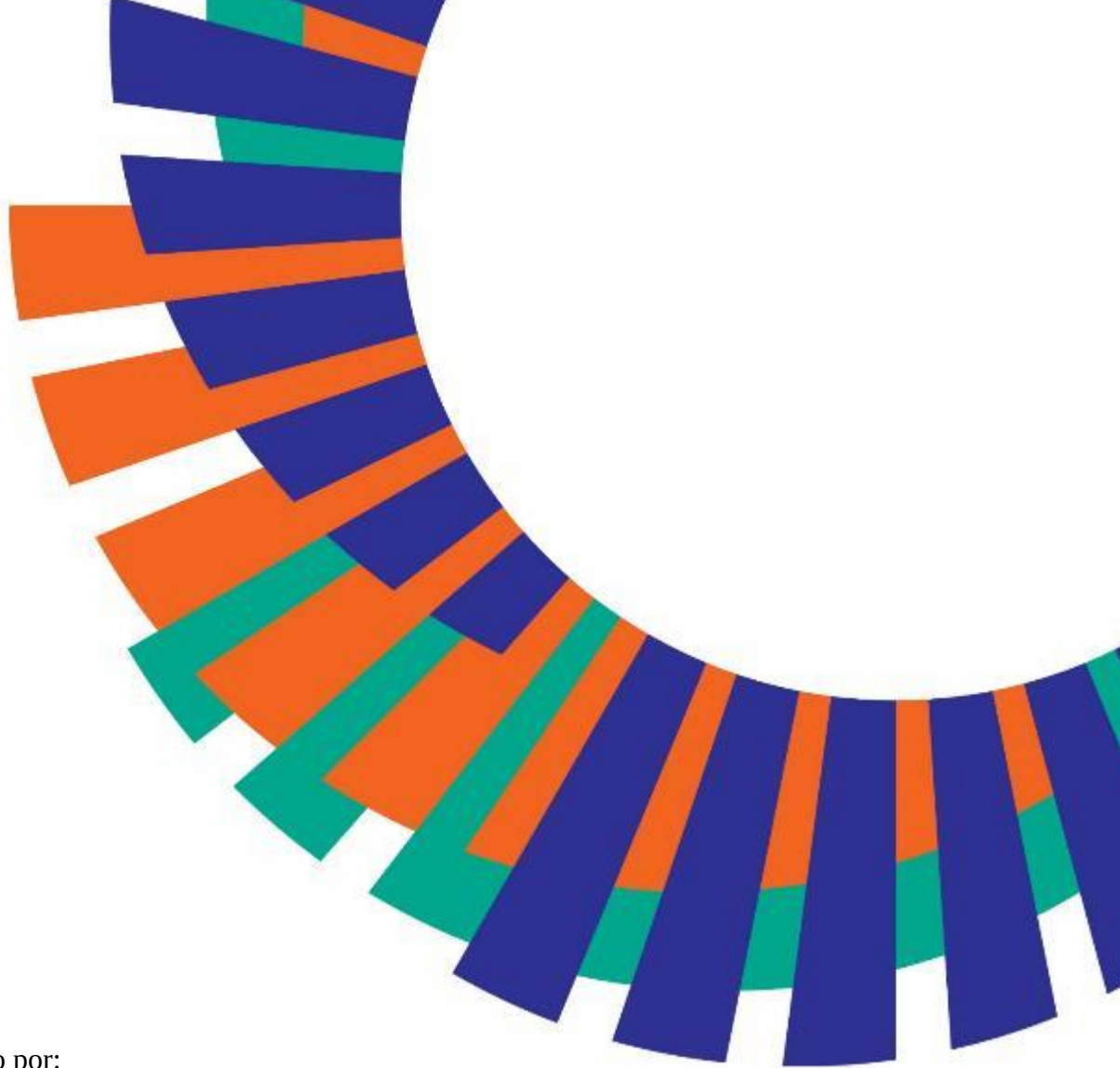




Desenvolvido por:



FUNDAÇÃO
renova

**Relatório Final – Estudos Geomorfológicos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta
Neves**

Junho/2024



Estudos Geomorfológicos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta Neves

