletrônico.



O presente estudo aplicou um modelo numérico unidirecional e bidimensional para representar a propagação da onda de cheia proveniente da ruptura hipotética da Barragem Paranoá, localizada no rio Paranoá.

O emprego de um modelo numérico hidrodinâmico unidirecional é adequado para representar os processos de escoamento, sendo numericamente mais preciso e eficiente com as simulações, conforme discussões apresentadas por USACE (2014) sobre estudos de ruptura de barragens.

HEC (2010) e USACE (2014) colocam que o módulo de formação de brecha de ruptura do modelo HEC-RAS permite modos de ruptura por galgamento, piping ou colapso instantâneo. Tendo em vista que a Barragem Paranoá é construída em enrocamento e possui vertedouro de concreto, os processos de ruptura hipotética da barragem podem ser deflagrados por galgamento ou formação de piping.

Considerando a ruptura por formação de erosão hídrica interna na barragem de enrocamento, a fuga d'água pelo macroporo formado pelo escoamento preferencial, erode o interior do corpo da barragem, transportando o material presente em seu núcleo no sentido de jusante. Este processo gera uma progressão do tamanho da abertura formada pelo piping, aumentando a vazão e o transporte de material do interior da barragem. Inicialmente, tal processo pode ser representado numericamente por um orifício pressurizado.

Com o aumento da erosão em seu interior, evoluindo no talude jusante e progredindo em direção ao talude montante, num determinado momento, a massa remanescente do corpo da barragem na parte superior do piping colapsará, mudando o escoamento pressurizado para escoamento livre. A partir deste momento, a brecha passa a evoluir lateralmente ganhando largura, em especial pelo golpe súbito de obstrução parcial do fluxo devido à queda de material.

Por sua vez, Schaefer (1992) coloca que a representação numérica de um rompimento hipotético de uma barragem de concreto ou elementos mecânicos da barragem, tal como comportas, constituem um procedimento de baixa complexidade. Neste caso, a ruptura hipotética de uma barragem de concreto ou de um elemento rígido é analisado de forma instantânea.

A análise de formação das brechas foi realizada com a aplicação de um método probabilístico de amostragem de cenários de possíveis acidentes e suas consequências. Sendo assim, as cartas de inundação apresentam manchas de inundação com associação do risco à cota de inundação induzida pela ruptura hipotética da Barragem Paranoá.

## 2.1 DADOS UTILIZADOS

O presente estudo de ruptura de barragens empregou diferentes fontes de dados no desenvolvimento do modelo hidráulico, para representação da onda de cheia induzida pela ruptura hipotética da Barragem Paranoá.



O Quadro 6 resume as fontes dos dados e os tipos de dados empregados no presente estudo.

**Quadro 6. Resumo de dados empregados no estudo de ruptura hipotética da Barragem.**

<b>Tipo de base dados</b>	<b>Variável</b>
<b>Hidrológico</b>	Cheias de projeto, de períodos de retorno de 100 anos e 1.000 anos, da Barragem Paranoá.
<b>Curva cota x volume do reservatório</b>	Curva cota x volume do reservatório da Barragem Paranoá.
<b>Dispositivos de descarga</b>	Diagramas de operação do vertedouro da Barragem Paranoá.
<b>Projeto da Barragem Paranoá</b>	Dimensão do aterro de terra e enrocamento, bem como número e dimensão dos vãos dos vertedores e comportas.
<b>Topobatimetria</b>	Modelo Digital de Elevação 1:10.000 e SRTM 30 (NASA). Levantamentos topobatimétricos dos rios Paranoá e São Bartolomeu.
<b>Base cadastral georreferenciada</b>	Ortomosaico.

## 2.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

### 2.2.1 Amostragem das brechas

O método probabilístico de amostragem das brechas foi desenvolvido com a ferramenta MCBreach, a qual gera amostragens de conjuntos de parâmetros de formação de brecha de ruptura. Os conjuntos são formados pelos parâmetros de entrada para o modelo de brecha do HEC-RAS. O MCBreach roda somente acoplado com o modelo HEC-RAS, para a versão 4.1.

A aplicação do método probabilístico para o desenvolvimento do estudo de formação da brecha de ruptura hipotética da barragem é um procedimento solicitado e indicado por FERC, sendo classificado como um tipo de estudo avançado de ruptura de barragens, a frente do que atualmente emprega-se num estudo padrão.

### 2.2.2 Hidráulico

A análise desenvolvida no presente trabalho empregou os softwares HEC-RAS, versão 4.1, e HEC-RAS, versão 5.0.3. O HEC-RAS (2010) é um modelo numérico hidrodinâmico com solução unidirecional contemplando o cálculo dos perfis de superfície d'água em escoamento permanente e não permanente para canais com superfície livre.



Este é um modelo difundido mundialmente com diversas aplicações em diferentes condições, sendo recomendado pela FEMA (Federal Emergency Management Agency) dos EUA. Sua formulação é baseada nas equações da conservação do momento de St. Venant.

O modelo HEC-RAS permite simular a formação da brecha de ruptura, a qual é parametrizada geometricamente e temporalmente. O processo de ruptura é acoplado ao modelo hidrodinâmico, desta forma, ao longo da formação da brecha, o modelo HEC-RAS já inicia a propagação da onda ao longo do vale a jusante em regime não permanente e não uniforme. A simulação passa a ser dinâmica empregando as equações de momento de St. Venant, segundo o estado da arte na engenharia hidráulica.

### 2.3 FLUXOGRAMA

O presente estudo contemplou uma extensão de rio de, aproximadamente, 70 km, contados a partir do eixo da Barragem Paranoá até a divisa entre o Estado de Goiás e o Distrito Federal.

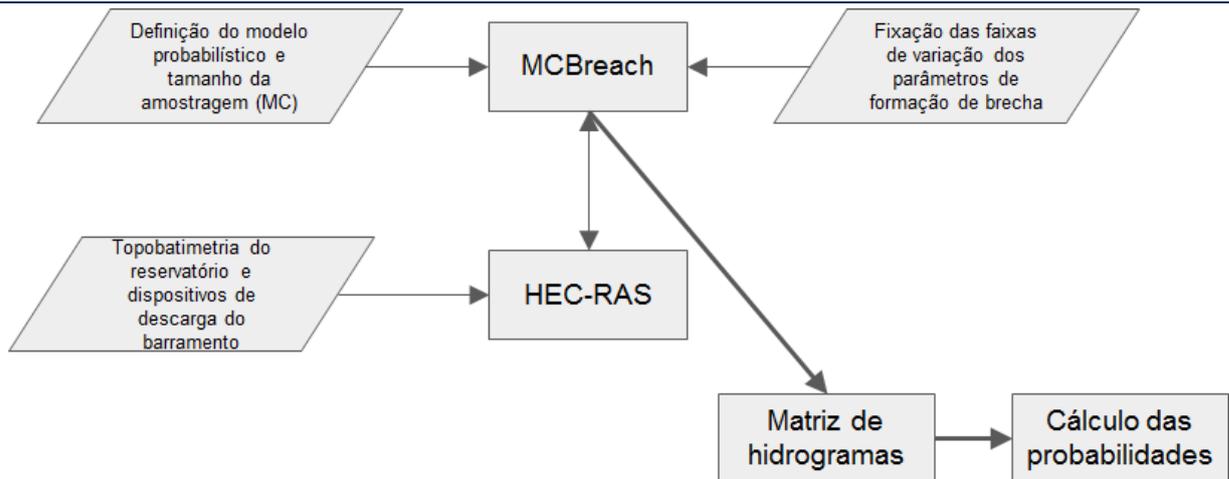
Duas frentes de trabalho foram aplicadas, o desenvolvimento do modelo hidráulico truncado e, então, o desenvolvimento do modelo hidráulico completo. O modelo HEC-RAS 4.1 e a ferramenta computacional MCBreach foram aplicados no modelo truncado para a simulação das brechas de ruptura e cálculo dos hidrogramas de saída.

O modelo HEC-RAS 5.0.3 foi aplicado para a propagação dos hidrogramas de saída referentes às probabilidades de excedência de 1%, 50% e 99% ao longo do vale a jusante. O detalhamento do estudo hidráulico será descrito no documento 312-PCHPA-CD-PAE-001.

Os parâmetros de formação da brecha amostrados foram: Cota da geratriz inferior da brecha; Largura média da brecha ( $B_m$ ); Coeficiente de vazão da brecha ( $C_d$ ); Coeficiente de descarga do piping ( $C_p$ ); Tempo de formação ( $T_i$ ); e, Cota da superfície d'água no momento da ruptura; Cota de início do piping; e, Declividade lateral da abertura do prisma.

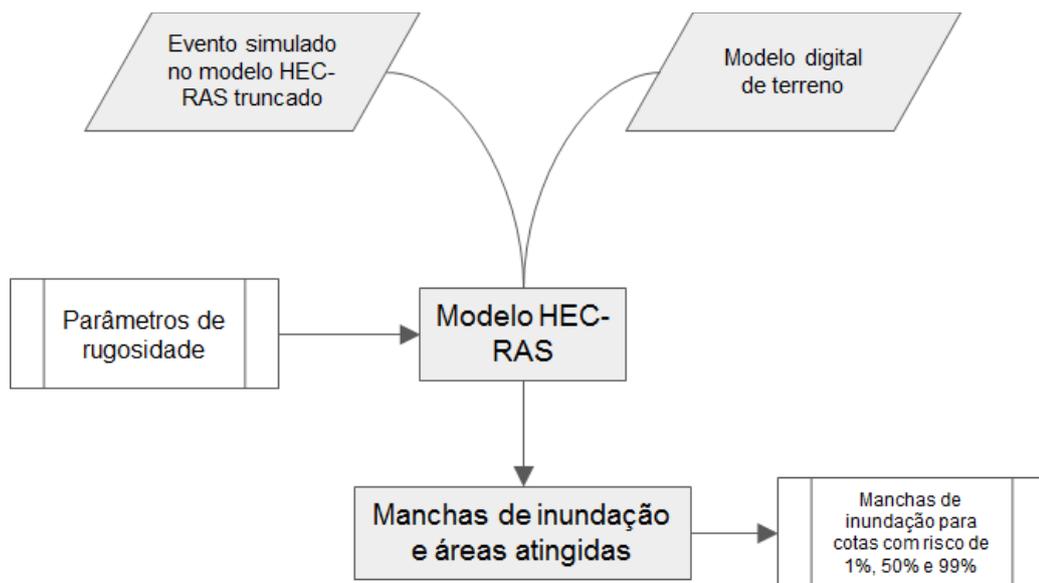
Na Figura 5 está ilustrado um fluxo de atividades para o desenvolvimento do método probabilístico, com a ferramenta MCBreach e o modelo HEC-RAS truncado.





**Figura 5. Representação esquemática do modelo HEC-RAS truncado e MCBreach.**

Os hidrogramas calculados no fluxo de atividades anterior alimentam o fluxo de atividades da Figura 6 para gerar as cartas de inundação e quantificação de potenciais atingidos.



**Figura 6. Representação esquemática do modelo HEC-RAS completo.**

## 2.4 FORMAÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA

A formação da brecha de ruptura da Barragem Paranoá foi desenvolvida nos softwares MCBreach e HEC-RAS. Parâmetros geométricos, hidráulicos e temporais foram definidos para a realização da simulação do rompimento hipotético da barragem.

Os seguintes parâmetros de formação da brecha de ruptura parametrizam o HEC-RAS:

- Largura da geratriz inferior da brecha;
- Largura média da brecha;
- Declividades laterais do prisma de abertura da brecha (H:V);
- Coeficiente de vazão da brecha;



- Coeficiente de descarga do piping;
- Cota de formação do piping
- Tempo de formação da brecha;
- Modo de ruptura; e,
- Cota operacional do reservatório no instante da ruptura.

## 2.5 POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA

Os seguintes cenários prováveis de ruptura da Barragem Paranoá foram definidos, segundo os modos de ruptura elencados na APMR, como:

- **Modo RPB1** – Rompimento por galgamento da barragem, orientado por combinações probabilísticas, vertendo a vazão Milenar;
- **Modo RPB2** – Rompimento por erosão interna (piping), orientado por combinações probabilísticas, vertendo a vazão  $Q_{50\%}$ ;
- **Modo RDC3** – Rompimento da comporta por problemas de acionamento e abertura ou colapso do munhão em Condição de Carregamento Normal (CCN), operando em condição normal;

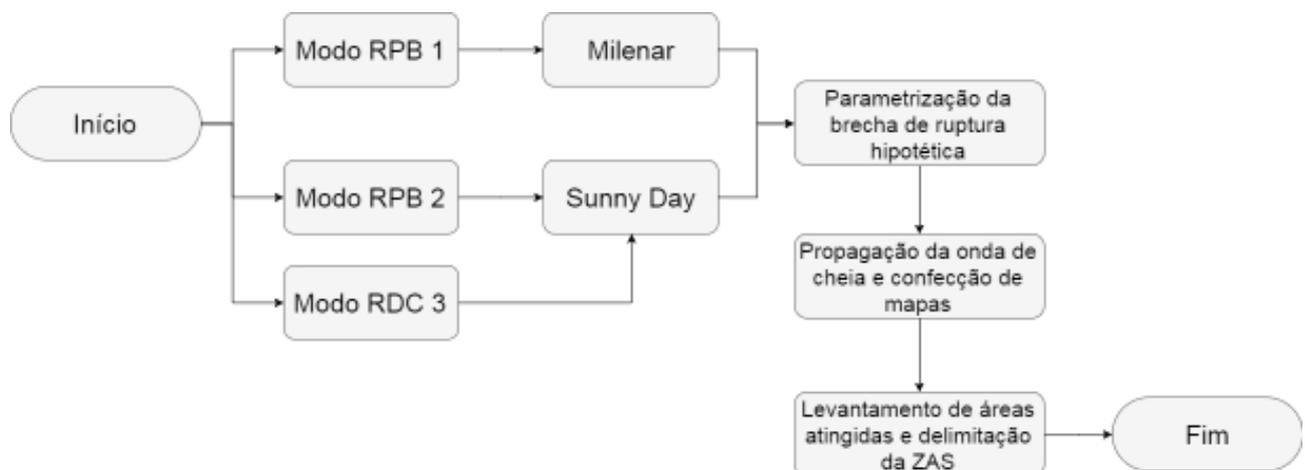


Figura 7. Cenários de ruptura da Barragem Paranoá.

Os 3 (três) modos de ruptura hipotética identificados poderão se concretizar caso o Nível 3 de Segurança (Emergência) seja atingido. Os níveis de segurança são balizados, devendo o coordenador do PAE estar atento às Fichas de Ação expostas no Apêndice 2. O Nível de Segurança 3 (três) é identificado em cor vermelha nos quadros de situações de emergência.

Cada modo de ruptura foi embasado numa simulação pelo Método de Monte Carlo, com amostragem de 10.000 elementos. As manchas de inundação selecionadas para a confecção das cartas de inundação são de probabilidades iguais a 1%, 50% e 99%. Sendo assim, para os modos de ruptura RPB1 e RPB2, 3 (três) manchas de inundação compuseram o mapa da carta, juntamente com as manchas para os eventos de períodos de retorno de 100 anos e 1.000 anos.



## 2.6 PROPAGAÇÃO HIDRÁULICO DA ONDA DE RUPTURA

A análise hidráulica da propagação da onda induzida pela ruptura hipotética da Barragem Paranoá foi desenvolvida com a simulação de 3 (três) cenários, variando o provável modo de ruptura segundo duas condições hidrológicas distintas (Figura 7), vazão de projeto Milenar (TR 1.000 anos) e Sunny Day. A condição Sunny Day representa o rompimento numa situação normal de operação, sem ocorrência de evento hidrológico com reservatório operado a nível normal.

Cada modo de ruptura foi amostrado 10.000 vezes, a fim de compor uma amostragem de combinações de abertura de brecha para o cálculo de probabilidades de excedência. Para o presente ciclo de atividades, as probabilidades de 1%, 50% e 99% foram selecionadas para o mapeamento de áreas de inundação. As cartas de inundação apresentam a espacialização destas manchas, destacando as benfeitorias atingidas.

Tendo em vista as características locais do trecho a jusante e do aproveitamento em estudo, estima-se que a onda induzida pela ruptura da Barragem Paranoá apresente grandes magnitudes. O padrão destrutivo da onda pode ser analisado mediante seu perigo hidrodinâmico. O Quadro 7 apresenta as prováveis consequências esperadas da onda de ruptura baseada na variável perigo hidrodinâmico ou inundação dinâmica.

**Quadro 7. Consequências em função do perigo hidrodinâmico.**

<b>Parâmetro HxV [m<sup>2</sup>/s]</b>	<b>Consequências esperadas</b>
<0,50	Crianças e deficientes são arrastados
0,50 – 1,00	Adultos são arrastados
1,00 – 3,00	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas
3,00 – 7,00	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
>7,00	Colapso de certos edifícios

Fonte: Adaptado de Synaven et al. (2000).

Ainda existem critérios de graduação do perigo hidrodinâmico em relação aos seres humanos. Estes encontram-se descritos no Quadro 8. As graduações dos níveis de perigo hidrodinâmico podem ser empregadas nas sinalizações para demarcação das áreas atingidas, dentro e fora da ZAS.

**Quadro 8. Graduação do perigo hidrodinâmico para seres humanos.**

<b>Nível</b>	<b>Classe</b>	<b>Inundação dinâmica (HxV) [m<sup>2</sup>/s]</b>
Reduzido	Verde	$HxV < 0,50$
Médio	Amarela	$0,50 < HxV < 0,75$
Importante	Laranja	$0,75 < HxV < 1,00$
Muito importante	Vermelha	$HxV > 1,00$



Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

O perigo hidrodinâmico ou inundação dinâmica é uma variável calculada hidraulicamente pelas características da inundação, com a qual é possível classificar o quão importante é o nível de dano potencial da inundação. Desta forma, valores superiores à 1 m<sup>2</sup>/s, indicam situações de escoamento onde objetos podem ser arrastados, edifícios podem ser danificados e até colapsados.

## 2.7 CARTAS DE INUNDAÇÃO

Mediante os resultados obtidos com os cenários de ruptura, fez-se a identificação da Zona de Autossalvamento (ZAS), bem como a fotointerpretação do trecho de, aproximadamente, 70 km a jusante do barramento. Os mapas de inundação, por estarem georreferenciados e plotados em pranchas padronizadas, segundo ABNT, são chamados de cartas de inundação.

Todas as informações estratégicas, para fins de subsidiar ações em momentos de crise, estão sumarizadas nas pranchas das cartas de inundação. São apresentados os resultados hidráulicos de:

- Vazão de pico [m<sup>3</sup>/s];
- Cota da superfície d'água [m-IBGE];
- Tempo de pico/chegada [h];
- Tempo de submergência [h]; e,
- Perigo hidrodinâmico [m<sup>2</sup>/s].

O perigo hidrodinâmico é representado, nas cartas de inundação, como curvas equipotenciais no intervalo de 0,50 até 7,00 m<sup>2</sup>/s. Isso dá uma percepção adequado da exposição ao perigo condicionado ao vale a jusante da Barragem Paranoá.

### 2.7.1 Zona de Autossalvamento (ZAS)

De acordo com recomendações de FEMA (2013) e FERC (2014), bem como de documentação da ANA (2015), a Zona de Autossalvamento (ZAS) é definida como a região, imediatamente a jusante da barragem, em que se considera não haver tempo suficiente para uma adequada intervenção dos serviços e agentes de proteção civil em caso de acidente. Seu tamanho é definido pela maior das seguintes distâncias: 10 km ou a extensão que corresponda ao tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

Tendo em vista que a distância percorrida pela onda no intervalo de 30 min é inferior à 10 km, definiu-se a Zona de Autossalvamento (ZAS) da Barragem Paranoá como a distância de 10 km a jusante de seu barramento.

O alerta antecipado para as pessoas na Zona de Autossalvamento (ZAS) é de responsabilidade da CEB Geração S.A, a qual deverá fornecer subsídios para orientar a evacuação



dos cidadãos potencialmente atingidos. No entanto, os procedimentos de evacuação deverão ser desenvolvidos pelos órgãos de Defesa Civil através de projeto específico.

A tipificação da ZAS encontra-se no Apêndice 5.

## 2.7.2 Área atingida

O levantamento das estruturas e pontos vulneráveis foi realizado por fotointerpretação, sendo identificadas benfeitorias e estruturas diversas ao longo da Zona de Autossalvamento (ZAS) e de todo vale a jusante, atingidas pela onda induzida pela ruptura hipotética da Barragem Paranoá.

**Tabela 1. Número aproximado de atingidos (economias).**

Cenário de Ruptura	Número Aprox. de atingidos (Economias)			
	Dentro da ZAS	Fora da ZAS	Total	
Modo RPB1	1%	105	251	356
	50%	102	251	353
	99%	101	251	352
Modo RPB2	1%	86	220	306
	50%	90	220	310
	99%	90	220	310
Modo RDC3	Determinístico	28	71	99

Sendo assim, observa-se que o número de atingidos é relativamente alto, variando entre 356 (Modo RPB1) a 99 (Modo RDC3) economias afetadas.

Considerando uma média de 3,34 habitantes por economia<sup>5</sup>, dado apresentado pelo IBGE no Censo Demográfico 2010, a estimativa da população afetada, por cenário de ruptura, encontra-se abaixo (Tabela 2).

**Tabela 2. Número aproximado de atingidos (habitantes)**

Cenário de Ruptura	Número Aprox. de atingidos (Habitantes)			
	Dentro da ZAS	Fora da ZAS	Total	
Modo RPB1	1%	351	839	1190
	50%	341	839	1180
	99%	338	839	1177
Modo RPB2	1%	288	735	1023
	50%	301	735	1036

<sup>5</sup>IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico de 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>> Acesso em 04ABR2017.



99%	301	735	1036
Modo RDC3    Determinístico	94	238	332

Cabe salientar que considerou-se como benfeitoria atingida, todas as residências localizadas dentro da mancha de inundação, bem como aquelas parcialmente atingidas por ela. Desta forma, o número exato de imóveis e famílias afetadas, somente será obtido após validação em campo com cadastro de atingidos.

Sendo assim, os órgãos competentes da Defesa Civil<sup>6</sup> deverão realizar a verificação in loco e o cadastramento das benfeitorias levantadas por fotointerpretação, conforme abaixo:

- Coordenadas planialtimétricas das benfeitorias e/ou infraestruturas;
- Número de habitantes com características de idade, capacidade de locomoção e instrução escolar;
- Existência de pessoas com necessidades especiais, gênero, faixa etária e nível de instrução;
- Número de telefone fixo e/ou celular;
- Meios de locomoção dos moradores (carro, trator, cavalo, bicicleta, pedestre, etc);

Estas informações irão subsidiar a confecção do Plano de Ação de Emergência Externo, cuja responsabilidade compete à Defesa Civil.

