

# MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO PARAÓPEBA

RELATÓRIO I

MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SEDIMENTOMÉTRICO

ABRIL/2019



---

**CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL**

**MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO PARAÓPEBA**

**RELATÓRIO 01: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico**

**BELO HORIZONTE**  
**ABRIL/2019**

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

**Ministro de Estado**

Bento Albuquerque

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

**Diretor Presidente**

Esteves Pedro Colnago

**Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial**

Antônio Carlos Bacelar Nunes

**Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

José Leonardo Silva Andriotti - interino

**Diretor de Relações Institucionais e Desenvolvimento**

Fernando Pereira de Carvalho - interino

**Diretor de Administração e Finanças**

Juliano de Souza Oliveira - interino

**Chefe do Departamento de Hidrologia**

Frederico Cláudio Peixinho

**Chefe do Departamento de Gestão Territorial**

Maria Adelaide Mansini Maia

**SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE BELO HORIZONTE**

**Superintendente Regional**

Marlon Marques Coutinho - interino

**Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial**

Marlon Marques Coutinho

**Gerente de Geologia e Recursos Minerais**

Marcelo de Souza Marinho

**Gerente de Relações Institucionais e Desenvolvimento**

Júlio Murilo Martino Pinho

**Gerente de Administração e Finanças**

Margareth Marques dos Santos

---

## **CRÉDITOS**

**Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial** – Marlon Marques Coutinho

### **Equipe Técnica**

**Supervisor de Hidrologia** - Fernando Silva Rego

### **Equipe de Escritório**

Alice Silva de Castilho; Artur José Soares Matos; Breno Guerreiro da Motta; Éber José de Andrade Pinto; Elizabeth Guelman Davis; Luana Kessia Lucas Alves Martins; Márcio de Oliveira Cândido; Maria Letícia Rabelo Alves Patrus

Alessandro José da Silva; Ivete Souza do Nascimento; José Geraldo Alves Franco; Juliani Costa Araújo Marinho; Luiza Clemente Cardoso; Maurina Soares Siqueira de Freitas

### **Equipe de Campo**

Alexandre Henrique, Aline da Silva Garcia, Amarildo Gomes De Assis, Barbara H De O Lobo Cordeiro, Bruno Henrique F Ribeiro, Edilson Francisco Siqueira, Eduardo Soares Feliciano Dos Santos, Elenildo Aparecido Goncalves, Emília Yumi Kawaguchi, Francisco Magela Dias, Frederico Ernesto C Carvalho, Grace Kelly Amaral Ventura, Gustavo Guedes De Faria Cruz, Helton Roberto Gomes De Sousa, Jackson Tiago Ribeiro, Janaína Gomes Pires Da Silva, Joilson Santana Barbosa, José Arcinei Bardini, Jose Júlio De Souza, Juliana Lourenção, Luana Souza Serafim De Lima, Luis Carlos Pereira De Oliveira, Maíra Uchoa Pinto Dos Santos, Marco Antônio Leitão Pimentel, Michele Bruna De Souza Nascimento, Oscar Alves Da Silva, Robinson De Souza Marinho, Sidney Luiz Do Nascimento, Welington Cesário De Oliveira, Wesley Natan Da Rocha, William Jhones G. Assis

### **Equipe de Laboratório**

**Supervisora** - Magda Cristina Ferreira Pinto

Álvaro Cesar Elias Mendes e Lorena Michele Oliveira Vaz

### **Capa**

Elizabeth Almeida Cadete Costa

---

## Sumário

1	Apresentação .....	5
2	Metodologia .....	6
3	Caracterização da Região .....	8
3.1	Caracterização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba .....	8
3.2	Caracterização da rede de monitoramento existente .....	12
3.3	Caracterização da barragem .....	24
3.4	Caracterização do monitoramento após a ruptura da barragem .....	26
3.4.1	40740000 – Alberto Flores .....	29
3.4.2	Mário Campos .....	30
3.4.3	BR-381 e BR-262 .....	31
3.4.4	Montante da BR-262 .....	32
3.4.5	40800001 – Ponte Nova do Paraopeba .....	34
3.4.6	40850000 – Ponte da Taquara .....	35
4	Resultados .....	37
4.1.1	Monitoramento de precipitação .....	37
4.1.2	Monitoramento de níveis .....	42
4.1.3	Monitoramento de vazões .....	43
4.1.4	Monitoramento de 5 parâmetros de qualidade da água <i>in loco</i> .....	51
4.1.5	Monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão .....	53
4.1.6	Monitoramento da granulometria do material em suspensão .....	66
4.1.7	Monitoramento da granulometria do material de fundo .....	69
4.1.8	Calculo da descarga sólida total .....	70
5	Considerações Finais .....	71
6	Referências Bibliográficas .....	74

## 1 Apresentação

No dia 25 de janeiro de 2019, por volta as 12:30h, houve o rompimento da barragem de rejeitos B1 da mina de minério de ferro do Córrego do Feijão da Vale. Esta barragem está localizada na bacia do ribeirão Ferro Carvão, que é afluente do rio Paraopeba pela margem direita, que por sua vez é afluente do rio São Francisco e um dos formadores do reservatório de Três Marias.

A CPRM, como SGB, no dia 26 de janeiro, mobilizou sua equipe para o registro do evento. Este registro consistiu:

- Pela equipe de Hidrologia, no monitoramento:
  - dos níveis e vazões do rio Paraopeba imediatamente a montante e a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão;
  - da precipitação em vários pontos da bacia;
  - de 5 parâmetros de qualidade de água *in loco*: temperatura, turbidez, pH, OD, condutividade elétrica;
  - de concentração de sedimentos em suspensão;
  - da granulometria em suspensão e de fundo.
- Pela equipe de geoquímica:
  - Realização de campanhas de amostragem de água e de sedimentos de corrente em vários pontos da bacia: no rio Paraopeba a montante e jusante da confluência do ribeirão Ferro Carvão, na bacia do ribeirão Ferro Carvão, com a realização de vários parâmetros:
    - Água - 27 cátions e 7 ânions;
    - Sedimentos – 53 elementos.

À medida que o evento foi registrado, os resultados foram sendo apresentados em boletins diários na página da CPRM: [http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_rio\\_paraopeba.php](http://www.cprm.gov.br/sace/index_rio_paraopeba.php).

O monitoramento hidrológico e sedimentométrico da bacia do rio Paraopeba foi possível devido a parceria existente entre a CPRM e ANA na operação da Rede Hidrometeorológica Nacional na região.

Este relatório apresenta os resultados do monitoramento feito pela equipe de Hidrologia no período de 26 de janeiro a 31 de março de 2019. Os resultados do monitoramento feito pela equipe de geoquímica estão apresentados em outro relatório: Relatório II – Monitoramento Geoquímico.

Este relatório está organizado em 6 capítulos, a saber:

- Primeiro – Apresentação;
- Segundo – Metodologia;
- Terceiro – Caracterização da Região;
- Quarto – Resultados;
- Quinto – Considerações Finais;
- Sexto – Referências Bibliográficas.

## 2 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia de medições realizadas no campo: desde a obtenção de chuva, nível, medições de descarga líquida, coleta de amostras de água e sedimentos; e análises laboratoriais de turbidez, granulometria de sedimentos em suspensão e de fundo e concentração de sedimentos em suspensão.

Os **níveis dos rios** obtidos através de réguas linimétricas e de sensores de pressão automáticos com transmissão de dados via satélite.

As **medições de vazão** foram feitas com molinetes e equipamentos acústicos: SONTEK M9 e RDI RiverRay.

A **coleta de amostras de água** para realização de análise de parâmetros *in loco* e de concentração de sedimentos em suspensão foi feita como uso de amostradores do tipo US-D-59. As amostras para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão foram, quando possível, integradas e realizadas segundo o método de igual incremento de descarga (IID).

A determinação dos 5 parâmetros de qualidade da água *in loco* foi feita com a sonda multiparamétrica YSI EXO1 e Hydrolab MS5. Para verificar a homogeneidade da seção, foram determinados os parâmetros em vários pontos da seção, em geral, em três verticais: centro, margem esquerda e margem direita; e em três profundidades: superfície, meia profundidade e acima do fundo. Porém, os resultados divulgados representaram a média dos parâmetros nos vários pontos da seção.

Os valores de turbidez encontrados em alguns casos foram maiores do que 1.500NTU, sendo necessária a diluição da amostra. Ainda assim as amostras foram encaminhadas para o laboratório e a turbidez feita no turbidímetro de bancada que tem maior precisão.

Para as amostras de água coletadas foram determinadas a concentração e a granulometria do sedimento em suspensão.

Na **coleta do sedimento de fundo** foram utilizados os amostradores tipo USBM-54 e Van Veen. As amostras de material de fundo foram coletadas nas mesmas verticais onde foram coletadas as amostras de material em suspensão.

As análises realizadas no laboratório foram as seguintes:

- Turbidez;
- Concentração de sedimentos em suspensão;
- Granulometria em Suspensão;
- Granulometria de Fundo.

A determinação de **turbidez** no laboratório foi feita com o equipamento Turbidímetro HACH TL2360.

A determinação da **concentração de sedimentos em suspensão** foi feita pelo método Filtração/gravimetria, com o uso de Membrana filtrante de fibra de vidro tipo 934-AH

---

(porosidade 1,5  $\mu\text{m}$ ). Este ensaio realizado pela CPRM é acreditado pela CGCRE/INMETRO (CRL 0463).

A determinação de **granulometria em suspensão** foi feita pelo método de espalhamento a laser, com o uso do equipamento Granulômetro a laser Malvern MS 2000.

A determinação de **granulometria do material do fundo** foi feita por peneiramento.

Foi realizado também o **monitoramento pluviométrico** em alguns pontos da bacia, a chuva foi obtida através de pluviômetros convencionais e automáticos do tipo báscula, com transmissão de dados via satélite. Além disso, foi utilizada a precipitação espacializada obtida através de informações de satélite. Os dados de precipitação estimados por satélite foram obtidos a partir do produto MERGE disponibilizado pelo INPE/CPTEC. Este produto é gerado utilizando dados do Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Nos mapas de chuva foram utilizados os dados horários do MERGE com GPM-IMERG V04 gerados na etapa mais precisa denominada LATE. Os dados são disponibilizados em formato grib2 com resolução horizontal de 5 km.



### 3 Caracterização da Região

Este capítulo apresenta a Caracterização:

- da bacia hidrográfica do rio Paraopeba,
- da rede de monitoramento existente,
- da barragem,
- do monitoramento após a ruptura da barragem.

#### 3.1 Caracterização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba

A bacia do rio Paraopeba está localizada na região central do estado de Minas Gerais, próxima a Região Metropolitana de Belo Horizonte, Figura 1.

O rio Paraopeba é afluente da margem direita do rio São Francisco e é um dos formadores do reservatório da usina de Três Marias da CEMIG.

Os principais usos da água da bacia do rio Paraopeba são: geração de energia elétrica; abastecimento público; abastecimento industrial, com destaque para mineração e irrigação, Figura 2.

A bacia do rio Paraopeba possui importantes mananciais de abastecimento da RMBH, que tem da ordem de 5,15M habitantes. Três de seus afluentes tem em suas bacias, reservatórios usados para este abastecimento: rio Manso (Manso); ribeirão Juatuba (Serra Azul) e rio Betim (Várzea das Flores). O próprio Paraopeba tem uma captação sazonal para abastecimento da RMBH, a qual foi suspensa após a ruptura da barragem. Vide Figura 3.

O rio Paraopeba é utilizado também para o abastecimento da cidade de Pará de Minas, com cerca de 92mil habitantes, dentre outras.

Além de ser um dos formadores do reservatório de Três Marias, no rio Paraopeba existem as usinas hidrelétricas de Salto do Paraopeba e Retiro Baixo, e a barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé.

A bacia do rio Paraopeba tem área de drenagem da ordem de 13.640km<sup>2</sup>, sendo que a montante do ribeirão Ferro Carvão, onde houve a ruptura da barragem a área é da ordem de 4.000km<sup>2</sup>. Ressalta-se que o ribeirão Ferro Carvão é afluente pela margem direita do rio Paraopeba, e sua bacia tem área de 32,8km<sup>2</sup>, e a vazão média em sua foz é da ordem de 600L/s, obtida através de regionalização de vazão.

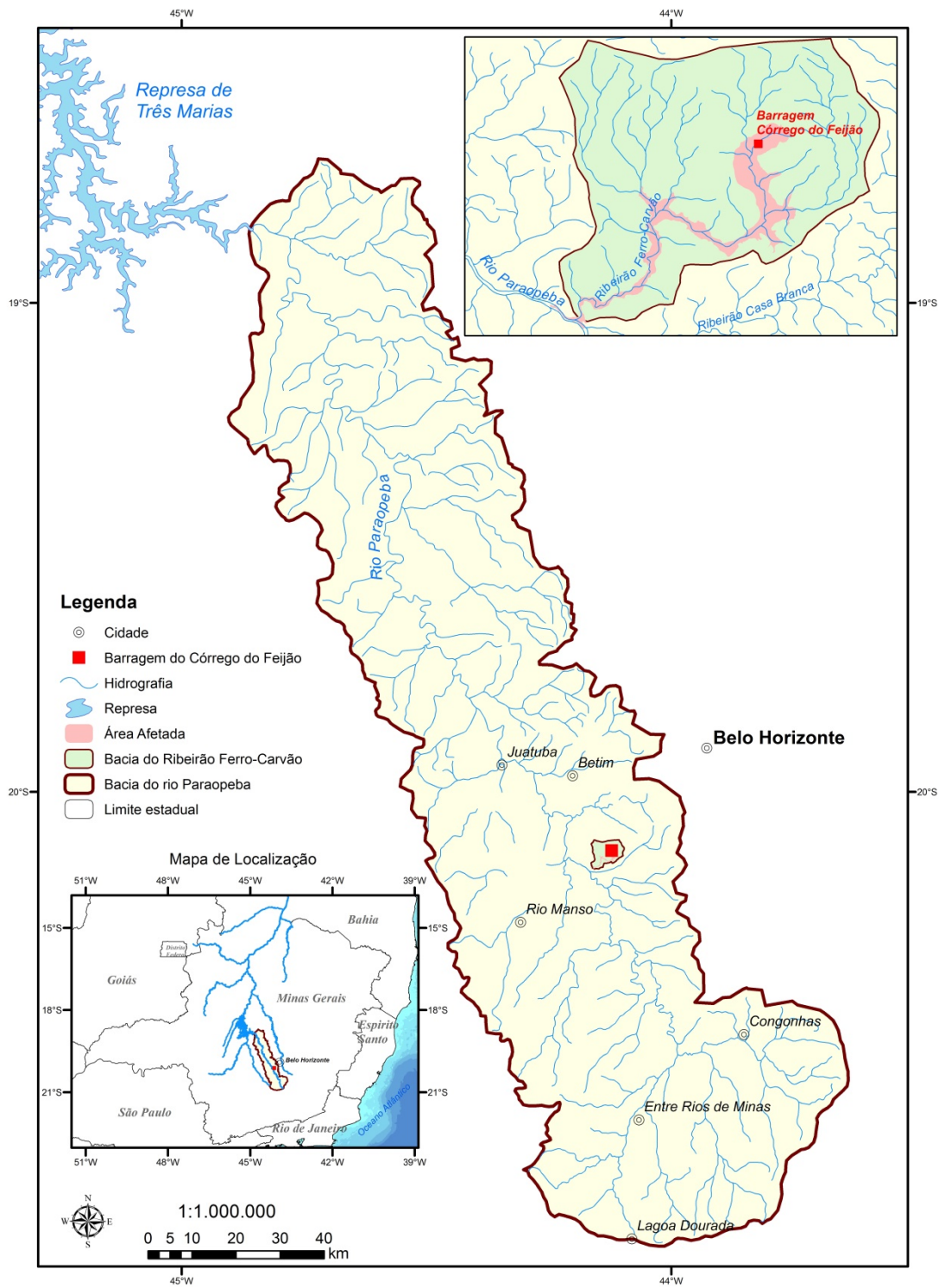


Figura 1 – Localização da bacia do Paraopeba

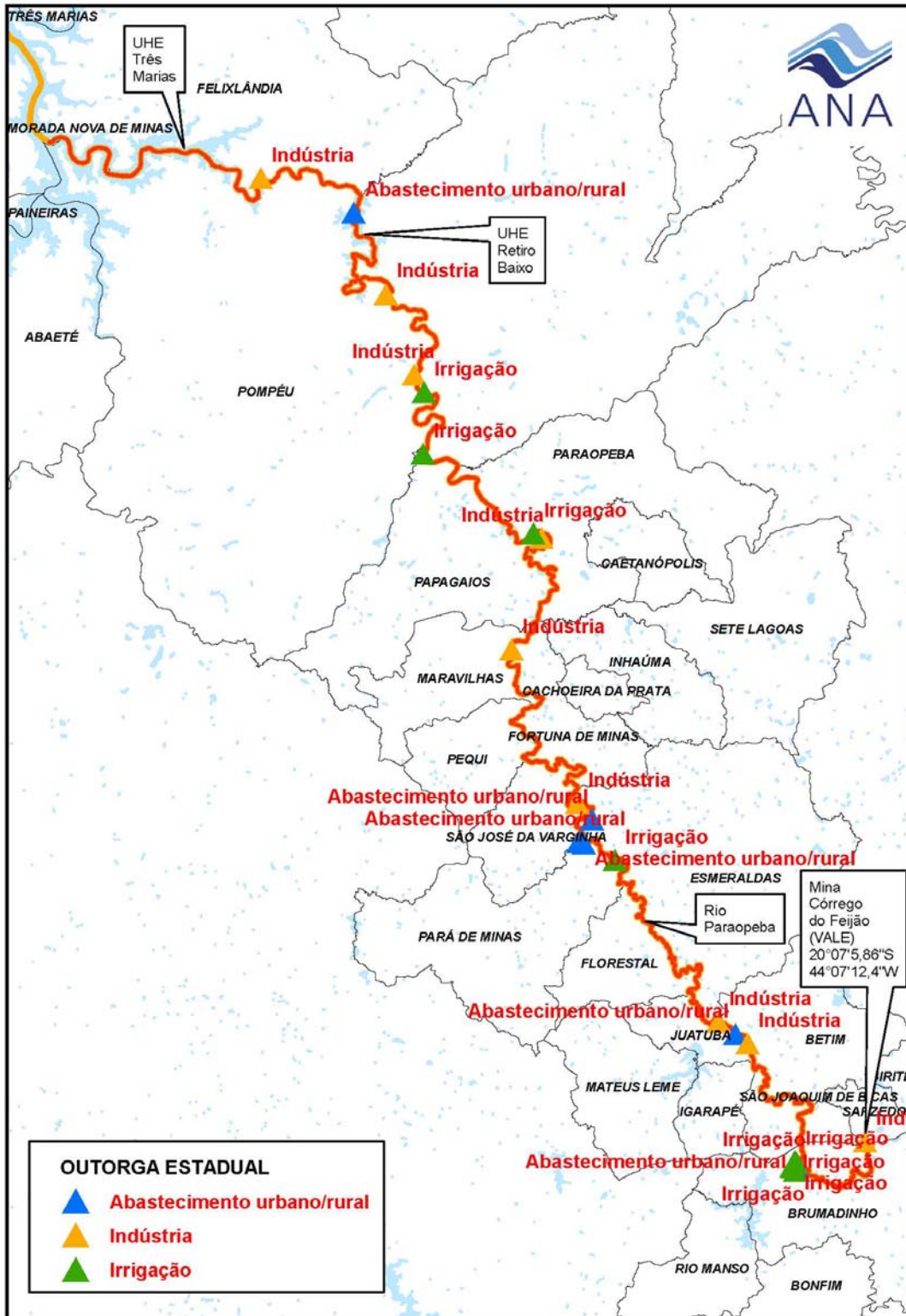


Figura 2 – Principais Usos da água na bacia do rio Paraopeba – Fonte: ANA

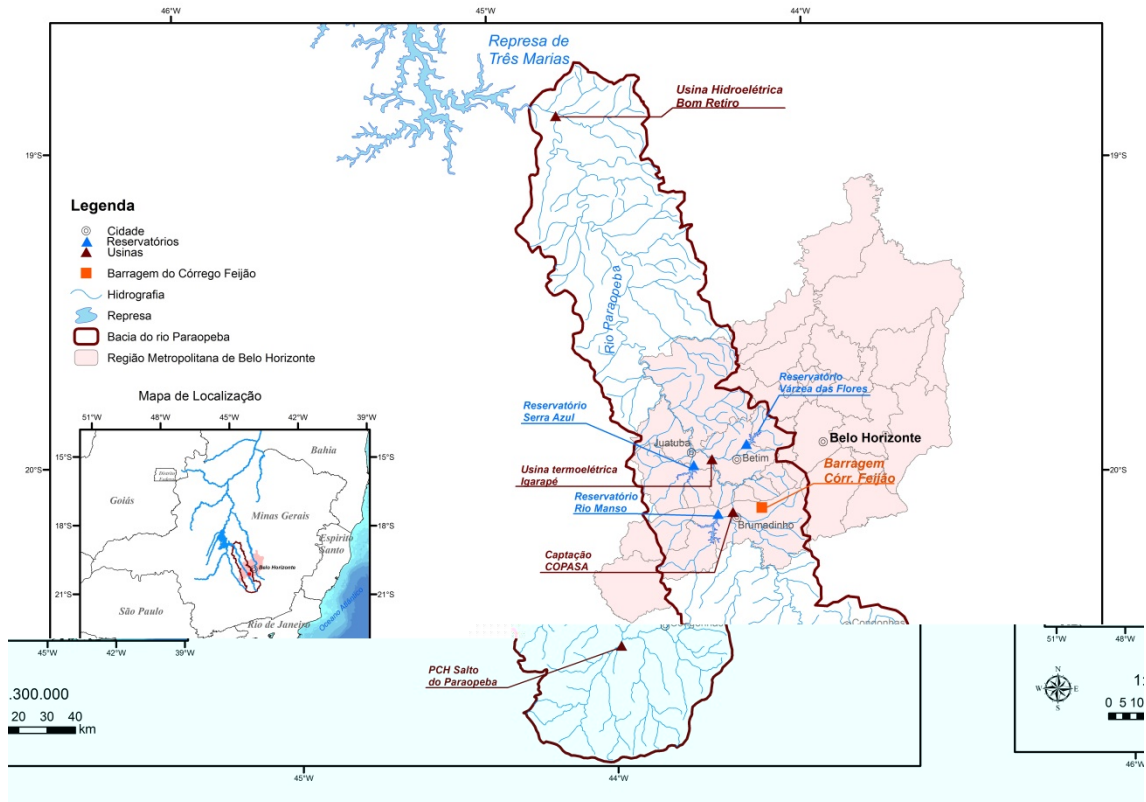


Figura 3 – Principais mananciais de abastecimento da RMBH e empreendimentos elétricos da bacia do rio Paraopeba

---

### **3.2 Caracterização da rede de monitoramento existente**

A rede hidrometeorológica nacional – RHN, a qual é gerenciada pela ANA, na bacia do rio Paraopeba, é operada pela CPRM. Esta rede é formada por estações: pluviométricas, fluviométricas e sedimentométricas. Já a rede de qualidade da água na bacia é operada pelo IGAM em parceria com a ANA.

Ressalta-se que existem vários pontos de monitoramento na bacia pertencentes a diversos órgãos a saber: CEMIG, COPASA, INMET, CEMADEN, dentre outros.

Importante ressaltar também que a bacia de um dos afluentes do rio Paraopeba, ribeirão Juatuba, foi escolhida há mais de 40 anos como Representativa do Cerrado de Minas Gerais. Nesta bacia há uma rede mais densa de monitoramento contando também com estações climatológicas e piezométricas.

A RHN da bacia do rio Paraopeba está apresentada nas Tabelas 1 e 2 e nas Figuras 4 e 5.

Nas estações fluviométricas da RHN são coletados dados diários de nível dos rios, e calculadas as vazões diárias obtidas através de curvas chaves, que são estabelecidas a partir de medições de vazão realizadas 3 a 4 vezes por ano durante as visitas de inspeção. Nestas visitas são feitas também análises de 5 parâmetros de qualidade da água *in loco*: temperatura da água, pH, Oxigênio Dissolvido e Condutividade Elétrica.