**Relatório Final – Estudos Geomorfológicos do Rio Doce a Jusante da UHE
Risoleta Neves**

RT-002_22535632_04

São Paulo / 2023

REVISÕES							
TE: A - PRELIMINAR C - PARA E - PARA CONSTRUÇÃO G - CONFORME CONSTRUÍDO CONHECIMENTO TIPO DE B - PARA F - CONFORME H - CANCELADO EMIÇÃO APROVAÇÃO D - PARA COTAÇÃO COMPRADO							
REV	TE	DESCRIÇÃO	POR	VER.	APR.	AUT.	DATA
00	B	Documento para a Fundação Renova	EQUIPE TÉCNICA SEÇÃO 9	AF			
01	B	Documento para a Fundação Renova	EQUIPE TÉCNICA SEÇÃO 9	RA AF			
02	B	Documento para a Fundação Renova	EQUIPE TÉCNICA SEÇÃO 9	RA AF			
03	B	Documento para a Fundação Renova	EQUIPE TÉCNICA SEÇÃO 9	AF			
04	B	Documento para a Fundação Renova	EQUIPE TÉCNICA SEÇÃO 9	AF			

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	10
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
3 CONTEXTUALIZAÇÃO – NT CT-GRSA Nº 17/2022.....	20
4 ÁREA DE ESTUDO.....	22
4.1 Clima	22
4.2 Hidrografia	24
4.2.1 Caracterização Fluviométrica.....	27
4.3 Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica	30
4.4 Contexto Geológico.....	33
4.5 Contexto Pedológico	37
4.6 Contexto Geomorfológico	39
4.6.1 Contexto Geomorfológico da Bacia do Rio Doce.....	39
4.6.2 Contexto Geomorfológico Fluvial do Rio Doce	42
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	45
5.1 Caracterização Geomorfológica	45
5.1.1 Nível de detalhe I da classificação de Rosgen (1994) – Ampla caracterização morfológica	47
5.1.2 Nível de detalhe II da classificação de Rosgen (1994) – Descrição morfológica.....	51
6 METODOLOGIA	52
6.1 Metodologia para Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento).....	53
6.2 Metodologia para Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta Neves	55
6.2.1 Delimitação dos segmentos	56
6.2.2 Padrão fluvial e Classificação de Rosgen (1994).....	56

6.2.3	Área de drenagem.....	57
6.2.4	Nível de margens plenas.....	58
6.2.5	Grau de entrincheiramento do canal.....	59
6.2.6	Largura e profundidade	59
6.2.7	Declividade.....	59
6.2.8	Índice de sinuosidade (Is).....	60
6.2.9	Material de fundo	61
6.3	Metodologia para Classificação das Feições Geomorfológicas	61
6.3.1	Classificação de imagens.....	62
6.3.2	Metodologia para classificação de imagens	63
6.4	Metodologia para avaliação dos resultados da classificação de imagens.....	69
6.4.1	Limitações da avaliação dos resultados de classificação das imagens.....	73
6.5	Inspeção de Campo.....	76
7	RESULTADOS.....	78
7.1	Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento)	78
7.2	Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta Neves.....	78
7.2.1	Delimitação dos segmentos	78
7.2.2	Área de drenagem.....	81
7.2.3	Grau de entrincheiramento do canal.....	83
7.2.4	Largura e profundidade	85
7.2.5	Declividade.....	88
7.2.6	Índice de Sinuosidade.....	88
7.2.7	Material de fundo	89
7.2.8	Padrão fluvial e Classificação de Rosgen (1994).....	94
7.3	Resultados do ajuste do modelo de classificação de imagens	108

7.4	Classificação de Feições Geomorfológicas	112
7.5	Análise Integrada dos Resultados.....	119
7.5.1	Avaliação Geral.....	124
7.5.2	Avaliação dos Resultados Médios Antes e Após o Rompimento da Barragem de Fundão.....	132
7.5.3	Avaliação Por Segmento	139
7.5.4	Avaliação Específica – Inspeção de Campo.....	147
8	RESPOSTAS AOS QUESTIONAMENTOS DA NOTA TÉCNICA CT-GRSA nº 05/2023	150
9	CONCLUSÕES	153
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
11	EQUIPE TÉCNICA	163