## 2.8 RESTRIÇÕES LOCAIS

Algumas restrições de mobilidade em momentos de crise podem ser descritas. Dentre elas, o acesso às localidades da área de inundação, previsto mediante rodovias e estradas. As restrições de acesso identificadas encontram-se elencadas no Quadro 9. A impossibilidade de uso dessas estradas deverá ser observada, bem como a interdição das pontes pertencentes à elas.

**Quadro 9. Vias potencialmente atingidas.**

Vias potencialmente atingidas	RPB1	RPB2	RDC3
	Usina Paranoá CEB	Usina Paranoá CEB	Usina Paranoá CEB
	Núcleo Rural Boqueirão	Núcleo Rural Boqueirão	Núcleo Rural Capão Comprido
	R. Sítio da Forquilha	R. Sítio da Forquilha	BR-251 ( Rod. Júlio Garcia)
	Trilha da Bundinha	Trilha da Bundinha	
	R. 17	R. 17	
	R. 18	R. 18	
	R. 19	R. 19	

	R. 13	R. 13	
	Núcleo Rural Capão Comprido	Núcleo Rural Capão Comprido	
	BR-251 ( Rod. Júlio Garcia)	BR-251 ( Rod. Júlio Garcia)	

## 2.9 ESTRATÉGIA, RECURSOS E MEIO DE DIVULGAÇÃO E ALERTA

O aviso, bem como divulgação, de situações de emergência deve ser realizado pelo uso de sinais visuais, sonoros e apoio logístico. A CEB Geração S.A. é responsável pelo suporte à população residente na Zona de Autossalvamento (ZAS), cooperando com a divulgação de informações, para as áreas externas à ZAS, sob responsabilidade de órgãos públicos e entidades civis.

O detalhamento dos meios e procedimentos de comunicação estão no documento da Seção III do PAE (312-PCHPA-RT-PAE-003). As responsabilidades dos agentes, desde o proprietário da barragem até o Entes Federados, estão descritas no documento da Seção IV do PAE (312-PCHPA-RT-PAE-004).



### 3 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Modelo de Plano de Ação de Emergência. Audiência Pública para coletar contribuições e subsídios para a Regulamentação do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 que trata da Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. (15 de março de 2013). Brasília: ANA.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual do Empreendedor – Volume IV. Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência – PAE. Brasília: ANA, 2015.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures - FEMA 946p. FEMA, USA, 2013.
- FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. Dam Safety Performance Monitoring Program. FERC, USA, 2005.
- FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. Dam Breach Analysis – DRAFT. FERC, USA, 2014.
- SCHAEFER, M.G. Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Breach Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification, Washington State Department of Ecology Publication Nº. 92-55E, USA, July 1992.
- SYNAVEN, K. The pilot Project Kyrkojarvi dam and reservoir, Seinajoki, Finland. In: INTERNACIONAL SEMINAR AND WORKSHOP RISK ASSESSMENT, DAM-BREAK FLOOD ANALYSIS AND EMERGENCY ACTION PLANNING. Seinajoki: Finnish Environment Institute, 2000.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. Training Documents – Using HEC-RAS for Dam Break Studies. TD-39, USCE, August 2014.
- USACE-HEC. River Analysis System, HEC-RAS v4.1 – Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 351p, USA, 2010.
- WISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – metodologias de apoio à gestão dos riscos. 2006. 482f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.
- VON THUN J.L. & GILLETE, D.R. Guidance on breach parameters. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, 17p. Denver, CO, USA, 1990.



## 4 APÊNDICES

O estudo de ruptura hipotética da Barragem Paranoá encontra-se no **Caderno de Apêndices** desta unidade, código 312-PCHPA-CD-PAE-001 (Apêndice 1).

### Apêndice 1. Documento do estudo hidráulico da ruptura hipotética da barragem.

Título	Código
Memória de Cálculo do Estudo de Ruptura Hipotética	312-PCHPA-CD-PAE-001

As Fichas de Ação encontram-se no **Caderno de Apêndices** desta unidade, código 312-PCHPA-RT-PAE-002. A Listagem destes documentos pode ser visualizada no Apêndice 2

### Apêndice 2. Fichas de Ação.

LISTAGEM DAS FICHAS DE AÇÃO – BARRAGEM PARANOÁ	
Nível	Código
0	312-PCHPA-FCH-NSH-001
0	312-PCHPA-FCH-NSH-002
0	312-PCHPA-FCH-NSH-003
0	312-PCHPA-FCH-NSH-004
0	312-PCHPA-FCH-NSH-005
0	312-PCHPA-FCH-NSH-006
1	312-PCHPA-FCH-NSH-007
1	312-PCHPA-FCH-NSH-008
1	312-PCHPA-FCH-NSH-009
1	312-PCHPA-FCH-NSH-010
1	312-PCHPA-FCH-NSH-011
1	312-PCHPA-FCH-NSH-012
2	312-PCHPA-FCH-NSH-013
2	312-PCHPA-FCH-NSH-014
2	312-PCHPA-FCH-NSH-015
2	312-PCHPA-FCH-NSH-016
2	312-PCHPA-FCH-NSH-017
2	312-PCHPA-FCH-NSH-018

LISTAGEM DAS FICHAS DE AÇÃO – BARRAGEM PARANOÁ	
Nível	Código
3	312-PCHPA-FCH-NSH-019
3	312-PCHPA-FCH-NSH-020

As Cartas de Inundação, referentes à Barragem Paranoá, encontram-se no **Caderno de Apêndices** desta unidade, código 312-PCHPA-CD-PAE-003. A Listagem e codificação destes documentos está resumida no Apêndice 3.

**Apêndice 3. Cartas de Inundação.**

MODO	Cartas de Inundação (1:10.000)	Cartas de Inundação (1:5.000)
RPB1	312-PCHPA-DES-APMR-01	312-PCHPA-DES-DZ-01
RPB2	312-PCHPA-DES-APMR-02	312-PCHPA-DES-DZ-02
RDC3	312-PCHPA-DES-APMR-03	312-PCHPA-DES-DZ-03

MODO	Cartas de Perigo hidrodinâmico (1:10.000)
RPB1	312-PCHPA-DES-PER-01
RPB2	312-PCHPA-DES-PER-02
RDC3	312-PCHPA-DES-PER-03

As coordenadas das benfeitorias atingidas, referentes aos modos de ruptura da Barragem Paranoá, encontram-se no **Caderno de Apêndices** desta unidade (Apêndice 4).

**Apêndice 4. Coordenadas das benfeitorias atingidas.**

Título	Código
Caderno de Coordenadas	312-PCHPA-CD-PAE-004

A tipificação da Zona de Autossalvamento (ZAS), encontram-se no **Caderno de Apêndices** desta unidade (Apêndice 5).

**Apêndice 5. Tipificação da ZAS.**

Título	Código
Tipificação da Zona de Autossalvamento (ZAS)	312-PCHPA-CD-PAE-005



## 5 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se à CEB Geração S.A a revisão e adequação dos instrumentos de auscultação pertencentes à usina, de forma a serem estabelecidas as faixas de operação conforme os níveis de segurança do empreendimento, bem como revistos os limites de projeto para cada instrumento de auscultação.

O diagrama de operação do reservatório da PCH Paranoá deve ser revisto, segundo resultados apresentados na revisão hidrológica e hidráulica do reservatório e dispositivos de descarga da Barragem Paranoá, contidos no documento (312-PCHPA-RT-PSB-005) do Volume V do PSB.





## PCH Paranoá

### Plano de Segurança de Barragem

### Volume IV – Plano de Ação de Emergência

## APÊNDICE 1: Memória de Cálculo do Estudo de Ruptura Hipotética

**Cliente**



**Produção**



### REVISÃO

Revisão	Descrição	Execução	Verificação	Aprovação	Data
A	Emissão	PGL	JDL	HLR	26/04/2017
0	Atendimento	JDL	RBX	PGL	07/06/2017

## APRESENTAÇÃO

Este documento consiste no **Apêndice 1** da Seção II do Plano de Ação de Emergência (PAE) da Barragem Paranoá (Volume IV do PSB), tendo como intuito apresentar a metodologia empregada no desenvolvimento do seu estudo de ruptura hipotética, bem como resultados obtidos para subsidiar o documento da Seção II do PAE (312-PCHPA-RT-PAE-002).

Desta forma, o presente documento expõe a memória de cálculo do estudo de formação da brecha de ruptura hipotética, bem como da propagação hidráulica das ondas de cheia induzidas por estas rupturas. Cabe salientar que, por se tratar de um apêndice, algumas informações descritas possam constar de forma redundante no documento da Seção II do PAE (312-PCHPA-RT-PAE-002).



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>MODELO DE BRECHA.....</b>	<b>9</b>
2.1	PARÂMETROS DE FORMAÇÃO DA BRECHA.....	13
2.1.1	Bureau of reclamation (1988) .....	16
2.1.2	Froehlich (1995) .....	17
2.1.3	Froehlich (2008) .....	17
2.1.4	Von Thun & Gillette (1990) .....	18
2.2	PARÂMETROS DE RUPTURA DA BARRAGEM PARANOÁ .....	19
<b>3</b>	<b>MODELO HIDRÁULICO.....</b>	<b>21</b>
3.1	PROCESSO DE RUPTURA – HEC-RAS .....	23
<b>4</b>	<b>DADOS DE ENTRADA .....</b>	<b>26</b>
4.1	FLUXOGRAMA .....	28
4.2	HIPÓTESE DE RUPTURA E PROVÁVEIS MODOS DE RUPTURA .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
5.1	AMOSTRAGEM ESTATÍSTICA.....	35
5.2	PROPAGAÇÃO DA ONDA.....	40
5.3	REGIÃO DE AMORTECIMENTO E EFEITO SINÉRGICO .....	49
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>55</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interface da ferramenta computacional MCBreach. Desenvolvedor: WEST Consultants..	10
Figura 2. Ilustração de modelo probabilístico Uniforme. ....	11
Figura 3. Ilustração de modelo probabilístico Normal. ....	11
Figura 4. Conceito de aplicação do método probabilístico. ....	12
Figura 5. Ilustração do método probabilístico. ....	13
Figura 6. Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura. ....	15
Figura 7. Interface LPI do HEC-RAS. ....	23
Figura 8. Exemplo de modelo HEC-RAS truncado. ....	24
Figura 9. Exemplo de modelo HEC-RAS completo. ....	25
Figura 10. Perfil transversal dos rios Paranoá e São Bartolomeu. ....	27
Figura 11. Seção transversal típica. ....	28
Figura 12. Modelo HEC-RAS conceitual truncado. ....	29
Figura 13. Modelo HEC-RAS conceitual completo. ....	30
Figura 14. Representação esquemática de entrada e saída de dados dos modelos HEC-RAS truncado e MCBreach. ....	31
Figura 15. Representação esquemática de entrada e saída de dados no modelo HEC-RAS completo. ....	31
Figura 16. Rio São Bartolomeu. ....	32
Figura 17. Conformação do barramento da PCH Paranoá. ....	33
Figura 18. Cenários de ruptura da Barragem Paranoá. ....	34
Figura 19. Vazões de pico: RPB 1 (Milenar). ....	37
Figura 20. Vazões de pico: RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	37
Figura 21. Hidrogramas selecionados para o modo RPB 1 (Milenar). ....	38
Figura 22. Hidrogramas selecionados para o modo RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	39
Figura 23. Hidrograma selecionado para o modo RDC 3 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	39
Figura 24. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar). ....	41
Figura 25. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar). ....	41
Figura 26. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar). ....	42
Figura 27. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar). ....	42
Figura 28. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar). ....	43
Figura 29. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar). ....	43
Figura 30. Propagação de hidrogramas. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	44
Figura 31. Profundidade da onda propagada. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	45
Figura 32. Propagação de hidrogramas. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	45
Figura 33. Profundidade da onda propagada. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	46
Figura 34. Propagação de hidrogramas. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	46



Figura 35. Profundidade da onda propagada. RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ).....	47
Figura 36. Propagação de hidrogramas. RDC 3 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	48
Figura 37. Profundidade da onda propagada. RDC 3 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	48
Figura 38. Perfil hidráulico do modo RPB 1 (Milenar). ....	50
Figura 39. Perfil hidráulico do modo RPB 2 ( <i>Sunny Day</i> ). ....	51
Figura 40. Perfil hidráulico do modo RDC 3 – Vertedouro e sistema de comportas.....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes de descarga. Adaptado de USACE (2014). .....	14
Tabela 2. Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha. Adaptado de USACE (2014). .....	16
Tabela 3. Coeficientes $C_b$ . .....	19
Tabela 4. Vazões de projeto. ....	26
Tabela 5. Dados referentes às curvas Cota x Volume. ....	26
Tabela 6. Parametrização das brechas para cada provável modo de ruptura. ....	35
Tabela 7. Limites de amostragem do Método Monte Carlo por parâmetro de formação da brecha. ....	36

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1. Resumo de dados empregados no estudo de ruptura hipotética da Barragem Paranoá. ....	26
--	----



## 1 ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA

O primeiro passo no desenvolvimento do estudo hidráulico de ruptura hipotética de uma barragem é a realização da Análise de Potenciais Modos de Ruptura. A Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR), do inglês *Potential Failure Mode Analysis* (PFMA), segundo FERC (2005), é um procedimento informal executado para levantamento das prováveis formas de ruptura de uma barragem. Tal procedimento foi realizado em escritório pela consultora Fractal Engenharia, usando registros documentais e fotográficos do empreendimento da Barragem Paranoá.

O desenvolvimento do estudo de APMR é fundamentado em levantamento de informações diversas existentes a respeito da barragem. Tais dados podem ser compostos por histórico de operação hidráulica do reservatório e do barramento, monitoramento geotécnico e estrutural da barragem, relatórios de inspeções regulares, plantas, croquis e memoriais de cálculo do projeto executivo, entre outros. A equipe técnica de especialistas em segurança de barragens deve se munir destas informações e iniciar as reuniões, do tipo “*brainstorm*”, para desenvolvimento dos prováveis modos de ruptura que a barragem poderá sofrer numa situação catastrófica.

A APMR é composta, basicamente, pelo levantamento de todas as informações disponíveis sobre a barragem, bem como àquelas obtidas mediante visita local para análise visual. Tal levantamento de informações consiste em buscar:

- Análises de engenharia (estabilidade e outros esforços);
- Banco de dados da auscultação;
- DATUM vertical do projeto;
- Estudos hidrológicos;
- Séries temporais de monitoramento pluviométricos e fluviométrico da área de drenagem da barragem, bem como do próprio barramento;
- Imagens aéreas atualizadas ao longo do vale à jusante da barragem;
- Histórico operacional ou séries temporais da operação do reservatório e dispositivos de descarga;
- Registros de atividade sísmica recente; e
- Caracterização demográfica ao longo do vale à jusante da barragem.

Outras informações, se justificadas como importantes, podem ser incorporadas na lista acima. Em relação à visita e vistoria das estruturas civis do barramento, os seguintes procedimentos são seguidos:

- Verificação visual direcionada para definição dos potenciais modos de ruptura;
- Verificação das condições estruturais e geológicas da barragem; e,



- Entrevista com proprietários/operadores, a fim de incorporar informações no processo de definição dos potenciais modos de ruptura.

Sendo assim, questões importantes foram avaliadas e discutidas. São elas:

- Como a barragem poderia romper?
- O que acontece se a barragem romper?
- Estão identificados os potenciais modos de ruptura e estão sendo apropriadamente monitorados por inspeções visuais e auscultação?
- Quais ações poderiam ser tomadas para reduzir áreas atingidas pelo rompimento da barragem ou mitigar as consequências desse evento catastrófico?

Ao longo do documento são apresentados os modelos numéricos que fundamentaram o estudo hidráulico da ruptura hipotética da Barragem Paranoá, bem como os dados e informações da APMR utilizados nas simulações dos cenários para delimitação das manchas de inundação e mapeamento das áreas atingidas.



## 2 MODELO DE BRECHA

Para garantir robustez ao estudo hidráulico, o presente trabalho utiliza a ferramenta computacional MCBreach, desenvolvida pela WEST Consultants. Esta técnica, envolvendo métodos estatísticos, visa aperfeiçoar os estudos de rompimento de barragens através de amostragens de parâmetros de formação da brecha, os quais estão associados a um modelo probabilístico de distribuição de frequências. Como a brecha é a principal fonte de incerteza de um estudo de ruptura de barragens, o uso de técnica estatística para amostragem de combinações de condições para a formação da brecha é uma forma de melhor entender o risco condicionado ao vale a jusante.

Com o desenvolvimento do estudo de formação de brecha por meio de uma metodologia estatística, obtém-se junto com as probabilidades de ocorrência dos cenários uma análise de sensibilidade dos parâmetros de formação da brecha de ruptura.

Desta forma, a técnica permite prever o risco de uma cota de inundação, gerada pela onda induzida do rompimento hipotético da barragem, atingir o vale a jusante. Lara et al. (2017) colocam que o método probabilístico possibilita o cálculo da probabilidade de uma determinada cota de inundação ocorrer ao longo da área atingida, segundo probabilidades de excedência de 1%, 5%, 10%, 50%, 90%, 95% e 99%.

A ferramenta computacional de amostragem de parâmetros de formação de brecha, MCBreach, é um controlador externo (*External Controller*) do modelo HEC-RAS e possui as seguintes características:

- Acoplamento com o modelo numérico hidrodinâmico e de formação da brecha de ruptura HEC-RAS 4.1, através de uma DLL (Dynamic Link Library) que funciona como um controlador externo;
- Amostragem de conjuntos de parâmetros de formação da brecha de ruptura da barragem realizado pelo Método de Monte Carlo;
- Emprego dos modelos probabilísticos Uniforme e Normal; e,
- Análise de probabilidade de ocorrência do cenário de rompimento orientado pela vazão de pico do hidrograma formado pela brecha, em função do conjunto de parâmetros amostrados.

Os trabalhos de Goodell (2012), Goodell & Froehlich (2012) e Lara (2016) servem como referência técnica do método probabilístico de formação de brecha de ruptura, com uso da ferramenta MCBreach, sendo o último trabalho a única referência atual em língua portuguesa.

Numericamente, o MCBreach gera amostragens de conjuntos de parâmetros geométricos e de formação da brecha de ruptura, os quais constituem os parâmetros de entrada para o modelo de ruptura de barragens e aterros do HEC-RAS. Com os parâmetros amostrados, o MCBreach aciona



o HEC-RAS para hidraulicamente simular a abertura da brecha, e então armazenar o hidrograma de saída. A Figura 1 ilustra a interface da ferramenta computacional MCBreach.

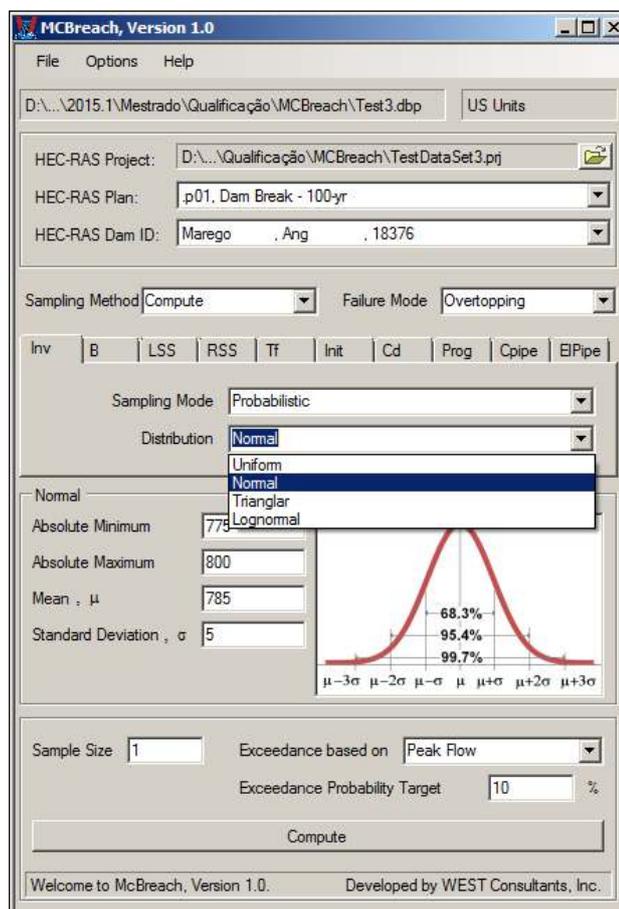
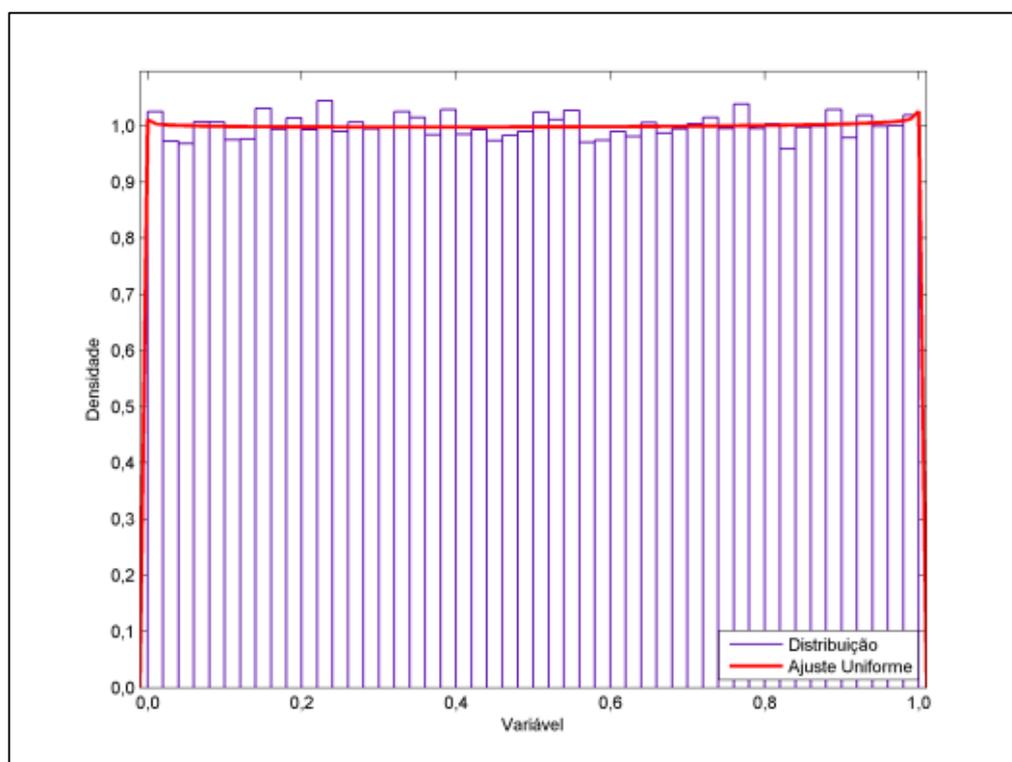


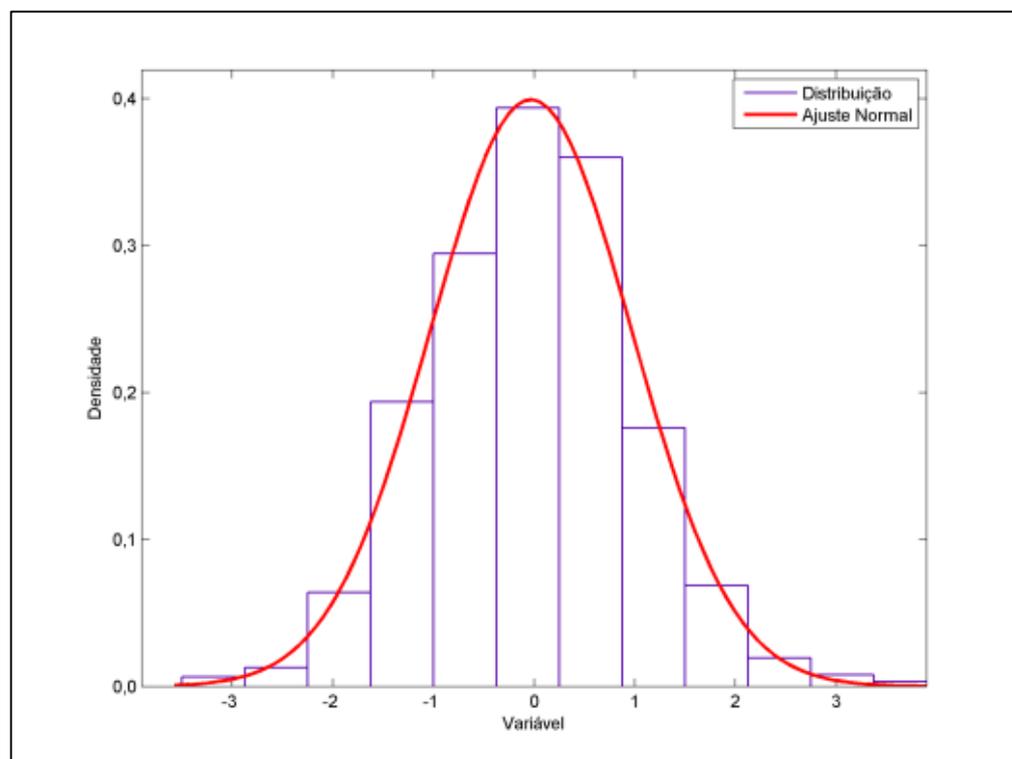
Figura 1. Interface da ferramenta computacional MCBreach. Desenvolvedor: WEST Consultants.