Nas estações fluviométricas: Belo Vale – 40710000, Ponte Nova do Paraopeba – 40800001 e Mateus Leme – 40822995 são realizadas medições de descarga sólida durante as visitas de inspeção, quando são coletadas amostras de água para determinação da concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela 1 – RHN na bacia do rio Paraopeba – Estações Fluviométricas

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>	<b>CURSO D'ÁGUA</b>	<b>AD (km<sup>2</sup>)</b>	<b>LAT</b>	<b>LONG</b>
40549998	SAO BRAS DO SUACUI-MONTANTE	RIO PARAOPEBA	446	-20:36:17	-043:54:31
40579995	CONGONHAS-LINIGRAFO	RIO MARANHAO	613	-20:31:07	-043:50:08
40680000	ENTRE RIOS DE MINAS	RIO BRUMADO	469	-20:39:37	-044:04:19
40710000	BELO VALE	RIO PARAOPEBA	2690	-20:24:29	-044:01:16
40740000	ALBERTO FLORES	RIO PARAOPEBA	3945	-20:09:45	-044:09:38
40800001	PONTE NOVA DO PARAOPEBA	RIO PARAOPEBA	5680	-19:56:57	-044:18:19
40810400	FAZENDA LARANJEIRAS JUSANTE	CORREGO MATO FRIO	10,2	-20:05:39	-044:29:37
40810800	FAZENDA PASTO GRANDE	RIBEIRAO SERRA AZUL/FREITAS	54,7	-20:05:14	-044:26:15
40811100	JARDIM	RIBEIRAO SERRA AZUL	112,4	-20:02:51	-044:24:32
40821900	BOM JARDIM MONTANTE	RIBEIRAO SESMARIA	39,8	-19:59:43	-044:31:50
40822995	MATEUS LEME-ALDEIA	RIBEIRAO MATEUS LEME	89,4	-19:59:07	-044:26:22
40823500	SUZANA	RIBEIRAO MATEUS LEME	153	-19:57:41	-044:21:58
40850000	PONTE DA TAQUARA	RIO PARAOPEBA	8720	-19:25:23	-044:32:58

Tabela 2 – RHN na bacia do rio Paraopeba – Estações Pluviométricas

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>	<b>MUNICÍPIO</b>	<b>ALT (m)</b>	<b>LAT</b>	<b>LONG</b>
1944004	PONTE NOVA DO PARAOPEBA	BETIM	721	-19:57:20	-044:18:24
1944007	FAZENDA ESCOLA FLORESTAL	FLORESTAL	745	-19:52:47	-044:25:16
1944010	HORTO FLORESTAL	PARAOPEBA	733	-19:16:05	-044:24:06
1944026	BARRO PRETO	MATEUS LEME	846,7	-19:57:51	-044:27:07
1944027	JUATUBA	MATEUS LEME	716	-19:57:20	-044:20:04
1944031	PONTE DA TAQUARA	PARAOPEBA	624,3	-19:25:24	-044:32:50
1944048	MATEUS LEME	MATEUS LEME	868,6	-19:59:30	-044:25:26
1944049	PAPAGAIOS	PAPAGAIOS	703	-19:25:39	-044:43:12

Tabela 2 – RHN na bacia do rio Paraopeba – Estações Pluviométricas

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>	<b>MUNICÍPIO</b>	<b>ALT (m)</b>	<b>LAT</b>	<b>LONG</b>
1944055	BETIM	BETIM	822	-19:58:24	-044:11:17
1944059	FORTUNA DE MINAS	FORTUNA DE MINAS	729	-19:33:47	-044:26:49
1944062	FAZENDA SANTA RITA	MATEUS LEME	820	-19:58:58	-044:29:32
2043005	CONSELHEIRO LAFAIETE	CONSELHEIRO LAFAIETE	996	-20:39:54	-043:46:40
2043013	CONGONHAS-MONTANTE	CONGONHAS	871	-20:31:19	-043:49:48
2044007	ENTRE RIOS DE MINAS	ENTRE RIOS DE MINAS	885	-20:39:40	-044:04:14
2044008	MELO FRANCO	BRUMADINHO	761	-20:11:52	-044:07:15
2044012	IBIRITE	IBIRITE	1073	-20:02:34	-044:02:36
2044016	FAZENDA BENEDITO CHAVES	ITATIAIUÉ	944	-20:10:09	-044:30:54
2044019	FAZENDA VISTA ALEGRE	MATEUS LEME	913,4	-20:03:05	-044:27:06
2044020	CALAMBAU	ITAUNA	943	-20:04:06	-044:29:32
2044021	ALTO DA BOA VISTA	MATEUS LEME	905,2	-20:06:07	-044:24:04
2044024	FAZENDA CURRALINHO	MATEUS LEME	786,1	-20:01:23	-044:19:13
2044026	FAZENDA COQUEIROS	ITAUNA	974,7	-20:07:47	-044:28:28
2044041	FAZENDA LARANJEIRAS	ITAUNA	894,7	-20:06:08	-044:29:05
2044043	ESTIVA	MATEUS LEME	806,8	-20:00:01	-044:27:42
2044047	SERRA DA SAUDADE	MATEUS LEME	838,4	-20:01:26	-044:28:05
2044052	JARDIM	MATEUS LEME	806	-20:02:42	-044:24:28
2044053	ESCOLA DE VETERINARIA	MATEUS LEME	812	-20:04:01	-044:20:57
2044054	SERRA AZUL	MATEUS LEME	817,4	-20:05:12	-044:25:38

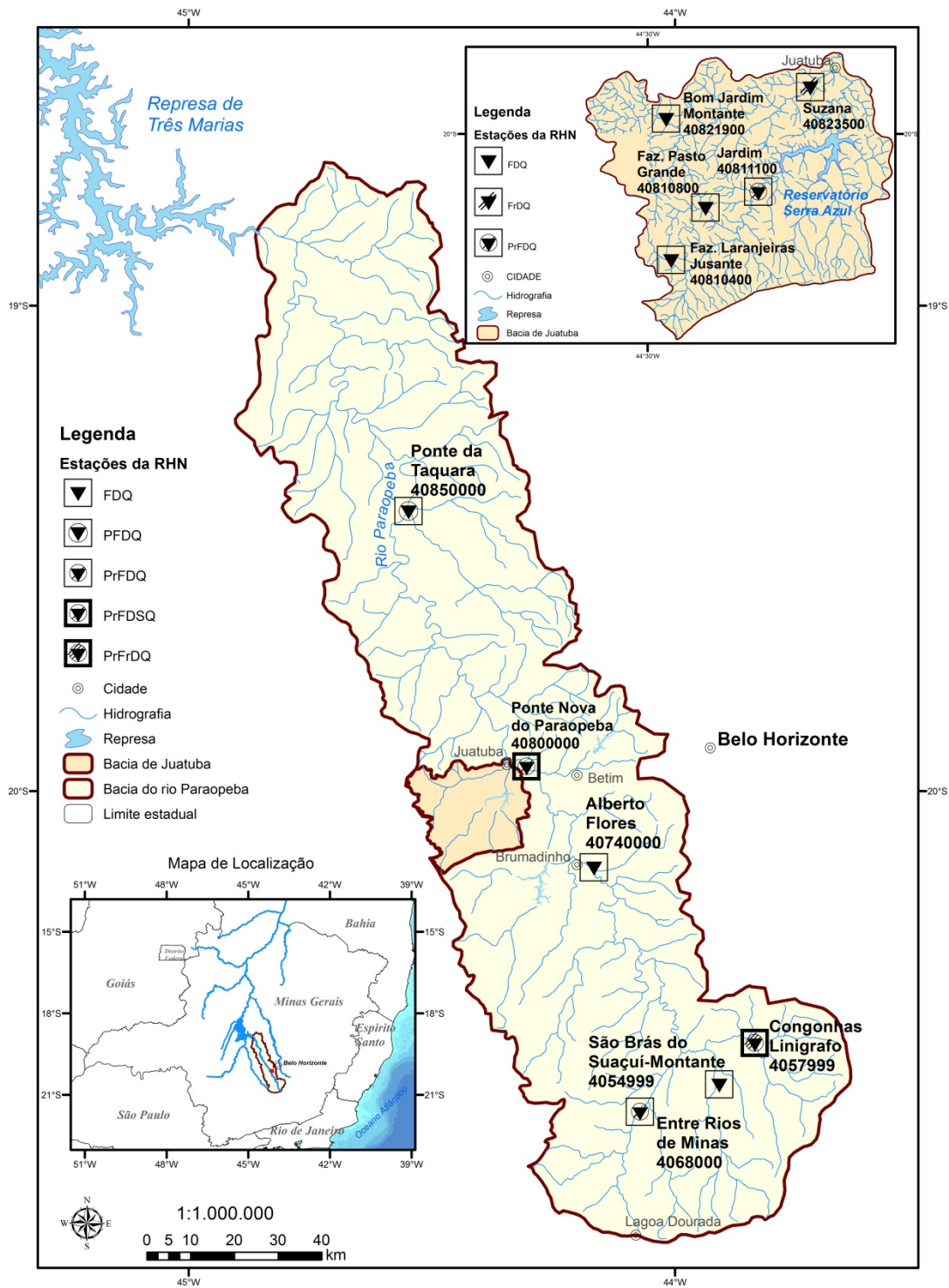


Figura 4 – RHN na bacia do rio Paraopeba – Estações Fluviométricas



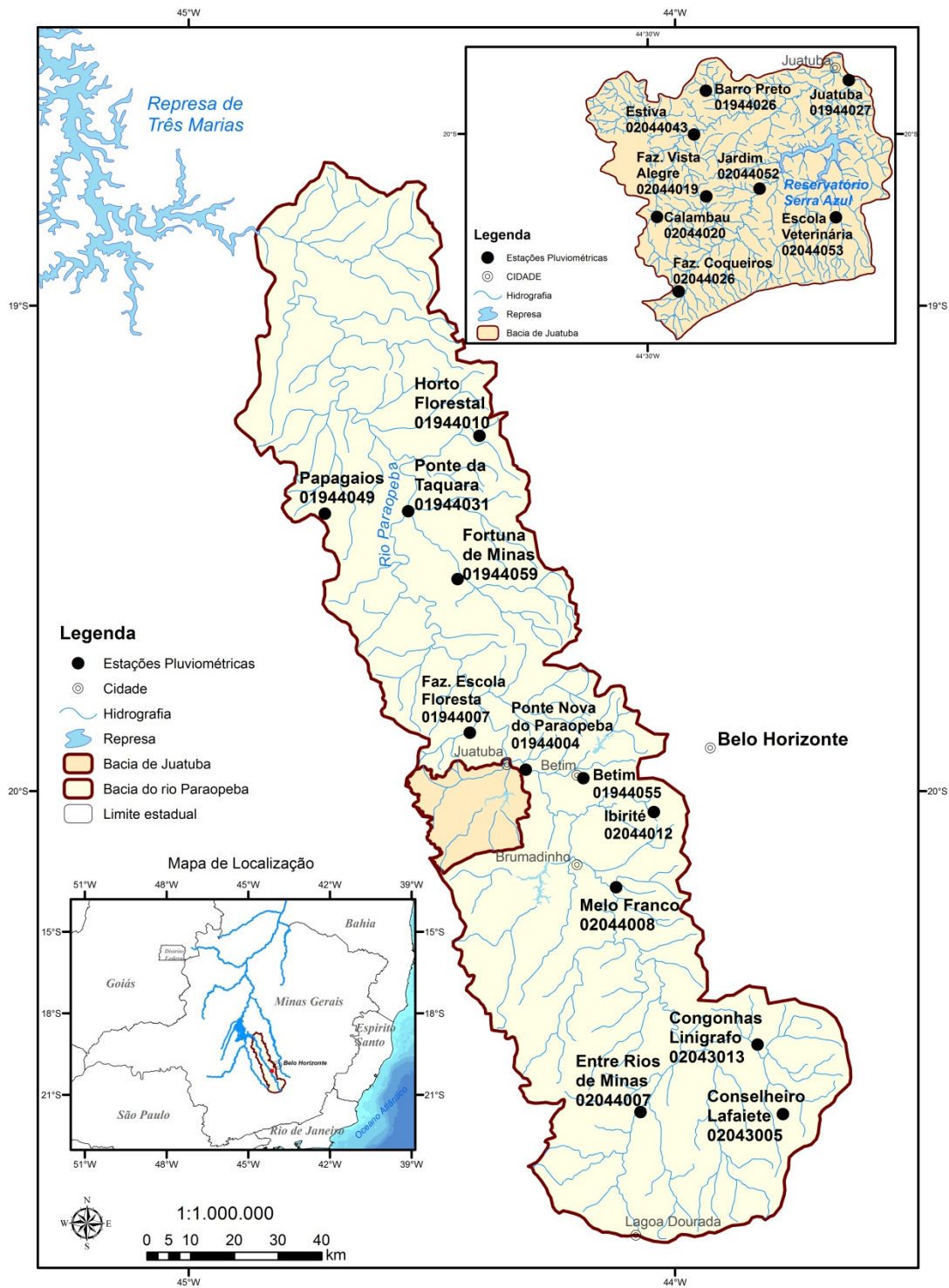


Figura 5 – RHN na bacia do rio Paraopeba – Estações Pluviométricas

A tabela 3 e a figura 6 apresentam as vazões médias mensais,  $Q_{mlt}$  e  $Q_{7,10}$  nas estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba pertencentes a RHN.

Tabela 3 – Vazões médias mensais,  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mlt}$  nos cursos d’água da bacia do rio Paraopeba

CÓDIGO	Q710	Qmlt	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
40549998	1,25	7,61	16,0	12,3	10,8	7,36	5,53	4,59	3,76	3,20	3,63	4,72	7,53	11,9
40680000	1,45	9,28	23,1	17,4	15,2	10,4	7,66	6,46	5,53	4,78	4,62	6,55	10,0	20,1
40710000	10,9	47,86	101,8	73,9	63,6	43,1	31,5	26,6	23,3	20,0	22,2	27,9	46,7	77,2
40740000	12,4	59,2	122,2	97,9	81,7	56,3	42,1	35,4	30,8	27,0	27,7	35,5	58,1	99,3
40800001	15,4	83,4	172,5	143,3	127,8	85,4	61,8	51,8	43,9	37,0	36,1	47,4	75,5	134,1
40850000	18,8	122,9	267,6	208,0	178,6	125,1	86,0	69,9	55,0	46,4	48,3	60,2	117,3	216,3

Fonte: Hidroweb-dados consistidos

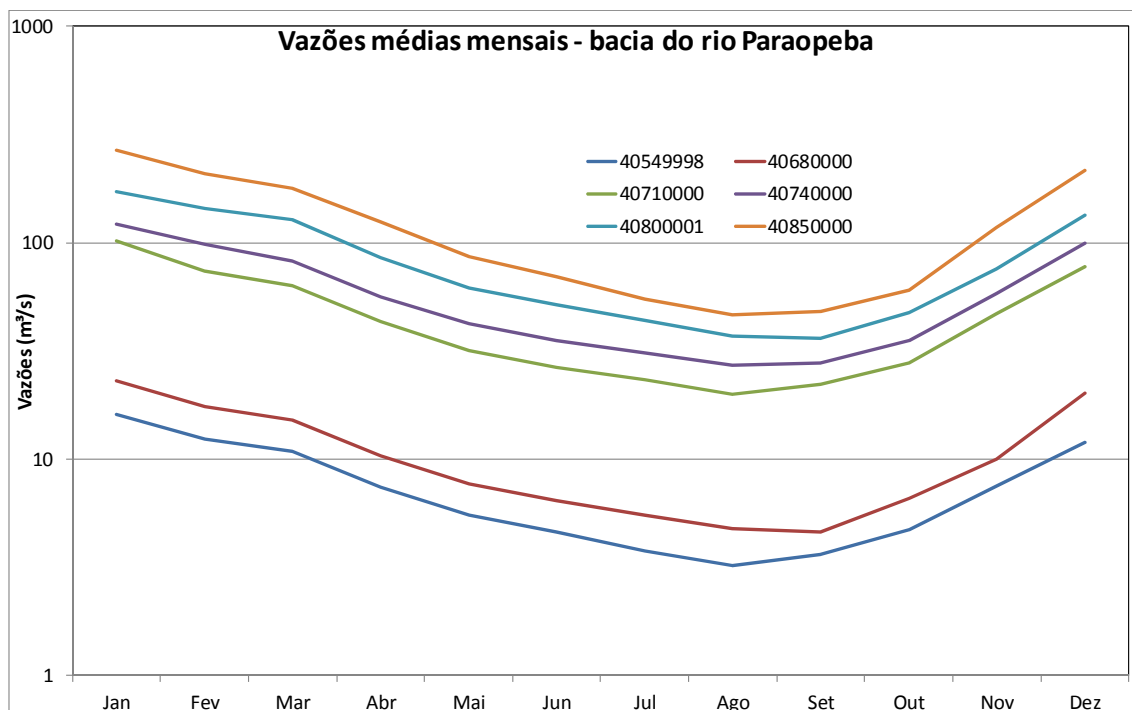


Figura 6 – Vazões médias mensais das estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba

As figuras 7 e 8 apresentam as isoietas anual e mensais da bacia do rio Paraopeba.