Lista de Figuras

Figura 1	Foto (28/11/2015) do rio Doce no município de Governador Valadares. (Coordenadas aproximadas: - 18,8544°; -41.8669°) (GOLDER, 2016).....	15
Figura 2	Foto (27/05/2022) do rio Doce no município de Tumiritinga. (Coordenadas aproximadas: - 18.967884°; - 41.680023°) (Fonte: O autor)	17
Figura 3	Área de estudo do estudo geomorfológico nos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves (Trechos 13 a 16).....	18
Figura 4	Série histórica (1974 a 2023) de precipitação média mensal (mm) das estações pluviométricas do SNIRH localizadas no baixo, médio e alto Rio Doce.....	24
Figura 5	Mapa do contexto hidrográfico	26
Figura 6	Estações Fluviométricas e Dados de Vazão (média mensal)	28
Figura 7	Gráfico da vazão média mensal medida nas estações fluviométricas Fazenda Cachoeira D'antas, Tumiritinga e Colatina.....	29
Figura 8	Mapa de cobertura do solo na bacia do rio Doce. Fonte: Mapbiomas (2021)	32
Figura 9	Potencial de produção de sedimentos na bacia, calculado em toneladas por quilômetro quadrado por ano.....	33
Figura 10	Mapa do contexto geológico	36
Figura 11	Mapa do contexto pedológico	38
Figura 12	Mapa do contexto geomorfológico	40
Figura 13	Modelo de sistema fluvial típico descrito por Schumm (1977). Fonte: FISRWG (1999)	45
Figura 14	Vistas longitudinais, transversais e planas dos principais tipos de fluxo descritos por Rosgen (1994)	48
Figura 15	Guia ilustrativo mostrando configuração transversal, composição e critérios de delineamento dos principais tipos de fluxo. Fonte: Adaptado de Rosgen (1994),.....	51
Figura 16	Tipos de canais definidos pela classificação de Rosgen. Fonte: Fernandez (2016).....	57
Figura 17	Determinação do nível de margens plenas a partir de perfil transversal de um curso d'água hipotético	58

Figura 18 – Feições mapeadas nesse trabalho. 1-Água, 2-Banco submerso, 3-Banco emerso, 4-Ilha vegetada, 5- Afloramento rochoso, 6-Nuvens	65
Figura 19 – Exemplo de matriz confusão obtida a partir dos resultados do processamento	67
Figura 20 – Valores de índice Kappa e a respectiva concordância (de Ullibbarri & Pita Fernandez, 1999) ...	68
Figura 21 – Processo de edição manual devido a confusão de classes devido a presença de nuvens. A- Resultado da classificação com quatro classes representadas, B-Imagem RGB, C-Arquivo de classificação com correção da classe água.....	68
Figura 22 – Fluxograma de atividades adotado para a classificação de imagens.....	69
Figura 23 – Segmentos considerados para caracterização geomorfológica do rio Doce.....	80
Figura 24 – Área de drenagem ao longo dos segmentos	81
Figura 25 – Correlação entre área de contribuição e a vazão do rio Doce	83
Figura 26 – Grau de entrincheiramento ao longo dos segmentos delimitados. As linhas pontilhadas representam os limites inferiores (1,4) e superiores de entrincheiramento (2,2) de acordo com Rosgen (1994)	85
Figura 27 – Largura média do rio Doce nos segmentos avaliados	86
Figura 28 – Profundidade média do rio Doce nos segmentos avaliados	87
Figura 29 – Relação largura e profundidade nos segmentos avaliados	87
Figura 30 – Declividade média nos segmentos estudados	88
Figura 31 – Valores de sinuosidade ao longo dos trechos estudados	89
Figura 32 – Granulometria de sedimentos ao longo dos segmentos avaliados no período entre 2019 e 2021.	92
Figura 33 – Concentração média de cascalho, areia fina, média e grossa, silte e argila nos segmentos avaliados. Segmentos em branco não possuem dados válidos	93
Figura 34 – Número de segmentos por classe de Rosgen	96
Figura 35 – Área de drenagem ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	99
Figura 36 – Grau de entrincheiramento ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	100
Figura 37 – Largura média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	101
Figura 38 – Profundidade média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	102
Figura 39 – Relação entre largura e profundidade ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga.....	103
Figura 40 – Declividade média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	104
Figura 41 – Valores de sinuosidade ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga	105
Figura 42 – Concentração de areia total nos sedimentos do leito ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga (nota: alguns segmentos não tinham dados disponíveis)	106
Figura 43 – Concentração de silte + argila nos sedimentos do leito ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga (nota: alguns segmentos não tinham dados disponíveis)	107
Figura 44 – Matriz confusão para conjunto de treinamento do modelo	109
Figura 45 – Matriz confusão para conjunto de validação externa do modelo	109
Figura 46 – Exemplo de uma página da figura articulada (Apêndice 03) com o resultado espacial da classificação das feições geomorfológicas obtido a partir das imagens de satélite dos anos de 2013 a 2022 do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	118
Figura 47 – Gráficos de picos de vazão e nível d'água das estações.	122
Figura 48 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.....	125