Conforme Goodell (2012) e Lara (2016), a intuição e a experiência do engenheiro definirão qual modelo probabilístico empregar na representação da função densidade de cada parâmetro de formação da brecha de ruptura. Por isso, faz-se necessário determinar as hipóteses de formação da brecha de ruptura, utilizando por base a Análise dos Potenciais Modos de Ruptura (APMR), para então, realizar as amostragens de parâmetros que caracterizarão as aberturas de brecha.

A Figura 2 e a Figura 3 ilustram, conceitualmente, os modelos probabilísticos Uniforme e Normal, respectivamente. Quando os parâmetros de formação da brecha são amostrados, o MCBreach orienta o processo de amostragem conforme o modelo probabilístico selecionado para o parâmetro de interesse, usando o Método de Monte Carlo.



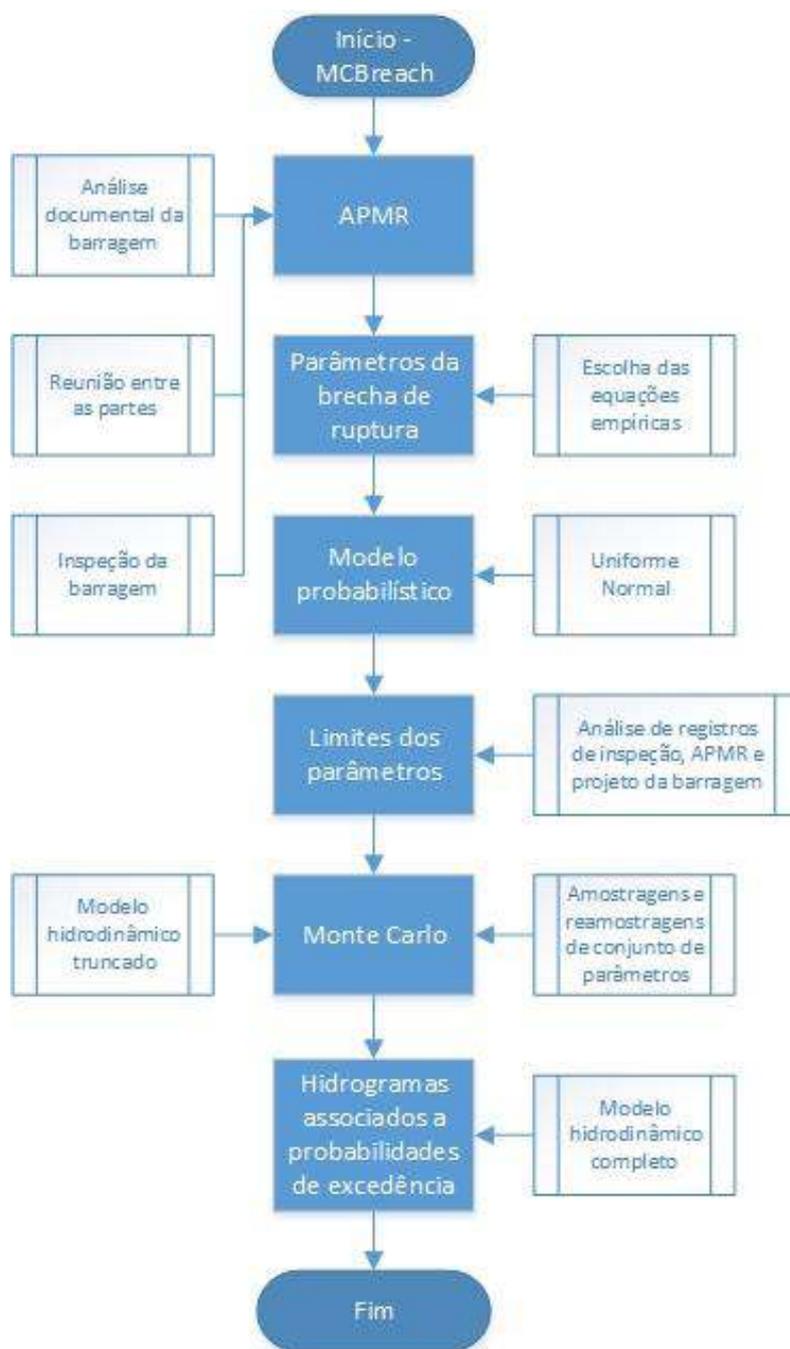
**Figura 2. Ilustração de modelo probabilístico Uniforme.**



**Figura 3. Ilustração de modelo probabilístico Normal.**

O Método de Monte Carlo parte do princípio que a incerteza da variável de interesse é amostrada randomicamente quando se atinge uma amostra suficientemente grande, pelo menos 10.000 elementos amostrados para compor a população.

A Figura 4 ilustra o fluxograma dos procedimentos de aplicação da ferramenta MCBreach, acoplada ao modelo hidráulico HEC-RAS 4.1, segundo apresentado por LARA (2016).

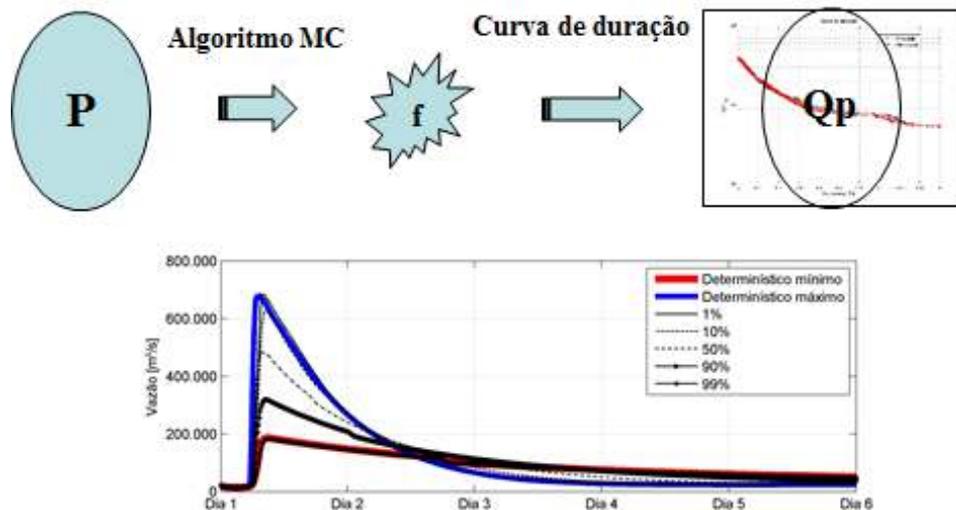


**Figura 4. Conceito de aplicação do método probabilístico.**  
 Fonte: Lara (2016).



Com a amostragem dos conjuntos de parâmetros, o MCBreach ativa o modelo HEC-RAS e calcula as brechas com os parâmetros amostrados. As vazões de pico, dos hidrogramas de saída, são armazenadas numa matriz para posterior cálculo das probabilidades de excedência, logo a cota de inundação gerada pela vazão de interesse é associada a mesma probabilidade daquela vazão.

Na Figura 5 está ilustrado o funcionamento esquemático do método probabilístico, em pelo menos três etapas: (i) amostragem dos parâmetros de formação de brecha com o Método Monte Carlo; (ii) simulação dos hidrogramas de saída com HEC-RAS controlado pelo MCBreach; e, (iii) cálculo das probabilidade de excedência das vazões de pico armazenadas.



**Figura 5. Ilustração do método probabilístico.**  
 Adaptado de Lara (2016).

## 2.1 PARÂMETROS DE FORMAÇÃO DA BRECHA

Os parâmetros de formação da brecha analisados estatisticamente pelo modelo MCBreach são os mesmos empregados nos modelos HEC-RAS 4.1 e HEC-RAS 5.0.3. A ferramenta MCBreach necessita ser orientada através da determinação dos limites e faixas aplicáveis aos parâmetros de formação da brecha de ruptura para representar a variabilidade deles. Tal procedimento é apresentado nos resultados do presente documento.

A seguir estão descritos os parâmetros de formação de brecha parametrizados no modelo HEC-RAS e no MCBreach:

- Posição: Local ao longo do eixo longitudinal da estrutura do barramento onde estará o centroide da brecha;
- Modo de ruptura: Definição da ruptura hipotética segundo galgamento, formação de *piping* (retroerosão tubular) ou colapso instantâneo;

- Forma: Largura da base da brecha e declividade do prisma de abertura (H:V), pois a brecha é representada sempre através de uma forma prismática;
- Tempo de formação: Tempo de desenvolvimento da brecha de ruptura;
- Mecanismo de ruptura: Definido como um tempo específico ou a partir de uma elevação do nível d'água do reservatório;
- Coeficientes de vazão e descarga: Coeficientes associados à brecha, a qual pode ocorrer por galgamento ou por *piping*.

Tais parâmetros representam qual deverá ser a geometria da brecha de ruptura da barragem, tempo de desenvolvimento da brecha entre início e abertura total e os coeficientes hidráulicos necessários à quantificação das vazões geradas pela seção transversal da brecha.

HEC (2010) e USACE (2014) colocam que o módulo de formação de brecha de ruptura do modelo HEC-RAS permite modos de ruptura por galgamento, *piping* ou colapso instantâneo. Tendo em vista que a Barragem Paranoá é construída em terra/enrocamento e possui vertedouro de concreto, os processos de ruptura hipotética da barragem podem ser deflagrados por galgamento ou formação de *piping*. Um colapso instantâneo pode ser esperado no sistema de comportas do vertedouro.

Baseado no tipo de material de construção da barragem, USACE (2014) sugere o emprego da Tabela 1 como norteador na adoção dos valores dos coeficientes de descargas associados ao corpo do barramento e ao *piping*.

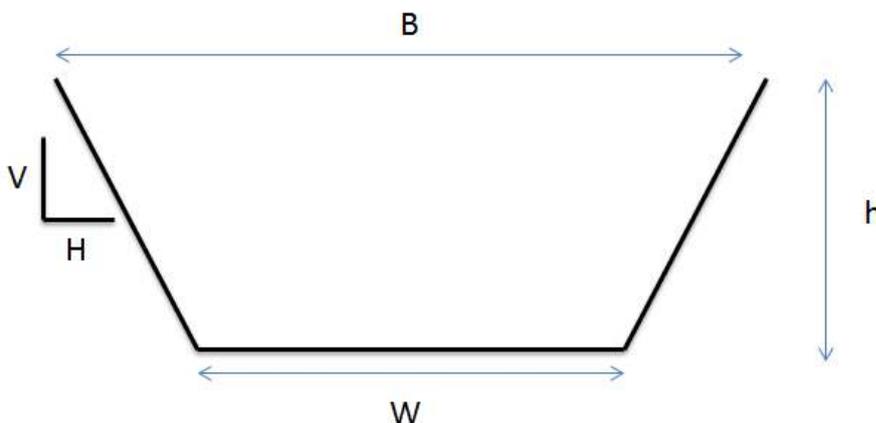
**Tabela 1. Coeficientes de descarga. Adaptado de USACE (2014).**

<b>Tipo de barragem</b>	<b>Coeficiente de vazão da brecha</b>	<b>Coeficiente de descarga para o <i>piping</i></b>
<b>Barragem de argila ou núcleo de argila</b>	1,44 – 1,82	0,5 – 0,6
<b>Barragem de enrocamento</b>	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6
<b>Concreto em arco</b>	1,71 – 1,82	0,5 – 0,6
<b>Concreto (gravidade)</b>	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6

O presente trabalho considera a representação da brecha através dos parâmetros de largura, altura e declividade de abertura do prisma (H:V). Este conceito, de tratar a brecha como uma forma prismática, é uma simplificação utilizada para representá-la numericamente em modelos como HEC-RAS.

A Figura 6 ilustra os parâmetros de forma da brecha de ruptura, bem como sua representação no modelo numérico conceitual.





**Figura 6. Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura.**

USACE (2014) argumenta que o procedimento de determinação de parâmetros de formação da brecha de ruptura de barragens, no caso de barragens de terra e enrocamento, apresenta maior complexidade. A heterogeneidade junto do controle de qualidade dos materiais, conforme o tipo de barragem, demanda maior perícia nos procedimentos arrojados em normas.

Schaefer (1992) coloca que a representação numérica de um rompimento hipotético de uma barragem de concreto ou elementos mecânicos da barragem, tal como comportas, constituem um procedimento de baixa complexidade. Neste caso, a ruptura hipotética de uma barragem de concreto ou de um elemento rígido é analisado de forma instantânea.

Os valores recomendados para os parâmetros de forma geométrica e tempo de formação das brechas de ruptura, para cada tipo de barragem, encontram-se expostos na Tabela 2.

**Tabela 2. Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha. Adaptado de USACE (2014).**

Tipo de barragem	Largura média da brecha (Bm)	Componente horizontal da declividade lateral da brecha (H:V)	Tempo de formação da brecha tf [horas]	Agência (EUA)
<b>Terra/Enrocamento</b>	(0,5 até 3,0) x hd	0 até 1,0	0,5 até 4,0	USACE (1980)
	(1,0 até 5,0) x hd	0 até 1,0	0,1 até 1,0	FERC
	(2,0 até 5,0) x hd	0 até 1,0 (maior)	0,1 até 1,0	NWS
	(0,5 até 5,0) x hd*	0 até 1,0	0,1 até 4,0*	USACE (2007)
<b>Concreto (Gravidade)</b>	Múltiplos blocos	Vertical	0,1 até 0,5	USACE (1980)
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,3	FERC
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,2	NWS
	Múltiplos blocos	Vertical	0,1 até 0,5	USACE (2007)
<b>Concreto em arco</b>		Declividade do vale		
	Toda o barramento	0 até a declividade do vale	<0,1	USACE (1980)
	Toda o barramento		<0,1	FERC
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1	NWS
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1	USACE (2007)
<b>Escombros</b>	(0,8 x L) até L	1,0 até 2,0	0,1 até 0,3	FERC
	(0,8 x L) até L		<0,1	NWS

\*Nota: Barragens com grande volume de água armazenado, e que tenham grande extensão de crista, continuarão erodindo por longos períodos, podendo apresentar maiores larguras e tempos de formação da brecha.  $h_d$  = altura da barragem; L = largura de crista da barragem.

Juntamente com as recomendações de engenharia, para a estimativa da geometria de uma brecha em barragens de terra e enrocamento, faz-se necessário o uso de equações empíricas para subsidiar a orientação dos modelos probabilísticos de amostragem. As seguintes equações de regressão são empregadas no presente estudo:

- Bureau of Reclamation (1988);
- Froehlich (1995);
- Froehlich (2008); e,
- Von Thun & Gillette (1990).

### 2.1.1 Bureau of reclamation (1988)

As equações de regressão do modelo de Bureau of Reclamation (1988) são representadas pelas seguintes relações



$$B_m = 3H_w \quad (1)$$

$$t_f = 0,011B_m \quad (2)$$

Onde  $B_m$  representa a largura média da brecha [m],  $H_w$  representa a altura d'água [m] acima da geratriz inferior da brecha, no momento do rompimento e  $t_f$  representa o tempo de formação da brecha [h].

### 2.1.2 Froehlich (1995)

Froehlich (1995) empregou 63 casos de rompimentos de barragens, compostos por barragens de terra e enrocamento. As barragens utilizadas pelo autor apresentavam dentre suas características, alturas do barramento variando entre 3,66 m até 92,96 m e volume armazenado no reservatório, no momento de rompimento, entre 0,013 até 660,000 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

As equações de regressão do modelo de Froehlich são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 0,1803K_o V_w^{0,32} H_b^{0,19} \quad (3)$$

$$t_f = 0,00254 * V_w^{0,53} H_b^{-0,90} \quad (4)$$

Onde  $B_m$  representa a largura média da brecha [m];  $K_o$  representa uma constante na equação (1,4 para rompimentos por galgante e 1,0 para rompimentos por piping);  $V_w$  representa o volume do reservatório no momento do rompimento [m<sup>3</sup>];  $H_b$  representa a altura final da brecha [m]; e,  $t_f$  representa o tempo de formação da brecha [h].

Froehlich preconiza que os valores médios de declividade lateral da brecha devem ser:

- 1,4H:1V para rompimentos por galgante; e,
- 0,9H:1V para os demais casos.

USACE (2014) argumenta que Froehlich (1995a) não deixou claro como calcular a altura da brecha, por isso é assumido que a altura da brecha, caso não haja outro argumento ou justificativa, inicia no topo da barragem e vai até a interface com o nível da superfície do solo.

### 2.1.3 Froehlich (2008)

É uma equação indicada para pequenas e grandes barragens, a qual gera resultados conservadores e, segundo SEO (2010), coerentes. A equação anterior foi atualizada, empregando 74 casos de barragens de terra e enrocamento.

Os mesmos parâmetros de largura media da brecha, tempo de formação e declividades laterais da brecha foram empregados no desenvolvimento desta atualização. As barragens utilizadas pelo



autor apresentavam dentre suas características, alturas do barramento variando entre 3,05 m até 92,96 m e volume armazenado no reservatório, no momento de rompimento, entre 0,0139 até 660,000 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

As equações de regressão do modelo de Froehlich atualizado são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 0,27 * K_o V_w^{0,32} H_b^{0,04} \quad (5)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g H_b^2}} \quad (6)$$

Onde  $K_o$  representa uma constante na equação (1,4 para rompimentos por galgamento e 1,0 para rompimentos por *piping*); e,  $g$  representa a aceleração de gravidade (9,80665 m/s<sup>2</sup>).

Na publicação do artigo, Froehlich (2008) colocou que a declividade lateral da brecha deve ser

- 1,0H:1V para rompimento por galgamento; e,
- 0,7H:1V para os demais casos.

Da mesma forma, o procedimento de determinação da altura da brecha não foi especificado no artigo do autor, no entanto, USACE (2014) preconiza a adoção do critério de determinar a altura entre o topo da barragem e o nível da superfície do solo com interface com o barramento.

#### 2.1.4 Von Thun & Gillette (1990)

Este modelo de regressão foi desenvolvido empregando 57 estudos de casos de rompimentos reais de barragens, os mesmos casos utilizados nos trabalhos de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) e de Froehlich (1987).

O método proposto utiliza a declividade lateral da brecha igual a 1H:1V, exceto para casos que o corpo da barragem é composto por solos coesivos, onde as declividades laterais deve ficar entorno de 0,5H:1V até 0,33H:1V. Os dados característicos das barragens empregados pelos autores variaram entre 3,66 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,0027 até 660,00 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

As equações de regressão do modelo de Von Thun & Gillette são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 2,5 * H_w + C_b \quad (7)$$

Onde  $C_b$  representa um coeficiente, o qual é função do tamanho do reservatório, segundo quatro classes de tamanho.



Tabela 3. Coeficientes  $C_b$ .

Tamanho do reservatório [m <sup>3</sup> ]	$C_b$ [m]
<1,23*10 <sup>6</sup>	6,1
1,23*10 <sup>6</sup> – 6,17*10 <sup>6</sup>	18,3
6,17*10 <sup>6</sup> – 1,23*10 <sup>7</sup>	42,7
>1,23*10 <sup>7</sup>	54,9

Von Thun & Gillette (1990) desenvolveram dois conjuntos de equações para o tempo de formação da brecha. O primeiro em função da profundidade d'água sobre a geratriz inferior da brecha, conforme a seguinte relação:

$$t_f = 0,02 * H_w + 0,25 \text{ [barragens resistentes à erosão]} \quad (8)$$

$$t_f = 0,015 * H_w \text{ [barragens facilmente erodíveis]} \quad (9)$$

Por sua vez, o segundo conjunto de equações trabalha o tempo de formação da brecha em função da profundidade d'água sobre sua geratriz inferior e largura média, conforme as seguintes relações:

$$t_f = \frac{B_m}{4H_w} \text{ [barragens resistentes à erosão]} \quad (10)$$

$$t_f = \frac{B_m}{4H_w + 61,0} \text{ [barragens facilmente erodíveis]} \quad (11)$$

USACE (2014) salienta, conforme trabalho de Von Thun & Gillette (1990), que os termos “barragens resistentes à erosão” e “barragens facilmente erodíveis” estejam associados ao controle de qualidade do método construtivo aplicado.

## 2.2 PARÂMETROS DE RUPTURA DA BARRAGEM PARANOÁ

Para a Barragem Paranoá, os seguintes parâmetros de formação de brecha, bem como os mecanismos ou modos de ruptura, se aplicam:

- Posição: Local ao longo do eixo longitudinal da estrutura do barramento onde estará o centroide da brecha;
- Modo de ruptura: Definição da ruptura hipotética segundo galgamento ou formação de *piping*;
- Forma: Largura da base da brecha e declividade de abertura do prisma (H:V);
- Tempo de formação: Tempo de desenvolvimento da brecha de ruptura;
- Coeficientes de vazão: Coeficiente hidráulico associado à abertura da brecha;



- Coeficiente de descarga: Coeficiente hidráulico associado ao *piping*; e,
- Cota de formação do *piping*: Cota onde ocorre o início do *piping* no corpo da barragem de terra/enrocamento;
- Cota operacional do reservatório: Cota do reservatório onde inicia a abertura da brecha.