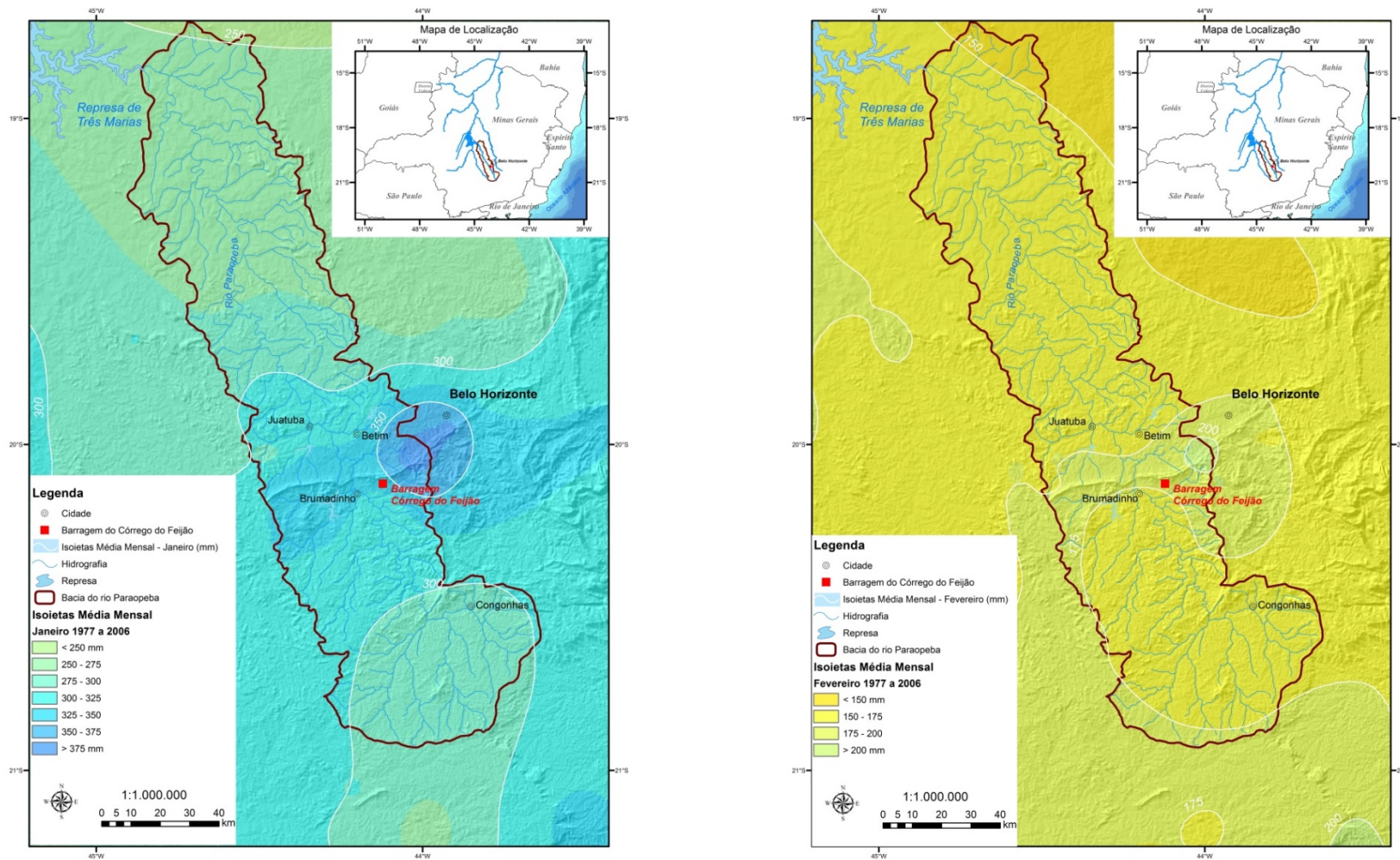


Figura 7 a – Isoietas mensais de janeiro e fevereiro

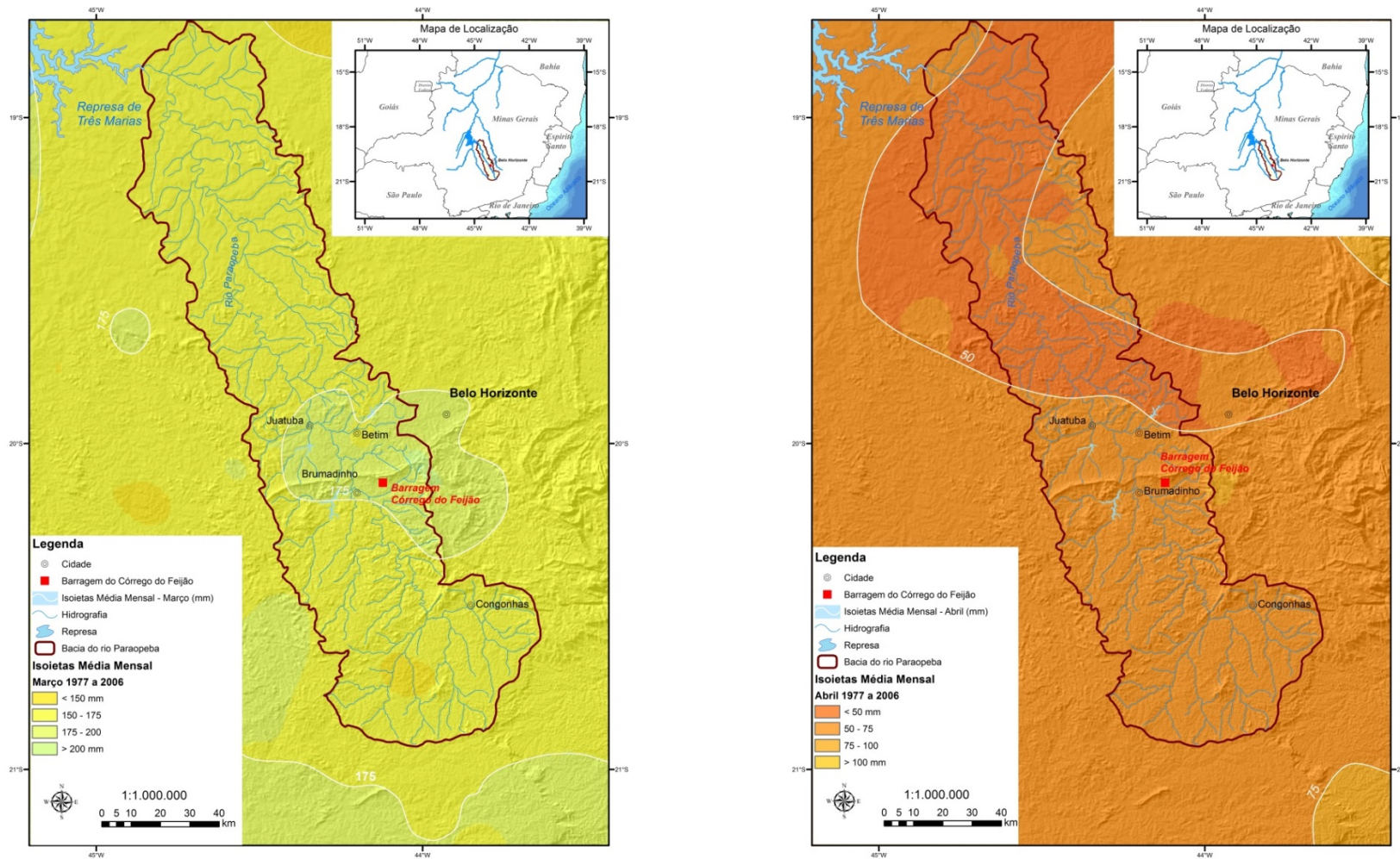


Figura 7 b – Isoietas mensais março e abril

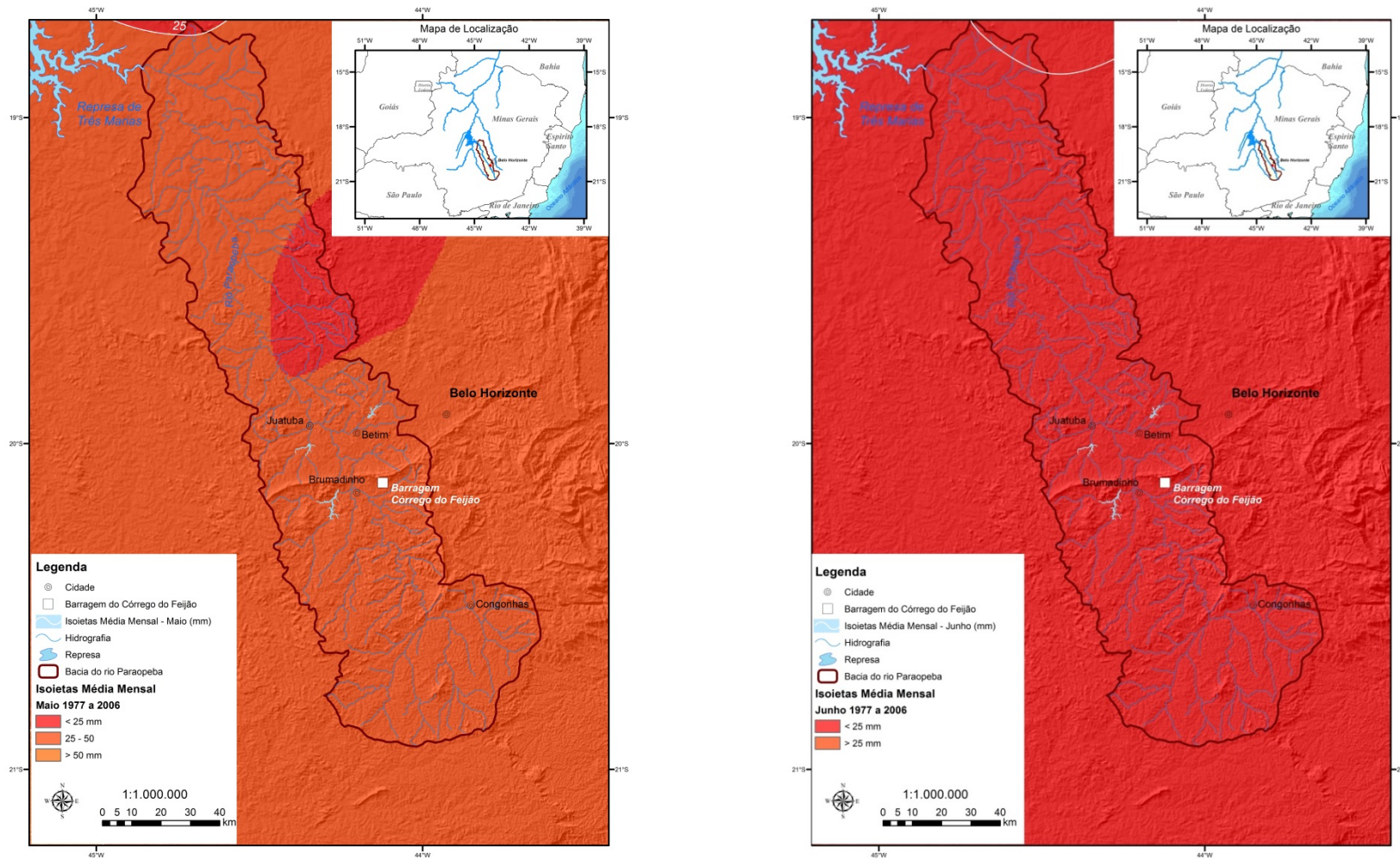


Figura 7 c – Isoietas mensais maio e junho

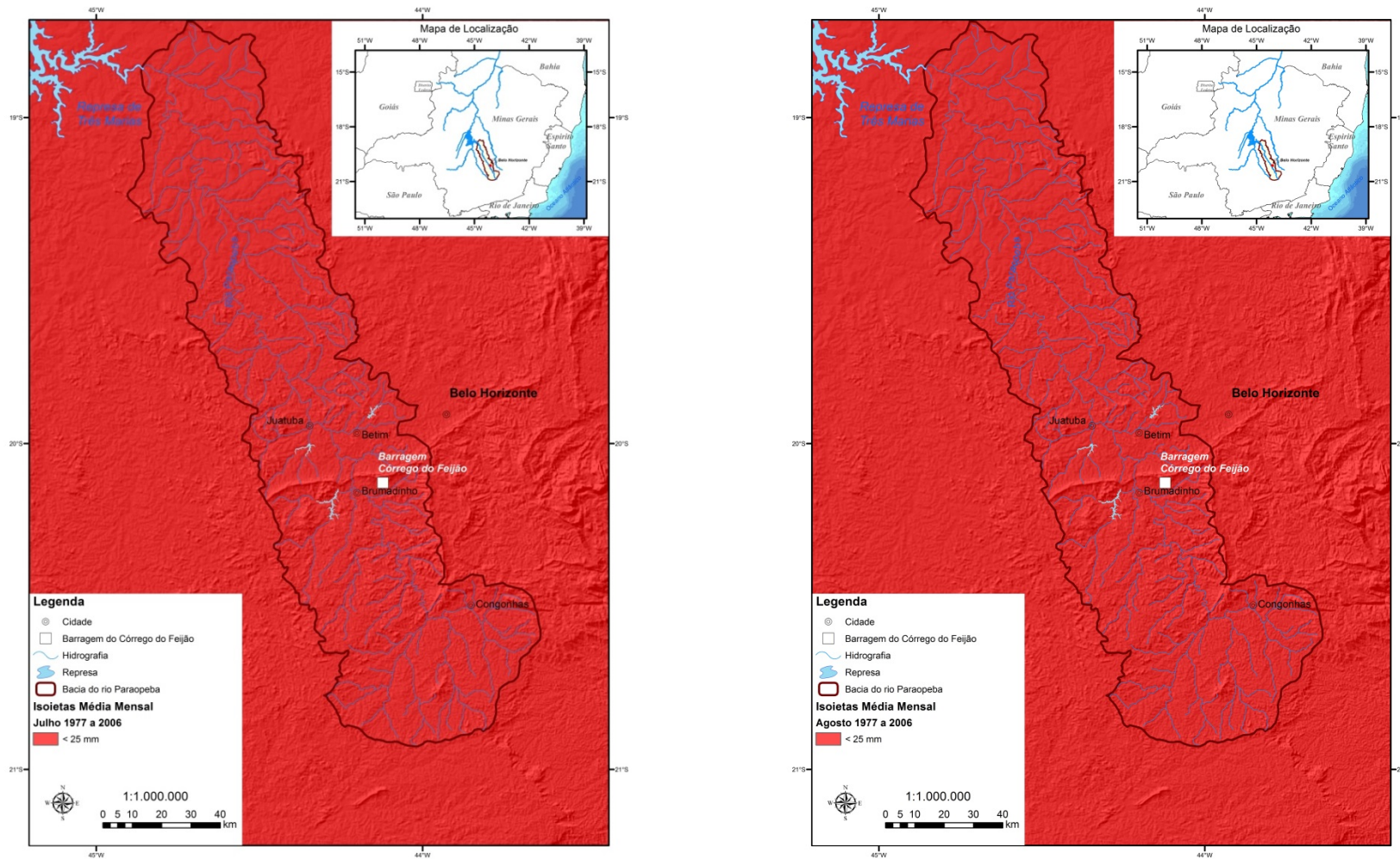


Figura 7 d – Isoietas mensais julho e agosto

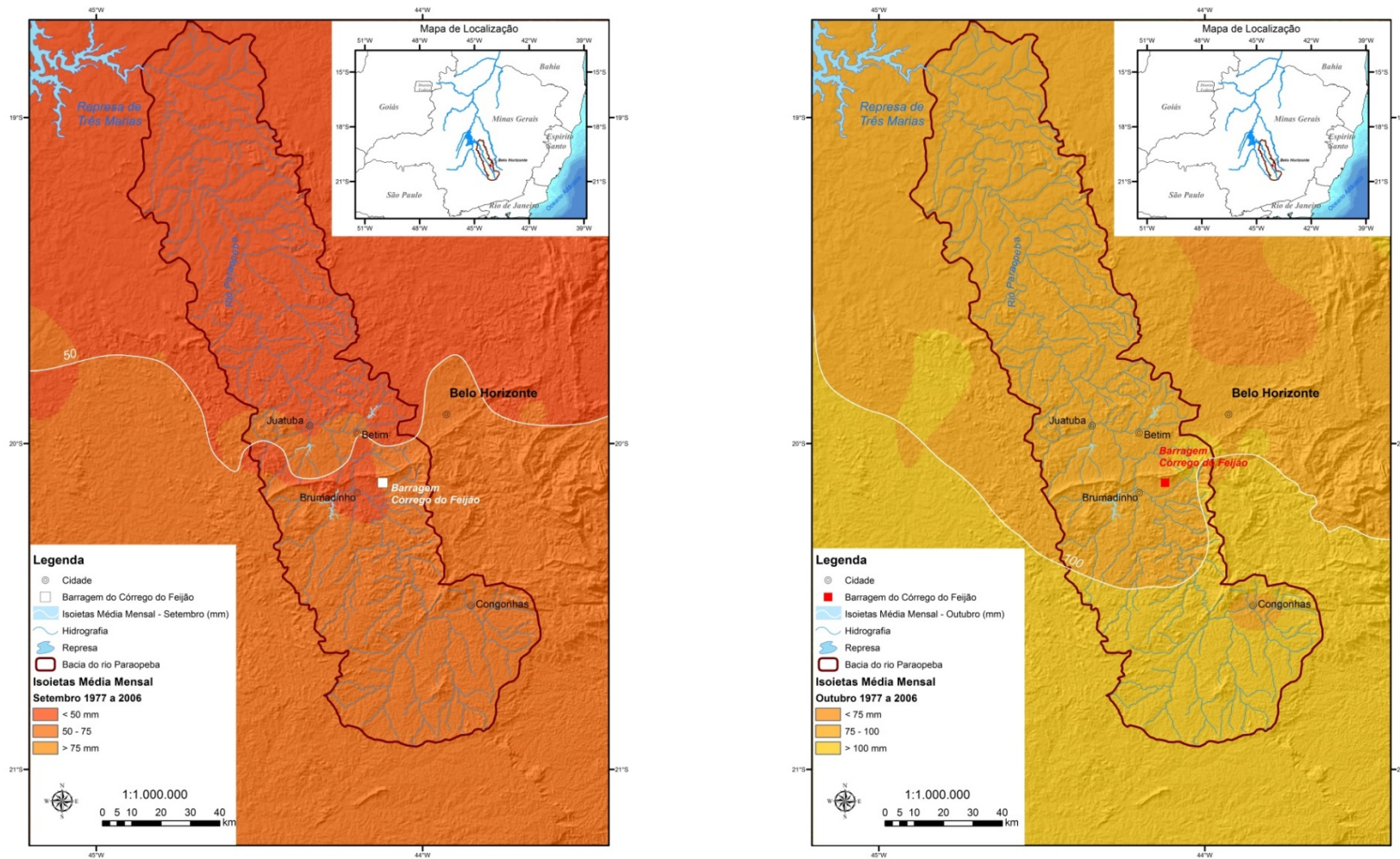


Figura 7 e – Isoietas mensais setembro e outubro

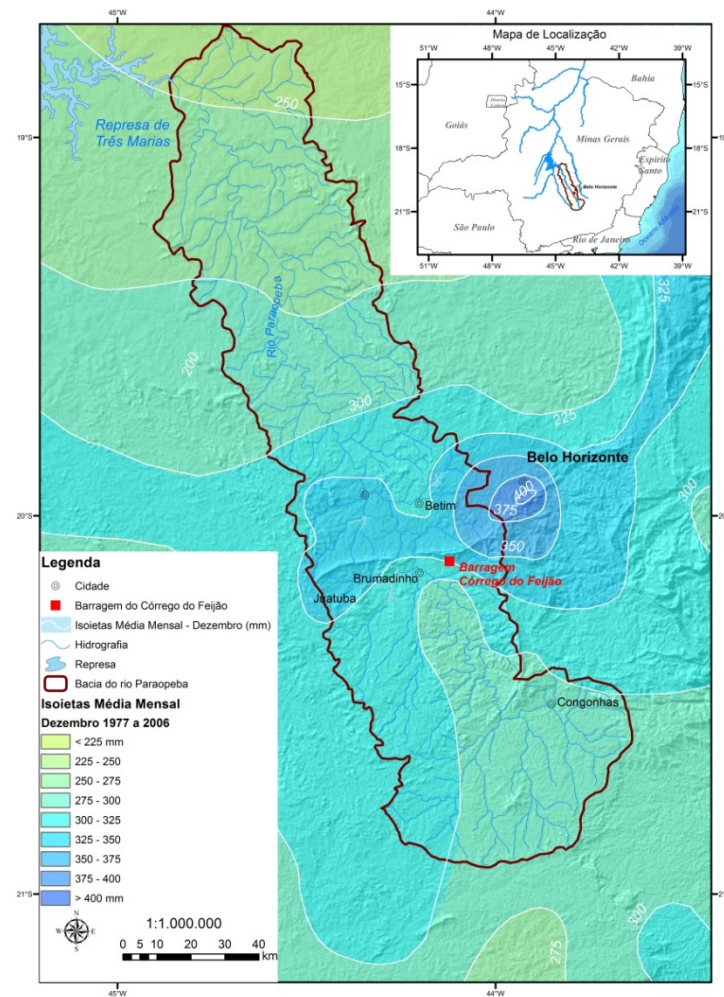
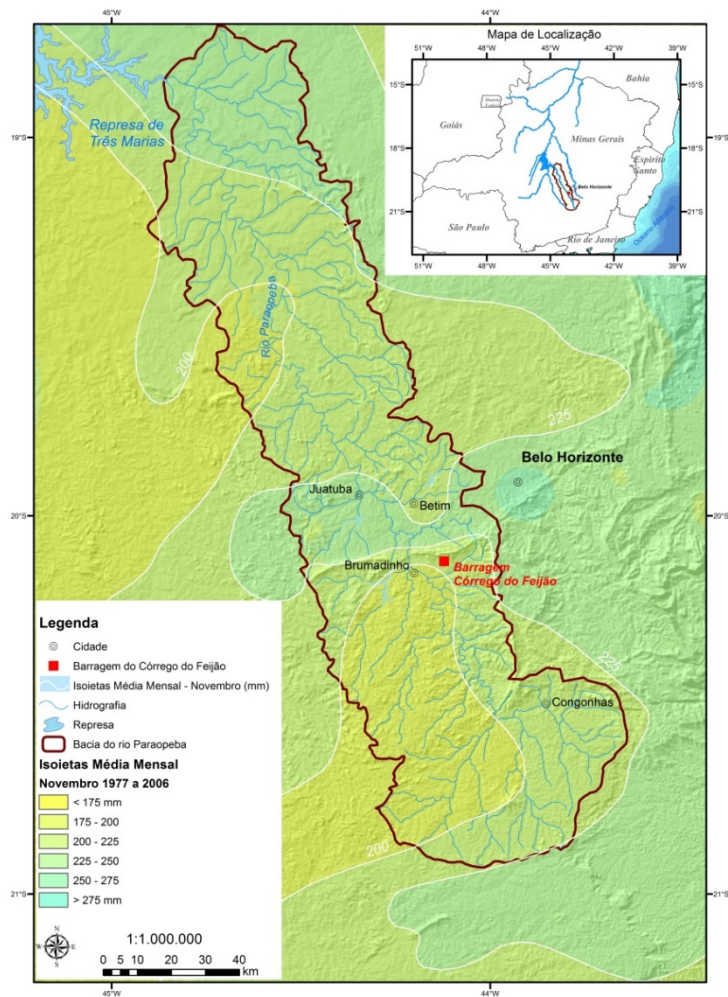


Figura 7 f – Isoietas mensais novembro e dezembro



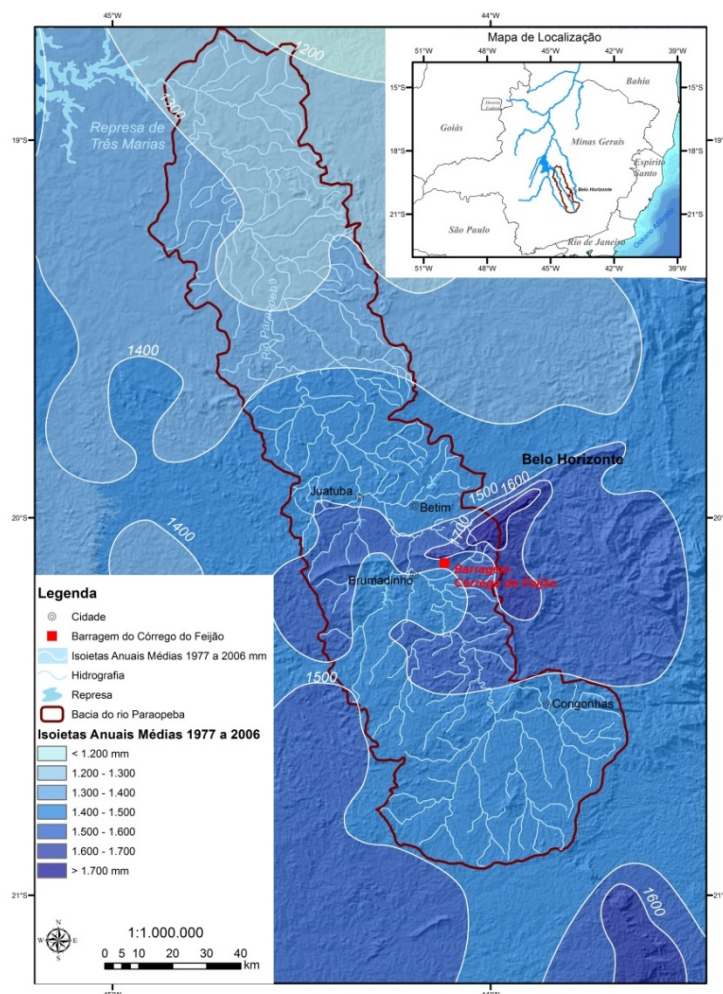


Figura 8 – Isoietas anuais da bacia do rio Paraopeba

### 3.3 Caracterização da barragem

A Mina de ferro do Córrego do Feijão fica em Brumadinho, Minas Gerais. Segundo a Vale, a barragem B1 da Mina Córrego do Feijão tinha como finalidade a disposição de rejeitos provenientes da produção. A barragem estava inativa, não recebia mais rejeitos, não tinha presença de lago e nenhuma atividade operacional em andamento.

A barragem foi construída em 1976 pela Ferteco Mineração e adquirida pela Vale em 2001. A barragem foi construída pelo método de alteamento a montante, tinha 86m de altura e comprimento de crista de 720m. Os rejeitos dispostos ocupavam uma área de aproximadamente 250mil m<sup>2</sup> e um volume de 11,7milhões de m<sup>3</sup>.

A figura 9 mostra a área da barragem antes e depois da ruptura. A CPRM delimitou a área atingida de 3,1 km<sup>2</sup> pelo rejeito na bacia do ribeirão Ferro Carvão com a utilização de imagens Google Earth.

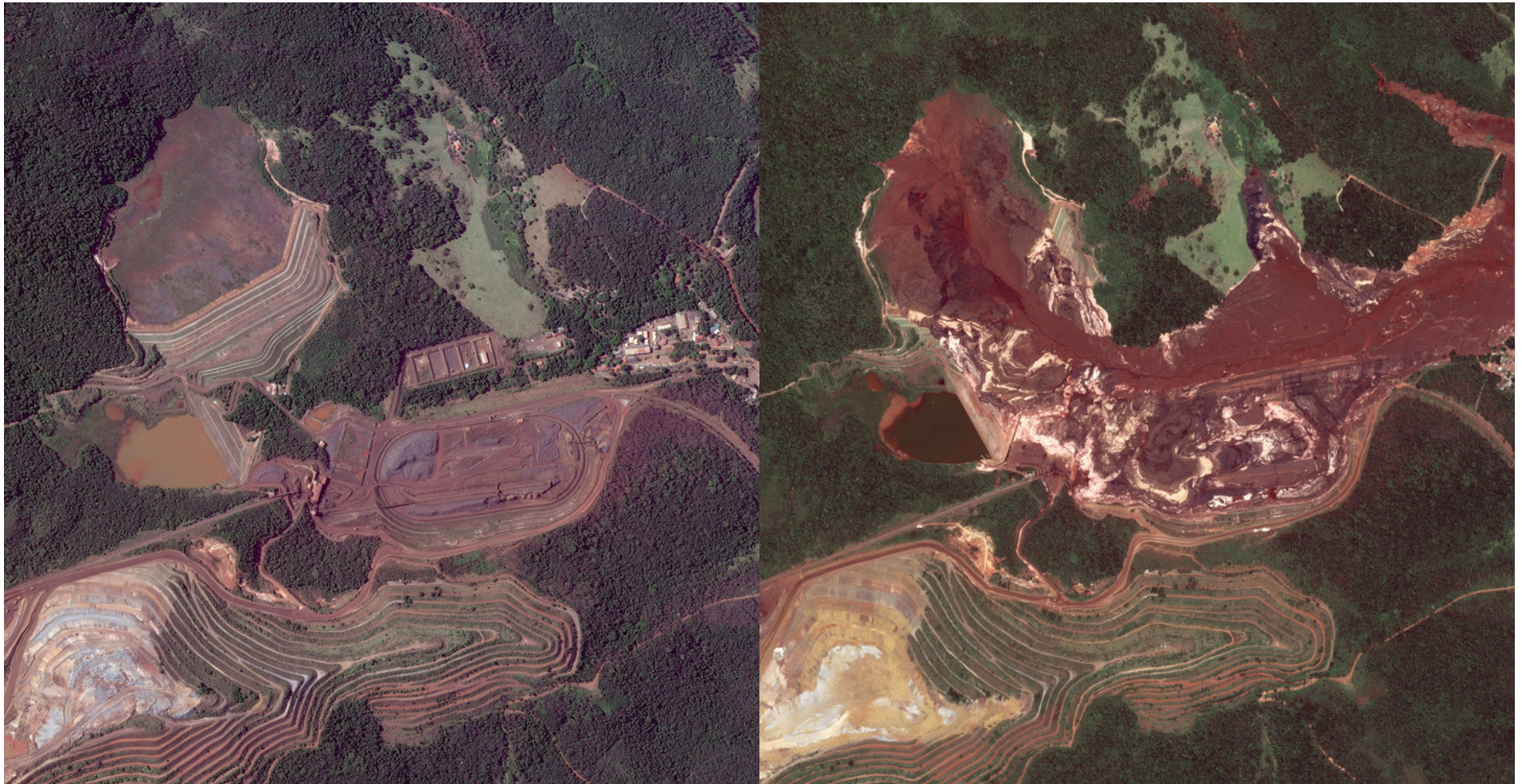


Figura 9 – Área da barragem da mina do Córrego do Feijão antes e depois da ruptura da barragem

### 3.4 Caracterização do monitoramento após a ruptura da barragem

Nos dias 26 e 27 de janeiro foram realizadas reuniões em Belo Horizonte, MG com a participação dos órgãos: ANA, CPRM, IGAM e COPASA para definição de um plano de monitoramento conjunto entre as instituições, otimizando os recursos. Neste plano ficou definido que:

- IGAM – monitoramento de 11 pontos, 1 a montante da ruptura e 10 a jusante até o município de Pompéu, cerca de 318km de distância da barragem. Monitoramento diário com coleta de água e realização de análises dos seguintes parâmetros: condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, pH, temperatura, turbidez, sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, sólidos em suspensão totais; metais: alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total; contaminantes: arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, cromo total, mercúrio total, níquel total, zinco total e selênio total.
- COPASA – monitoramento de 3 pontos, no rio Paraopeba a montante das captações da RMBH, e das cidades de Paraopeba e Três Marias. Monitoramento diário com coleta de amostras de água e realização das análises dos seguintes parâmetros: temperatura, oxigênio dissolvido, turbidez e pH e a série de metais.
- CPRM – monitoramento de 3 pontos no rio Paraopeba: Mário Campos e as estações fluviométricas: Ponte Nova do Paraopeba – 40800001 e Ponte da Taquara – 40850000. Monitoramento diário de 5 parâmetros *in loco*: temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, turbidez e condutividade elétrica.

Além do que ficou definido neste monitoramento conjunto, a CPRM promoveu o monitoramento diário de: nível, vazão, descarga sólida e granulometria do material em suspensão e do fundo nas estações fluviométricas existentes da RHN (40740000- Alberto Flores, 40800001 – Ponte Nova do Paraopeba, 40850000 – Ponte da Taquara) e alguns pontos extras.

Alberto Flores-40740000 fica a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, onde houve uma grande deposição de rejeitos após ruptura da barragem, inviabilizando o monitoramento, este só foi retomado a partir de meados de fevereiro de 2019, quando o material depositado foi erodido pelo rio Paraopeba. Com isto, a CPRM definiu outro ponto de monitoramento: Mário Campos, a jusante da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro Carvão.

Para o acompanhamento do avanço da pluma de rejeitos a CPRM definiu 3 pontos de amostragem entre Mário Campos e Ponte Nova do Paraopeba-40800001: Ponte BR-381, montante da BR-262 e Ponte BR-262.

Além disso, ainda definiu mais 5 pontos entre Ponte Nova do Paraopeba-40800001 e Ponte da Taquara-40850000: Povoado de Valentim, Fazenda MG-060, Ponte MG-060, Montante MG-238, Ponte MG-238; e posteriormente 2 entre Ponte da Taquara e UHE Retiro de Baixo: Ponte MG-420 e Montante Retiro de Baixo.

A CPRM monitorou e coletou também amostras a montante das captações de Pará de Minas e Paraopeba.

As características dos pontos de monitoramento encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 – Características dos pontos de monitoramento da CPRM no rio Paraopeba

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOME</b>	<b>LAT</b>	<b>LONG</b>	<b>DIST (km)</b>	<b>AREA (km<sup>2</sup>)</b>
40740000	Alberto Flores	-20,1625	-44,1606	1 km a montante	3945
-	Mário Campos	-20,0531	-44,1968	29	-
-	Ponte BR-381	-20,0392	-44,2564	40	-
-	Mont Ponte BR-262	-20,0044	-44,2717	48	-
-	Ponte BR-262	-19,9730	-44,2769	52	-
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	-19,9492	-44,3053	57	5680
-	Povoado do Valentim	-19,8355	-44,3912	85	-
-	Fazenda MG-060	-19,6932	-44,4954	98	-
-	Ponte MG-060	-19,6707	-44,4805	102	-
-	Montante MG-238	-19,6013	-44,5673	129	-
-	Ponte MG-238	-19,5753	-44,5624	135	-
40850000	Ponte da Taquara	-19,4231	-44,5494	176	8720
-	Ponte MG-420	-19,1729	-44,7010	239	-
-	Mont Retiro de Baixo	-19,0124	-44,7388	271	-

A figura 10 apresenta os pontos de monitoramento da CPRM em forma de mapa e a figura 11 em forma de diagrama unifilar.

O monitoramento diário foi realizado até 14 de março de 2019, a partir desta data estão sendo realizadas visitas semanais nos meses de março e abril de 2019 nos pontos de monitoramento: Alberto Flores, Mário Campos, Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara.