Figura 49 – Percentual de distribuição da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.	125
Figura 50 – Correlação de Spearman entre as classes geomorfológicas mapeadas e características físicas do canal do rio Doce. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.	127
Figura 51 – Correlações entre classes mapeadas e a cota do rio Doce no segmento 31, considerando os dados do período entre 2013 e 2022. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.	128
Figura 52 – Correlações entre classes mapeadas e a cota do rio Doce no segmento 19, considerando os dados do período entre 2013 e 2022. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.	129
Figura 53 – Relação da largura/profundidade e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados.	130
Figura 54 – Concentração de areia total e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados	130
Figura 55 – Concentração de areia grossa + areia muito grossa e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados.	131
Figura 56 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2015 (pré-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	134
Figura 57 – Distribuição em porcentagem da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2015 (pré-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	134
Figura 58 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	135
Figura 59 – Distribuição em porcentagem da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	135
Figura 60 – Comparação da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013-2015 (pré) e 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	137
Figura 61 – Comparação das porcentagens de distribuição da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013-2015 (pré) e 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	138
Figura 62 – Exemplo de apresentação dos resultados do Apêndice 4 para o Segmento 01.	140
Figura 63 – Contexto fluvial e geológico dos segmentos cujo padrão fluvial é unicanal.	148
Figura 64 – Registro de campo da presença de ilhas e barras arenosas determinando o padrão fluvial multicanal.	149

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Quantidade de segmentos por classes e por trecho.	10
Tabela 2 – Porcentagem de ocorrência das classes considerando a totalidade dos trechos.	10
Tabela 3 – Diferença entre as porcentagens médias ocupadas pelas feições geomorfológicas de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós- rompimento) – Total de todos os segmentos.	13
Tabela 4 – Posicionamentos da Câmara Técnica a respeito do plano de trabalho do estudo geomorfológico de jusante presentes na NT CT-GRSA nº 17/2022.	20
Tabela 5 – Principais informações das estações fluviométricas consideradas neste estudo.	27
Tabela 6 – Padrões fluviais descritos por Rosgen (1994).	50
Tabela 7 – Principais bases de dados utilizadas no trabalho.	53
Tabela 8 – Resoluções de imagens utilizadas para os diferentes anos de análise.	64
Tabela 9 – Estações fluviométricas da ANA usadas como referência de nível de água do rio Doce para cada segmento.	72
Tabela 10 – Pontos determinados para a visita de campo.	77
Tabela 11 – Segmentos geomorfológicos gerados ao longo dos 558,5 km dos trechos a jusante da barragem da UHE Risoleta Neves no rio Doce.	79

Tabela 12 – Vazões médias mensais e áreas de drenagem das estações fluviométricas.	82
Tabela 13 – Resultados médios das diferentes frações granulométricas presentes nos segmentos estudados	90
Tabela 14 – Quantidade de segmentos por classes e por trecho.	96
Tabela 15 – Porcentagem de ocorrência das classes considerando a totalidade dos trechos.	96
Tabela 16 – Aplicação do sistema de classificação de Rosgen (Nível II) nos segmentos do Rio Doce. Comp= Comprimento do segmento, E=grau de entrenchamento, L e P= largura e profundidade do canal medida em nível de margens plenas, IS=índice de sinuosidade, D=declividade da lâmina d'água.	98
Tabela 17 – Resultados do treinamento do modelo. Valores correspondentes ao erro total do treinamento considerando todas as seis classes. Valores em %.	111
Tabela 18 – Resultados do índice Kappa realizados a partir dos dados de validação externa.	111
Tabela 19 – Resultados da classificação das feições geomorfológicas a partir das imagens de satélite entre os anos de 2013 e 2022 em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.	112
Tabela 20 – Nível d'água na data das imagens.	119
Tabela 21 – Vazões de pico (m³/s) dos períodos chuvosos (outubro a março) de 2012 a 2022.	121
Tabela 22 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica ao longo do período avaliado (2013 a 2022).	124
Tabela 23 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica nos períodos pré (2013-2015) rompimento da barragem de Fundão.	132
Tabela 24 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica no período pós (2016-2022) rompimento da barragem de Fundão.	133
Tabela 25 – Diferença entre as porcentagens médias ocupadas pelas feições geomorfológicas de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós- rompimento) – Total de todos os segmentos.	136
Tabela 26 – Avaliação individual de cada segmento da evolução das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.	141
Tabela 27 – Diferença entre as médias das áreas das feições geomorfológicas entre os anos de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós-rompimento).	145