O uso de equações empíricas para estimar a geometria da brecha subsidiou a definição dos limites das amostradas probabilísticas dos parâmetros calculados com aquelas equações.



### 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, onde poderão ocorrer mudanças de regime supercrítico para subcrítico ou de subcrítico para supercrítico. 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 onde 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 versão 4.1 é utilizada para o desenvolvimento do estudo probabilístico das aberturas de brecha em conjunto com a ferramenta MCBreach, enquanto a versão 5.0.3 é empregada na propagação das ondas induzidas pela ruptura hipotética, para cada probabilidade de excedência selecionada.

O modelo possui um módulo dedicado para análise de rompimento de barragens, onde é possível determinar os parâmetros de formação da brecha. A formação da brecha no HEC-RAS é tratada com a parametrização de largura, altura, tempo de formação e tipo de deflagração.

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 [m<sup>3</sup>/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 [m<sup>2</sup>]; L é a largura da superfície d'água [m]; K é capacidade de transporte [m<sup>3</sup>/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]; q é o fluxo lateral [m<sup>3</sup>/s/m];  $\beta$  é o fator de distribuição do fluxo [adim].

O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na Eq.(13) 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:

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



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].

Já a versão bidimensional do HEC-RAS é baseada nas equações de conservação da massa e conservação do momentum de Navier-Stokes pelas seguintes relações:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h.u)}{\partial x} + \frac{\partial(h.v)}{\partial y} + q = 0 \quad (14)$$

$$\therefore H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t)$$

Componente x da equação da conservação do momento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_f \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot u + f \cdot v \quad (15)$$

Componente y da equação da conservação do momento:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_f \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot v + f \cdot u \quad (16)$$

Onde  $q$  é o fluxo externo,  $u$  e  $v$  são as componentes de velocidade,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $H$  é a energia específica,  $h$  é a profundidade d'água,  $z$  é a superfície altimétrica,  $c_f$  é o coeficiente de atrito do leito e  $f$  é o parâmetro de Coriolis.

Goodell (2012) argumenta que o modelo HEC-RAS, para estudos de rompimento de barragens, pode apresentar instabilidades numéricas. Isso é comum, pois a complexidade hidráulica de um estudo de rompimento é grande, onde a variação da vazão no tempo e no espaço atinge o escoamento rapidamente variado. Para este tipo de simulação o engenheiro deve utilizar, no HEC-RAS, a opção de regime composto (do inglês "mixed flow regime") para estabilizar a solução numérica em casos de mudanças bruscas de regime hidráulico entre subcrítico e supercrítico.

Para tal, o modelo HEC-RAS é estabilizado empregando a técnica de inércia local parcial (Local Partial Inertia – LPI), discutida por Fread et al. (1996). Com esta técnica é possível estabilizar a solução numérica para escoamentos não permanentes e não uniformes do modelo HEC-RAS, principalmente para eventos de rompimento de barragens.

A seguinte simplificação é empregada na formulação do modelo HEC-RAS como fator de redução nos termos inerciais da equação do momentum, tal como:

$$\varphi \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right)}{\partial x} \right] + Ag \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (17)$$

Segundo as condições:



$$\begin{aligned} \sigma &= F_T - F_r^m (F_r \leq F_T; m \geq 1) \\ \sigma &= 0 (F_r > F_T) \end{aligned} \quad (18)$$

Onde,  $\varphi$  representa o fator LPI multiplicador dos termos inerciais;  $F_T$  é o número limite de Froude, o qual determina o coeficiente  $\varphi$  igual a zero para valores de 1 até 2;  $F_r$  representa o número de Froude;  $m$  representa o expoente da equação, o qual altera o formato da curva da equação e varia entre 1 e 128.

A Figura 7 ilustra a interface onde o engenheiro pode ajustar os parâmetros supracitados.

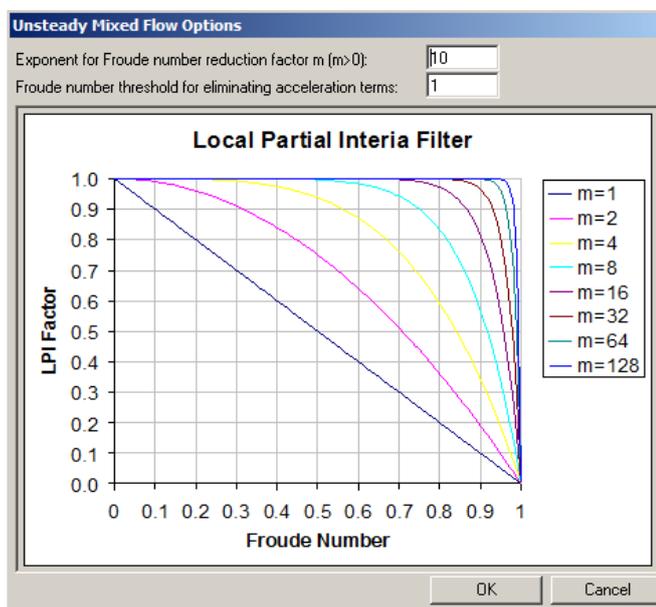


Figura 7. Interface LPI do HEC-RAS.

### 3.1 PROCESSO DE RUPTURA – HEC-RAS

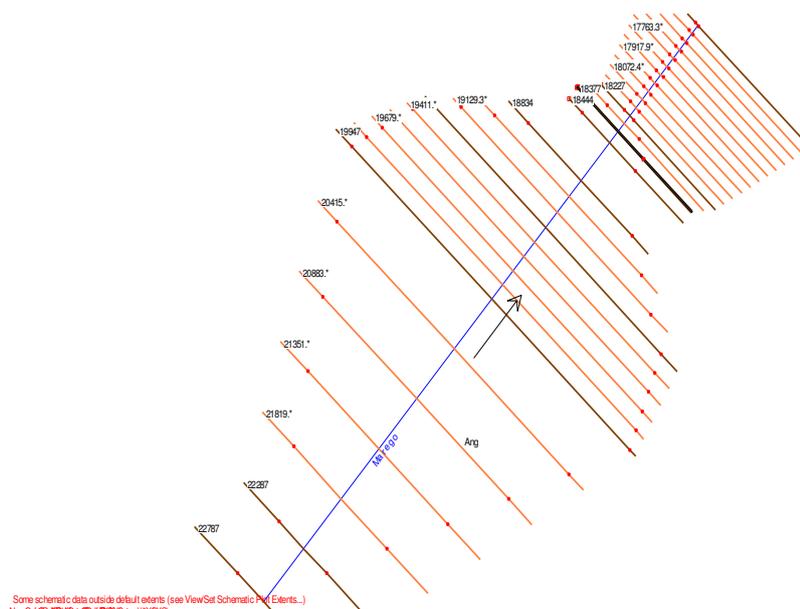
Para o modelo HEC-RAS, os seguintes parâmetros de formação da brecha de ruptura devem ser inseridos para o desenvolvimento de uma simulação de ruptura hipotética de barragens:

- Largura da geratriz inferior da brecha;
- Largura média da brecha;
- Declividades laterais do prisma de abertura da brecha (H:V);
- Coeficiente de vazão da brecha;
- Coeficiente de descarga do *piping*;
- Cota de formação do *piping*
- Tempo de formação da brecha;
- Modo de ruptura; e,
- Cota operacional do reservatório no instante da ruptura.

O MCBreach se comunica com o modelo HEC-RAS 4.1 para simular, com cada conjunto de parâmetros amostrados, um hidrograma de saída associado à brecha calculada.

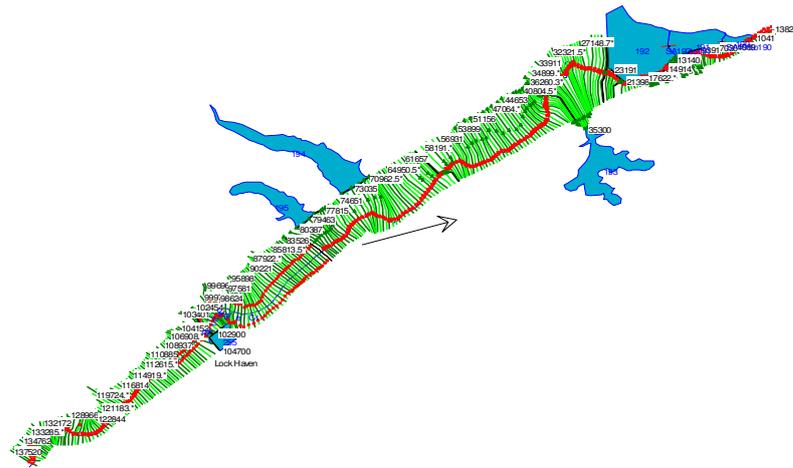
Como o Método de Monte Carlo gera muitas simulações e os domínios do HEC-RAS para estudos de rompimento de barragens costumam ser extensos e complexos, tal procedimento computacional de simulação pode levar semanas até meses para ser concluído.

Por isso, Goodell (2012) preconiza a criação de dois modelos de simulação de ruptura hipotética da barragem para o HEC-RAS. Denominado como truncado (Figura 8), o primeiro modelo HEC-RAS compreende somente o reservatório e a estrutura da barragem. Este modelo está acoplado com o MCBreach para a realização das amostragens de parâmetros e simulações de formação da brecha. Este artifício visa otimizar computacionalmente o processo de simulação, uma vez que este primeiro modelo serve para a geração dos conjuntos mais prováveis de parâmetros de formação da brecha de ruptura, para cada nível desejado de probabilidade.



**Figura 8. Exemplo de modelo HEC-RAS truncado.**  
Cortesia: Christopher Goodell.

O segundo modelo, contemplando todo o domínio de simulação (Figura 9), é empregado após a determinação dos hidrogramas associados a cada nível de probabilidade. Com o HEC-RAS 5.0.3 faz-se a simulação dos cenários gerados para cada nível de probabilidade, para então realizar o mapeamento das áreas atingidas e criação das manchas e inundação.



**Figura 9. Exemplo de modelo HEC-RAS completo.**  
Fonte: HEC (2010).

#### 4 DADOS DE ENTRADA

O desenvolvimento do presente estudo foi baseado em dados hidrológicos, topográficos e estruturais da Barragem Paranoá. O Quadro 1 resume os dados empregados no desenvolvimento do modelo numérico para ruptura hipotética da Barragem Paranoá.

**Quadro 1. Resumo de dados empregados no estudo de ruptura hipotética da Barragem Paranoá.**

<b>Tipo de base dados</b>	<b>Variável</b>
<b>Hidrológico</b>	Cheias de projeto, de períodos de retorno de 100 anos e 1.000 anos, da Barragem Paranoá.
<b>Curva cota x volume do reservatório</b>	Curva cota x volume do reservatório da Barragem Paranoá.
<b>Dispositivos de descarga</b>	Diagrama de operação do vertedouro da Barragem Paranoá.
<b>Projeto da Barragem Paranoá</b>	Dimensão do aterro de terra e enrocamento, bem como número e dimensão dos vãos dos vertedores e comportas.
<b>Topobatimetria</b>	Modelo Digital de Elevação 1:10.000. Seções transversais topobatimétricas nos rios Paranoá e São Bartolomeu.
<b>Base cadastral georreferenciada</b>	Ortomosaico.

As vazões de projeto de referência do estudo hidráulico estão resumidas na Tabela 4. As vazões fazem parte do estudo de revisão hidrológica do Volume V (312-PCHPA-RT-PSB-005) do PSB.

**Tabela 4. Vazões de projeto.**

<b>Período de recorrência (Tr – anos)</b>	<b>Vazão [m³/s]</b>
100	360,7
1.000	495,9

A Tabela 5 apresenta os valores de cota e volume, obtidos pela análise dos dados topobatimétricos do reservatório da Barragem Paranoá. O reservatório tem volume máximo operativo na ordem de 510 hm³, tal volume é considerado de grande porte na segurança de barragens.

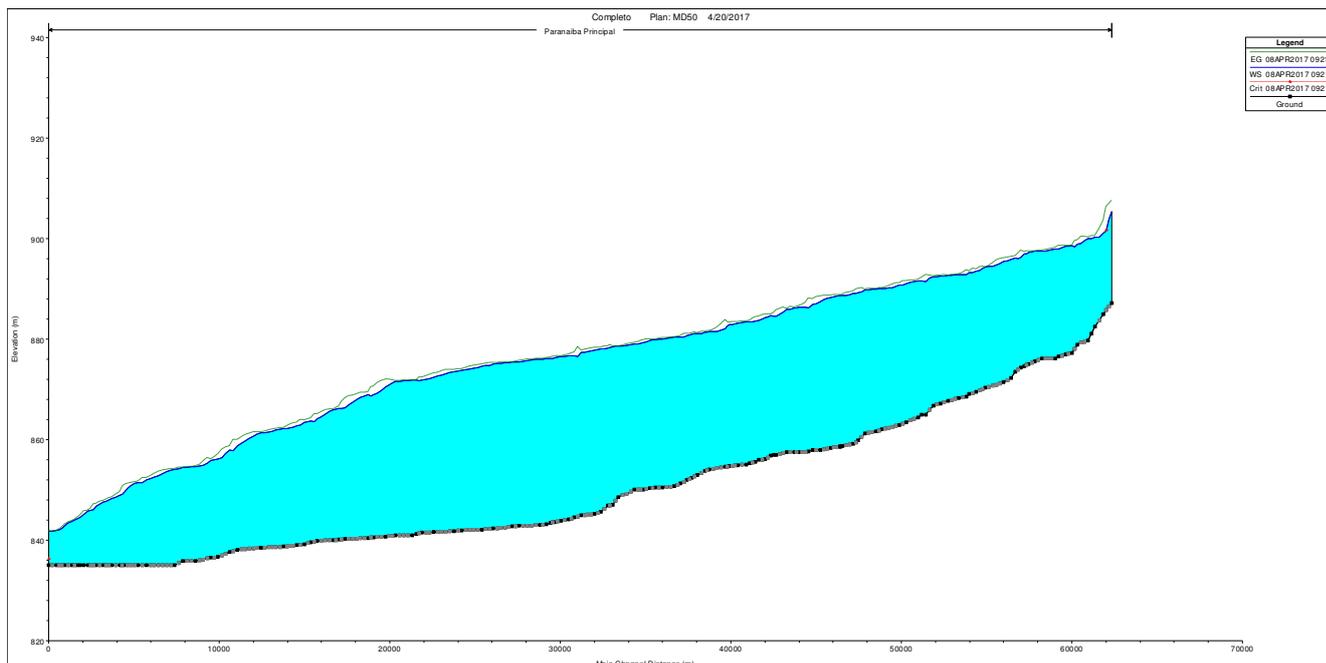
**Tabela 5. Dados referentes às curvas Cota x Volume.**

<b>Cota [m-IBGE]</b>	<b>Volume [hm³]</b>
954,00	0,000
971,70	0,054
972,96	0,442



Cota [m-IBGE]	Volume [hm <sup>3</sup> ]
974,47	1,911
976,27	5,711
978,44	14,368
981,04	32,123
984,17	66,372
987,91	126,736
992,41	226,537
997,81	391,092
1004,28	647,937

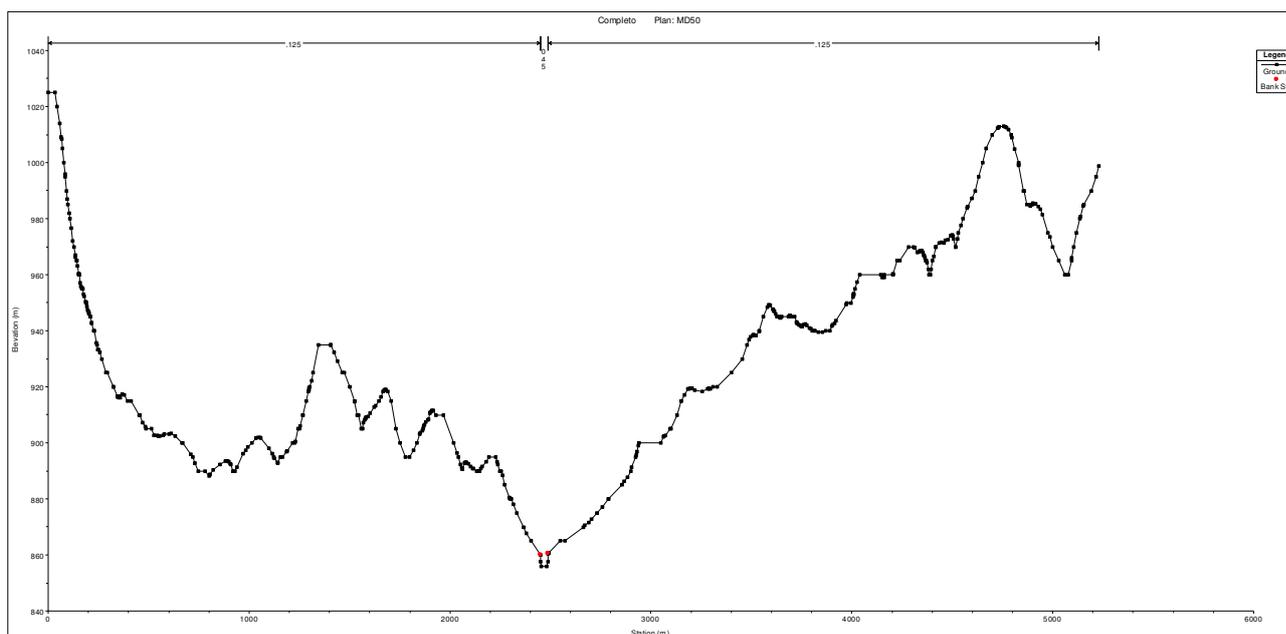
A região do vale da Barragem Paranoá apresenta declive regular (Figura 10). No decorrer de, aproximadamente, 70 km de extensão, observa-se uma variação de cota entre 887,00 [m-IBGE] até 835,00 [m-IBGE]. Os dez primeiros quilômetros, a partir do eixo do barramento, apresentam maior declividade. Desta forma, o escoamento de uma onda induzida pela ruptura hipotética da Barragem Paranoá, no vale a jusante, pode ser considerada como unidirecional.



**Figura 10. Perfil transversal dos rios Paranoá e São Bartolomeu.**

Na Figura 11 está ilustrada uma seção transversal no modelo hidráulico do presente estudo de ruptura hipotética da Barragem Paranoá. A área que o modelo hidráulico abrange apresenta geomorfologia suave, tendendo a um vale encaixado.





**Figura 11. Seção transversal típica.**

#### 4.1 FLUXOGRAMA

O presente estudo contemplou uma extensão de rio de, aproximadamente, 70 km, contados a partir do eixo da Barragem Paranoá até a divisa entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás, conforme disponibilidade de dados fotogramétricos fornecidos pela CEB Geração S.A. Duas frentes de trabalho foram aplicadas, o desenvolvimento do modelo HEC-RAS truncado (Figura 12) e, então, o desenvolvimento do modelo HEC-RAS completo (Figura 13). O modelo HEC-RAS 4.1 e a ferramenta computacional MCBreach foram aplicados no modelo truncado para a simulação das brechas de ruptura e cálculo dos hidrogramas de saída pelo método probabilístico.

O modelo truncado contempla a região do reservatório do empreendimento de interesse e duas seções transversais a jusante, conforme requisito numérico do modelo HEC-RAS. Já o modelo completo abrange todo o vale a jusante, representando o comportamento das ondas induzidas pelas rupturas hipotética da barragem, as quais foram calculadas no modelo truncado.

Neste contexto, o modelo HEC-RAS 4.1 truncado foi desenvolvido com 9 seções transversais, contemplando, apenas, a região do reservatório da Barragem Paranoá. Composto por 314 seções transversais espaçadas, aproximadamente, 250 m entre si, o modelo HEC-RAS 5.0.3 completo foi desenvolvido para um trecho de 70 km a jusante do barramento.

O modelo HEC-RAS 5.0.3 foi aplicado para a propagação dos hidrogramas de saída referentes às probabilidades de excedência de 1%, 50% e 99% ao longo do vale a jusante.



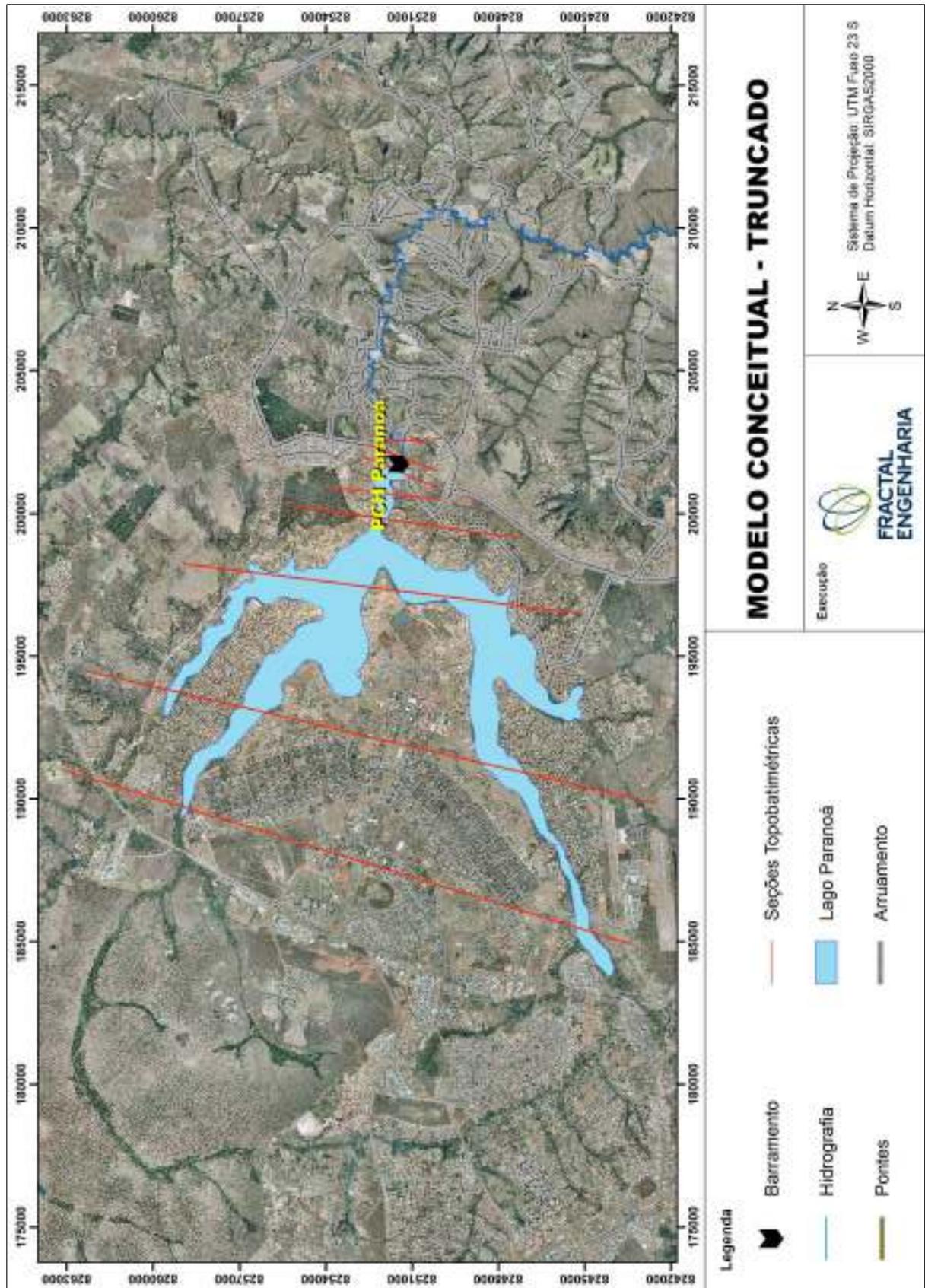


Figura 12. Modelo HEC-RAS conceitual truncado.