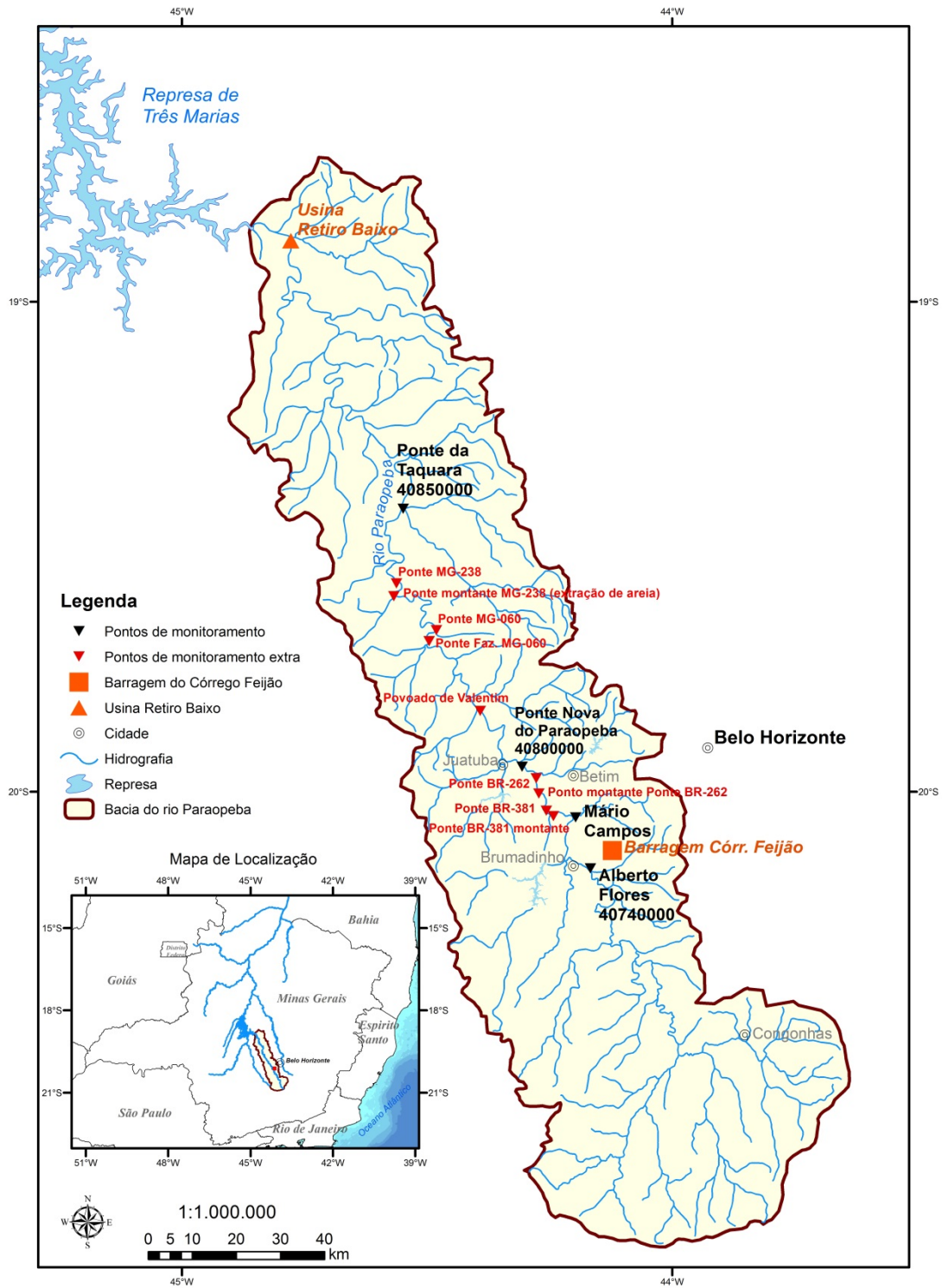


Figura 10 – Pontos de monitoramento da CPRM após a ruptura da barragem

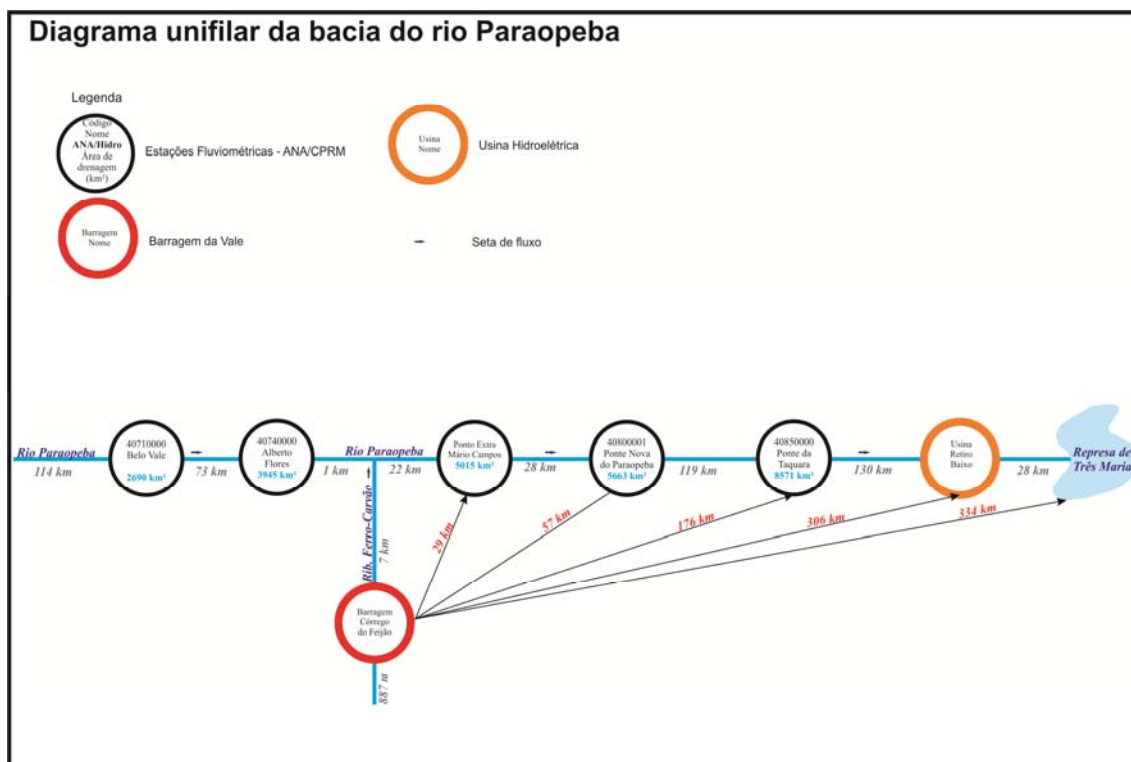


Figura 11 – Diagrama unifilar dos pontos principais pontos de monitoramento da CPRM após a ruptura da barragem

### 3.4.1 40740000 – Alberto Flores

A estação de Alberto Flores possui monitoramento automático de nível, que foi registrado durante todo o evento. As medições de descarga líquida nesta estação foram retomadas em 14 de fevereiro de 2019, porém não diariamente, quando foram coletadas também amostras de água para análise de 5 parâmetros.



Foto 1 –Rio Paraopeba na confluência com o ribeirão Ferro Carvão próximo a estação de Alberto Flores

### 3.4.2 Mário Campos

Este ponto de monitoramento foi estabelecido para a realização de medição de descarga líquida e sólida, um vez por dia, e coleta de amostras de água para a realização de análise de 5 parâmetros *in loco*, 2 a 4 vezes por dia. Amostragem foi feita em 3 verticais e em 3 profundidades distintas.

Em função da grande quantidade de sedimentos em suspensão, a princípio não foi possível fazer a medição de descarga líquida com medidor acústico e nem molinete, nem mesmo a realização de amostragem integrada na vertical.

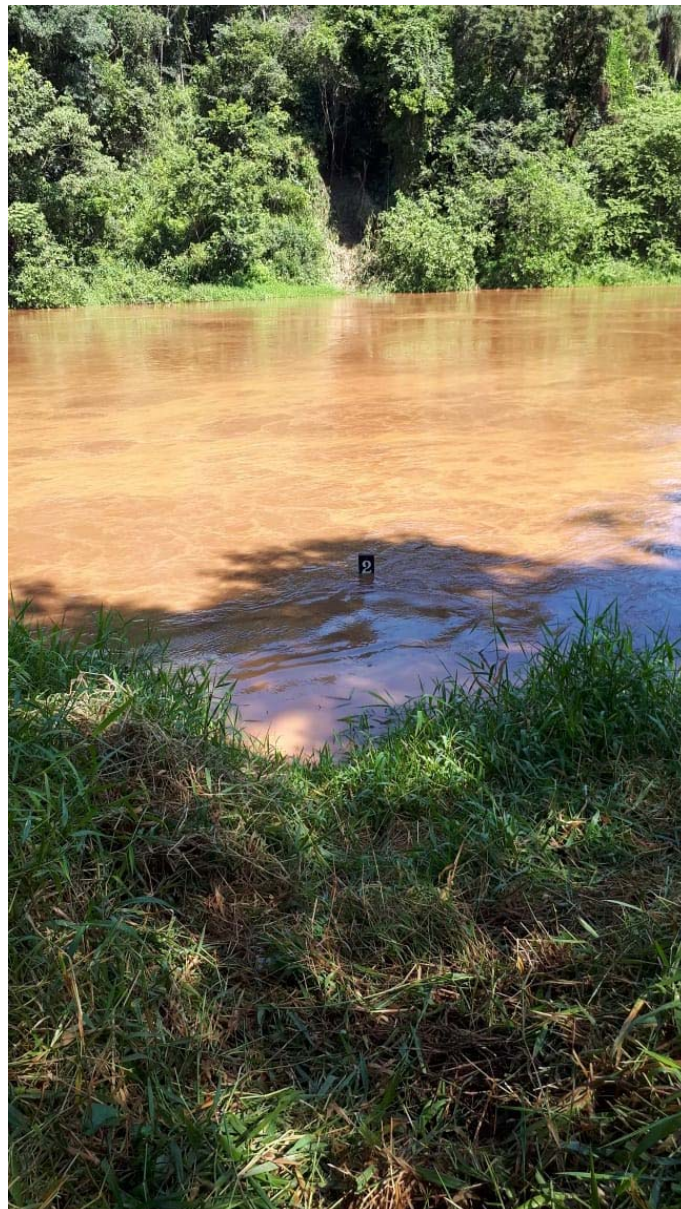


Foto 2 –Rio Paraopeba em Mário Campos em 22/02/19

### 3.4.3 BR-381 e BR-262

Estes pontos de monitoramento foram estabelecidos para coleta de amostras de qualidade da água, determinação de 5 parâmetros, um vez por dia, em 3 verticais e 3 profundidades distintas.



Foto 3 – Amostras do rio Paraopeba na Ponte BR-381 em 09/02/19



Foto 4 – rio Paraopeba na Ponte BR-381 em 10/02/19





Foto 5 –Rio Paraopeba na Ponte BR-262 em 09/02/19

#### **3.4.4 Montante da BR-262**

Este ponto de monitoramento foi estabelecido para medição de vazão e de nível, com seção de réguas em substituição a Mário Campos, devido aos problemas de medição de vazão acima mencionados. Neste ponto foram coletadas amostras uma vez por dia, em 3 verticais e 3 profundidades distintas.



Foto 6 – Rio Paraopeba a Montante de BR-262



Foto 7 – Amostras do rio Paraopeba a montante da BR-262 em 11/02/19



Foto 8 – Amostras do rio Paraopeba a montante da BR-262 em 15/02/19

### 3.4.5 40800001 – Ponte Nova do Paraopeba

Esta estação fluviométrica possui monitoramento automático de nível registrado durante todo o evento. Nesta estação foram realizadas medições de descarga líquida e sólida, uma vez por dia, e as amostras coletadas para determinação de concentração de sedimentos em suspensão foram integradas em 5 verticais, conforme o método de amostragem de igual incremento de descarga – IID. Foram coletadas amostras para determinação de qualidade da água 2 a 4 vezes por dia em 3 verticais em 3 profundidades.



Foto 9 – Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba em 18/02/19



Foto 10 – Amostra do rio Paraopeba coletada em Ponte Nova do Paraopeba em 18/02/19

#### **3.4.6 40850000 – Ponte da Taquara**

Esta estação fluviométrica possui monitoramento convencional de nível em réguas linimétricas. Nesta estação foram realizadas medições de descarga líquida e sólida, uma vez por dia, e as amostras coletadas para determinação de concentração de sedimentos em suspensão foram integradas em 5 verticais, conforme o método de amostragem de igual incremento de descarga – IID. Foram coletadas amostras para determinação de qualidade da água 2 a 4 vezes por dia em 3 profundidades em 5 verticais até 31/01/2019 e após em 3 verticais.



Foto 11 – Rio Paraopeba em Ponte da Taquara em 24/02/19



Foto 12 – Amostra do rio Paraopeba coletada em Ponte da Taquara em 20/02/19

## 4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados do monitoramento realizado no rio Paraopeba no período de 26 de janeiro a 31 de março de 2019, em termos de:

- Monitoramento de níveis;
- Medições de vazão e perfis transversais;
- Monitoramento de 5 parâmetros de qualidade da água *in loco*;
- Monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão (até 10 de março de 2019);
- Monitoramento da granulometria do material em suspensão (em análise);
- Monitoramento da granulometria do material de fundo (em análise).

### 4.1.1 Monitoramento de precipitação

A precipitação foi monitorada em 6 estações pluviométricas, bem como através de estimativa por satélite.

A figura 12 apresenta as precipitações estimadas por satélite acumuladas por períodos secos e chuvosos de 25 de janeiro a 31 de março de 2019. Já a tabela 5 apresenta os valores de precipitação registrados nas 6 estações pluviométricas.

Tabela 5 – Precipitações registradas em estações pluviométricas da bacia do rio Paraopeba em mm

Data	Conselheiro Lafaiete - 1	Lagoa Dourada - 1	Entre Rios de Minas - 1	Alberto Flores - 1	Ponte Nova do Paraopeba -1	Ponte da Taquara - 2
25/01/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26/01/2019	0,4	7,8	0,2	5,8	6,4	0,0
<b>27/01/2019</b>	<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>60,0</b>
28/01/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29/01/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30/01/2019	0,0	0,0	0,0	10,6	0,0	0,0
31/01/2019	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
01/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>04/02/2019</b>	<b>15,0</b>	<b>67,6</b>	<b>18,8</b>	<b>30,8</b>	<b>85,6</b>	<b>2,5</b>
05/02/2019	9,0	0,0	18,4	1,6	0,2	0,0
<b>06/02/2019</b>	<b>3,0</b>	<b>1,4</b>	<b>5,4</b>	<b>20,0</b>	<b>57,4</b>	<b>13,4</b>
<b>07/02/2019</b>	<b>14,4</b>	<b>70,6</b>	<b>26,6</b>	<b>9,2</b>	<b>8,6</b>	<b>6,9</b>
08/02/2019	0,2	8,4	3,0	0,0	0,2	8,2
09/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
10/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
11/02/2019	21,2	5,4	0,0	0,0	0,4	5,4
12/02/2019	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
<b>13/02/2019</b>	<b>4,4</b>	<b>17,0</b>	<b>69,6</b>	<b>11,6</b>	<b>1,6</b>	<b>0,0</b>
14/02/2019	1,2	0,6	0,2	0,4	0,0	8,2
15/02/2019	0,6	0,0	0,2	7,2	12,2	1,5
<b>16/02/2019</b>	<b>31,4</b>	<b>66,2</b>	<b>21,8</b>	<b>29,4</b>	<b>32,8</b>	<b>8,0</b>
<b>17/02/2019</b>	<b>13,8</b>	<b>7,0</b>	<b>21,8</b>	<b>23,8</b>	<b>16,0</b>	<b>30,0</b>
<b>18/02/2019</b>	<b>2,2</b>	<b>2,8</b>	<b>1,2</b>	<b>3,6</b>	<b>1,4</b>	<b>19,6</b>

Tabela 5 – Precipitações registradas em estações pluviométricas da bacia do rio Paraopeba em mm

Data	Conselheiro Lafaiete - 1	Lagoa Dourada - 1	Entre Rios de Minas - 1	Alberto Flores - 1	Ponte Nova do Paraopeba -1	Ponte da Taquara - 2
19/02/2019	0,4	0,6	0,4	4,4	0,2	40,5
20/02/2019	24,8	31,0	19,4	18,6	12,0	24,8
21/02/2019	4,2	24,6	25,4	14,2	8,4	4,2
22/02/2019	0,0	0,2	0,2	8,8	0,0	0,0
23/02/2019	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
24/02/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25/02/2019	19,2	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0
26/02/2019	4,8	35,6	8,2	42,2	9,8	0,0
27/02/2019	0,6	3,4	0,8	0,4	0,2	34,8
28/02/2019	0,0	4,4	8,2	28,4	6,8	0,0
01/03/2019	10,6	15,0	12,0	41,4	24	3,4
02/03/2019	6,0	3,0	1,8	0,6	0,8	7,3
03/03/2019	0,8	1,6	12,8	0,0	2,6	0,0
04/03/2019	0,4	2,8	0,2	1,0	0,6	0,7
05/03/2019	0,2	0,2	0,2	0,0	0,4	1,6
06/03/2019	0,0	0,0	0,0	2,0	0,2	1,0
07/03/2019	0,0	0,0	0,4	0,2	0,2	24,7
08/03/2019	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
09/03/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10/03/2019	0,0	1,4	24,4	22,0	17,0	0,0
11/03/2019	18,4	37,4	10,6	0,2	5,6	43,3
12/03/2019	0,2	1,8	0,2	0,0	0,2	0,7
13/03/2019	0,0	19,4	0,0	0,0	14,8	3,5
14/03/2019	0,0	8,6	0,4	0,2	0,2	0,0
15/03/2019	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,0
16/03/2019	4,8	1,4	0,0	0,0	33,2	0,0
17/03/2019	3,0	12,2	9,0	1,4	10,0	4,6
18/03/2019	0,2	2,2	0,2	0,0	0,2	1,3
19/03/2019	8,0	20,0	9,4	0,0	0,0	0,0
20/03/2019	0,4	0,0	2,8	3,2	0,0	0,0
21/03/2019	0,8	2,4	2,2	13,6	60,8	8,4
22/03/2019	14,6	15,2	13,0	25,2	16,8	18,8
23/03/2019	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	3,4
24/03/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25/03/2019	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
26/03/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27/03/2019	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	-
28/03/2019	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	-
29/03/2019	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	-
30/03/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
31/03/2019	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-

1 – Estações automáticas – precipitação de 0 a 24h; 2 – Estação convencional – precipitação de 7 as 7h – a partir de 14/03/19 visitada uma vez por semana. Negrito – dias mais chuvosos nas estações

Os totais de precipitação registrados no mês de fevereiro de 2019 nas estações constantes na tabela anterior variaram de 170 a 350mm, acima da média para este mês que varia de 150 a 200mm. Já os totais acumulados até 18 de março de 2019 variam entre 69 a 188mm, próximo a média para março de 150 a 175mm.

Analisando a figura 13 verifica-se que, na bacia do rio Paraopeba, nos períodos:

- 25/01 a 03/02; 08 a 12/02; 22 a 24/02 praticamente não foram registradas precipitações;
- 04 a 07/02 foram registradas precipitações, especialmente na margem esquerda;
- 13 a 21/02 foram registradas precipitações, especialmente na margem direita;
- 25/02 a 01/03 foram registradas precipitações em parte do trecho médio, incluindo bacia do ribeirão Ferro Carvão e no trecho baixo na margem direita;
- 02 a 09/03 foram registradas precipitações no trecho médio a baixo;
- 10 e 11/03 foram registradas precipitações nos trechos alto e parte do médio.

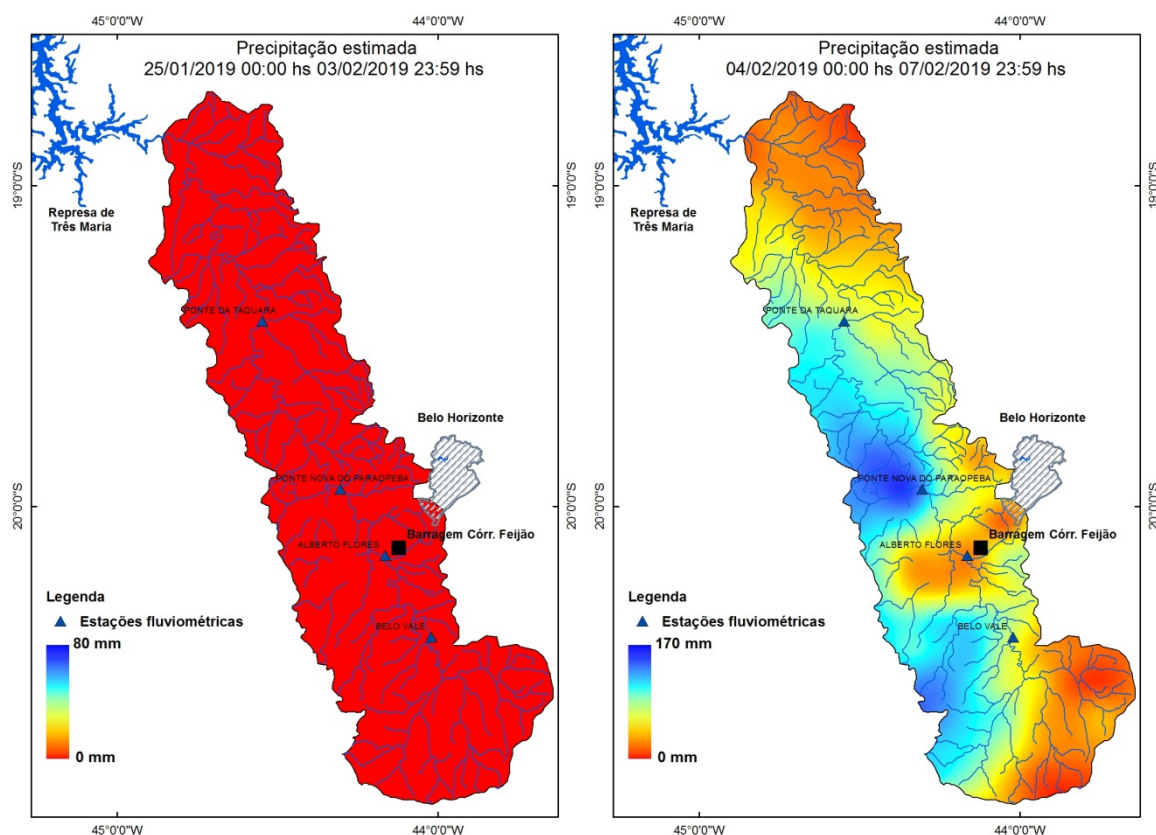


Figura 13 – Precipitações registradas na bacia do rio Paraopeba – 25/01 a 10/03



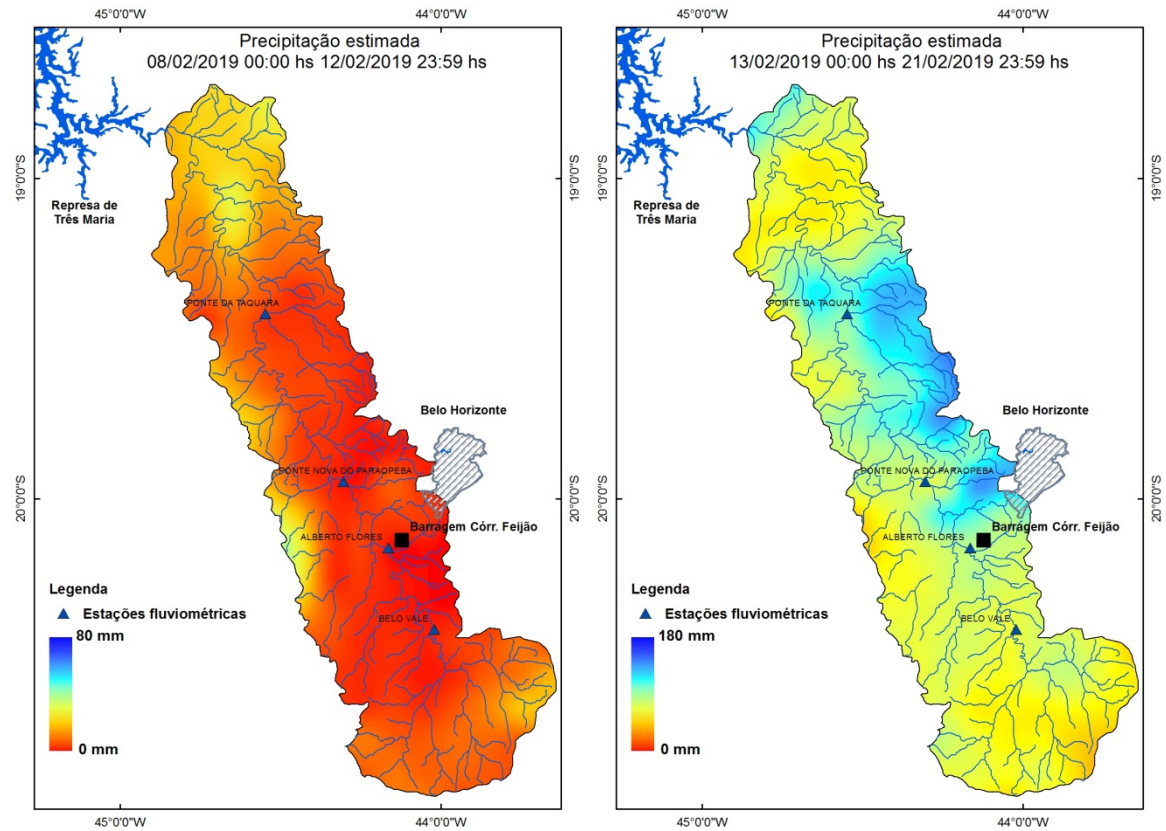


Figura 13 – Precipitações registradas na bacia do rio Paraopeba – 25/01 a 10/03 - continuação

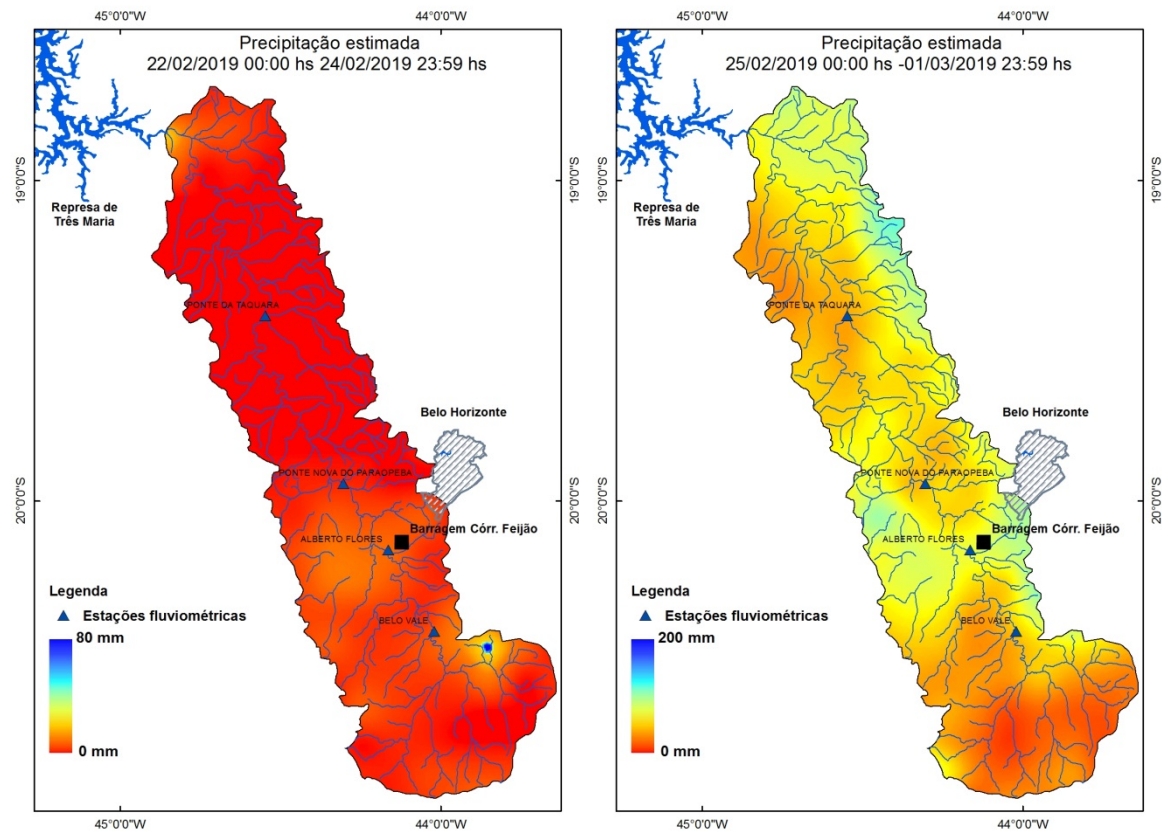


Figura 13 – Precipitações registradas na bacia do rio Paraopeba – 25/01 a 10/03 - continuação