Lista de Apêndices

Apêndice 01 – Aspectos Físicos do Rompimento da Barragem de Fundão: Onda de Rejeitos e Potencial Erosivo

Apêndice 02 – Considerações sobre a Remobilização de Solos e Sedimentos Erodidos Durante a Passagem da Onda de Rejeitos

Apêndice 03 – Figura articulada com resultados gráficos da classificação das feições geomorfológicas

Apêndice 04 – Gráficos das Áreas das Feições Geomorfológicas para cada Segmento

Apêndice 05 – Relatório Fotográfico dos Pontos Visitados em Campo

Lista de Anexos

Anexo 01 – Relatório Técnico das Imagens Orbitais e Sensores

Anexo 02 – Anotação de Responsabilidade Técnica (ART)

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este relatório apresenta os resultados de um estudo para avaliação geomorfológica de trechos de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão localizados a jusante da UHE Risoleta Neves. O objetivo geral deste trabalho foi verificar se há ocorrências de alterações da geomorfologia fluvial e aumento de feições deposicionais nos trechos afetados a jusante da UHE Risoleta Neves (Trechos 13 a 16), que podem ser associadas ao rompimento da barragem de Fundão e/ou às atividades de reparação ambiental.

Este trabalho incluiu inspeções de campo realizadas entre 17 e 21 de abril de 2023 para verificação in situ de feições geomorfológicas em alguns pontos selecionados do rio Doce visando complementar a avaliação de forma que as distintas características físicas do leito fluvial do rio Doce e de áreas adjacentes fossem registradas.

Caracterização geomorfológica dos trechos dos rios da área de estudo a jusante da UHE Risoleta Neves

A partir da análise das variáveis geomorfológicas avaliadas neste trabalho, a área de estudo foi dividida em 31 segmentos fluviais. A análise dos diferentes segmentos do rio Doce permitiu a identificação de quatro classes principais de canais fluviais, definidas como B, C, D e F segundo a classificação de Rosgen. A **Tabela 1** traz o quantitativo de segmentos por classe e trecho e a **Tabela 2** traz as porcentagens de ocorrência das classes nos trechos.

Tabela 1 – Quantidade de segmentos por classes e por trecho.

TRECHO	B5A	C5B	D5B	D6B	F5B	TOTAL GERAL
Trecho 13	6	7	2	1	1	17
Trecho 14	0	0	8	1	0	9
Trecho 15	0	0	3	0	0	3
Trecho 16	0	0	2	0	0	2
Total Geral	6	7	15	2	1	31

Tabela 2 – Porcentagem de ocorrência das classes considerando a totalidade dos trechos.

TRECHO	B5A	C5B	D5B	D6B	F5B	TOTAL GERAL
Trecho 13	8,79%	16,28%	10,61%	4,08%	0,81%	40,57%
Trecho 14	0,00%	0,00%	27,86%	5,56%	0,00%	33,42%
Trecho 15	0,00%	0,00%	19,81%	0,00%	0,00%	19,81%

TRECHO	B5A	C5B	D5B	D6B	F5B	TOTAL GERAL
Trecho 16	0,00%	0,00%	6,20%	0,00%	0,00%	6,20%
Total Geral	8,79%	16,28%	64,48%	9,64%	0,81%	100,00