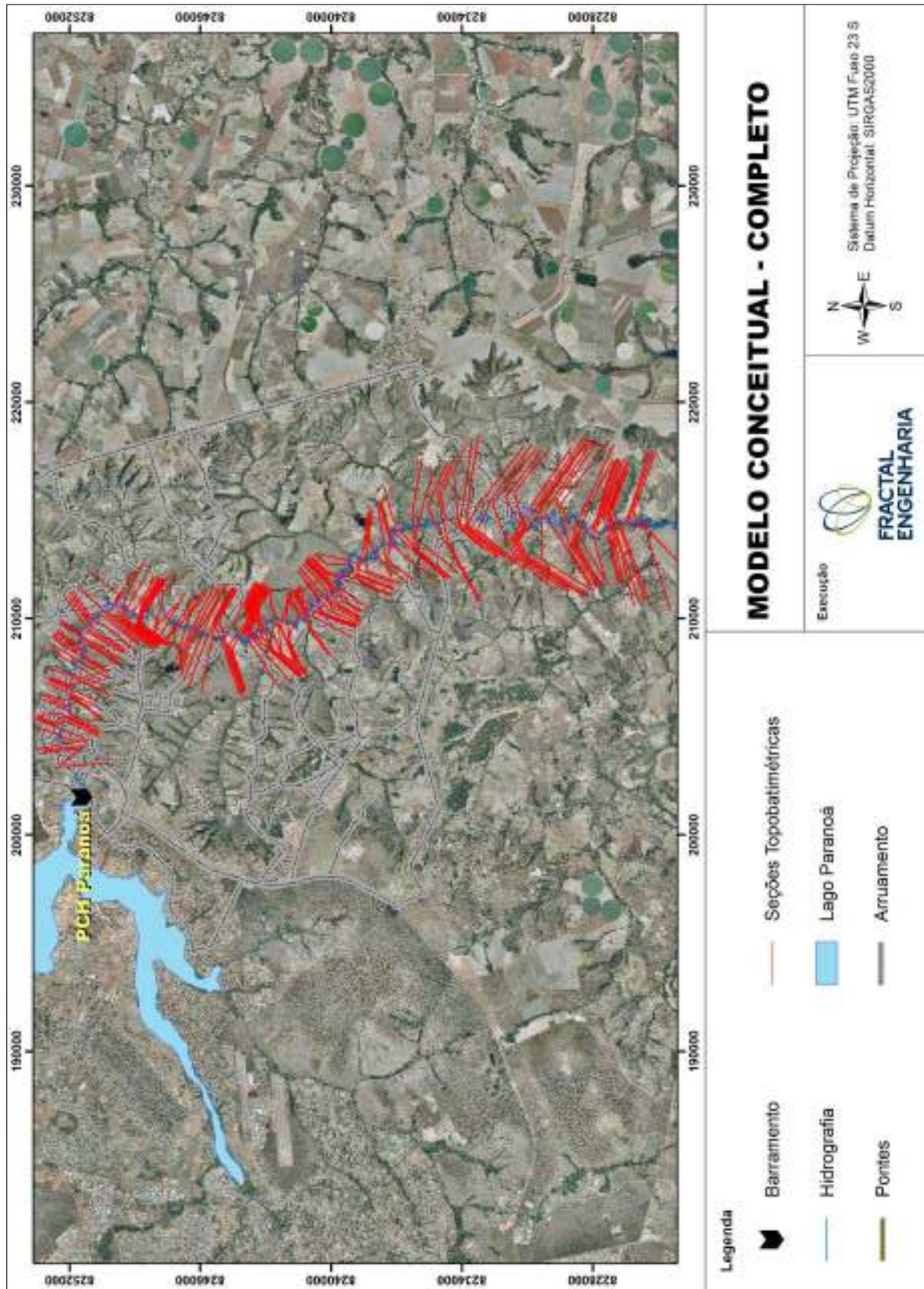
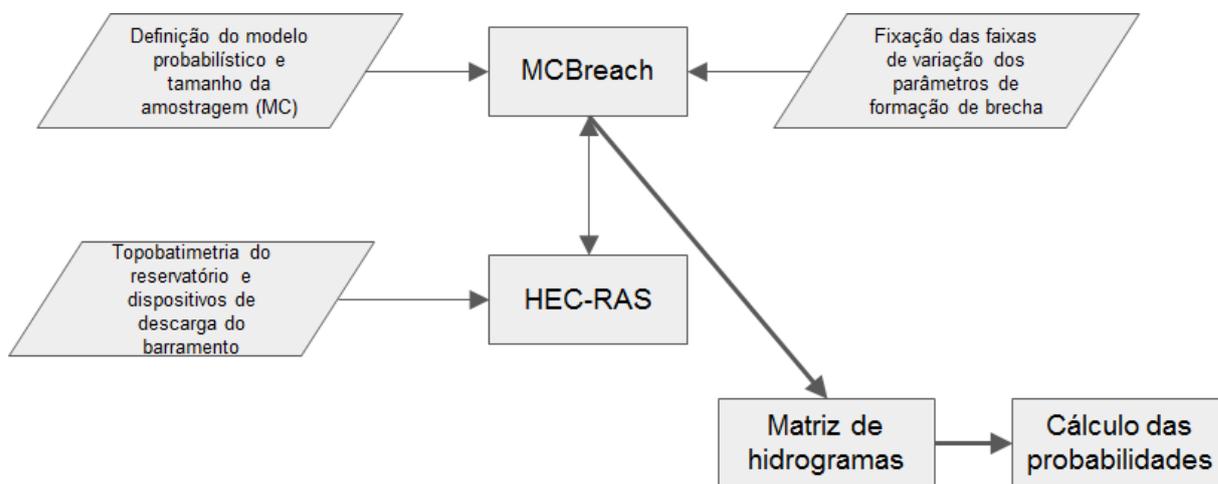


Figura 13. Modelo HEC-RAS conceitual completo.

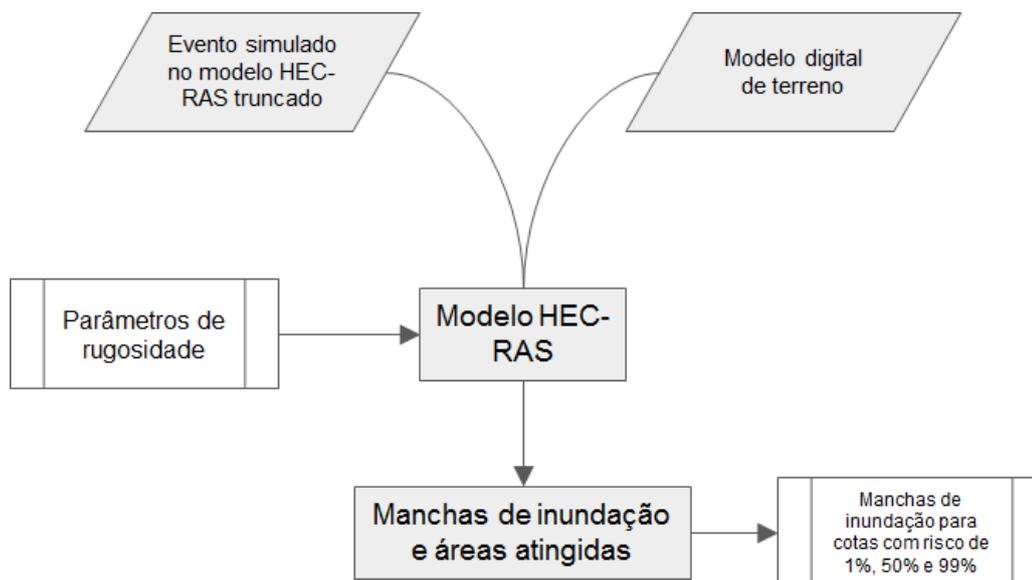
Os parâmetros de formação da brecha amostrados foram: Cota da geratriz inferior da brecha; Largura média da brecha ( $B_m$ ); Coeficiente de vazão da brecha ( $C_d$ ); Coeficiente de descarga do *piping* ( $C_P$ ); Tempo de formação ( $T_f$ ); Cota operacional do reservatório no momento da ruptura; Cota de formação do *piping*; e, Declividade lateral do prisma de abertura. As amostragens dos conjuntos de parâmetros foram realizadas pelo Método de Monte Carlo, usando os modelos de distribuição uniforme e normal.

Na Figura 14 está ilustrado o fluxo de atividades para o desenvolvimento do método probabilístico, com a ferramenta MCBreach e o modelo HEC-RAS truncado.



**Figura 14. Representação esquemática de entrada e saída de dados dos modelos HEC-RAS truncado e MCBreach.**

Os hidrogramas calculados no fluxo de atividades anterior alimentam o fluxo de atividades da Figura 15 para gerar as cartas de inundação e quantificação de potenciais atingidos.



**Figura 15. Representação esquemática de entrada e saída de dados no modelo HEC-RAS completo.**



Os coeficientes de rugosidade de Manning foram ajustados entre 0,030 a 0,045 para a calha principal e 0,125 para as margens e planícies inundáveis. Os valores de coeficiente de Manning estão condizentes aos valores indicados em CHOW (1959) e pelas características fisiográficas dos rios Paranoá e São Bartolomeu.



**Figura 16. Rio São Bartolomeu.**  
**Foto: Edgard Thomas (Google Earth).**

#### 4.2 HIPÓTESE DE RUPTURA E PROVÁVEIS MODOS DE RUPTURA

Pelo desenvolvimento da APMR foi identificado o arranjo das estruturas da Barragem Paranoá, conforme vistoria das estruturas:

- Ombreira Direita (OD);
- Barragem de Terra e Enrocamento (BTD);
- Muros de Aproximação;
- Vertedouro de Superfície – Controlado (VS);
- Tomada d'água (TA); e
- Ombreira Esquerda (OE).

Detalhes construtivos e geométricos destas estruturas encontram-se descritos e ilustrados na Seção I do Volume IV do PSB (312-PCHPA-RT-PAE-001), referente ao PAE, conforme Figura 17.

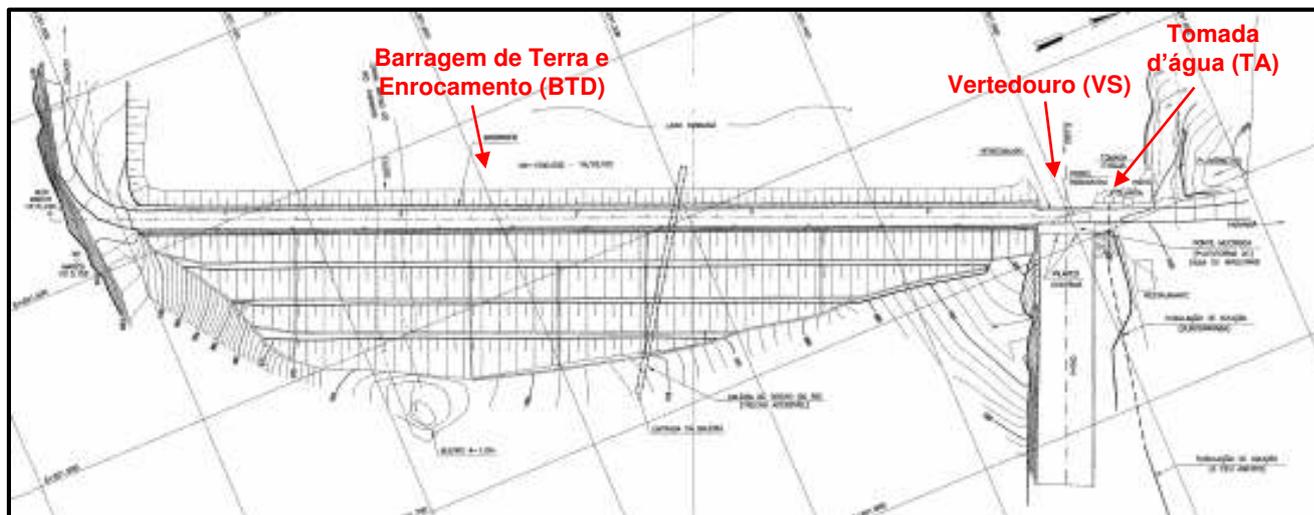


Figura 17. Conformação do barramento da PCH Paranoá.  
Fonte: Barragem do Paranoá – Planta – Arranjo (UPA-D-001).

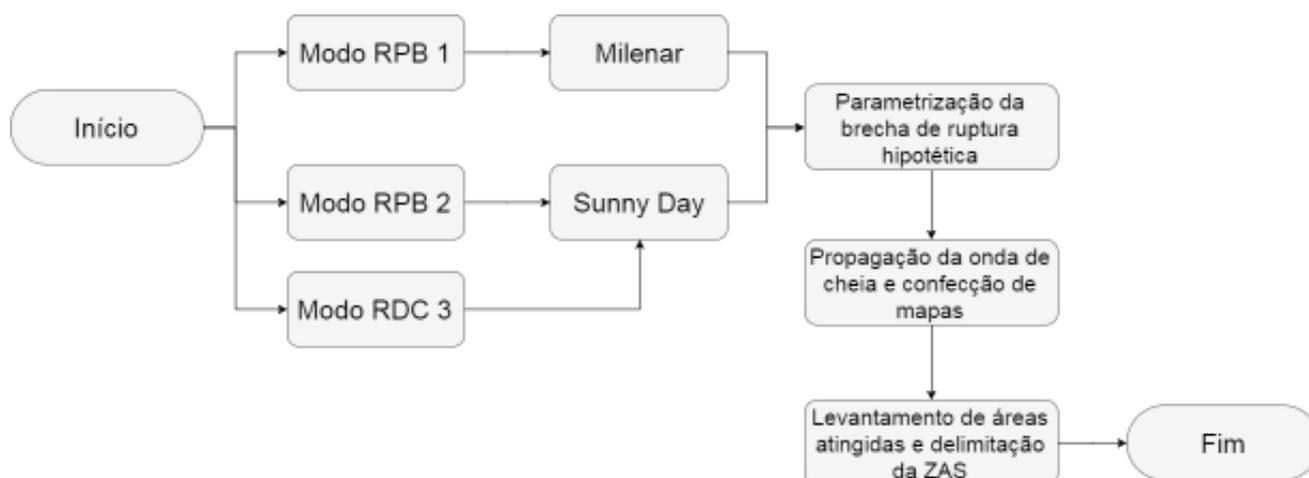
Os possíveis locais de formação da brecha de ruptura da Barragem Paranoá estão listados abaixo, tendo sido selecionadas as estruturas de maior altura do barramento. A escolha por estes pontos foi realizada mediante informações da planta do arranjo geral.

- Barragem de terra da margem direita (OD); e,
- Vertedouro controlado por comportas.

A altura máxima da brecha é de, aproximadamente, 38 m, contados da fundação à crista do barramento de terra. Os seguintes cenários prováveis de ruptura da Barragem Paranoá foram definidos e identificados, segundo os modos de ruptura elencados na APMR, como:

- **Modo RPB 1** – Rompimento por galgamento da barragem de terra, orientado por combinações probabilísticas, vertendo a vazão Milenar;
- **Modo RPB 2** – Rompimento *Sunny Day* por erosão interna (*piping*) da barragem de terra, orientado por combinações probabilísticas, vertendo a vazão  $Q_{50\%}$ ;
- **Modo RDC 3** – Rompimento da comporta por problemas de acionamento e abertura do sistema de comportas ou colapso do munhão em Condição de Carregamento Normal (CCN), operando em condição normal;

O fluxo de atividades do estudo hidráulico está representado na Figura 18.



**Figura 18. Cenários de ruptura da Barragem Paranoá.**

Os 3 (três) modos de ruptura hipotética identificados poderão se concretizar caso o Nível 3 de Segurança (Emergência) seja atingido. Os níveis de segurança são balizados, devendo o coordenador do PAE estar atento às Fichas de Ação expostas na Seção II do PAE (312-PCHPA-RT-PAE-002), Volume IV do PSB. O Nível de Segurança 3 (três) é identificado em cor vermelha nos quadros de situações de emergência.

Cada modo de ruptura foi embasado numa simulação pelo Método de Monte Carlo, com amostragem de 10.000 elementos. As manchas de inundação selecionadas para a confecção das cartas de inundação são de probabilidades iguais a 1%, 50% e 99%. Sendo assim, para os modos de ruptura RPB1 e RPB2, 3 (três) manchas de inundação compuseram o mapa da carta, juntamente com as manchas para os eventos de períodos de retorno de 100 anos e 1.000 anos.

## 5 RESULTADOS

Os seguintes resultados são apresentados e discutidos no presente documento, referente ao estudo de ruptura hipotética da Barragem Paranoá:

- Amostragem estatística da formação das brechas e cálculo das probabilidades de excedência;
- Propagação da onda induzida pela ruptura;
- Perfis hidráulicos dos modos de ruptura; e,
- Apêndice detalhado de configurações dos modelos HEC-RAS e resultados por seção transversal de controle mostradas nas cartas de inundação.

### 5.1 AMOSTRAGEM ESTATÍSTICA

O processo de amostragem dos parâmetros de formação da brecha de ruptura foi realizado para os dois modos de ruptura, RPB 1 (Milenar) e RPB 2 (*Sunny Day*). O modo RDC 3 representa um cenário determinístico, sem a aplicação de amostragem estatística.

Na Tabela 6 estão resumidos os parâmetros de formação da brecha para cada um dos modos de ruptura e para cada uma das probabilidades de excedência selecionadas. As probabilidades foram calculadas com as populações de vazões de pico, função das simulações dos conjuntos de parâmetros amostrados entre a interação do MCBreach e o modelo HEC-RAS truncado.

**Tabela 6. Parametrização das brechas para cada provável modo de ruptura.**

Parâmetros	Milenar			Sunny-day			Comp.
	1%	50%	99%	1%	50%	99%	
<b>Cota geratriz inferior [m]</b>	968,32	969,09	969,36	969,68	969,96	968,16	993,00
<b>Largura média – B<sub>m</sub> [m]</b>	216,63	200,37	151,91	246,09	198,76	166,67	60,00
<b>Declividade lateral esquerda</b>	4,16	4,40	1,14	4,18	2,04	2,37	0,00
<b>Declividade lateral direita</b>	1,26	3,33	1,41	1,75	2,43	1,53	0,00
<b>Tempo de formação da brecha – T<sub>f</sub> [h]</b>	0,58	1,12	1,06	0,42	0,7	1,95	0,20
<b>NA do reservatório [m]</b>	1003,9	1003,9	1003,9	1000,65	1000,65	1000,65	1000,65
<b>Coefficiente de vazão da brecha – Cd</b>	1,73	1,45	1,58	1,77	1,57	1,58	1,80
<b>Coefficiente de descarga do piping – Cp</b>	NDA	NDA	NDA	0,778	0,514	0,708	NDA
<b>Cotação de formação do piping [m]</b>	NDA	NDA	NDA	980,62	982,3	976,84	NDA
<b>Vazão de pico [m<sup>3</sup>/s]</b>	75.486	63.863	49.262	58.906	48.153	39.021	2.467

Dos parâmetros indicados na Tabela 6, a Largura média e o Tempo de formação da brecha passaram por amostragem com orientação do modelo probabilístico normal. Os parâmetros de Declividade direita, Coeficiente de vazão, Coeficiente de descarga, Cota d'água e Cota de *piping* passaram por amostragem com orientação do modelo probabilístico uniforme. No caso do parâmetro NA do reservatório, a amostragem foi realizada, apenas, no RPB 1 (Milenar), sendo mantido fixo para o RPB 2 (*Sunny Day*). Isto é válido uma vez que o modo de ruptura RBP 1 consiste em galgamento.



O tempo de formação da brecha é contado a partir do momento em que se classifica a ruptura como um evento iminente. Para o modo RPB 1 (Milenar), a ruptura inicia-se no momento em que a vazão vertida atinge a vazão de projeto Milenar. Para o modo RPB 2 (*Sunny Day*), a ruptura tem início no momento da formação de *piping* entre a fundação e o topo da primeira berma. Por fim, no modo RDC 3, a ruptura tem início pelo colapso da estrutura do vertedouro em Condição de Carregamento Normal (CCN). Os mecanismos de deflagração de uma ruptura estão descritos no documento (312-PCHPA-RT-PAE-002) da Seção II do Volume IV do PSB, referente ao PAE.

Na Tabela 7 estão resumidos os parâmetros de formação da brecha amostrados com o Método Monte Carlo, e os limites de parametrização dos modelos probabilísticos. As equações USBR (1988), Froehlich (1995), Froehlich (2008) e Von Thun & Gillette (1990) subsidiaram a parametrização dos modelos probabilísticos para largura média e tempo de formação.

**Tabela 7. Limites de amostragem do Método Monte Carlo por parâmetro de formação da brecha.**

Parâmetro	Variância	Média	Mínimo	Máximo	Modelo
Largura médio – $B_m$ [m]	33	200	50	300	Normal
Tempo de formação – $T_f$ [h]	0,33	1,00	0,30	2,00	Normal
Declividade esquerda (H:V)	-	-	1	5	Uniforme
Declividade direita (H:V)	-	-	1	4	Uniforme
$C_D$	-	-	1,44	1,80	Uniforme
$C_P$	-	-	0,50	0,80	Uniforme
Cota d'água [m]			1.003,81	1.003,90	Uniforme
Cota de <i>piping</i> [m]			970,20	994,00	Uniforme
Cota geratriz inferior [m]	-	-	968,00	970,00	Uniforme

Os parâmetros amostrados foram aplicados pelo MCBreach no modelo HEC-RAS truncado, o qual simulou 10.000 aberturas de brecha, armazenando 10.000 hidrogramas de saída. As vazões de pico dos hidrogramas de saída compuseram uma matriz para calcular as probabilidades de excedência, entre 1% e 99%.