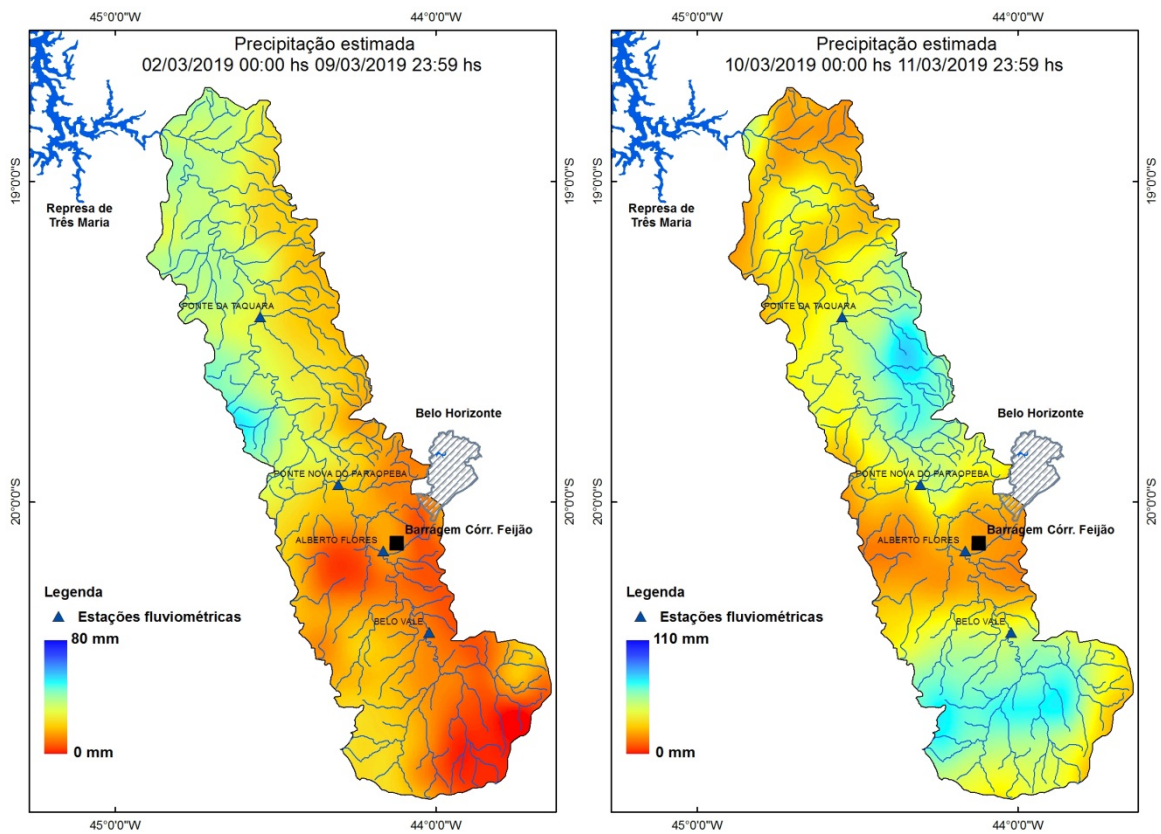


Figura 13 – Precipitações registradas na bacia do rio Paraopeba – 25/01 a 10/03 - continuação

#### 4.1.2 Monitoramento de níveis

A figura 14 apresenta o monitoramento de níveis do rio Paraopeba de janeiro a março de 2019.

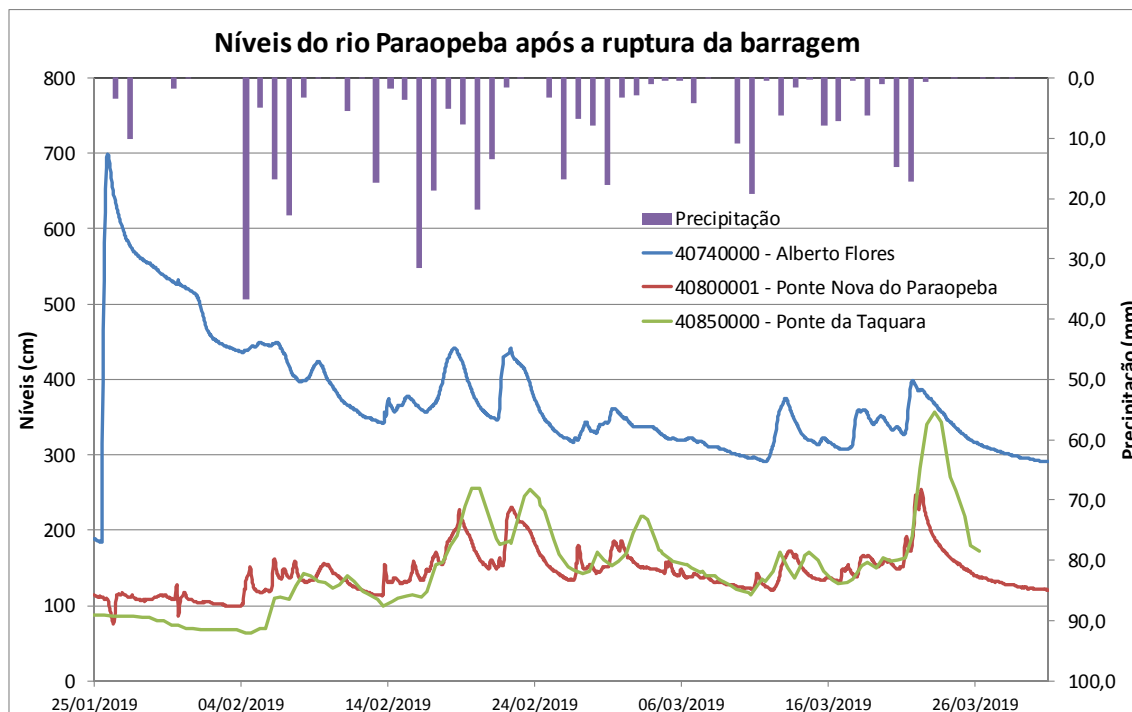


Figura 14 – Monitoramento de níveis do rio Paraopeba em janeiro a março de 2019

Observa-se que no dia 25 de janeiro de 2019 a tarde houve uma elevação brusca do nível de aproximadamente 5 metros do rio Paraopeba na estação 40740000 – Alberto Flores, que fica a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, demonstrando que houve uma deposição de rejeitos na confluência, barrando o rio Paraopeba.

Neste mesmo dia, observou-se uma diminuição do nível do rio Paraopeba em 40800001 – Ponte Nova do Paraopeba demonstrando que houve uma diminuição de vazão do rio decorrente da citada deposição de rejeitos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão.

Nos períodos em que foram registradas chuvas na bacia houve uma variação do nível do rio nas estações fluviométricas e consequente aumento da turbidez e do transporte de sedimentos.

No dia 30/01/19 foi registrada uma variação anômala do nível do rio Paraopeba em 40800001 – Ponte Nova do Paraopeba; houve uma elevação do nível, seguida de uma diminuição. Esta variação pode ser um problema do sensor de pressão, mas pode ser também uma operação na barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé.

Os dados dos níveis do rio Paraopeba e chuva nas estações automáticas podem ser consultados no site <http://gestorpcd.ana.gov.br/Mapa.aspx> e das estações convencionais

futuramente estarão armazenados no site [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf).

### 4.1.3 Monitoramento de vazões

Foram realizadas medições de vazão diárias em: Mário Campos, BR-262, 40800001 – Ponte Nova do Paraopeba, 40850000 – Ponte da Taquara, após a ruptura da barragem e posteriormente em 40740000 – Alberto Flores. As figuras 15 a 19 apresentam os gráficos vazão x cota das estações da RHN que tem série histórica de medição de vazões e dos pontos de monitoramento instalados denominados Mário Campos e BR-262

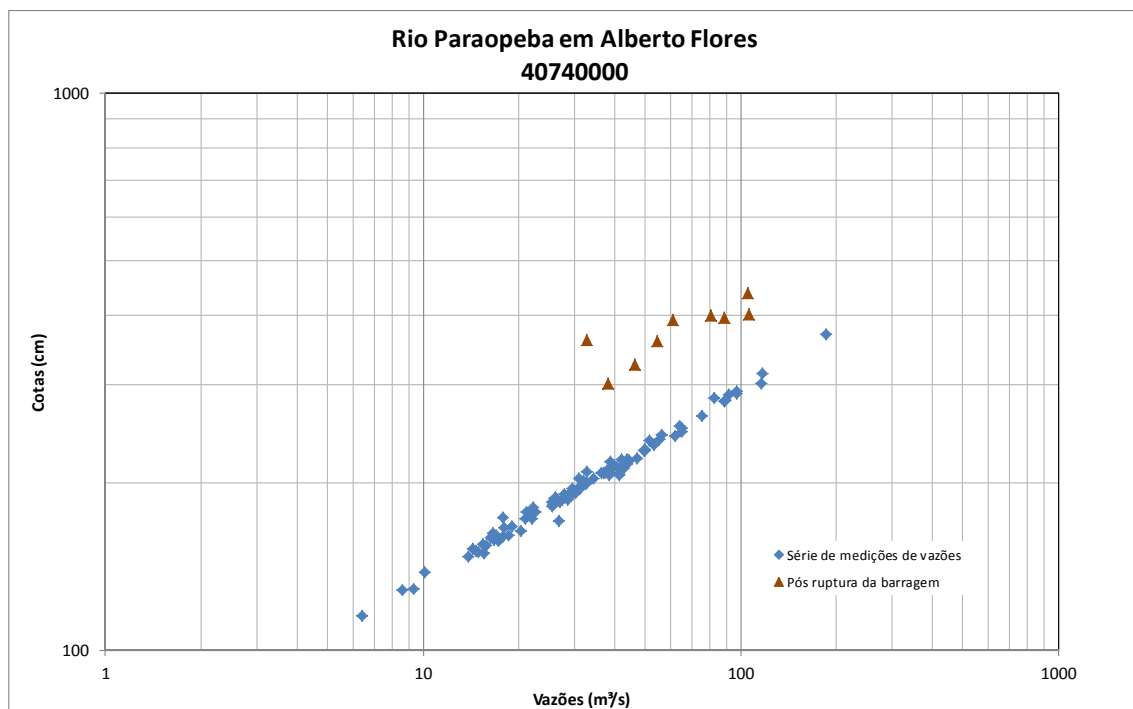


Figura 15 – Vazão x cota do rio Paraopeba em Alberto Flores – 40740000

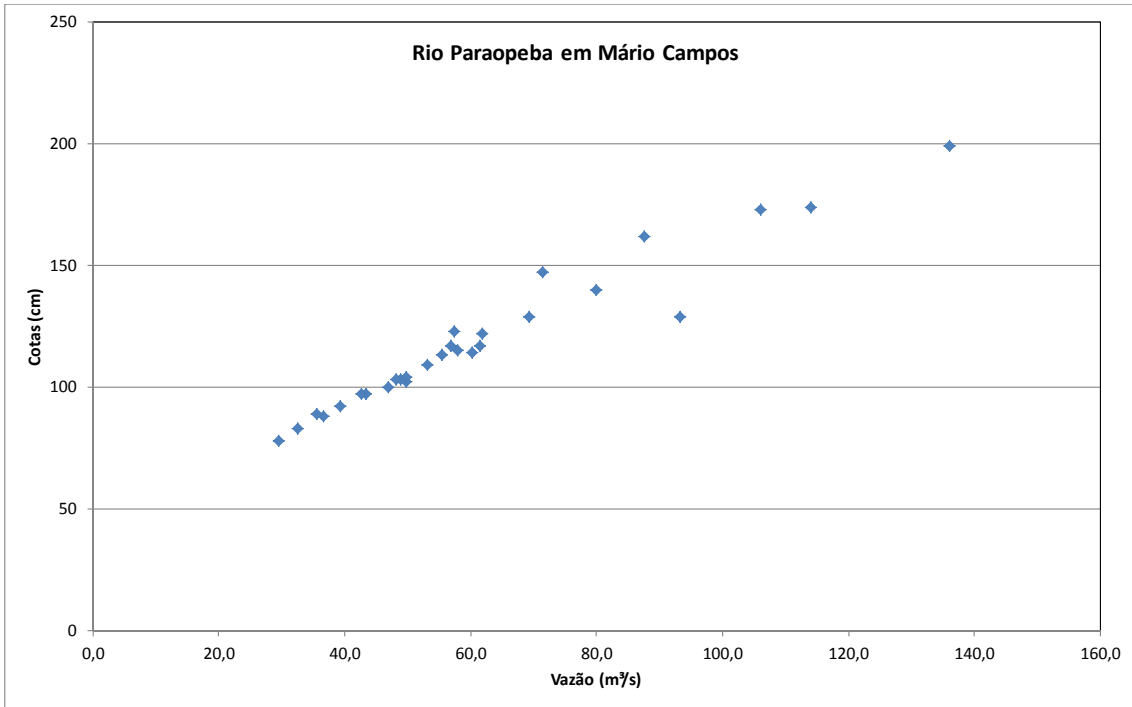


Figura 16 – Vazão x cota do rio Paraopeba em Mário Campos

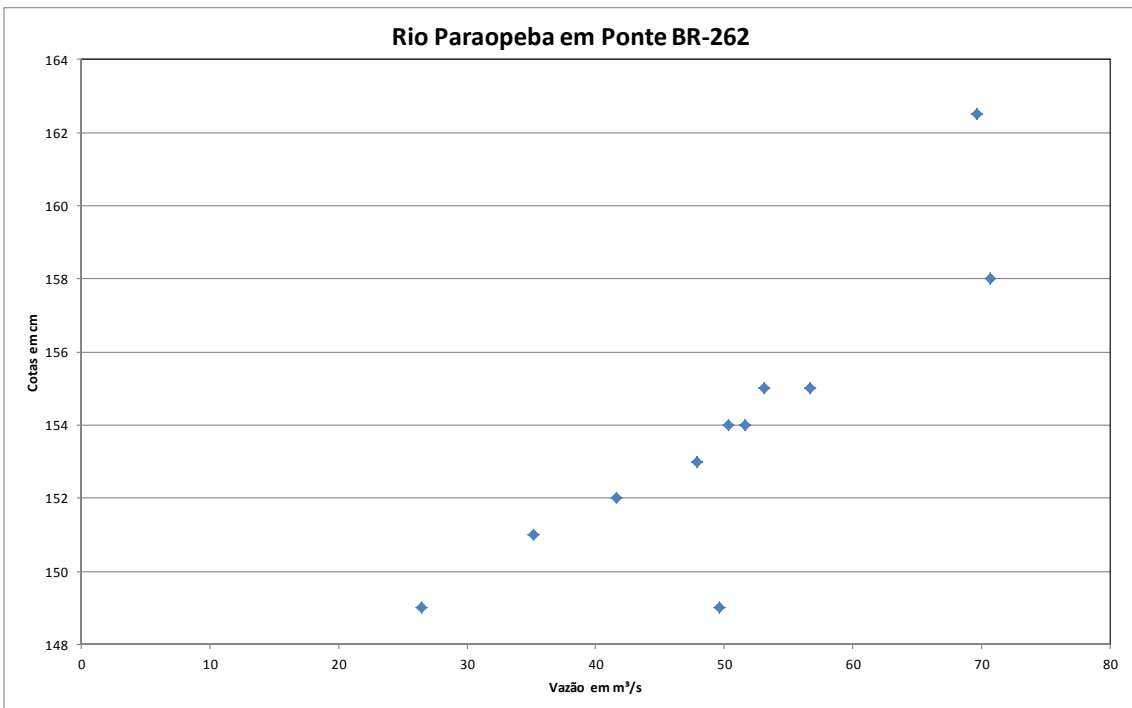


Figura 17 – Vazão x cota do rio Paraopeba em Montante BR-262

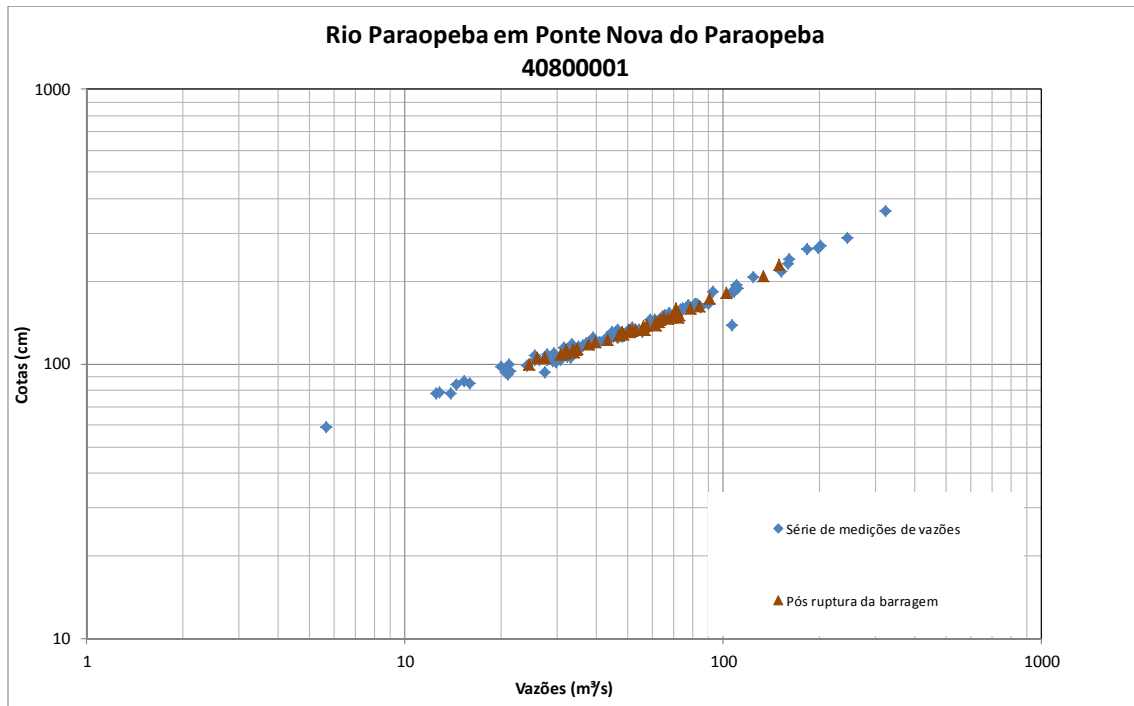


Figura 18 – Vazão x cota do rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba – 40800001

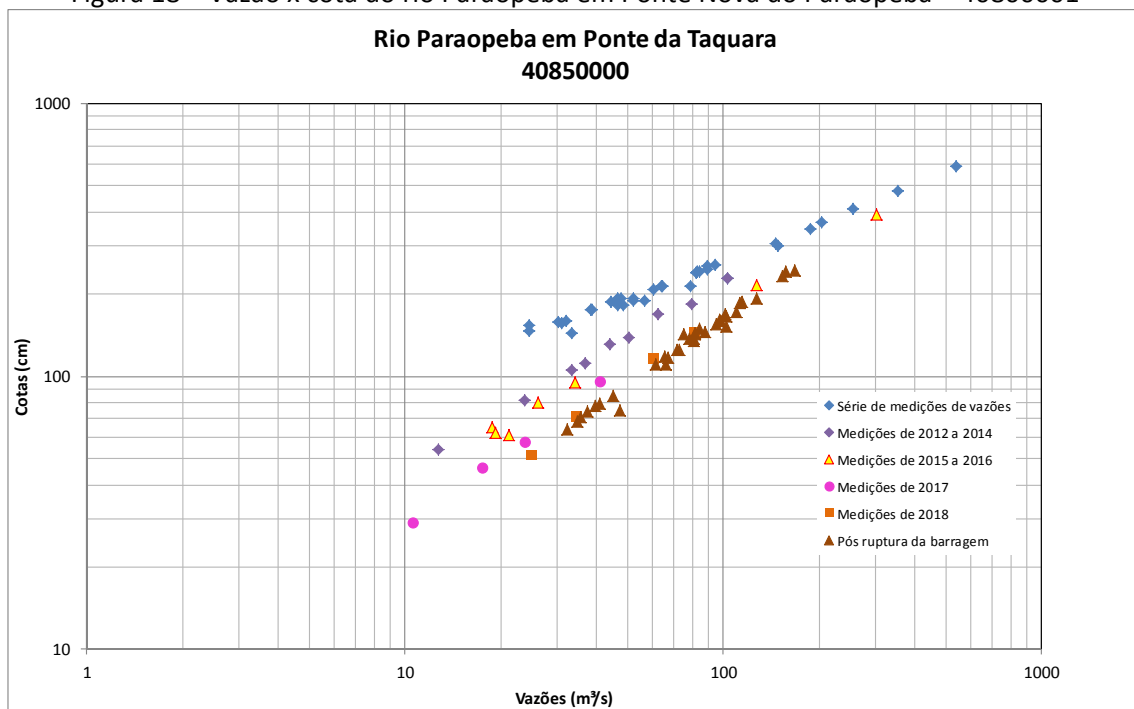


Figura 19 – Vazão x cota do rio Paraopeba em Ponte da Taquara - 40850000

Analisando estas figuras observa-se que:

- Houve mudança da relação vazão x cota na estação Alberto Flores – 40740000, isto se deu em função do depósito dos rejeitos a jusante da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro Carvão, provocando um remanso na estação que está localizada a montante desta confluência. O nível do rio subiu cerca de 5 metros após a ruptura

nesta estação. Com o passar do tempo, o rio Paraopeba está escavando um novo canal no depósito de rejeitos.

- As vazões x cotas na estação de Mário Campos medidas após a ruptura da barragem apresentam boa correlação. Em BR-262 esta correlação não é tão boa quanto a de Mário Campos.
- Não houve mudança na relação vazão x cota na estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001 após a ruptura da barragem.
- A relação vazão x cota na estação Ponte da Taquara - 40850000 tem sofrido alterações ao longo do tempo após 2011, porém as medições realizadas após a ruptura da barragem estão alinhadas com as medições de 2018, evidenciando que não houve mudança na relação vazão x cota em função da ruptura da barragem.

A tabela 6 apresenta as vazões diárias do rio Paraopeba nos pontos de monitoramento.