Nota: Percentuais relacionados à extensão total de cada trecho

A região localizada mais a montante da área de estudo é caracterizada por apresentar uma drenagem de padrão unicanal, com canal apresentando menor largura, maior grau de entrincheiramento, maior sinuosidade e maior declividade, contribuindo para a produção de sedimentos para os segmentos posteriores. O padrão F foi constatado apenas no segmento 01, sendo o padrão B e C alternando até próximo ao término da região do Parque Estadual do Rio Doce (segmento 14). A. A partir do segmento 15, ocorre uma alteração da morfologia fluvial para um padrão multicanal (classe D), com presença de barras longitudinais e transversais, além da presença de margens compostas por material arenoso, caracterizando ambientes com maior expressão de características deposicionais. Dentre os parâmetros avaliados, destaca-se o aumento expressivo da relação largura/profundidade do rio Doce no trecho final, indicando que o aumento da área de drenagem contribui significativamente para o alargamento do canal fluvial, porém não é acompanhado no aumento da profundidade média do rio. Fatores como o baixo índice de sinuosidade e valores mais baixos de declividade, além do aumento expressivo da largura do canal, indicam que nesses setores o rio apresenta uma redução na sua capacidade de transporte de sedimentos.

Mapeamento geomorfológico das principais feições fluviais

O mapeamento das feições geomorfológicas foi feito a partir de um processo de classificação supervisionada usando como base imagens de sensoriamento remoto disponíveis para períodos secos dos anos de 2013 a 2022, que cobriram toda a área de estudo. Os resultados do ajuste do modelo de classificação, representados pelo índice Kappa, indicaram uma concordância considerada muito boa (de Ullibbarri & Pita Fernandez, 1999) entre a classificação realizada e o conjunto de validação externa, demonstrando a eficácia do processo de classificação utilizado.

Considerando toda a área de estudo e a média das áreas de todo o período avaliado, a feição geomorfológica mais abundante observada, em termos percentuais de área total incluída no mapeamento, foi ilha fluvial (cerca de 11,61% da área total mapeada), seguida de banco submerso

(cerca de 8,15% da área total mapeada) e banco emerso (cerca de 6,08% da área total mapeada). Áreas de afloramento rochosos corresponderam a cerca de 2,41% da área total mapeada.

Os segmentos que apresentaram os maiores percentuais de área de cada feição em relação à área total do segmento, considerando a média dos resultados entre 2013 e 2022, foram:

- ✓ Bancos submersos: Segmentos 31 (cerca de 25,02% da área do segmento), 30 (cerca de 20,72% da área do segmento), 28 (cerca de 19,93% da área do segmento) e 29 (cerca de 19,52% da área do segmento);
- ✓ Bancos emersos: Segmentos 03 (18,31% da área do segmento), 28 (17,86% da área do segmento), 04 (14,03% da área do segmento), 02 (13,97% da área do segmento);
- ✓ Ilhas fluviais: Segmentos 29 (33,18% da área do segmento), 19 (31,70% da área do segmento), 21 (30,91% da área do segmento) e 25 (30,86% da área do segmento);
- ✓ Rochas: Segmentos 23 (32,65% da área do segmento), 25 (11,63% da área do segmento), 21 (7,67% da área do segmento) e 19 (4,35% da área do segmento).

Considerando a soma das áreas das feições indicadas acima, os segmentos que apresentaram os maiores percentuais dessa soma em relação à área total do segmento (média dos resultados entre 2013 e 2022), foram: segmentos 29 (cerca de 60,34% da área do segmento), 23 (cerca de 56,88% da área do segmento), 28 (cerca de 53,64% da área do segmento) e 30 (cerca de 51,71% da área do segmento).

Os dados apontaram que a maior presença de bancos submersos nos segmentos próximos à foz do rio Doce tem relação com a redução da competência de transporte decorrente do aumento da largura do canal e da redução da profundidade média.

Análise integrada comparativa de feições fluviais de antes e depois do rompimento da barragem de Fundão.

Uma análise integrada dos resultados com avaliação das variações temporais e espaciais foi apresentada neste documento, sendo primeiramente apresentados os resultados gerais da área de estudo, com uma média dos resultados obtidos ao longo do período avaliado (2013 a 2022). Posteriormente, foi apresentada uma comparação das áreas médias pré e pós rompimento, sendo utilizada como uma etapa de *screening* para avaliação de eventuais impactos do rompimento da

barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica da área de estudo. Em seguida, os resultados foram discutidos considerando cada um dos segmentos apresentados.