A probabilidade de excedência calculada com as vazões de pico é associada ao hidrograma de saída, ao conjunto de parâmetros e à cota de inundação no vale a jusante. A distribuição das populações de vazões de pico, do modo de ruptura RBP 1 e RPB 2, resultantes das simulações de ruptura da Barragem Paranoá estão representadas na Figura 19 e na Figura 20.



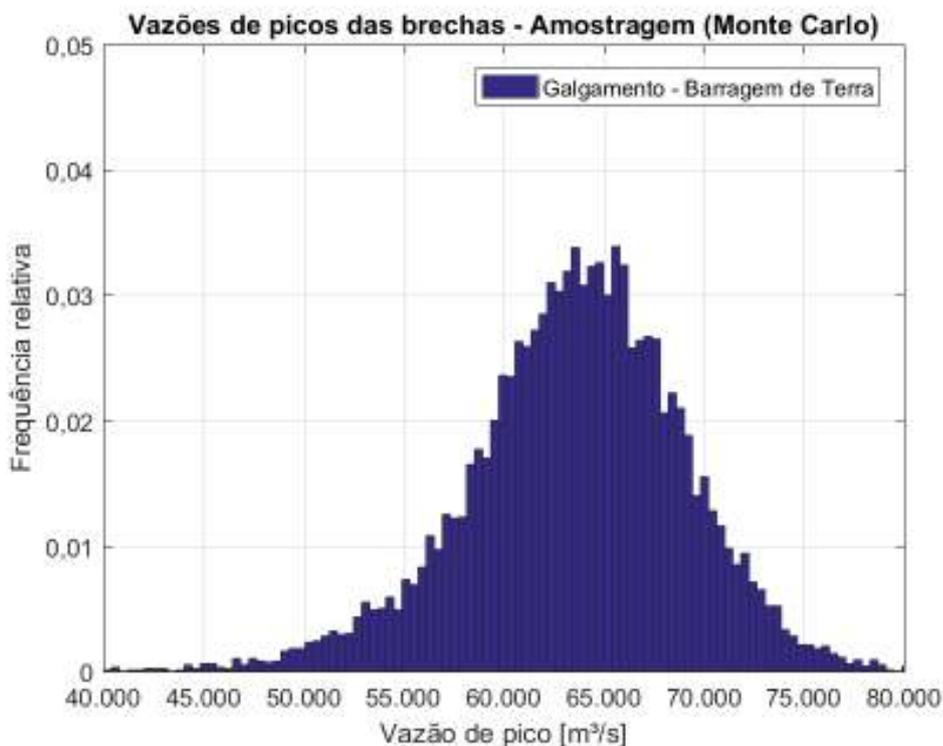


Figura 19. Vazões de pico: RPB 1 (Milenar).

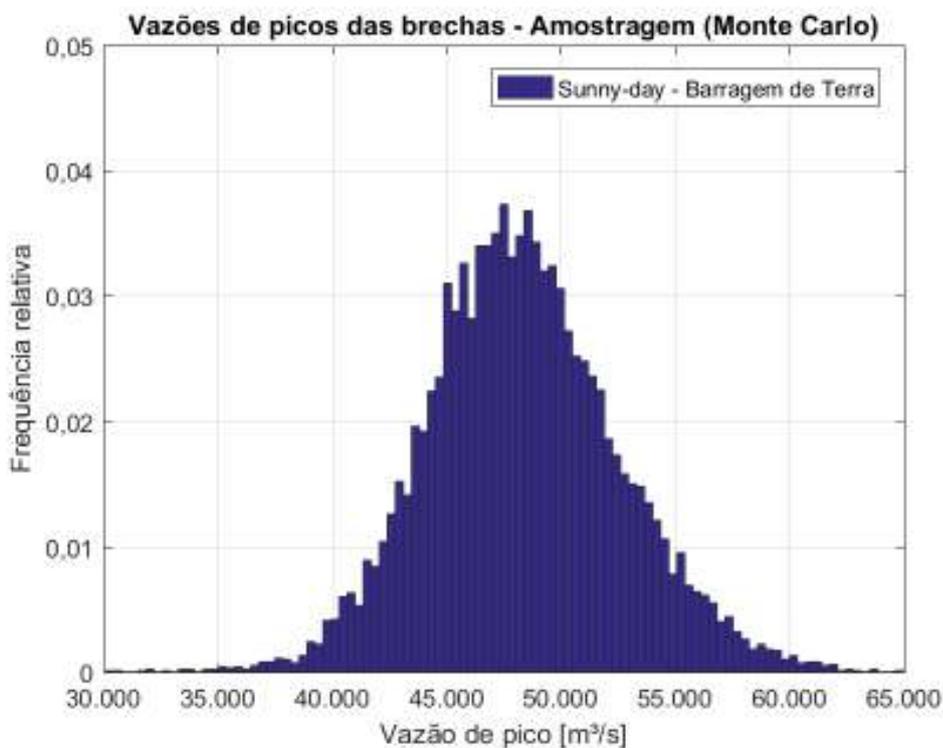


Figura 20. Vazões de pico: RPB 2 (Sunny Day).

A amostragem dos parâmetros mescla populações amostradas com modelo uniforme e modelo normal, enquanto a distribuição resultante das vazões de pico tende a um modelo normal. Neste

caso, a hidráulica da brecha é controlada pelos parâmetros de largura e tempo de formação. A magnitude das vazões de saída para a ruptura da Barragem Paranoá são expressivas, o que está relacionado ao grande volume de acumulação do reservatório do empreendimento. As vazões de pico, para os cenários de ruptura da barragem de terra/enrocamento, são pelo menos duas ordens de grandeza superiores às vazões extremas naturais da resposta hidrológica da bacia do Rio Paranoá.

Três probabilidades de excedência foram selecionadas para compor as cartas de inundação, 1%, 50% e 99%, tanto para o modo RPB 1, quanto para o modo RPB 2. O modo RDC 3 é um evento determinístico para o caso específico, conforme descrito na hipótese de ruptura da PCH Paranoá.

Para o cálculo das manchas de inundação, os hidrogramas do modo RPB 1 (Milenar) estão representados na Figura 21. Para o modo RPB 2 (Sunny Day), os hidrogramas estão representados na Figura 22. Para o modo RDC 3, o hidrograma está representado na Figura 23.

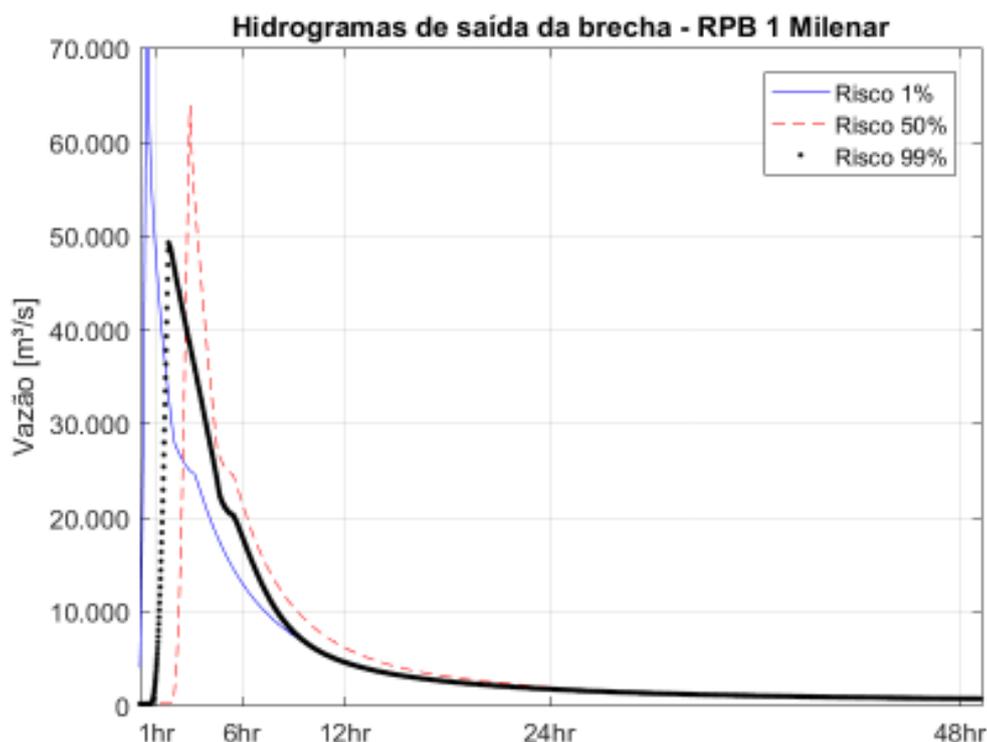


Figura 21. Hidrogramas selecionados para o modo RPB 1 (Milenar).

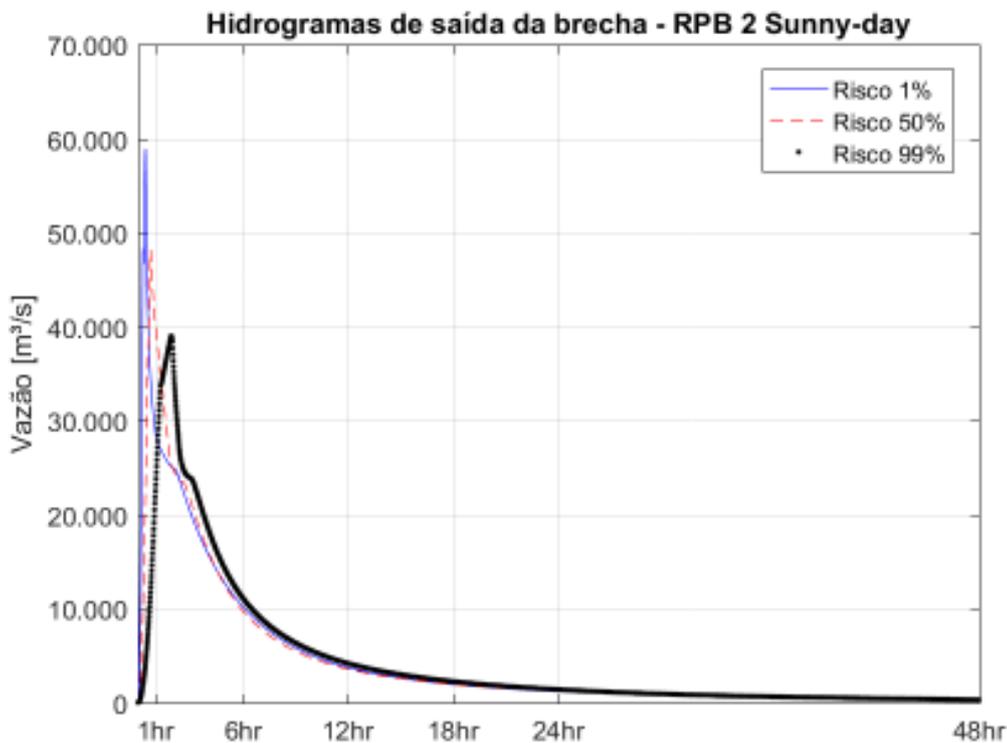


Figura 22. Hidrogramas selecionados para o modo RPB 2 (*Sunny Day*).

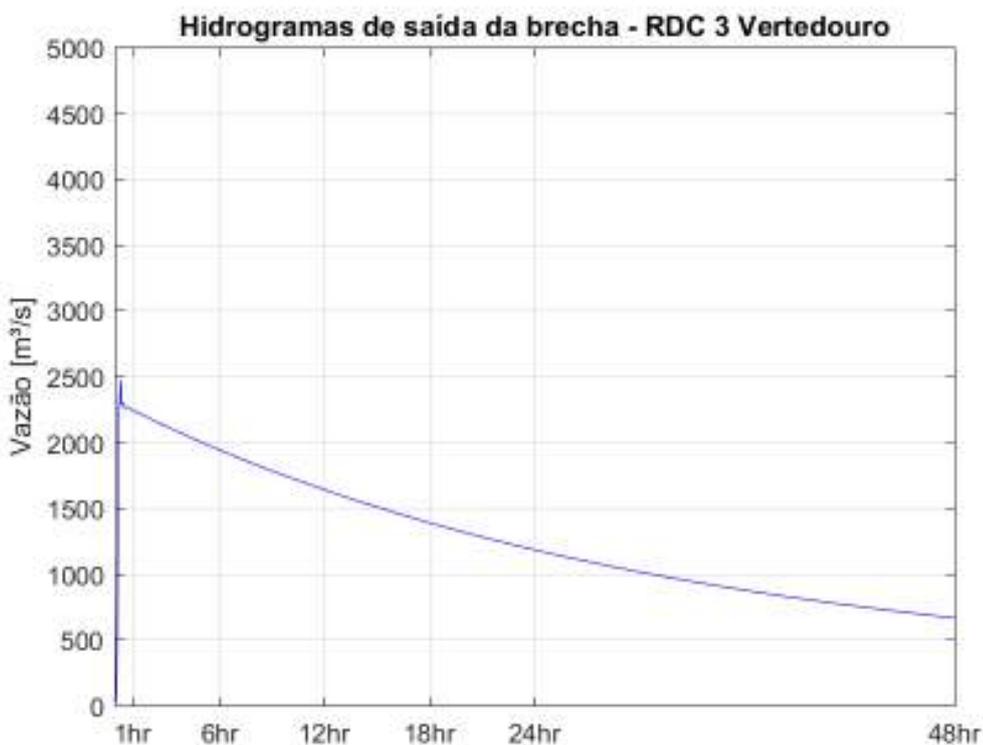


Figura 23. Hidrograma selecionado para o modo RDC 3 (*Sunny Day*).

Para os modos de ruptura RPB 1 e RPB 2, o método probabilístico confere diferença nos hidrogramas de saída para cada probabilidade de excedência, garantindo efeito da análise de sensibilidade na incerteza de formação da brecha de ruptura. A inundação induzida pela ruptura da Barragem Paranoá dura cerca de 48 horas, para todos os cenários simulados, até que a vazão volte à magnitude de uma inundação natural de 1.000 anos de período de retorno.

O hidrograma de ruptura do modelo RDC 3 não apresenta vazão de pico elevada, quando comparado aos demais modos, no entanto, o tempo de duração da inundação é semelhante. Isto está associado à grande capacidade de acumulação do reservatório do empreendimento.

O volume do reservatório da Barragem Paranoá é de aproximadamente 510 hm<sup>3</sup>, numa condição operacional normal, o que supera em, pelo menos, 3 vezes um volume de afluência ao reservatório da barragem de um evento com período de retorno igual ou superior a 1.000 anos. A ruptura hipotética da Barragem Paranoá condiciona uma condição hidráulica sem precedentes para o vale a jusante dos rio Paranoá e Bartolomeu.

Além dos hidrogramas de ruptura, os eventos de período de retorno de 100 anos e 1.000 anos compõem as manchas de inundação, a fim de orientar analistas e gestores sobre o real impacto da ruptura da barragem em relação aos eventos hidrológicos naturais da bacia hidrográfica. Os períodos de retorno de 100 anos e 1.000 anos, em alguns casos 10.000 anos, são usados para comparar o efeito da inundação induzida pela ruptura hipotética em relação a um cenário natural. Tal recomendação é preconizada por FEMA (2013) para estudos hidráulicos de rompimento de barragens.

## 5.2 PROPAGAÇÃO DA ONDA

Com os hidrogramas calculados, o modelo HEC-RAS completo foi usado para propagar as ondas de cheia ao longo do vale a jusante, entre o eixo da Barragem Paranoá e as proximidades da divisa entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás. Os resultados hidráulicos são analisados mediante 10 seções transversais. Esses pontos de controle estão representados nas cartas de inundação como seções transversais denominadas de “Pontos de interesse”.

Os rios Paranoá e São Bartolomeu, para o trecho de propagação da onda, apresenta declividade acentuada, na ordem de 0,30 m/km e presença de corredeiras e desníveis entre o eixo da Barragem Paranoá e a Casa de Força. É uma região de baixa densidade populacional, contando com poucas estruturas hidráulicas ao longo dos rios.

Nas figuras abaixo encontra-se ilustrado o comportamento das ondas de ruptura no decorrer do vale a jusante da Barragem Paranoá para o modo RPB 1 (Milénar), onde são apresentados 10 hidrogramas, referentes às 10 seções de controle. A ruptura inicia em Condição de Galgamento quando o nível do reservatório supera a cota da crista da barragem de terra.



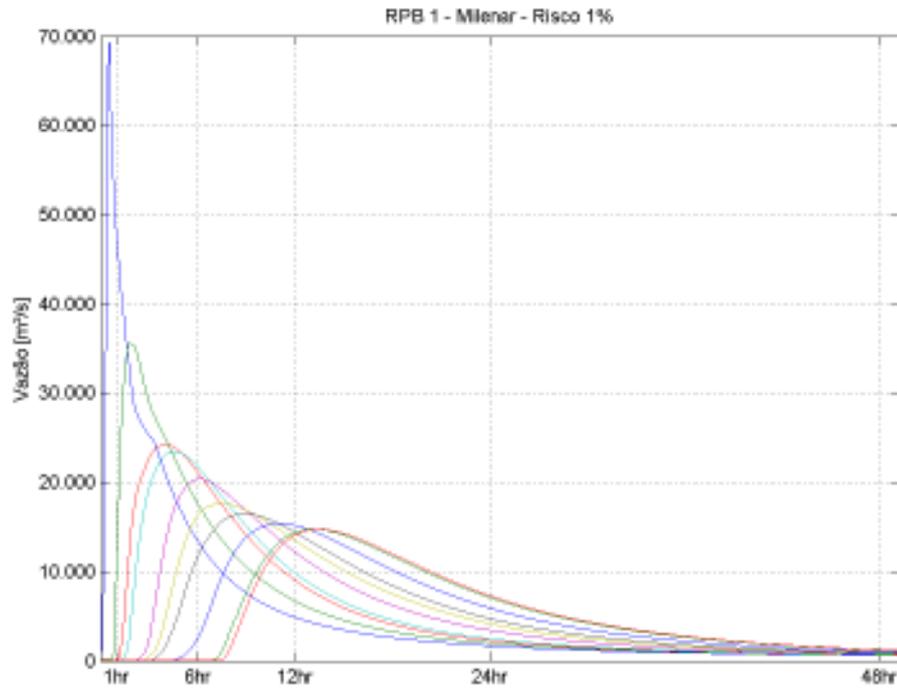


Figura 24. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar).

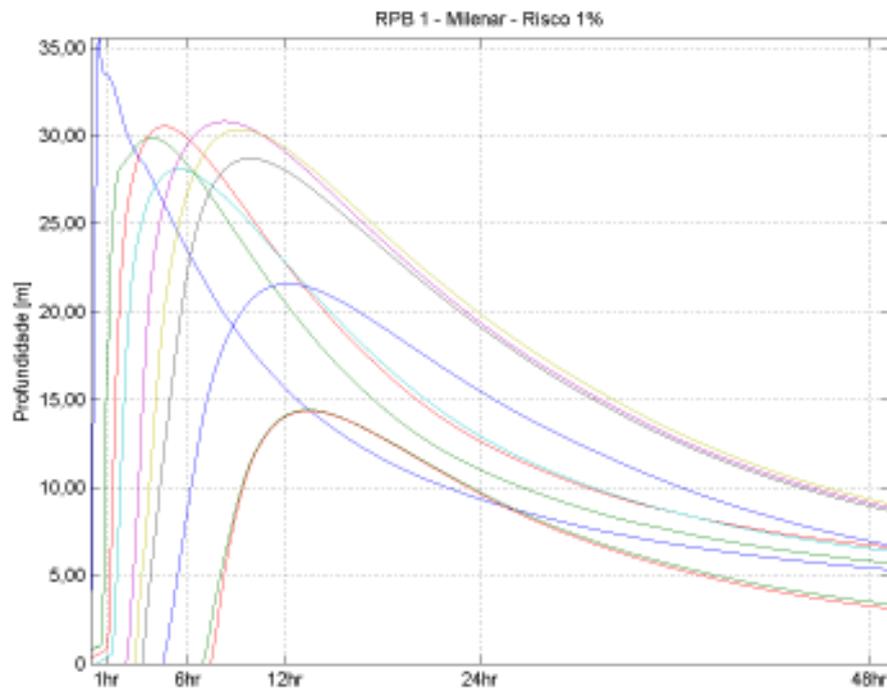


Figura 25. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar).



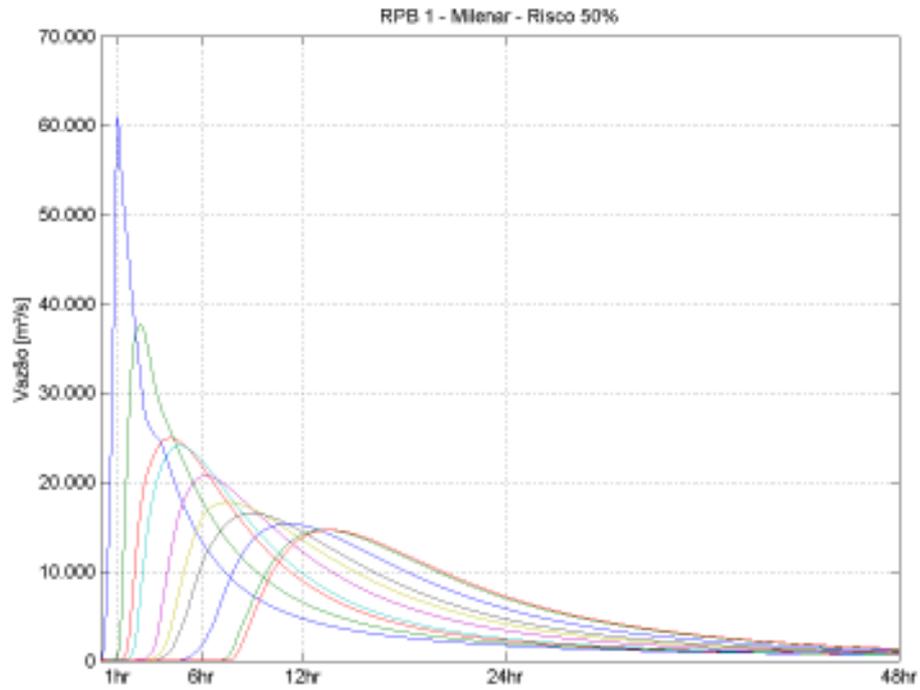


Figura 26. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar).