Tabela 6 – Níveis em cm e Vazões em m<sup>3</sup>/s do rio Paraopeba

Data	Alberto Flores		Mário Campos	Ponte BR - 262	Ponte Nova do Paraopeba			Ponte da Taquara		
	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 2	Vazão - 2	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 3	Nível - 4	Vazão - 2	Vazão - 3
25/01/2019	365	-	-	-	111	-	33,0	87	-	43,5
26/01/2019	638	-	-	-	101	33,6	26,8	86	-	42,9
27/01/2019	578	-	-	-	112	34,0	33,6	86	-	42,9
28/01/2019	557	-	-	-	108	30,7	30,6	85	45,0	42,3
29/01/2019	542	-	28,1	-	113	34,5	34,0	80	39,5	39,3
30/01/2019	529	-	26,2	-	109	31,7	31,7	74	-	35,9
31/01/2019	519	-	-	-	110	32,1	32,1	69	41,0	33,3
01/02/2019	482	-	-	26,4	105	27,4	28,3	68	37,5	32,8
02/02/2019	450	-	-	-	102	26,0	26,5	68	35,7	32,8
03/02/2019	440	-	-	-	100	24,5	24,9	68	34,8	32,8
04/02/2019	440	-	-	-	127	61,4	46,4	64	32,2	30,9
05/02/2019	447	-	22,6	-	119	37,6	38,8	70	47,4	33,8
06/02/2019	444	-	40,8	50,3	141	71,9	58,7	111	61,4	59,0
07/02/2019	411	-	40,6	51,6	144	55,8	60,8	118	66,1	63,6
08/02/2019	403	-	-	-	133	50,9	50,5	141	81,5	80,8
09/02/2019	415	-	62,3	70,7	148	68,7	64,9	131	75,2	73,3
10/02/2019	384	-	47,7	53,1	141	61,3	58,4	126	71,7	69,2
11/02/2019	364	-	38,6	41,6	128	48,4	46,5	136	78,4	77,0
12/02/2019	351	-	32,5	35,2	119	39,6	38,8	117	65,2	63,1
13/02/2019	347	-	29,5	-	123	34,8	42,6	105	-	54,6
14/02/2019	364	32,3	-	47,9	132	51,5	50,2	108	-	57,0
15/02/2019	-	-	49,7	56,7	139	50,3	56,6	114	-	61,0
16/02/2019	360	-	40,3	-	141	-	58,4	115	-	61,8
17/02/2019	384	57,9	57,4	69,7	162	-	78,7	156	-	92,7
18/02/2019	434	100,9	106,0	121,3	198	-	121,3	187	-	118,6
19/02/2019	399	80,2	87,5	-	194	50,4	116,6	244	-	173,4
20/02/2019	360	54,8	60,4	-	158	78,8	74,6	256	157,2	186,3



Tabela 6 – Níveis em cm e Vazões em m<sup>3</sup>/s do rio Paraopeba

Data	Alberto Flores		Mário Campos	Ponte BR - 262	Ponte Nova do Paraopeba			Ponte da Taquara		
	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 2	Vazão - 2	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 3	Nível - 4	Vazão - 2	Vazão - 3
21/02/2019	-	-	55,4	-	156	-	73,0	185	114,5	116,8
22/02/2019	-	-	136,0	-	218	149,7	144,6	185	-	116,8
23/02/2019	403	89,1	114,0	-	203	133,5	126,1	250	-	179,5
24/02/2019	356	-	93,3	-	166	90,8	83,7	234	-	163,3
25/02/2019	331	46,5	53,1	-	144	64,7	61,1	178	-	111,2
26/02/2019	320	-	47,0	-	141	53,1	58,1	149	-	87,0
27/02/2019	334	-	57,9	-	156	70,8	72,6	144	-	83,1
28/02/2019	337	-	56,8	-	148	-	64,3	166	-	100,5
01/03/2019	355	-	71,5	-	175	102,0	93,3	156	-	92,7
02/03/2019	343	-	69,3	-	165	84,3	82,2	183	-	115,7
03/03/2019	338	-	61,5	-	151	72,5	66,9	217	-	146,5
04/03/2019	331	-	60,3	-	147	67,1	63,7	175	-	108,1
05/03/2019	321	-	49,7	-	147	63,2	64,0	159	-	95,4
06/03/2019	321	-	48,9	-	140	57,4	57,1	153	-	90,5
07/03/2019	315	-	48,2	-	138	55,9	55,1	143	-	82,3
08/03/2019	309	-	43,4	-	131	50,7	49,2	137	-	77,5
09/03/2019	302	-	39,3	-	126	47,0	45,1	125	-	68,9
10/03/2019	297	-	36,6	-	123	43,3	42,2	116	-	62,6
11/03/2019	293	-	35,5	-	131	47,9	49,0	132	-	74,0
12/03/2019	336	-	-	-	132	56,7	50,7	158	-	94,5
13/03/2019	358	-	79,9	-	167	-	84,6	144	-	82,8
14/03/2019	324	-	-	-	146	62,8	62,3	166	-	100,6
15/03/2019	318	-	-	-	135	-	52,5	154	-	90,7
16/03/2019	312	-	-	-	135	-	52,5	132	-	73,6
17/03/2019	317	-	-	-	145	-	61,9	133	-	74,7
18/03/2019	355	-	-	-	161	-	77,9	155	-	91,8
19/03/2019	347	-	-	-	156	-	72,6	157	-	93,5

Tabela 6 – Níveis em cm e Vazões em m<sup>3</sup>/s do rio Paraopeba

Data	Alberto Flores		Mário Campos	Ponte BR - 262	Ponte Nova do Paraopeba			Ponte da Taquara		
	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 2	Vazão - 2	Nível - 1	Vazão - 2	Vazão - 3	Nível - 4	Vazão - 2	Vazão - 3
20/03/2019	336	-	-	-	153	70,6	69,8	160	-	95,5
21/03/2019	363	-	61,8	-	182	-	102,7	178	-	111,0
22/03/2019	383	-	-	-	229	-	158,0	311	-	248,6
23/03/2019	363	-	-	-	183	-	103,5	350	-	295,3
24/03/2019	341	-	-	-	162	-	78,4	262	-	192,3
25/03/2019	323	-	-	-	147	-	63,6	200	-	130,8
26/03/2019	313	-	-	-	137	-	54,4	172	97,6	105,9
27/03/2019	306	-	42,7	-	132	-	49,5	-	-	-
28/03/2019	300	-	-	-	127	47,7	45,5	-	-	-
29/03/2019	295	-	-	-	123	-	42,6	-	-	-
30/03/2019	292	-	-	-	121	-	40,9	-	-	-
31/03/2019	290	-	-	-	120	-	39,6	-	-	-

1 – Nível automático-média diária; 2 – vazão medida; 3 – vazão calculada pela curva chave atualizada; 4 – nível convencional – média de 7 e 17h

As vazões médias de 25 a 31/01, 01 a 28/02 e 01 a 31/03/19 foram:

- 31,7; 65,2 e 65,5 m<sup>3</sup>/s na estação Ponte Nova do Paraopeba, muito abaixo das vazões médias dos meses de janeiro, fevereiro e março: 175,5; 143,3 e 127,8m<sup>3</sup>/s.
- 40,0; 86,2 e 111,4 m<sup>3</sup>/s em Ponte da Taquara, muito abaixo das vazões médias dos meses de janeiro, fevereiro e março: 267,6; 208 e 178,6m<sup>3</sup>/s.

As figuras 20 a 21 que apresentam os perfis transversais do rio Paraopeba nas estações fluviométricas antes e depois da ruptura da barragem.

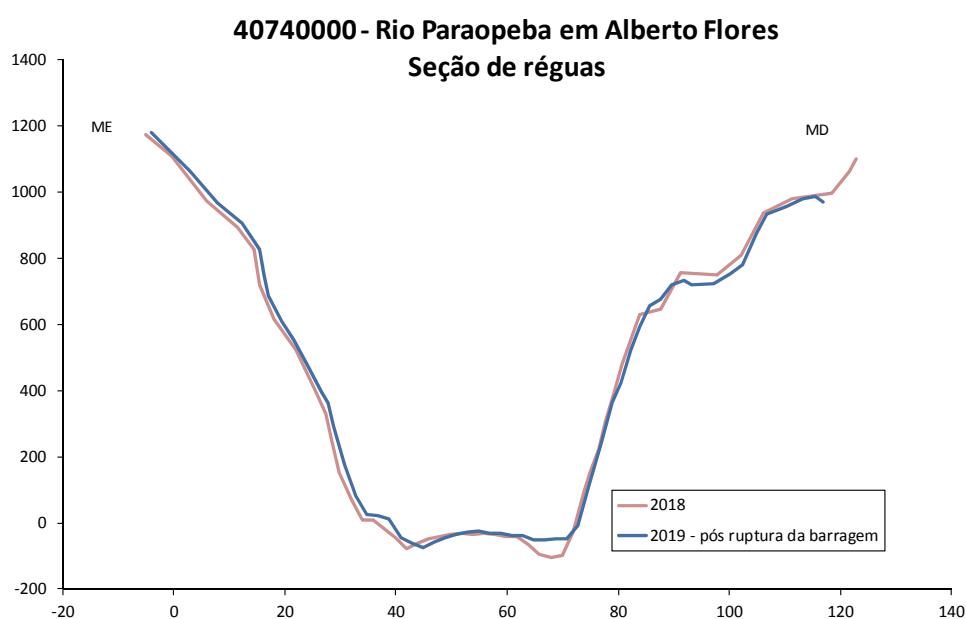


Figura 20 – Perfil transversal do rio Paraopeba na estação Alberto Flores – 40740000

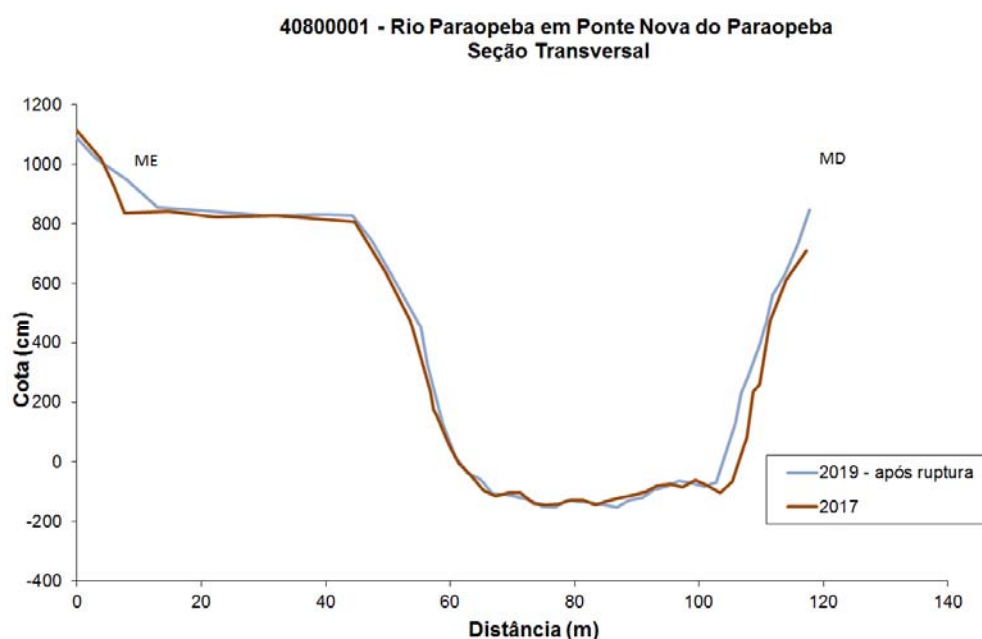


Figura 21 – Perfil transversal do rio Paraopeba na estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001

Mesmo com a grande deposição de sedimentos a jusante da estação Alberto Flores – 40740000, que alterou a relação vazão x cota, não foi alterado o perfil transversal do rio Paraopeba no local da estação.

Da mesma forma, o perfil transversal do rio Paraopeba não foi alterado na estação Ponte Nova do Paraopeba, sendo um indicativo que nesta seção não houve, até o momento, uma deposição significativa de sedimentos.

Importante ressaltar que em função da grande quantidade de sedimentos, houve dificuldades na realização das medições de descarga quer seja com: equipamentos mecânicos, molinetes, onde houve o fechamento do circuito do contador de pulsos do molinete, inviabilizando a contagem das rotações; e com equipamentos acústicos, M9 e River Ray, que apresentaram dificuldade de localizar o fundo do rio.

#### **4.1.4 Monitoramento de 5 parâmetros de qualidade da água *in loco***

A tabela 7 apresenta os valores máximo, mínimo e médio dos 5 parâmetros de qualidade da água já monitorados nas estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba pertencentes a RHN, antes da ruptura da barragem e dos pontos de monitoramento após ruptura da barragem, em janeiro a março de 2019.

Analisando esta tabela verifica-se que os valores nos cursos d'água da bacia do rio Paraopeba, antes e após a ruptura da barragem, foram:

- temperatura da água entre 13,8 a 30°C antes da ruptura; 23 a 33°C após a ruptura;
- pH entre 5,1 e 8,4 antes da ruptura; 6 a 8,2 após a ruptura;
- OD entre 3,6 e 10,2mg/L antes da ruptura; 5 a 8,2 mg/L após a ruptura;
- Condutividade Elétrica entre 15 e 570 $\mu$ S/cm antes da ruptura; 29 a 270 $\mu$ S/cm após a ruptura;
- Turbidez entre 1,5 a 1.100 NTU; antes da ruptura; 11 a 22.000NTU após a ruptura.

Todos os valores encontrados estão compatíveis com os registrados na série histórica, exceto a turbidez, cujos valores encontrados máximos encontrados eram da ordem de 1.100NTU.

Importante ressaltar que os valores encontrados para pH e OD estão compatíveis com os limites previstos na DN COPAM/CERH N°01/2008 para classe 2, entre 6 a 9 para pH e maior que 5mg/L para o OD. Já para Turbidez o limite previsto nesta legislação é de 100NTU. Não existem limites para temperatura da água e condutividade elétrica.

Tabela 7 – Dados de Temperatura da água, pH, Condutividade Elétrica, OD e Turbidez antes e depois da ruptura da barragem até 31/03/2019

Parâmetro	Estatística	Antes da ruptura								Depois da ruptura							
		São Bras do Suaçui	Congonhas Linígrafo	Entre Rios de Minas	Belo Vale	Alberto Flores	Ponte Nova do Paraopeba	Mateus Leme	Ponte da Taquara	Mário Campos	Ponte BR-381	Monte Ponte BR-262	Ponte BR-262	Ponte Nova do Paraopeba	Faz MG-060	Ponte da Taquara	Monte Retiro Baixo
Temperatura da água (°C)	Med	20,4	20,1	20,3	22,5	22,0	22,4	20,5	22,7	25,7	28,1	26,6	27,2	26,5	28,6	27,5	27,7
	Min	14,8	14,9	15,1	13,8	15,1	17,0	15,0	17,0	23,0	23,8	23,7	23,6	23,7	25,9	24,6	26,1
	Max	28,6	25,4	28,6	30,0	26,5	27,5	26,0	26,9	31,2	32,1	31,2	31,5	29,7	30,4	30,7	30,0
pH	Med	7,18	7,01	7,06	7,04	7,26	7,26	6,91	7,31	7,17	7,16	7,14	6,91	7,12	6,89	7,24	7,49
	Min	6,50	6,30	6,22	5,10	6,07	6,07	5,60	6,75	6,08	6,36	6,50	6,40	6,61	6,48	6,52	7,20
	Max	7,90	7,80	7,90	8,13	8,23	8,23	8,37	8,14	7,82	8,06	7,62	7,49	7,37	7,15	7,66	8,13
Condutividade de Elétrica (µS/cm)	Med	43,9	182,6	31,9	69,4	65,9	71,6	67,7	88,6	74,0	110,2	104,0	109,4	107,2	120,0	103,1	90,8
	Min	23,0	63,0	15,2	22,8	43,8	24,2	39,5	36,5	29,4	73,2	73,7	77,3	65,8	107,6	47,7	77,3
	Max	59,1	412,9	55,0	135,0	128,1	161,0	567,9	156,9	127,0	130,7	138,1	130,9	270,0	122,0	130,6	102,9
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Med	7,57	6,45	7,83	7,47	8,11	7,59	6,71	7,01	7,42	7,04	6,86	6,25	6,86	6,92	6,60	7,07
	Min	5,28	5,30	5,84	5,82	7,14	3,60	3,60	4,75	6,25	6,35	6,03	5,27	5,33	6,51	5,29	6,29
	Max	10,20	8,57	10,10	9,90	9,70	9,71	8,43	9,14	8,20	7,94	7,54	7,24	7,68	7,07	7,80	7,36
Turbidez (NTU)	Med	141,2	91,4	98,2	128,3	99,5	87,0	11,0	42,7	<b>2393,8</b>	<b>1305,1</b>	<b>639,4</b>	<b>212,8</b>	<b>872,0</b>	<b>57,9</b>	<b>242,7</b>	<b>342,8</b>
	Min	2,2	2,1	2,8	2,9	4,4	2,1	1,5	2,9	<b>366,4</b>	<b>45,7</b>	<b>30,5</b>	<b>15,1</b>	<b>19,7</b>	<b>30,4</b>	<b>11,4</b>	<b>97,4</b>
	Max	1082,0	829,0	566,0	858,0	746,0	750,0	72,0	381,0	<b>21031,2</b>	<b>4020,7</b>	<b>1990,2</b>	<b>1590,4</b>	<b>13264,5</b>	<b>281,5</b>	<b>1681,9</b>	<b>900,6</b>

Antes - série histórica de um modo geral de 2002 a 2018, exceto turbidez 2013 a 2018; depois – 26/01 a 31/03/2019

A figura 22 apresenta os resultados do monitoramento de: turbidez *in loco*, ao longo do tempo em diversos pontos do rio Paraopeba após a ruptura da barragem. Os valores representam a média simples das amostras em cada seção.

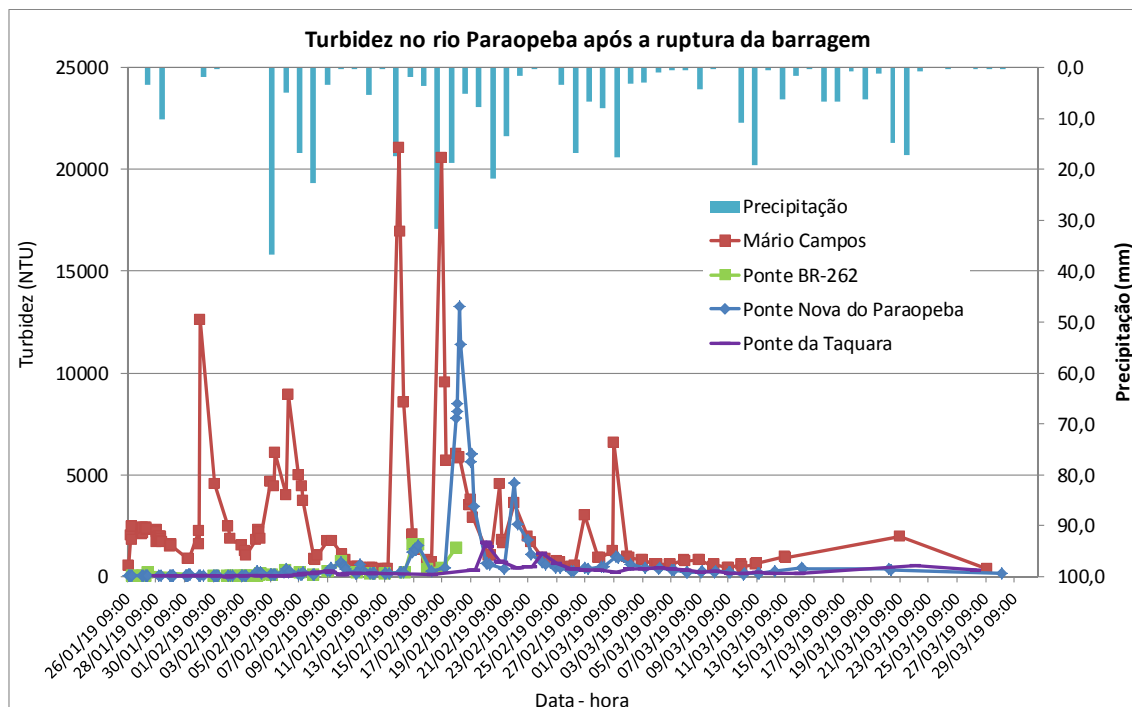


Figura 22 – Monitoramento da turbidez ao longo do tempo no rio Paraopeba após a ruptura da barragem.

Analisando a figura verifica-se que houve um aumento da turbidez do rio Paraopeba após a ruptura da barragem e nos períodos de chuva de 4 a 8 de fevereiro, de 13 a 22 de fevereiro e no início de março de 2019.

Importante ressaltar que na determinação da turbidez *in loco*, em função da grande quantidade de sedimentos em suspensão, em alguns casos, onde a turbidez era maior do que 1.500 NTU, foi necessário diluir a amostra para então fazer a medição com a sonda multiparamétrica.

Os dados do monitoramento hidrológico, sedimentométrico e dos 5 parâmetros de qualidade da água *in loco* realizado pela CPRM, estão sendo disponibilizados no site: [http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_rio\\_paraopeba.php](http://www.cprm.gov.br/sace/index_rio_paraopeba.php).

#### 4.1.5 Monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão

A tabela 8 apresenta os valores mínimo, médio e máximo de concentração de sedimentos em suspensão já medidos em estações fluviométricas na bacia do rio Paraopeba, antes da ruptura da barragem e nos pontos de monitoramento após ruptura da barragem até 10 de março de 2019.

Cabe ressaltar que as concentrações de sedimentos em suspensão da série histórica das estações, são concentrações obtidas pelo método de IIL ou IID, onde são coletadas amostras integradas em várias verticais ao longo de toda a sua profundidade.

Já as concentrações de sedimentos em suspensão após a ruptura da barragem, são concentrações de amostras coletadas da seguinte forma: em 3 verticais e em 3 profundidades, 2 a 4 vezes por dia. Em Mário Campos, Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara, foram coletadas também amostras através do método IID uma vez por dia.

Tabela 8 - Valores de concentração de sedimentos e descarga sólida em suspensão nos cursos d'água da bacia do rio Paraopeba, antes e após a ruptura da barragem até 10/03/2019

		Antes da ruptura					Depois da ruptura - 3					
Nome		Belo Vale	São Joaquim de Bicas	Ponte Nova do Paraopeba	Mateus Leme	Ponte da Taquara	Porto Mesquita	Mário Campos	BR-381	BR-262	Ponte Nova do Paraopeba	Ponte da Taquara
Rede		RHN 1	CEMIG 2	RHN 1	RHN 1	CODEVASF 2	CEMIG 2	Extra	Extra	Extra	RHN	RHN
Período		1975/2018	1982/1994	1975/2018	1989/2018	1972/1978	1978/1995	26/01 a 10/03/2019				
Vazão (m³/s) medida	Média	35,8	111	81,4	15,5	114	195	51,8	-	-	59,2	79,6
	DP	23,9	83	57,1	90,8	74	149	24,4	-	-	27,9	37,7
	Mínimo	10,4	25	24,7	0,1	29	32	25,8	-	-	24,5	32,2
	Máximo	150	410	246	575	414	889	136,0	-	-	149,7	173,4
	Quartil 1	19,7	-	38,6	0,4	-	-	33,0	-	-	36,9	46,2
	Mediana	27,1	-	62,9	0,7	-	-	47,6	-	-	54,5	72,7
	Quartil 3	45,7	-	117	1	-	-	58,5	-	-	71,1	99,5
Css(mg/L) medida	Média	341,9	428	428	47,9	276	354	1.685	819	286	334	141
	DP	636,4	525	541	112,6	240	310	2.061	1.836	577	768	128
	Mínimo	7,4	12,5	5,7	2,2	46	14	131	32	16	1	9
	Máximo	<b>4.879</b>	<b>3.664</b>	<b>2.651</b>	<b>632</b>	<b>1.468</b>	<b>2.120</b>	<b>8.844</b>	<b>7.558</b>	<b>2.353</b>	<b>4.112</b>	<b>737</b>
	Quartil 1	41,8	-	48,4	8,3	-	-	413	70	27	42	75
	Mediana	109,2	-	193	13	-	-	784	336	42	115	109
	Quartil 3	361,3	-	608	22,3	-	-	2.052	521	233	191	159

Fonte: 1 – Hidroweb, 2 – Castilho, 1998; Vazão medida; 3 – Mário Campos, Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara amostras IID, BR-381 e BR-262 – amostras em 3 verticais e 3 profundidades até 15 e 18/02/19 respectivamente



Analisando a tabela 8 verifica-se que os maiores valores de concentração de sedimentos já monitorados nos cursos d'água da bacia do rio Paraopeba foram inferiores a 5.000mg/L. Importante ressaltar que a estação 40788000 – São Joaquim de Bicas da rede da CEMIG era bem próxima a ponte da BR-381. A tabela apresenta que foram verificadas concentrações de sedimentos em suspensão inferiores a 9.000mg/L após a ruptura da barragem.

Comparando as estatísticas das séries de vazão e concentração de sedimentos em suspensão antes e após a ruptura da barragem verifica-se:

- As concentrações de sedimentos em suspensão medidas em São Joaquim de Bicas de 1982 a 1994 foram muito menores do que as concentrações medidas em Mário Campos e Ponte BR-381 após a ruptura da barragem até 10 de março de 2019. Entretanto as vazões medidas durante as medições de descarga sólida no mesmo período 1982/1994 tem uma amplitude maior do que as medidas após a ruptura da barragem. Evidenciando a elevação das concentrações de sedimentos em suspensão do rio Paraopeba em função da ruptura da barragem.
- As concentrações de sedimentos em suspensão medidas em Ponte Nova do Paraopeba de 1975 a 2018 foram menores do que as concentrações medidas nesta estação após a ruptura da barragem até 10 de março de 2019. Ressalta-se que a mediana da concentração de sedimentos em suspensão antes da ruptura é maior do que depois, isto porque no final de janeiro de 2019, as vazões do rio Paraopeba eram da ordem de 32m<sup>3</sup>/s, muito menores do que a média mensal de janeiro de 173m<sup>3</sup>/s, e consequentemente a concentração de sedimentos em suspensão na data da ruptura era muito pequena, da ordem de 25mg/L.
- As concentrações de sedimentos em suspensão e vazões medidas em Ponte da Taquara de 1972 a 1978 abrangeram uma faixa maior do que as medidas após a ruptura da barragem até 10 de março de 2019.

As figuras 23 e 24 apresentam os dados de C<sub>ss</sub> registrados no rio Paraopeba antes e depois da ruptura da barragem.