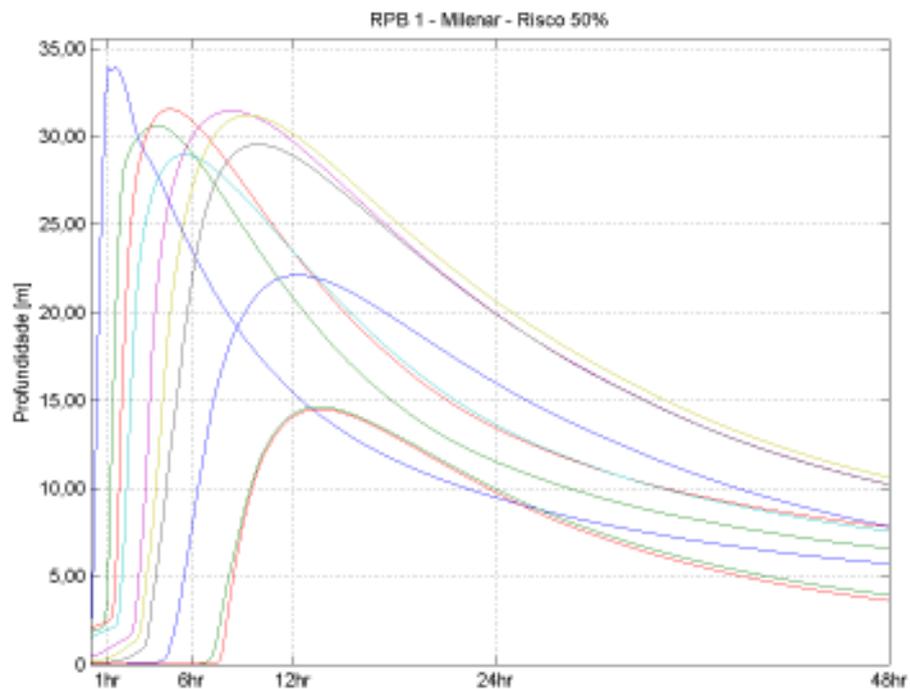


Figura 27. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar).



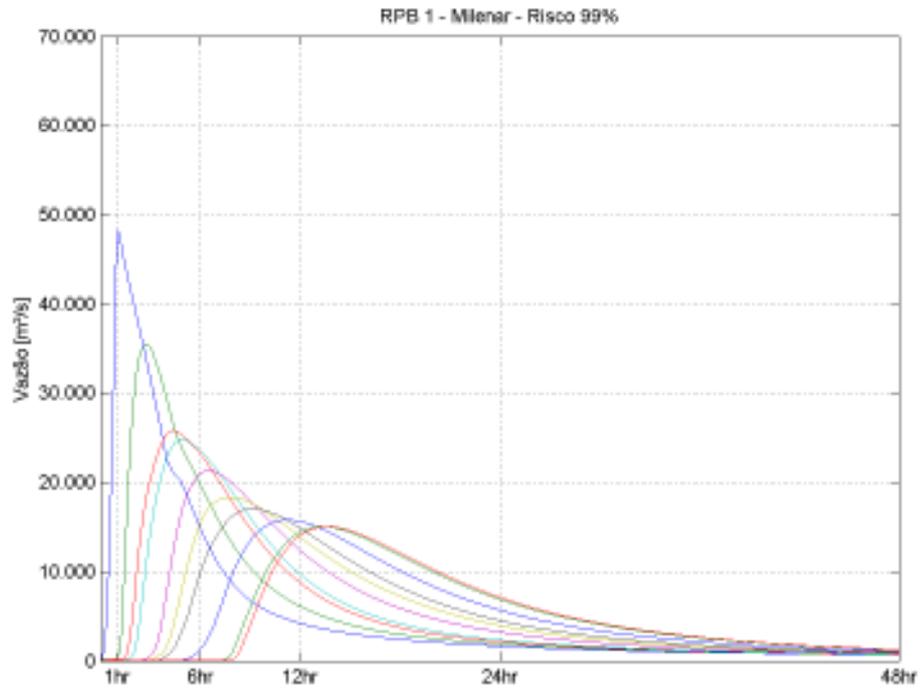


Figura 28. Propagação de hidrogramas. RPB 1 (Milenar).

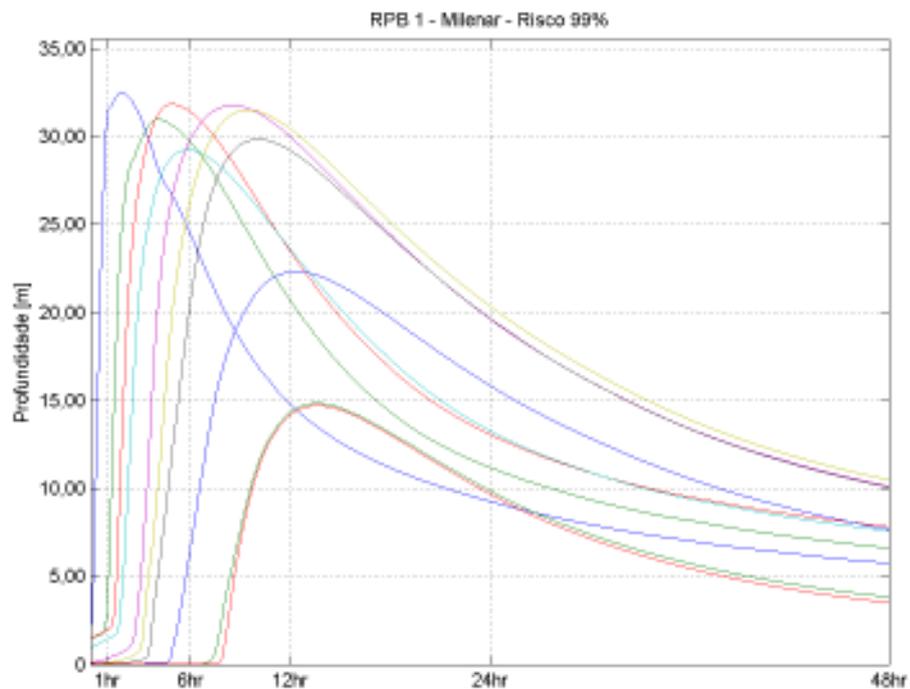


Figura 29. Profundidade da onda propagada. RPB 1 (Milenar).



O tempo inundado, pelo incremento da onda de ruptura, é quantificado a partir da permanência temporal da onda de cheia superior a 10 m de profundidade. Tal critério é uma forma de avaliar o tempo de submersão condicionado ao vale a jusante durante a passagem da onda de cheia.

Nas figuras abaixo encontra-se ilustrado o comportamento das ondas de ruptura ao longo do vale a jusante da Barragem Paranoá para o modo RPB 2 (*Sunny Day*), onde são apresentados 10 hidrogramas em cada gráfico, referentes às 10 seções de controle.

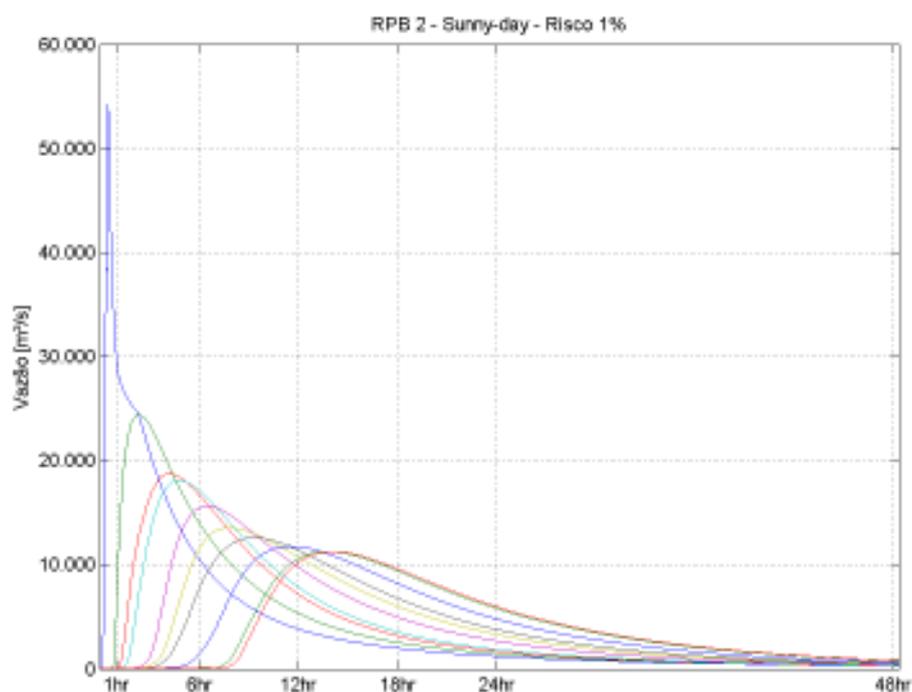


Figura 30. Propagação de hidrogramas. RPB 2 (*Sunny Day*).

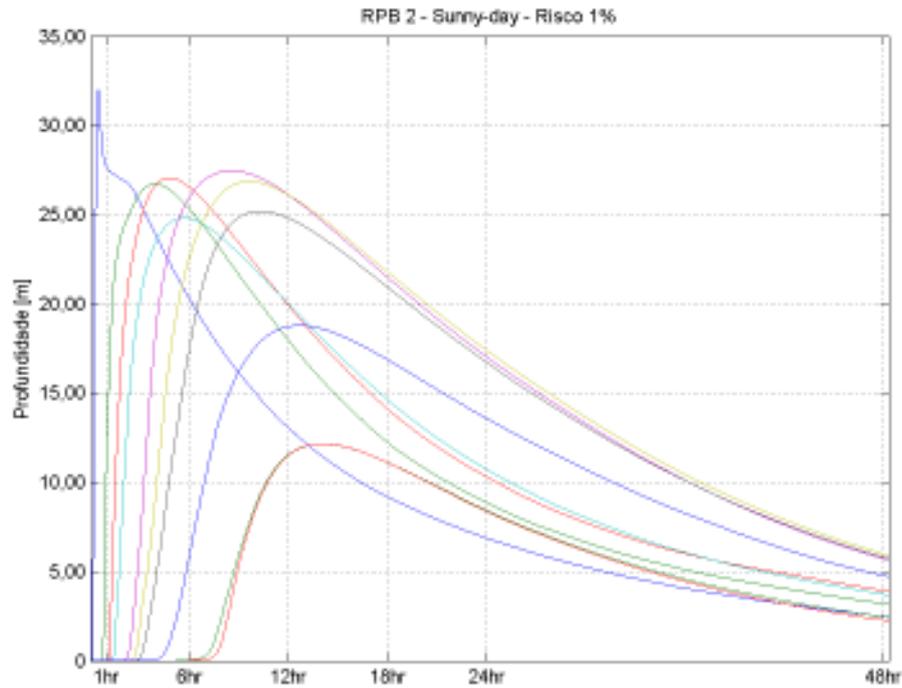


Figura 31. Profundidade da onda propagada. RPB 2 (*Sunny Day*).

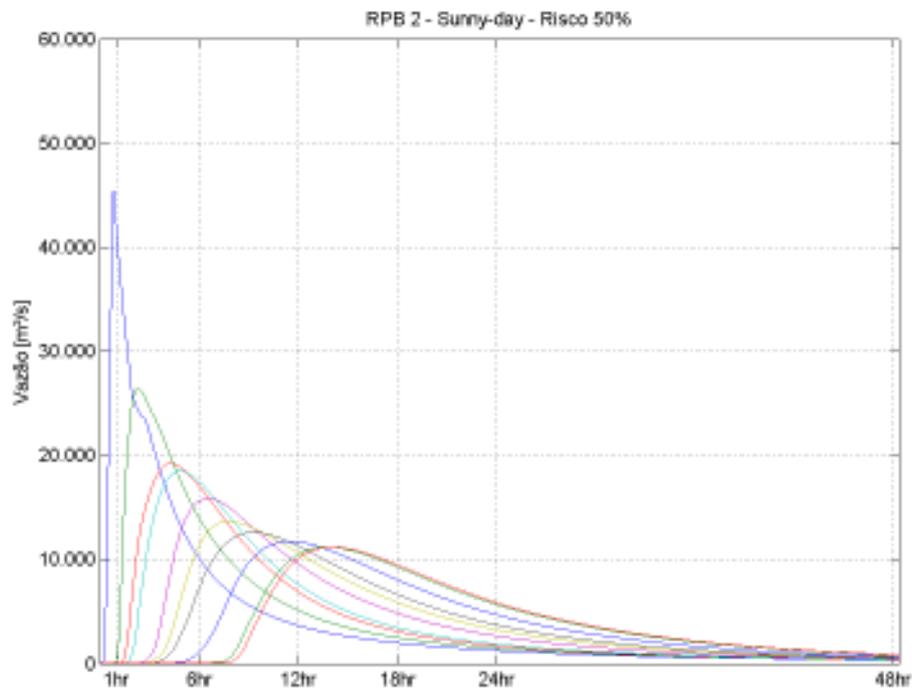


Figura 32. Propagação de hidrogramas. RPB 2 (*Sunny Day*).



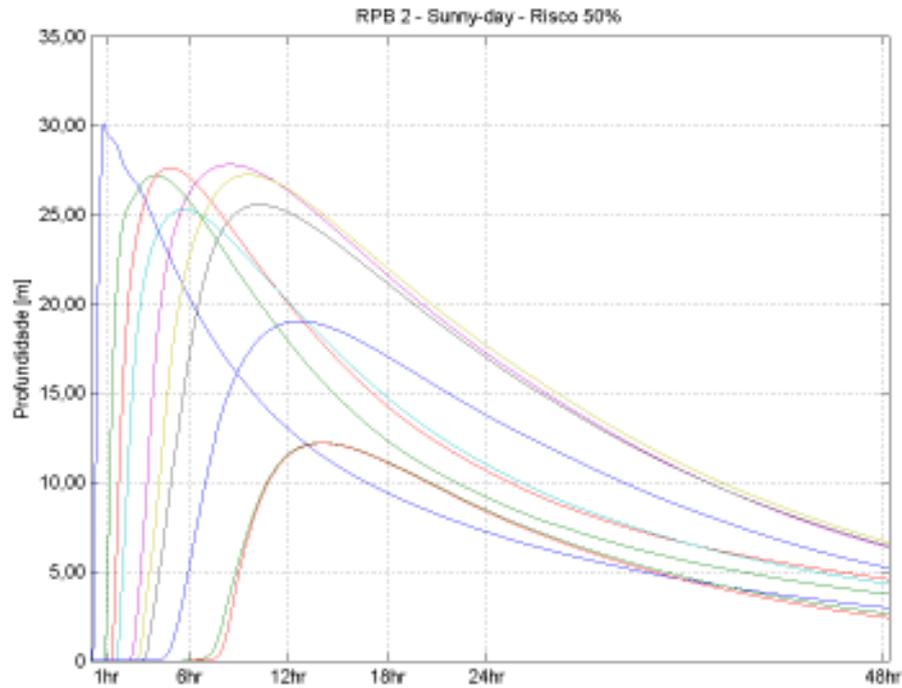


Figura 33. Profundidade da onda propagada. RPB 2 (*Sunny Day*).

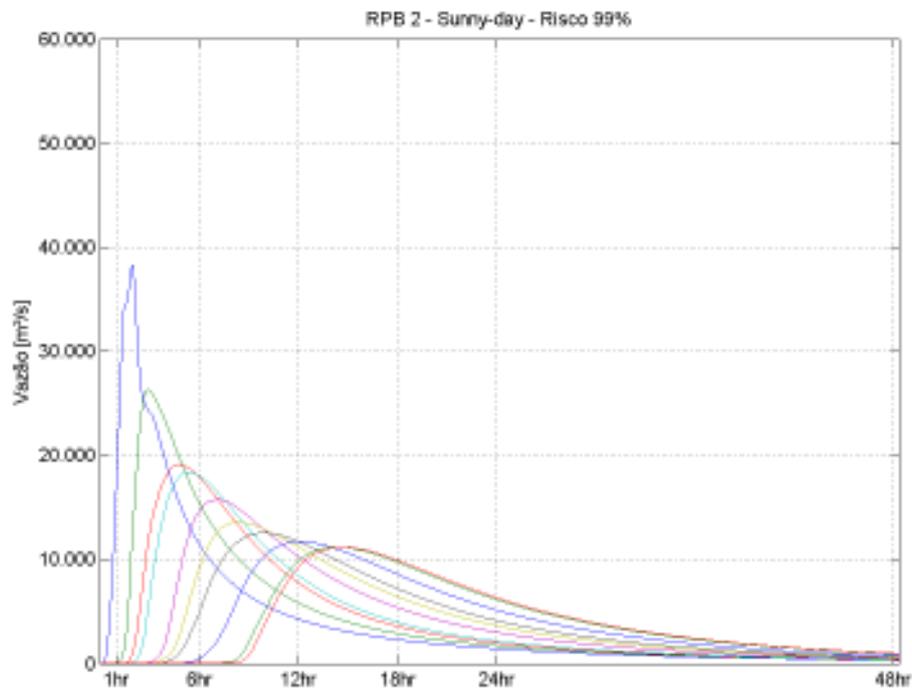


Figura 34. Propagação de hidrogramas. RPB 2 (*Sunny Day*).



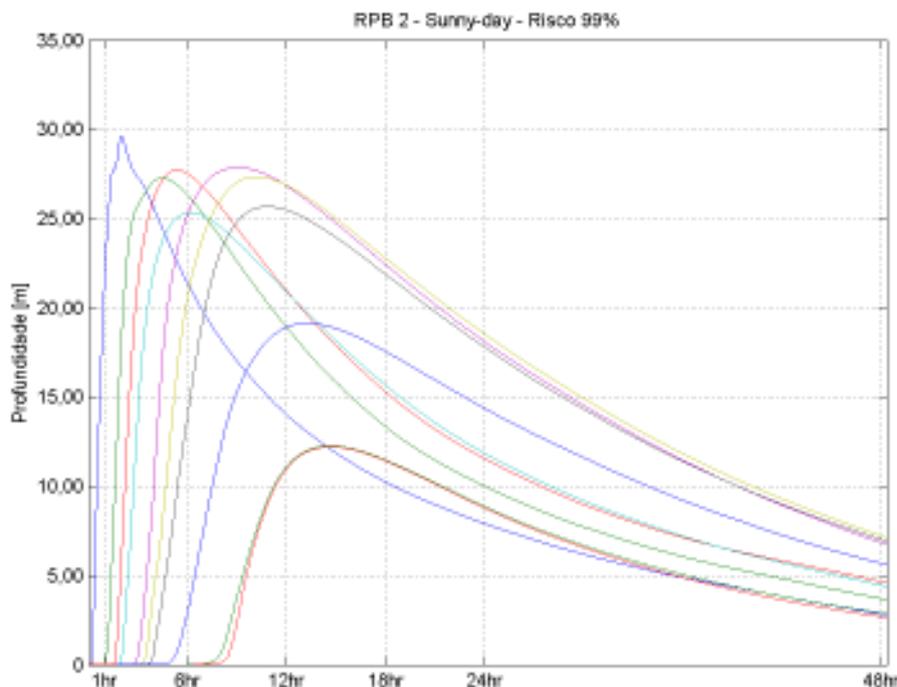
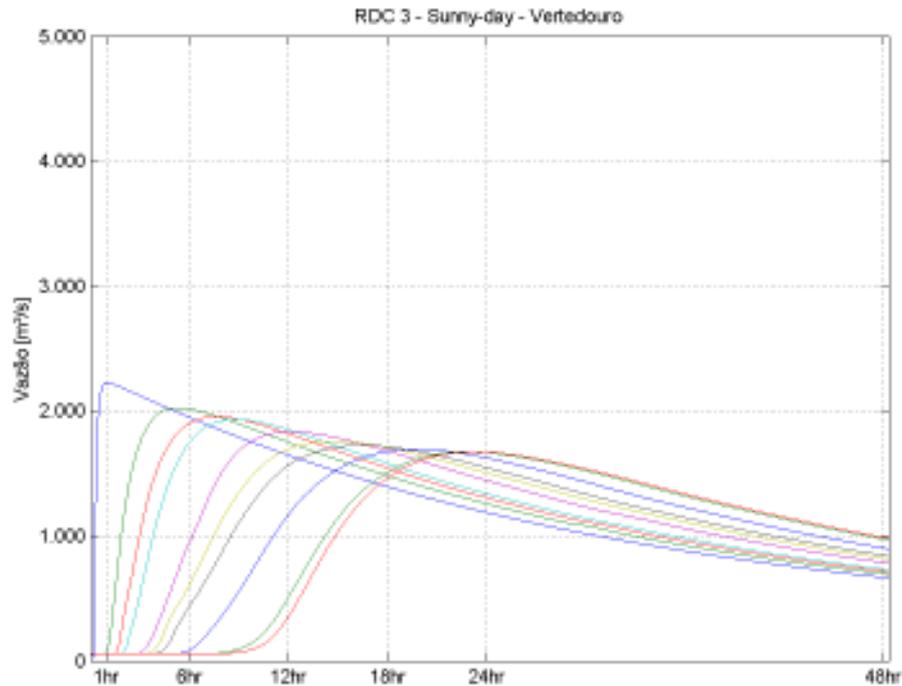


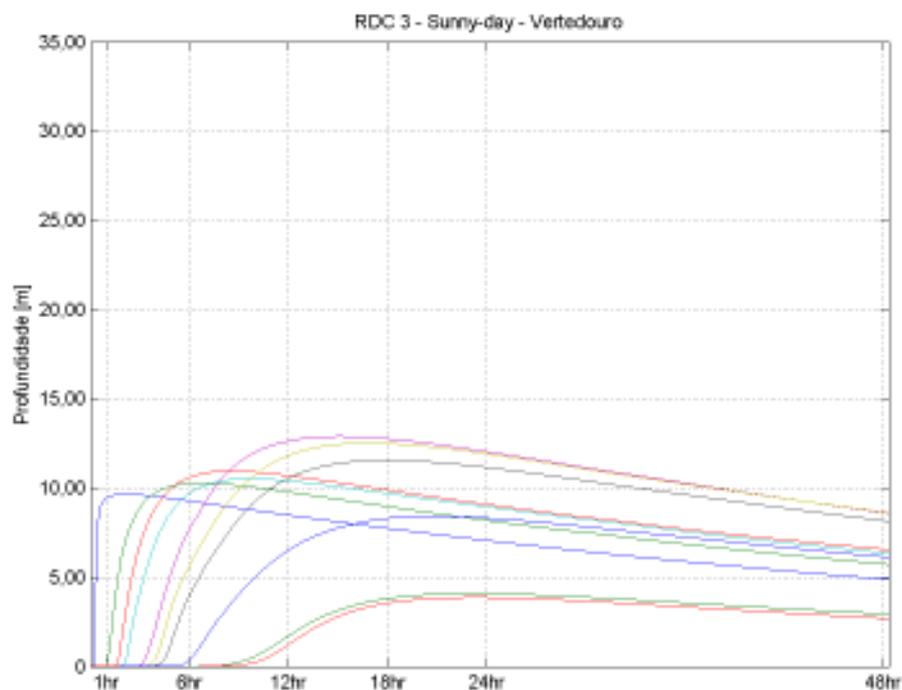
Figura 35. Profundidade da onda propagada. RPB 2 (*Sunny Day*).

O tempo inundado para o RPB 2 (*Sunny Day*) é quantificado a partir da permanência temporal da onda de cheia superior a 10 m de profundidade. É perceptível que o grande volume d'água deslocado ao longo do vale a jusante condiciona um padrão energético diferenciado, ocorrendo abatimento das vazões. Permanecendo, contudo, altas profundidades de inundação por todo o vale a jusante.

Nas figuras abaixo está ilustrado o comportamento da onda de ruptura ao longo do vale a jusante da Barragem Paranoá para o modo RDC 3. A ruptura inicia numa Condição de Carregamento Normal com o reservatório na cota próxima a 1.000,65 [m-IBGE], devido ao colapso das estruturas civis do vertedouro controlado pelo sistema de comportas. Esse modo é uma análise determinística de um caso específico para a ruptura hipotética da Barragem Paranoá.



**Figura 36. Propagação de hidrogramas. RDC 3 (Sunny Day).**



**Figura 37. Profundidade da onda propagada. RDC 3 (Sunny Day).**

Do Apêndice 3 ao Apêndice 10 estão resumidos os resultados hidráulicos para as 10 seções transversais, indicadas nas cartas de inundação como ponto de interesse, para cada um dos dois



prováveis modos de ruptura. Os seguintes parâmetros hidráulicos estão resumidos: Vazão de pico, Cota de pico, Tempo de pico e Tempo de Inundação.

A variável hidráulica de Perigo hidrodinâmico está representada nas cartas de inundação da Seção II do Volume IV do PSB (312-PCHPA-RT-PAE-002), referente ao PAE. O Perigo hidrodinâmico é o produto direto entre a velocidade e a profundidade do escoamento. É uma variável importante de tomada de decisão, a qual ilustra espacialmente a capacidade destrutiva de uma onda induzida por uma ruptura hipotética de barragem.

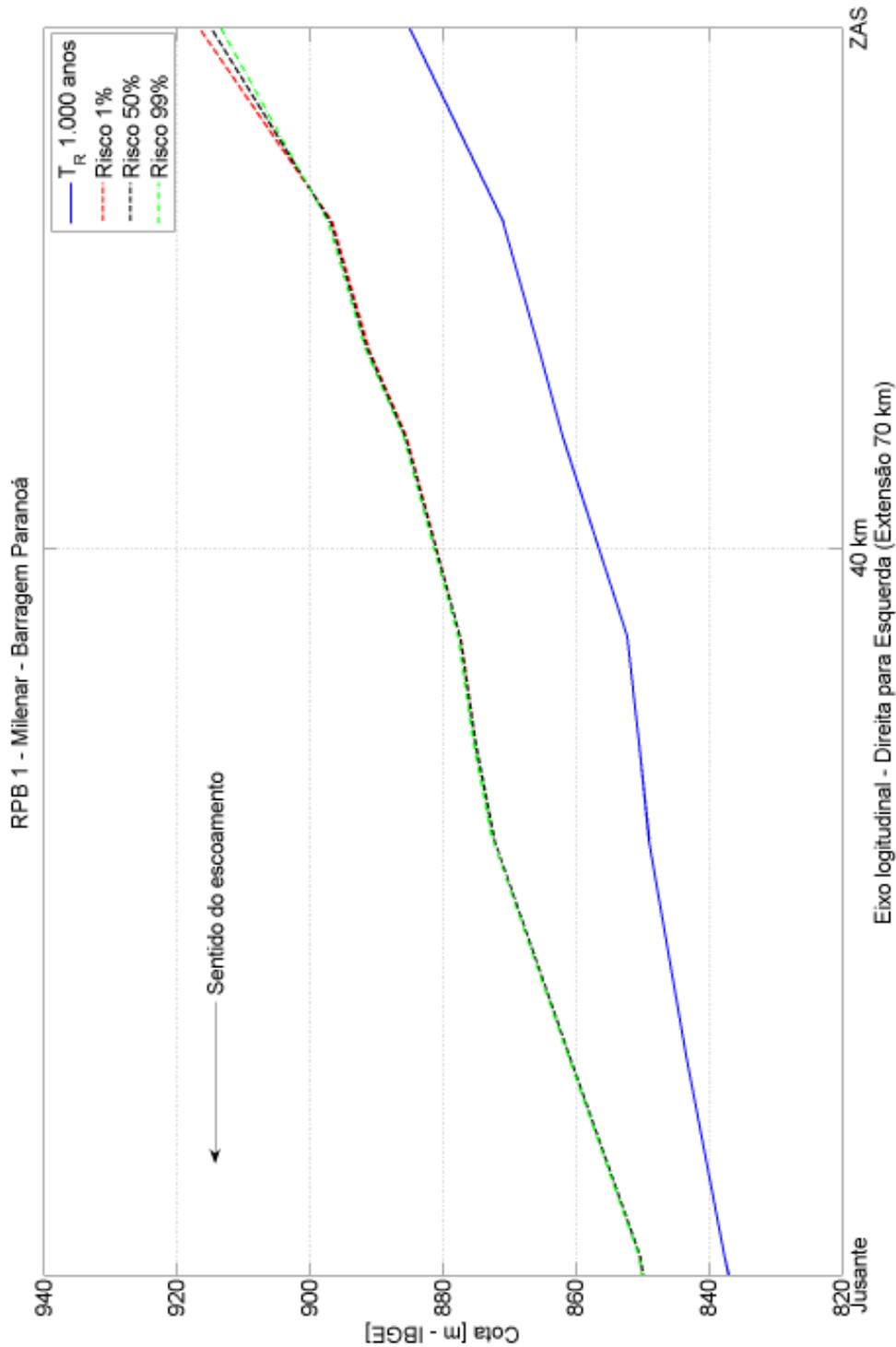
### 5.3 REGIÃO DE AMORTECIMENTO E EFEITO SINÉRGICO

Pela análise hidráulica não foram reconhecidas regiões de amortecimento das ondas de ruptura de cada modo, para cada probabilidade de excedência. O volume do reservatório da PCH Paranoá é capaz de gerar uma inundação de magnitude sem precedentes nos vales dos rios Paranoá e São Bartolomeu.

A geomorfologia do vale a jusante do barramento condiciona a convergência entre as inundações induzidas pela ruptura. Desta forma, independentemente do cenário de ruptura, as cotas de inundação serão as mesmas para todas as probabilidade de excedência analisadas. Isso indica que, por questões ligadas ao grande volume da onda de cheia e por aspectos geomorfológicos do vale a jusante, o resultado hidráulico da inundação não é condicionado predominantemente pela formação da brecha.

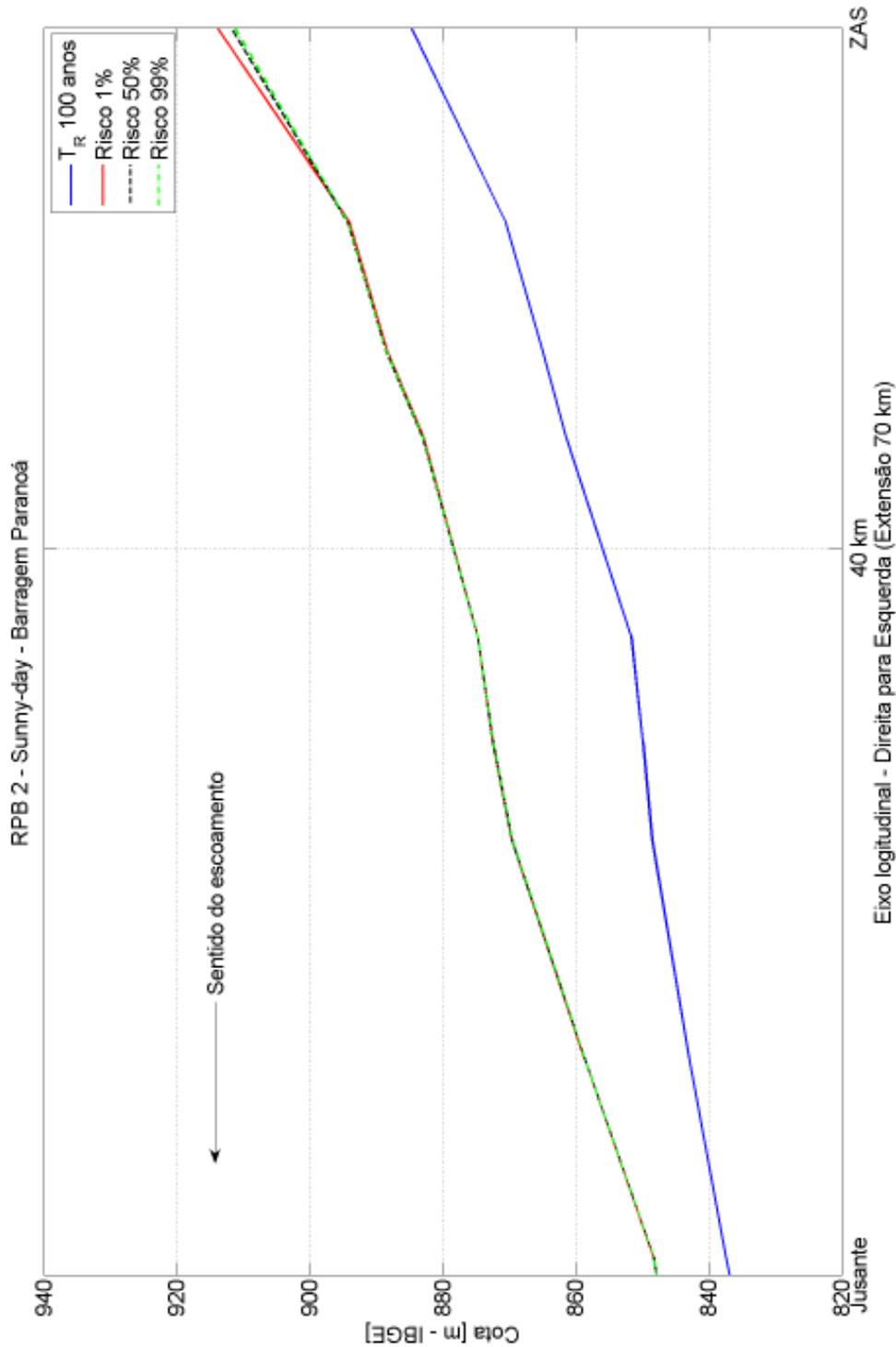
Os perfis hidráulicos estão ilustrados na Figura 38, Figura 39 e Figura 40 para os modos RPB 1, RPB 2 e RDC 3, respectivamente.





**Figura 38. Perfil hidráulico do modo RPB 1 (Milennar).**





**Figura 39. Perfil hidráulico do modo RPB 2 (Sunny Day).**



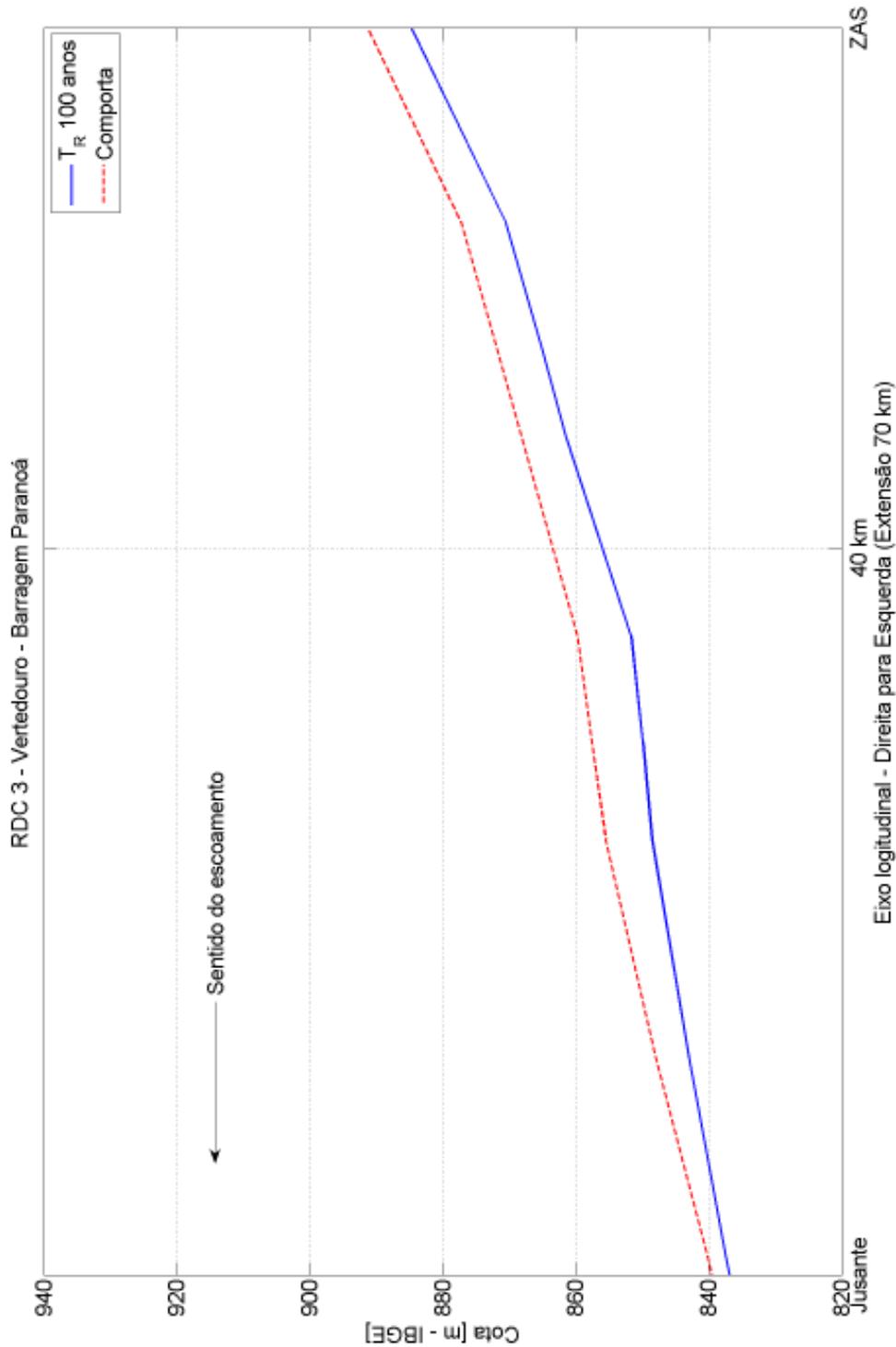


Figura 40. Perfil hidráulico do modo RDC 3 – Vertedouro e sistema de comportas.



## 6 REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, C.T. & BRUNNER, G.W. Dam failure analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS. In: Third Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference in Reno, NV, 2006.
- CHOW, V.T. 1959. Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- DNIT. Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.
- FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures - FEMA P-946. 2013.
- FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. Dam Safety Performance Monitoring Program. 2005.
- 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.
- FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters. In: Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1987 National Conference, ASCE, Williams burg, VA, pp. 570-575, 1987.
- FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters Revisited. In: First International Conference, Water Resources Engineering, Environmental and Water Resources Institute (EWRI), ASCE, Water Resources Engineering Proceeding, pp. 887-891, 1995.
- FROEHLICH, D. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 12. Pp. 1708-1721. 2008.
- GEE, M. Use of Breach Process Models to Estimate HEC-RAS Dam Breach Parameters. In: 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010
- GOODELL, C.R. "A Probabilistic Approach to Dam Breach Modeling". In: Proceedings, FloodRisk 2012 Conference, Rotterdam, The Netherlands, November, 2012.
- GOODELL, C.R. & FROEHLICH, D.C. "Comparison of Dam Breach Flood Uncertainty Calculations". In: Presentation, United States Society on Dams 2012, New Orleans, Louisiana, April, 2012.
- LARA, P.G. Metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura de barragens. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, 2016. 181 p.
- LARA, P.G.; GOODELL, C.R.; BONUMÁ, N.B. Previsão do risco de cota de inundação induzido por rompimento de barragens. In: XXXI - SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS – SNGB. Belo Horizonte, MG. 15 A 18 DE MAIO DE 2017.



- 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.
- MACDONALD, T.C & LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failure. Journal of Hydraulic Engineering. 110(5), pp. 567-586. 1984.
- 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.
- SCHAEFER, M.G. Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Breach Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification, Washington State Department of Ecology Publication Nº. 92-55E, USA, July 1992.
- SEO. STATE OF COLORADO DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES, Division of Water Resources Office of the State Engineer. “Guidelines for Dam Breach Analysis”, February 2010.
- SINGH, V.P.; SCARLATOS, P.D.; COLLINS, J.G.; JOURDAN, M.R. Breach Erosion of Earthfill Dams (BEED) Model. Natural Hazards, Volume 1, pp. 161-180. 1988.
- 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.
- SOUZA, C.F.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação hidrodinâmica via aquisição remota de dados. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, SP, v. 1, n. 1, p.1-12, nov. 2007.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. Training Documents – Using HEC-RAS for Dam Break Studies. TD-39, USCE, August 2014.
- USACE-HEC. River Analysis System, HEC-RAS v4.1 – Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 351p, USA, 2010.
- U.S. BUREAU OF RECLAMATION. Downstream hazard classification guidelines. ACER Technical Memorandum. No. 11, Denver. 1988.
- VON THUN J.L. & GILLETE, D.R. Guidance on breach parameters. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, 17p. Denver, CO, USA, 1990.
- WAHL, T.L. “Uncertainty of Prediction of Embankment Dam Breach Parameters”, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol 130, No. 5, pp 389-397. 2004.



## 7 APÊNDICES

### Apêndice 1. Resumo técnico do modelo numérico HEC-RAS truncado.

<b>Tipo de simulação numérica</b>	<b>Unidirecional 1D.</b>
<b>Número de seções transversais</b>	9
<b>Coeficiente de Manning</b>	Planície e área inundadas: 0,090 Canal principal: 0,045
<b>Parâmetros LPI – Local Partial Inertia</b>	m = 8 Limite de Froude para eliminação do termo de aceleração = 1,00
<b>Precisão altimétrica do MDT</b>	2,50 m
<b>Passo temporal do modelo HEC-RAS</b>	20 sec.
<b>DATUM vertical da barragem</b>	IBGE (zero de Imbituba/SC)
<b>DATUM vertical do MDT</b>	IBGE (zero de Imbituba/SC)

### Apêndice 2. Resumo técnico do modelo numérico HEC-RAS completo.

<b>Tipo de simulação numérica</b>	<b>Unidirecional 1D, com uso de áreas de armazenamento laterais (Quase-2D).</b>
<b>Número de seções transversais</b>	314
<b>Espaçamento médio</b>	250 m
<b>Coeficiente de Manning</b>	Planície e área inundadas: 0,125 Canal principal: 0,045
<b>Parâmetros LPI – Local Partial Inertia</b>	m = 8 Limite de Froude para eliminação do termo de aceleração = 1,60
<b>Precisão altimétrica do MDT</b>	2,00 m
<b>Passo temporal do modelo HEC-RAS</b>	15 sec.
<b>DATUM vertical da barragem</b>	IBGE (zero de Imbituba/SC)
<b>DATUM vertical do MDT</b>	IBGE (zero de Imbituba/SC)



**Apêndice 3. RBP 1 – Milenar. Vazões de pico [m³/s].**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%
	[m³/s]		
65395	69288	60912	48151
55906	35576	37663	35460
49693	24224	24944	25792
45366	23487	24110	24805
35701	20392	20738	21317
30537	17633	17786	18317
25764	16486	16526	17043
15079	15390	15362	15795
5418	14761	14692	15056
4464	14736	14666	15026

**Apêndice 4. RPB 1 – Milenar. Cotas de pico.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%
	[m – IBGE]		
65395	916,58	914,80	913,38
55906	896,55	896,85	897,22
49693	891,07	891,32	891,61
45366	885,40	885,57	885,84
35701	877,39	877,42	877,74
30537	875,11	875,11	875,42
25764	872,25	872,25	872,55
15079	860,85	860,81	861,02
5418	850,35	850,31	850,50
4464	849,89	849,85	850,05

**Apêndice 5. RPB 1 – Milenar. Tempo de pico.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%
	[h]		
65395	0,52	1,47	1,97
55906	3,82	3,93	4,18
49693	4,57	4,73	4,98
45366	5,47	5,60	5,95
35701	8,25	8,37	8,62
30537	9,22	9,33	9,55
25764	9,85	9,97	10,17
15079	12,17	12,28	12,43
5418	13,43	13,58	13,70
4464	13,45	13,60	13,72



**Apêndice 6. RPB 1 – Milenar. Tempo inundado.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%
	[h]		
65395	21,90	22,10	24,80
55906	25,78	27,28	30,40
49693	29,27	32,47	37,33
45366	29,15	31,83	36,17
35701	41,50	44,15	45,27
30537	41,70	43,53	44,67
25764	39,52	42,92	44,07
15079	30,25	32,07	35,18
5418	14,25	14,55	16,53
4464	13,93	14,03	15,97

**Apêndice 7. RPB 2 e RDC 3 – Sunny-day. Vazão de pico.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%	COMP
	[m³/s]			
65395	54268	45369	38282	2224
55906	24425	26410	26296	2025
49693	18767	19226	19157	1956
45366	18106	18501	18415	1932
35701	15629	15846	15755	1834
30537	13560	13660	13585	1757
25764	12603	12604	12557	1726
15079	11788	11736	11714	1694
5418	11277	11192	11192	1673
4464	11259	11173	11173	1672

**Apêndice 8. RPB 2 e RDC 3 – Sunny-day. Cotas de pico.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%	COMP
	[m – IBGE]			
65395	913,87	911,78	911,25	891,25
55906	894,01	894,26	894,22	877,23
49693	888,39	888,62	888,57	871,81
45366	882,84	883,00	882,94	868,10
35701	874,78	874,79	874,75	859,76
30537	872,48	872,47	872,43	857,60
25764	869,64	869,61	869,59	855,47
15079	858,73	858,67	858,67	847,94
5418	848,35	848,30	848,30	840,14
4464	847,88	847,83	847,83	839,48



**Apêndice 9. RPB 2 e RDC 3 – Sunny-day. Tempo de pico.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%	COMP
	[h]			
65395	0,42	0,73	1,93	2,17
55906	3,83	3,90	4,42	6,58
49693	4,72	4,73	5,28	8,40
45366	5,60	5,58	6,13	9,53
35701	8,47	8,40	9,00	15,00
30537	9,55	9,50	10,10	16,67
25764	10,20	10,17	10,77	17,80
15079	12,60	12,57	13,20	20,70
5418	13,98	13,97	14,58	23,07
4464	14,02	13,98	14,62	23,17

**Apêndice 10. RPB 2 e RDC 3 – Sunny-day. Tempo inundado.**

Código do ponto de interesse (Carta de inundação)	1%	50%	99%	COMP
	[h]			
65395	16,20	16,40	18,00	NDA*
55906	20,75	20,98	22,42	5,72
49693	23,12	23,67	25,20	12,28
45366	23,40	23,85	25,27	9,03
35701	33,02	33,97	35,37	30,38
30537	32,92	34,02	35,50	28,52
25764	31,48	32,50	33,95	22,12
15079	24,77	25,30	26,43	NDA*
5418	9,90	9,88	10,25	NDA*
4464	9,75	9,65	9,97	NDA*

\*NDA – Não atinge a condição de inundação.



# FICHAS DE AÇÕES DE EMERGÊNCIA

**PCH Paranoá**

CEB Geração