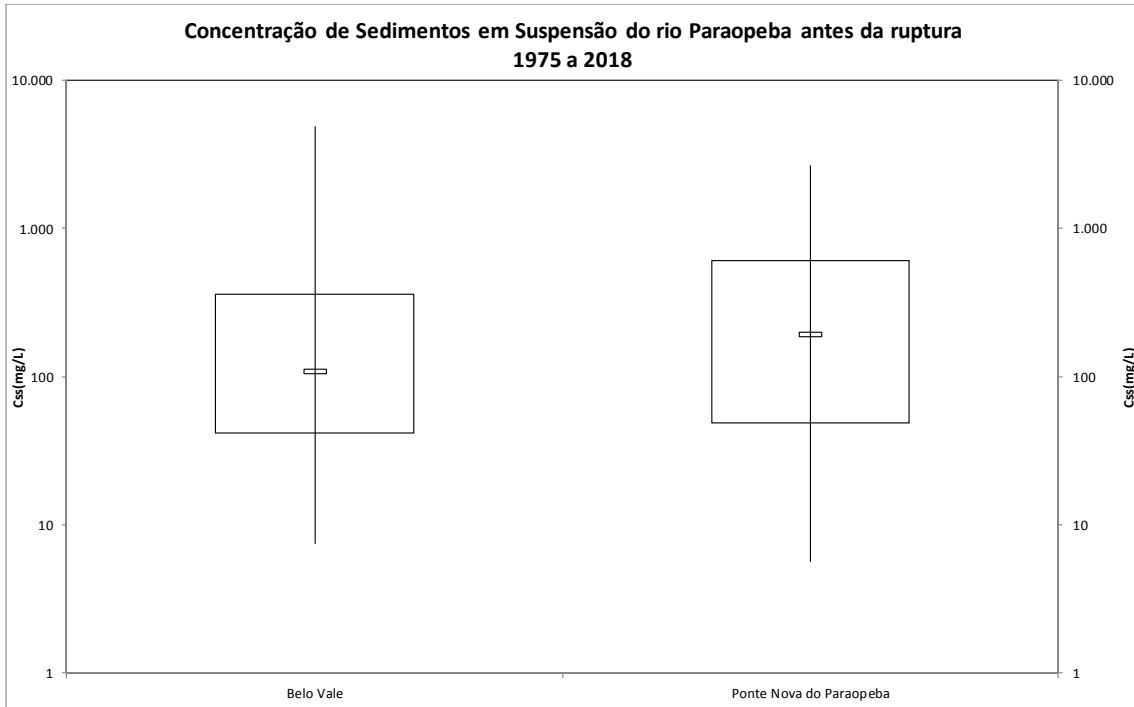


Figura 23 – Concentração de Sedimentos em Suspensão Medidas no rio Paraopeba antes da ruptura

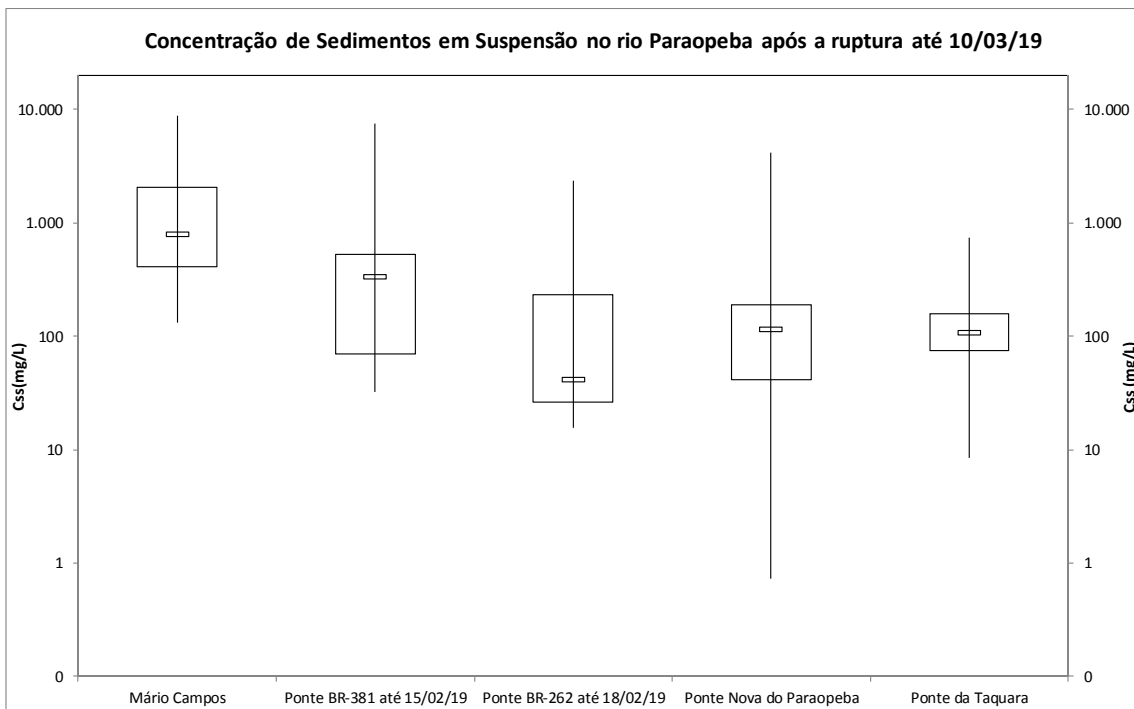


Figura 24 – Concentração de Sedimentos em Suspensão Medidas no rio Paraopeba após da ruptura

---

Com os dados de concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ -mg/L) e a vazão ( $Q$ -m<sup>3</sup>/s) no dia da coleta das amostras é possível calcular a descarga sólida ( $Q_{ss}$ -t/dia), através da equação:

$$Q_{ss} = 0,0864 * Q * C_{ss}$$

A tabela 9 apresenta o resultado da concentração de sedimentos em suspensão, de vazão e o cálculo da descarga sólida após a ruptura da barragem. Até o momento só se encontram disponíveis os dados de concentração de sedimentos em suspensão até o dia 10 de março de 2019.

Tabela 9 – Concentração de Sedimentos em suspensão e Descarga sólida média diária no rio Paraopeba após a ruptura da barragem

Data	Mário Campos				Ponte Nova do Paraopeba				Ponte da Taquara			
	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)
26/01/19	1.660	29	4.201	1.576	22	34	63	24	-	43	-	-
27/01/19	2.863	29	7.245	2.725	30	34	87	17	-	43	-	-
28/01/19	1.097	29	2.776	1.039	25	31	67	29	81	45	314	28
29/01/19	526	29	1.332	494	22	34	66	22	71	39	243	15
30/01/19	445	26	992	-	41	32	111	40	69	36	213	-
31/01/19	7.519	27	17.625	7.286	28	32	77	27	66	41	235	9
01/02/19	4.725	28	11.619	1.463	23	27	54	24	73	38	238	18
02/02/19	3.491	30	8.986	3.325	1	26	2	6	9	36	26	-
03/02/19	585	31	1.572	549	13	25	28	12	15	35	46	-
04/02/19	681	32	1.909	641	138	61	734	147	14	32	40	-
05/02/19	1.572	34	4.588	1.492	44	38	142	30	22	47	90	-
06/02/19	3.287	43	12.256	3.130	183	72	1.134	123	45	61	240	-
07/02/19	1.800	44	6.891	1.710	102	56	490	91	78	66	443	-
08/02/19	491	43	1.819	460	44	51	192	35	104	82	729	-
09/02/19	2.451	64	13.518	2.331	90	69	534	89	125	75	809	-
10/02/19	680	50	2.936	641	191	61	1.013	163	73	72	453	-
11/02/19	1.616	40	5.525	1.535	50	48	208	43	82	78	554	-
12/02/19	164	33	469	148	37	40	127	22	79	65	446	-
13/02/19	131	30	339	113	13	35	38	16	96	55	451	-
14/02/19	8.115	41	28.418	7.741	66	52	293	61	112	57	553	-
15/02/19	873	51	3.865	782	445	50	1.932	386	129	61	679	-
16/02/19	374	54	1.758	349	187	58	944	163	146	62	777	-
17/02/19	2.868	57	14.233	6.800	258	79	1.757	170	162	93	1.298	-
18/02/19	8.844	107	81.496	8.437	4.112	121	43.099	3.465	179	119	1.831	-
19/02/19	2.070	90	16.124	1.620	2.352	50	10.249	1.984	195	173	2.926	182
20/02/19	3.840	61	20.165	491	198	79	1.345	172	737	157	10.010	918
21/02/19	825	57	4.059	1.107	237	73	1.494	205	308	114	3.048	290
22/02/19	2.815	136	33.077	2.419	2.565	150	33.171	2.155	278	117	2.803	-
23/02/19	1.466	114	14.440	1.194	888	134	10.249	692	247	168	3.592	-

Tabela 9 – Concentração de Sedimentos em suspensão e Descarga sólida média diária no rio Paraopeba após a ruptura da barragem

Data	Mário Campos				Ponte Nova do Paraopeba				Ponte da Taquara			
	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)	Css - 1 (mg/L)	Vazão (m³/s)	Qss (t/d)	Css - 2 (mg/L)
24/02/19	743	93	5.985	692	336	91	<b>2.637</b>	289	548	153	<b>7.241</b>	-
25/02/19	402	53	1.844	378	146	65	815	150	276	112	2.680	-
26/02/19	244	47	991	243	115	53	527	90	147	84	1.070	-
27/02/19	828	58	4.142	956	146	71	892	159	99	82	697	-
28/02/19	535	57	2.626	535	166	30	433	162	146	101	1.277	-
01/03/19	<b>1.997</b>	72	12.337	1.898	507	102	4.468	526	<b>157</b>	41	560	-
02/03/19	651	69	3.898	697	276	84	2.010	253	168	127	1.839	-
03/03/19	500	62	2.658	455	173	73	1.084	148	<b>163</b>	146	2.055	-
04/03/19	355	60	1.847	382	150	67	868	150	159	110	1.508	-
05/03/19	372	50	1.596	443	173	63	943	145	119	98	1.005	-
06/03/19	395	49	1.668	425	72	57	359	75	106	95	873	-
07/03/19	656	48	2.732	455	75	56	361	65	96	87	729	-
08/03/19	301	43	1.127	296	81	51	357	57	127	81	888	-
09/03/19	196	39	667	218	51	47	207	41	72	73	452	-
10/03/19	273	37	862	272	42	43	155	43	74	67	427	-
<b>Total 26/01/19 a 10/03/19</b>			<b>369.210</b>				<b>125.816</b>				<b>56.388</b>	
<b>Total fev/19</b>			<b>305.649</b>				<b>114.533</b>				<b>45.048</b>	

Css – 1 – Amostras IID; Css-2 – Amostras não IID; Em vermelho: vazões estimadas em Mário Campos; vazões obtidas pela curva chave atualizada em Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara; concentrações estimadas por meio de correlação de amostras IID e não IID

A Figura 25 apresenta a descarga sólida em suspensão acumulada até o dia 10 de março de 2019 nos pontos de monitoramento e a precipitação acumulada registrada nas 6 estações pluviométricas. Analisando esta figura verifica-se que os aumentos de descarga sólida em suspensão na bacia estão vinculados a ocorrência de precipitação. Importante ressaltar o aumento de descarga sólida registrada em Mário Campos no dia 30 de janeiro foi decorrente de chuvas localizadas na bacia do ribeirão Ferro Carvão, bem como o esvaziamento preventivo da barragem B2 da mina do Córrego Feijão.

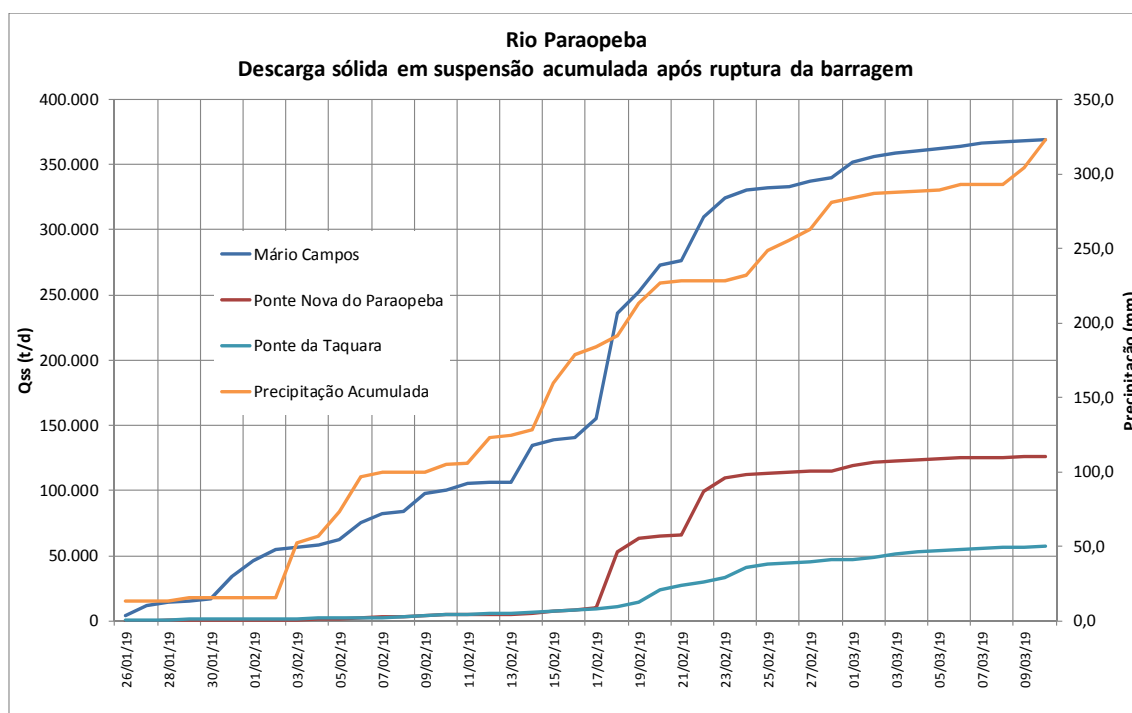


Figura 25 – Descarga sólida em suspensão acumulada do rio Paraopeba após a ruptura da barragem

As Figuras 26 e 27 apresentam a descarga sólida diária registrada nos pontos de monitoramento Mário Campos e Ponte Nova do Paraopeba até o dia 10 de março de 2019. Observa-se que o período de maior descarga sólida em suspensão está compreendido entre 17 a 24 de fevereiro de 2019, que coincide com a maior incidência de chuva na bacia.

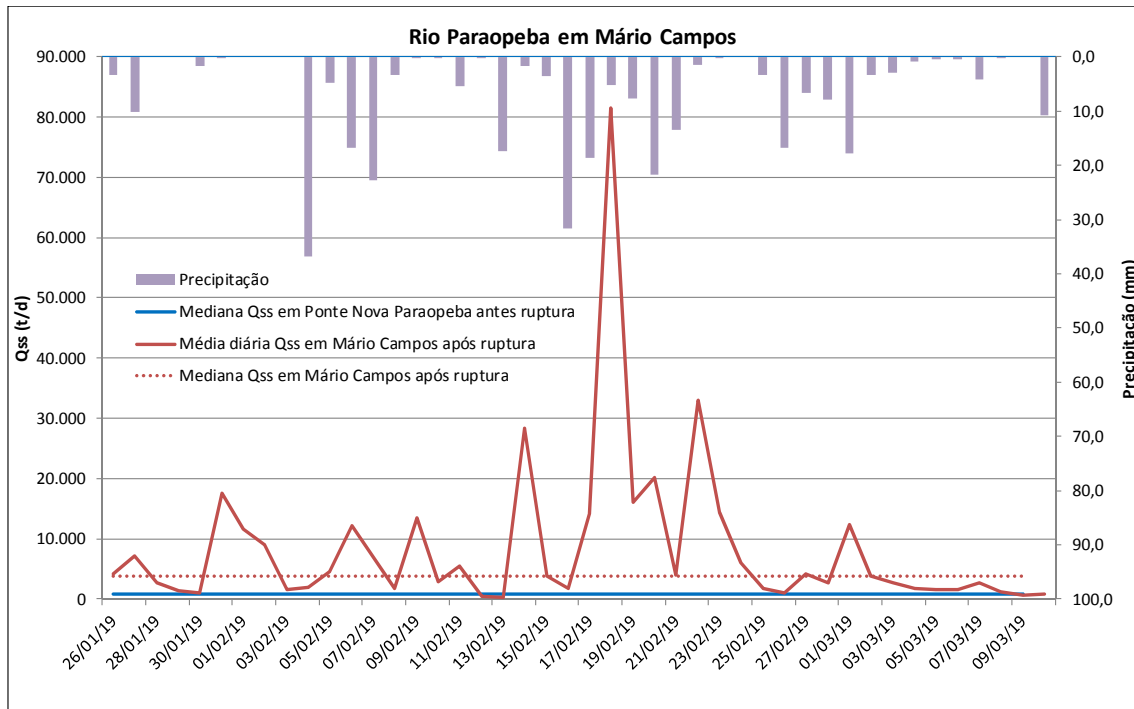


Figura 26 – Descarga sólida média diária em Mário Campos após ruptura da barragem

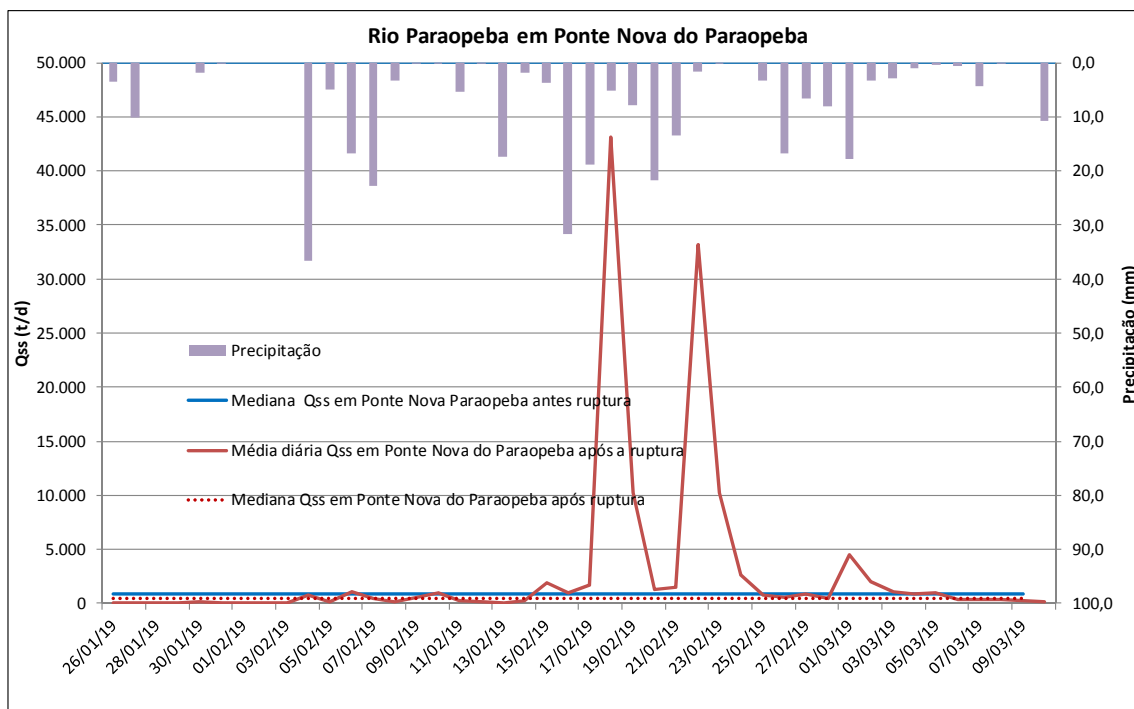


Figura 27 – Descarga sólida média diária em Ponte Nova do Paraopeba após ruptura da barragem

Com os valores de descarga líquida e descarga sólida é possível estabelecer uma correlação entre estas variáveis, chamada curva chave de sedimentos e estimar a descarga sólida em dias em que não houve coleta de amostras e, conseqüentemente estimar a descarga sólida mensal e anual. A curva chave de sedimentos em suspensão tem a seguinte forma:

$$Q_{ss} = a Q^b$$

Importante ressaltar que o número de medições de descarga sólida realizado por ano, 3 a 4, é muito pouco representativo da variação da concentração de sedimentos em suspensão registrada ao longo do ano. Assim, as curvas chaves de sedimentos que derivam deste conjunto de medições, possuem uma dispersão dos dados muito grande e, conseqüentemente, as estimativas de descarga sólida em suspensão resultantes da aplicação destas curvas chaves devem ser limitadas a uma estimativa da descarga sólida mensal e anual.

Com os dados históricos, foram estabelecidas as curvas chaves de sedimentos para as estações de Belo Vale-40710000 e Ponte Nova do Paraopeba-40800001, as quais se encontram apresentadas nas figuras 28 e 29.

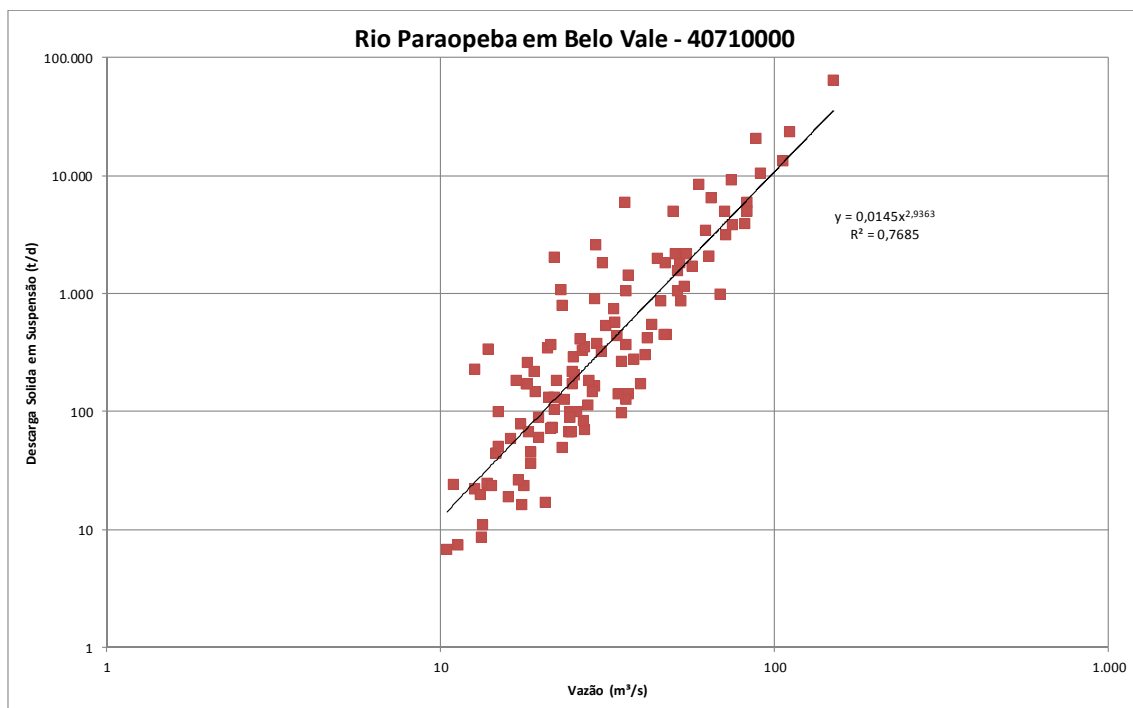


Figura 28 – Curva chave de sedimento do rio Paraopeba em Belo Vale



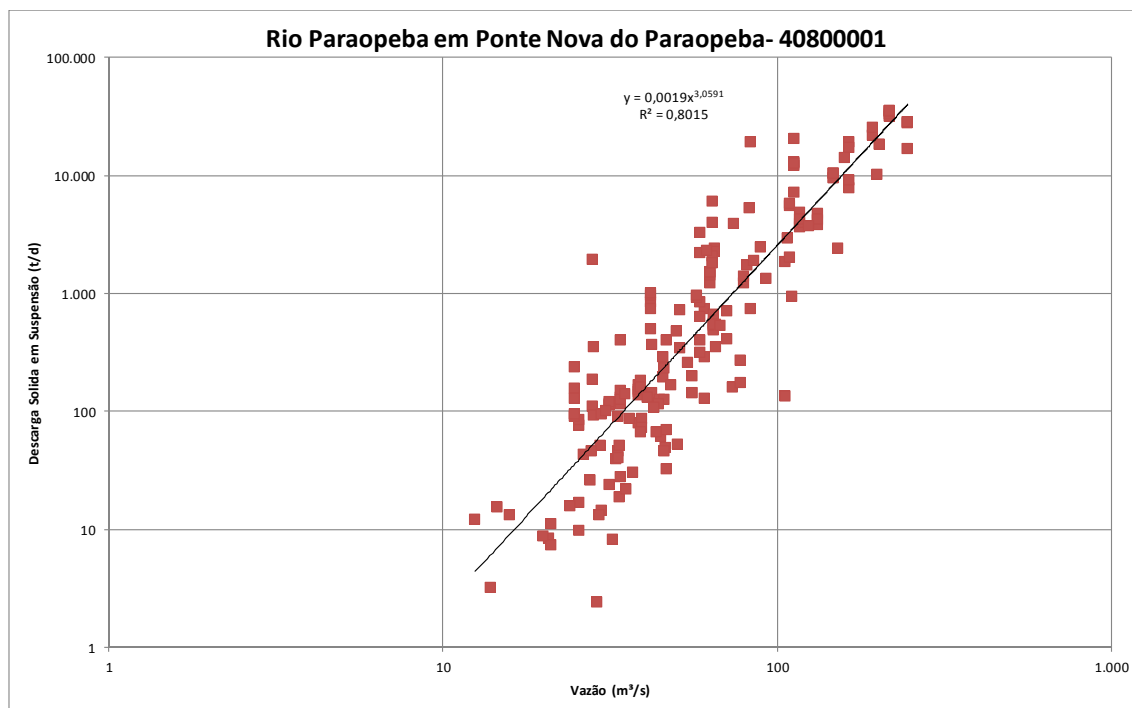


Figura 29 – Curva chave de Sedimento do rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba

A Tabela 10 apresenta a descarga sólida em suspensão média anual, e as mensais, calculadas a partir da série de vazões médias mensais, e a descarga sólida transportada no rio Paraopeba em diversos pontos de monitoramento no período de 26 de janeiro a 10 de março de 2019, após a ruptura da barragem.

Tabela 10 – Comparação entre a descarga sólida em suspensão média anual e transportada pelo rio Paraopeba no período de 26 de janeiro a 10 de março de 2019

Estação	Qss (mil t)													26/01 a 10/03/19
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual	
<b>Belo Vale</b>	750	292	154	55	20	12	7	5	7	15	56	235	1.608 (1)	-
<b>Mário Campos</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.421 (2)	369
<b>Ponte Nova do Paraopeba</b>	560	223	206	57	22	13	7	4	5	10	44	193	1.345 (1)	126
<b>Ponte da Taquara</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.060 (3)	56

1 – Dados da RHN de 1975 a 2018; 2 – Descarga sólida em suspensão média em São Joaquim de Bicas de 1982 a 1994, Castilho, 1998; 3 - Descarga sólida em suspensão média em Ponte da Taquara de 1972 a 1978, Castilho, 1998.

Analisando a Tabela verifica-se que a descarga sólida em suspensão transportada pelo rio Paraopeba em Mário Campos até o dia 10 de março de 2019 foi de 369mil toneladas, superior a descarga sólida média de fevereiro em Belo Vale, já em Ponte Nova do Paraopeba foi de 126mil toneladas no mesmo período, inferior a média mensal no mês de fevereiro que é de 223mil toneladas. Porém, é importante ressaltar que as vazões médias mensais em Ponte Nova do Paraopeba, em janeiro e fevereiro são da ordem de 173 e 143 m³/s, respectivamente. Entretanto a vazão média nesta estação no período de 25 de janeiro a 10 de março de 2019 foi da ordem de 59,2m³/s, muito abaixo da média de janeiro e fevereiro e equivalente a vazão de maio nesta estação. Assim a descarga sólida média transportada neste período deveria ser

—

muito menor do que a média mensal de fevereiro, equivalente a descarga de maio, que é da ordem de 22mil toneladas.

Por outro lado, a Vale informou em reunião ocorrida em 13 de março de 2019 nas dependências da CPRM que:

- O volume da barragem de rejeitos é de 11,7Mm<sup>3</sup>, destes cerca de 2,7/2,9Mm<sup>3</sup> ficaram retidos na barragem.
- Foi feita uma estimativa do volume depositado na bacia do ribeirão Ferro Carvão a partir da topografia anterior a ruptura e por imagens LIDAR, da ordem de 4Mm<sup>3</sup>.

Considerando estas estimativas informadas pela Vale, cerca de 5,0Mm<sup>3</sup>, estariam depositados sendo transportados no rio Paraopeba.

A título de comparação, segundo CPRM (2015), a concentração de sedimentos em suspensão, após a ruptura da barragem do Fundão da Samarco, no mês de novembro de 2015, verificada no rio Doce foi:

- nas estações mais a montante, Cachoeira dos Óculos e Belo Oriente, da ordem de centenas de milhares de mg/L;
- nas estações do trecho médio, Governador Valadares a Tumiritinga, da ordem de dezenas de milhares de mg/L de;
- nas estações a jusante de Resplendor, da ordem de unidades de milhares de mg/L.

Ou seja, a concentração de sedimentos em suspensão verificada no rio Doce após ruptura da barragem de Fundão da Samarco no rio Doce foi muito maior do que a verificada no rio Paraopeba, em Mario Campos, até o dia 10 de março de 2019, após a ruptura da barragem de Córrego do Feijão da Vale.

A título de comparação, segundo CPRM (2015), a descarga sólida em suspensão transportada pelo rio Doce após a ruptura da barragem em novembro de 2015 foi da ordem de:

- 16,6Mt em Cachoeira dos Óculos;
- 1,5Mt em Governador Valadares;
- 0,72Mt em Tumiritinga e
- 0,15Mt em Colatina.

Importante ressaltar que uma das características das amostras coletadas no rio Paraopeba foi a grande velocidade de decantação das partículas em suspensão, diferentemente das amostras coletadas no rio Doce após a ruptura da barragem de Fundão, vide Foto 13.

Em função da grande quantidade de sedimentos em suspensão no ponto de monitoramento Mário Campos, no início dos trabalhos, algumas adaptações foram feitas para possibilitar a coleta das amostras para análise de sedimentos, com a retirada do bico do amostrador para impedir o entupimento.



Foto 13 – Amostra do rio Paraopeba em Mário Campos – decantada e agitada de 07/02/19

#### 4.1.6 Monitoramento da granulometria do material em suspensão

A tabela 11 apresenta dos diâmetros característicos, médios diários, D10, D50 e D90 das amostras coletadas do material em suspensão, após a ruptura da barragem. Até o momento só estão disponíveis dados de granulometria do material em suspensão no ponto de monitoramento Mário Campos até o dia 6 de fevereiro. Observa-se que do dia 29 de janeiro para 6 de fevereiro houve pequena variação do D50, de 4 a 7 $\mu$ m, mas dentro da faixa do silte muito fino.

Tabela 11 – Diâmetros Característicos do Sedimento em Suspensão no rio Paraopeba, após a ruptura da barragem

Estação	Data	D10( $\mu$ m)	D50( $\mu$ m)	D90( $\mu$ m)
Mário Campos	29-jan-19	1,1	3,8	10,8
Mário Campos	30-jan-19	1,1	4,8	17,3
Mário Campos	31-jan-19	1,2	4,8	15,7
Mário Campos	01-fev-19	1,1	4,3	14,8
Mário Campos	03-fev-19	1,8	6,8	23,8
Mário Campos	04-fev-19	1,7	6,7	23,6
Mário Campos	05-fev-19	1,3	5,4	19,1
Mário Campos	06-fev-19	1,3	5,5	19,6

A tabela 12 apresenta a Classificação granulométrica da American Geophysical Union.

Tabela 12 – Classificação granulométrica da American Geophysical Union

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Denominação</b>
64 a 32	Cascalho muito grosso
32 a 16	Cascalho grosso
16 a 8	Cascalho médio
8 a 4	Cascalho fino
4 a 2	Cascalho muito fino
2,00 a 1,00	Areia muito grossa
1,00 a 0,50	Areia grossa
0,50 a 0,25	Areia média
0,25 a 0,125	Areia fina
0,125 a 0,0625	Areia muito fina
0,0625 a 0,031	Silte grosso
0,031 a 0,016	Silte médio
0,016 a 0,008	Silte fino
0,008 a 0,004	Silte muito fino
0,004 a 0,0020	Argila grossa
0,0020 a 0,0010	Argila média
0,0010 a 0,0005	Argila fina
0,0005 a 0,00024	Argila muito fina

A título de comparação, a granulometria do material em suspensão amostrado no rio Doce após a ruptura da barragem do Fundão em novembro de 2015, o diâmetro D50, foi da ordem de:

- Cachoeira dos Óculos e Belo Oriente – 18 $\mu$ m – silte médio;
- Governador Valadares e Tumiritinga – 7 a 9 $\mu$ m – silte muito fino a silte fino;
- Colatina e Linhares – 3 a 6 $\mu$ m – argila grossa.

As figuras 30 e 31 apresentam as curvas granulométricas do material em suspensão do rio Paraopeba e do rio Doce após a ruptura das barragens de rejeito.

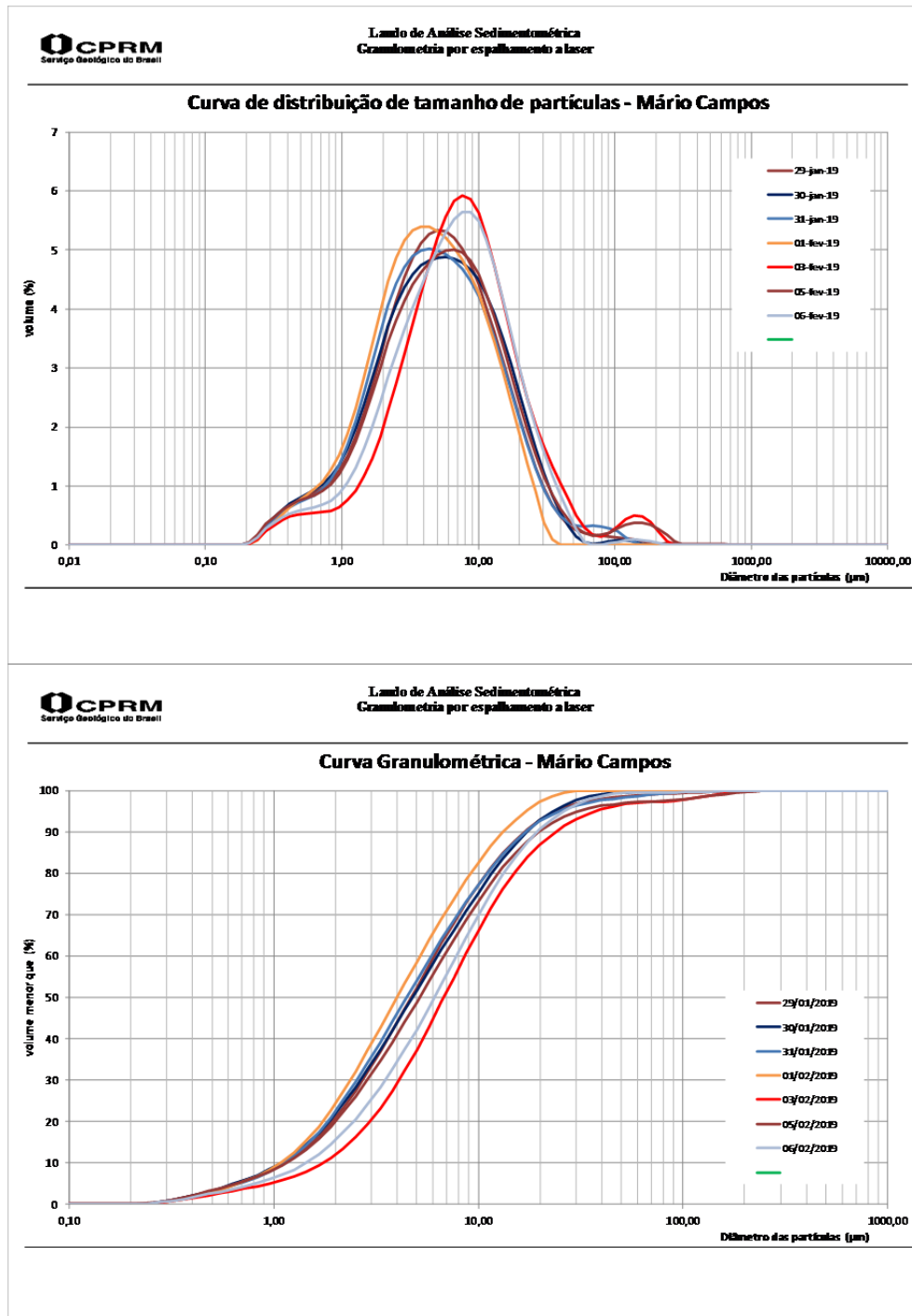


Figura 30 – Curvas Granulométricas do material em suspensão do rio Paraopeba após ruptura da barragem

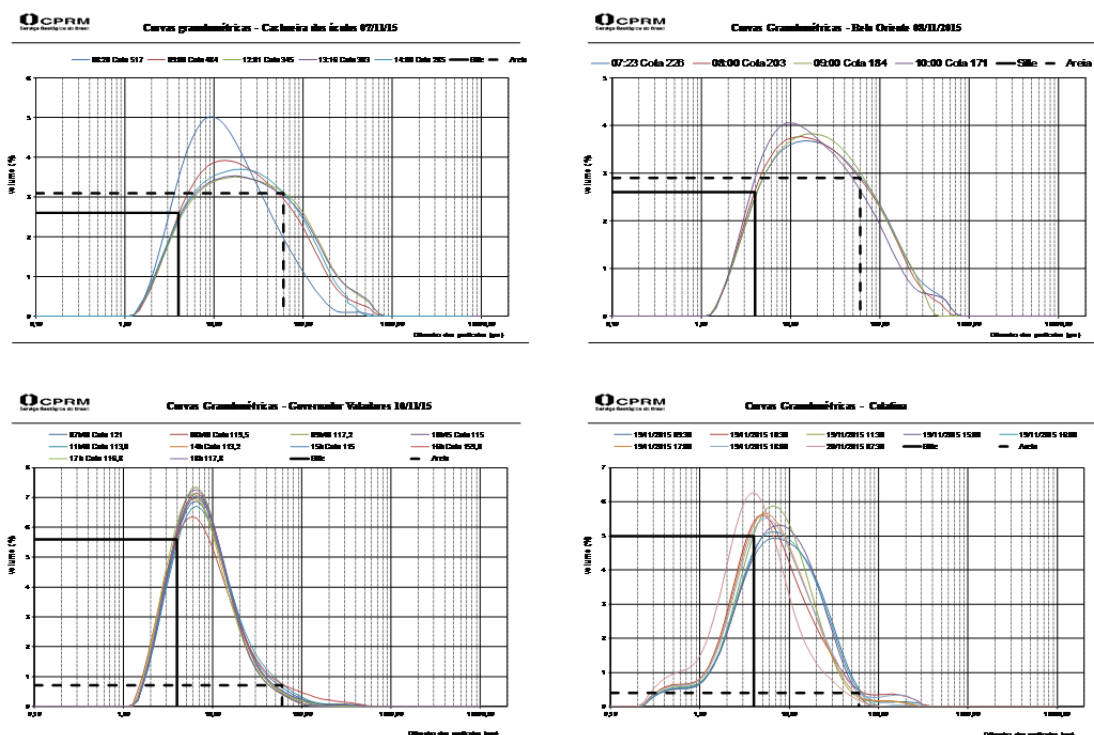


Figura 31 – Curvas granulométricas do material em suspensão do rio Doce após a ruptura da barragem

#### 4.1.7 Monitoramento da granulometria do material de fundo

A tabela 13 apresenta os valores de diâmetros em mm característicos do material de fundo no rio Paraopeba em diversas estações, antes da ruptura da barragem.

Tabela 13 – Valores característicos de granulometria do material de fundo do rio Paraopeba em diversas estações, antes da ruptura da barragem em mm

CODIGO	NOME	ESTATÍSTICA	D16	D35	D50	D65	D84	D90
40788000	São Joaquim de Bicas	Média	0,32	0,46	0,60	0,86	1,44	1,87
		DP	0,10	0,15	0,22	0,53	0,79	0,87
		Máximo	0,92	1,38	1,73	4,48	6,35	6,95
		Mínimo	0,09	0,23	0,32	0,45	0,83	0,95
40850000	Ponte da Taquara	Média	0,19	0,28	0,36	0,45	0,66	0,81
		DP	0,07	0,09	0,11	0,14	0,26	0,34
		Máximo	0,57	0,72	0,90	1,40	2,70	3,55
		Mínimo	0,08	0,11	<b>0,16</b>	0,21	0,32	0,41
40865000	Porto Mesquita	Média	0,31	0,49	0,64	0,86	1,61	2,16
		DP	0,09	0,11	0,15	0,21	0,89	1,43
		Máximo	0,70	0,99	<b>1,43</b>	1,89	11,70	19,47
		Mínimo	0,08	0,21	0,26	0,36	0,78	0,91

Fonte Castilho, 1998

Analisando a tabela anterior, segundo a classificação granulométrica da American Geophysical Union, verifica-se que o material de fundo é predominantemente:

- Areia fina a areia muito grossa em São Joaquim de Bicas (1982 a 1994);
- Areia muito fina a areia grossa em Ponte da Taquara (1978);
- Areia fina a cascalho muito fino em Porto Mesquita (1978 a 1995).

Importante ressaltar que a série de dados de Ponte da Taquara de granulometria é muito pequena, apenas um ano e pouco representativa.

No próximo relatório, serão apresentados os resultados da granulometria do material de fundo do rio Paraopeba após a ruptura da barragem.

A título de informação, a granulometria do material de fundo amostrado no rio Doce após a ruptura da barragem do Fundão, encontra-se apresentada na Tabela 14. O D50 corresponde a areia grossa.

Tabela 14 – Granulometria do material de fundo do rio Doce após a ruptura da barragem do Fundão

Estação	Data	D10% (mm)	D50% (mm)	D60% (mm)
Governador Valadares	01/12/15	-	0,70	1,20
Tumiritinga	02/12/15	0,27	0,62	0,98
Colatina	07/12/15	0,20	0,63	0,81
	15/12/15	0,22	0,53	0,68
Linhares	08/12/15	0,27	0,55	0,65
	16/12/15	0,25	0,59	0,71

#### 4.1.8 Cálculo da descarga sólida total

Castilho (1998) fez uma análise comparativa das equações para cálculo da descarga de fundo e total. Para as estações localizadas na bacia do rio Paraopeba chegou-se as relações apresentadas na tabela 15.

Tabela 15 – Relação entre a descarga sólida do fundo e total obtida através de várias equações nas estações do rio Paraopeba, antes da ruptura da barragem

Estação	Ackers	Engelund	Yang	Meyer	Schoklistch	Colby
Belo Vale	-	-	-	-	-	0,38
São Joaquim de Bicas	0,31	0,60	0,39	0,07	0,20	0,29
Ponte Nova do Paraopeba	-	-	-	-	-	0,27
Mateus Leme	-	-	-	-	-	0,40
Ponte da Taquara	0,31	0,56	0,50	0,11	0,15	0,33
Porto Mesquita	0,17	0,47	0,40	0,07	0,14	0,29
<b>Média</b>	<b>0,26</b>	<b>0,54</b>	<b>0,43</b>	<b>0,08</b>	<b>0,16</b>	<b>0,33</b>

A equação de Colby depende de parâmetros hidráulicos da seção e a descarga de fundo representa 29 a 40% da descarga total das estações da bacia do rio Paraopeba.

Para aplicação das demais estações, além dos parâmetros hidráulicos da seção, são utilizados também dados de granulometria de fundo. Verifica-se que a relação obtida pelas equações de

Meyer Peter & Muller e Shoklistch variam entre 7 a 20% da descarga total. Já a relação obtida pelas equações de Ackers & White, Engelund & Hansen e Yang para areias varia entre 17 a 60% da descarga total.

Como os resultados preliminares mostram que a descarga sólida em suspensão transportada pelo rio Paraopeba, após a ruptura da barragem, tem sido compatível com valores médios mensais para o mês de fevereiro e que os sedimentos em suspensão tem uma velocidade de decantação elevada, será necessário calcular a descarga sólida de fundo no rio Paraopeba, assim que os dados de granulometria do fundo estiverem disponíveis, com o objetivo de verificar se houve um aumento da descarga de fundo após a ruptura da barragem.

## 5 Considerações Finais

Em 25 de janeiro de 2019 por volta das 12:30h houve a ruptura da barragem de rejeitos B1 da Mina do Córrego do Feijão da Vale no município de Brumadinho, Minas Gerais. Cerca de 30 minutos depois, os rejeitos atingiram o rio Paraopeba, a jusante da estação Fluviométrica Alberto Flores, onde grande parte ficou depositada, represando o rio Paraopeba. Em função disto, foi registrado um aumento do nível do rio nesta estação da ordem de 5 metros.

A CPRM iniciou no dia 26 de janeiro o monitoramento da passagem da pluma de rejeitos no rio Paraopeba decorrente da ruptura da barragem. Em termos de **turbidez medida *in loco***, no rio Paraopeba:

- No ponto de monitoramento Mário Campos houve um aumento de turbidez no dia 26 de janeiro, da ordem de 2mil NTU, no dia 31 neste ponto foram verificados valores da ordem de 10mil NTU, e se mantiveram entre 3 a 10mil no dia 01 de fevereiro. Este patamar de turbidez foi verificado neste ponto de monitoramento nos períodos chuvosos subsequentes de 4 a 8 e de 13 a 22 de fevereiro, chegando acima de 20mil.
- Na estação de Ponte Nova do Paraopeba – 40800001, valores da ordem de 3 a 10mil NTU de turbidez, só foram registrados no período de 18 a 22 de fevereiro.
- Na estação Ponte da Taquara – 40850000 os valores de turbidez mais altos, da ordem de 1,5mil NTU foram verificados nos dias 20 e 24 de fevereiro.
- No ponto de monitoramento MG-420, a turbidez atingiu valores próximos a 1mil NTU no dia 25 de fevereiro, um mês após o rompimento da barragem.

Importante ressaltar que a turbidez registrada na série histórica da bacia do rio Paraopeba contém valores máximos da ordem de 1.100NTU. Já no monitoramento da ruptura da barragem do Fundão da Samarco, foi registrada turbidez da ordem de centenas de milhares de NTU nos primeiros dias de monitoramento nas estações do rio Doce, mais próximas ao local da ruptura.

Quanto aos demais **parâmetros medidos *in loco***: temperatura da água, OD, pH e Condutividade Elétrica, não foram observadas alterações significativas entre a série histórica e o monitoramento após a ruptura da barragem.



Quanto ao **monitoramento dos níveis** do rio Paraopeba, verificou-se que:

- Na estação Alberto Flores – 40740000 houve um aumento brusco do nível no dia 25 de janeiro da ordem de 5 metros, decorrente da deposição dos rejeitos na confluência do ribeirão Ferro Carvão com o rio Paraopeba, a jusante da estação, formando uma barreira de rejeitos, a qual foi escavada pelo rio Paraopeba.
- Na estação de Ponte Nova do Paraopeba – 40800001, em função desta deposição de rejeitos, citada no item anterior, ocorreu uma diminuição do nível do rio Paraopeba nesta estação no dia 26 de janeiro, o qual foi reestabelecido.
- Na estação de Ponte da Taquara – 40850000, não foram registradas alterações no nível do rio em função da ruptura da barragem.

Quanto ao **monitoramento de vazões** do rio Paraopeba, verificou-se que:

- As vazões médias mensais na estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001 de janeiro e fevereiro são da ordem de 172 e 143m<sup>3</sup>/s respectivamente. No dia 25 de janeiro a vazão nesta estação foi da ordem de 35m<sup>3</sup>/s e a vazão média dos meses de fevereiro e março de 2019 foram da ordem de 65m<sup>3</sup>/s, ou seja, as vazões no rio Paraopeba estiveram muito abaixo da média histórica, o que resulta numa capacidade de transporte de sedimentos menor.
- A relação vazão x cota da estação de Alberto Flores – 40740000 foi comprometida em função da deposição de rejeitos a jusante desta estação.
- Não foi verificada alteração significativa da relação vazão x cota da estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001.
- Na estação Ponte da Taquara – 40850000, estão sendo verificadas alterações da relação vazão x cota nos últimos anos, porém as medições de vazão realizadas após a ruptura da barragem estão alinhadas com as medições realizadas em 2018, não havendo portanto alteração da relação vazão x cota nesta estação em função da ruptura da barragem.

Quanto ao **levantamento de perfil transversal** verificou-se que:

- Na estação Alberto Flores – 40740000, apesar do depósito de rejeitos a jusante, não foi verificada alteração do perfil transversal.
- Na estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001, não foi verificada alteração do perfil transversal.
- O perfil transversal da estação Ponte da Taquara – 40850000 será feito futuramente.

Quanto a **concentração de sedimentos em suspensão** verificou-se que:

No ponto de monitoramento de Mário Campos no período de 26 de janeiro a 10 de março de 2019 a concentração máxima de sedimentos em suspensão, obtidas pelo método IID, foi da ordem de 10.000mg/L, já na estação Ponte Nova do Paraopeba da ordem de 4.000mg/L. Ainda serão realizadas as análises dos pontos de monitoramento das amostras coletadas após o dia 10 de março de 2019.

Na série histórica foram registrados valores máximos de 5mil mg/L.

No monitoramento da ruptura da barragem do Fundão da Samarco, foram registrados valores da ordem de centenas de milhares de mg/L nos primeiros dias, nas estações localizadas do rio Doce próximas ao local da barragem.

Quanto a **descarga sólida em suspensão** verificou-se que:

- No ponto de monitoramento de Mário Campos no período de 26 de janeiro a 10 de março de 2019 foram transportadas cerca de 369mil toneladas, 126mil toneladas em Ponte Nova do Paraopeba e 56mil toneladas em Ponte da Taquara. Porém, a vazão média do rio Paraopeba nesta data estava bem abaixo da média mensal de janeiro/fevereiro, logo a descarga sólida esperada deveria ser bem menor do que foi transportado, decorrente do rompimento da barragem.
- Considerando a densidade do minério  $2t/m^3$ , o volume transportado de sedimento em suspensão em Mário Campos no período de 26 de janeiro a 10 de março de 2019 foi da ordem de 175mil  $m^3$ , muito menor do que o volume da barragem de rejeitos, de 11,7Mm<sup>3</sup>.

A descarga sólida média anual na estação Belo Vale – 40710000 é da ordem de 1,6M t/a e na estação Ponte Nova do Paraopeba – 40800001 é da ordem de 1,3M t/a.

No monitoramento da barragem do Fundão da Samarco, a descarga sólida calculada em novembro de 2015 variou de montante para jusante ao longo do rio Doce, na estação próxima da barragem foi cerca de 10 vezes maior do que a descarga anual, em Governador Valadares da mesma ordem de grandeza da descarga anual e em Colatina cerca de 5% da descarga anual. Evidenciando que grande parte dos sedimentos ficou depositada ao longo do rio Doce e nos reservatórios e transportada nos meses subsequentes.

Quanto a **granulometria de sedimentos em suspensão** verificou-se que:

No ponto de monitoramento Mário Campos no período de 26 de janeiro a 6 de fevereiro, o D50 dos sedimentos em suspensão foi da ordem de 4 a 7  $\mu m$ , correspondendo ao silte muito fino. Ainda serão realizadas as análises dos pontos de monitoramento das amostras coletadas em fevereiro e março de 2019.

Na série histórica grande parte dos valores registrados é inferior a 0,0625mm, ou seja, menor que areia muito fina.

No monitoramento da ruptura da barragem do Fundão da Samarco, foram registrados valores de D50 para o material em suspensão de 18 a 3  $\mu m$ , de montante para jusante ao longo do rio Doce, ou seja, silte médio a argila grossa.

Quanto a **granulometria do material de fundo** verificou-se que:

Ainda estão sendo realizadas as análises de granulometria do material de fundo das amostras do rio Paraopeba após a ruptura da barragem.

Na série histórica os valores de D50 do material de fundo registrados são da ordem de 0,16 a 0,64mm, o que corresponde a areia muito fina a areia grossa.

No monitoramento da ruptura da barragem do Fundão da Samarco, foram registrados em dezembro de 2015, valores de D50 da ordem de 0,53 a 0,70mm, ou seja, areia muito grossa.

No próximo relatório serão publicados os resultados:

- Parâmetros *in loco* coletados e medições realizadas em abril;
- Concentração de sedimentos em suspensão das amostras coletadas após 10 de março de 2019;
- Granulometria do material em suspensão e de fundo das amostras coletadas de janeiro a março de 2019;
- Cálculo da descarga sólida após a ruptura da barragem.

## 6 Referências Bibliográficas

<http://www.ana.gov.br/>. Hidroweb. Acesso em março de 2019.

[http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_rio\\_paraopeba.php](http://www.cprm.gov.br/sace/index_rio_paraopeba.php). Acesso em março de 2019.

<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>. Acesso em julho de 2016.

Castilho, A. S. Avaliação da Aplicabilidade do Método Simplificado de Colby na Estimativa da Descarga Sólida Total em Cursos d'água. Estudo de Caso: Sub-bacia 40 – Região do Alto São Francisco, UFMG. Belo Horizonte, 1998.

CPRM. Projeto Operação da Rede Hidrometeorológica Nacional. Análise da Consistência de Dados Sedimentométricos e de Qualidade de água das sub-bacias: 40, 41, 42, 43, 44, 45, 54, 55, 56, 60 e 61. Belo Horizonte, 2002.

CPRM. “Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce: Relatórios 01, 02, 03 e 04”. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: [www.cprm.gov.br/publique/media](http://www.cprm.gov.br/publique/media).

Portes, Andrea Mirian Costa. Avaliação de Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências de Polpa e Torta. UFMG. Belo Horizonte, 2013.