Na avaliação geral, observou-se que as características de feições geomorfológicas encontradas se relacionam com a classificação de Rosgen (1994) apresentada anteriormente, corroborando com os resultados obtidos. Considerando-se a média de todos os segmentos avaliados, em geral, não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas entre o período de 2013 a 2015 (pré) e o período de 2016 a 2022 (pós-rompimento). A **Tabela 3** traz as porcentagens médias das feições geomorfológicas pré e pós rompimento.

Tabela 3 – Diferença entre as porcentagens médias ocupadas pelas feições geomorfológicas de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós- rompimento) – Total de todos os segmentos.

FEIÇÃO	MÉDIA DE 2013 A 2015	MÉDIA DE 2016 A 2022	DIFERENÇA NAS MÉDIAS
Banco submerso	12,24%	6,25%	-5,99%
Banco emerso	4,87%	6,64%	1,77%
Ilhas fluviais	11,00%	11,97%	0,97%
Rochas	2,34%	2,50%	0,17%
Soma de bancos, ilhas e rochas	30,44%	27,37%	-3,07%

Analisando os segmentos de forma mais detalhada, foi possível avaliar a evolução das feições distribuídas em cada segmento ao longo dos anos analisados. De maneira geral, na avaliação por segmento ao longo dos anos:

- ✓ Não se observou uma tendência de variação nas áreas das feições que possa estar relacionada ao rompimento da barragem de Fundão.
- ✓ Entre 2019 e 2022 se observou uma redução da área de bancos submersos e bancos emersos, que pode estar relacionada a uma maior cota média do rio Doce nesses períodos secos.
- ✓ Observou-se diminuição significativa nas áreas de banco submersos no ano de 2016. Essa redução está associada à coloração alaranjada da água, que interferiu na classificação dessa feição nas imagens.

Considerando-se todos os segmentos avaliados, em geral não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas quando observados os períodos pré (2013 a 2015)

e pós-rompimento (2016 a 2022). Considerando cada segmento individualmente, as maiores diferenças de áreas entre os períodos avaliados foram verificadas em:

- ✓ Segmentos 5, 6, 8, 10 e 12: redução de bancos submersos e da soma de bancos emersos, bancos submersos, ilhas e rochas.
- ✓ Segmentos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 e 16: redução de bancos submersos.

Com base nos resultados obtidos, entende-se que essas variações são devido à dinâmica natural do rio Doce e podem ter relação ainda com valores mais elevados de nível d'água nos períodos secos mais recentes avaliados (i.e., 2019 a 2022), conforme mencionado acima. Valores mais elevados de picos de descarga líquida nesses períodos mais recentes também podem ter contribuído para uma maior remobilização de bancos submersos comparado ao período inicial avaliado, o que seria um fator adicional para justificar as reduções de áreas indicadas acima.

1 INTRODUÇÃO

No dia 05 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos de mineração de Fundão, operada pela mineradora Samarco no município de Mariana/MG, rompeu, liberando rejeitos para o sistema fluvial a jusante. A ruptura da barragem resultou na liberação de aproximadamente 43,7 Mm³ (milhões de metros cúbicos) de rejeitos, causando impactos a jusante. O material liberado alcançou o córrego Santarém, atingindo posteriormente o rio Gualaxo do Norte até sua confluência com o rio do Carmo, que, junto com o rio Piranga, formam o rio Doce. Um grande volume de rejeitos ficou retido nos trechos a montante da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (Candonga) e no próprio reservatório da UHE, enquanto outra parte passou pelo reservatório, seguindo pelo rio Doce em direção ao mar como carga sólida. Parte desses sólidos e materiais coloidais em suspensão foram depositados na calha do rio Doce e nos demais reservatórios ao longo de seu curso a jusante, e parte deste material permaneceu em suspensão na água até a foz do rio Doce, com uma pluma de coloração alaranjada, como pode ser visto no registro da **Figura 1** na região de Governador Valadares/MG, penetrando no ambiente estuarino e costeiro 16 dias após o rompimento da barragem (GOLDER, 2016).

Figura 1 – Foto (28/11/2015) do rio Doce no município de Governador Valadares. (Coordenadas aproximadas: -18,8544°; -41.8669°) (GOLDER, 2016)



Ao longo do trajeto da onda de rejeitos, da barragem de Fundão até a foz do rio Doce, a área de drenagem variou de cerca de 10 km² até mais de 82.000 km², correspondendo respectivamente à drenagem da barragem de Fundão e à drenagem da estação fluviométrica de Linhares, próxima à foz.

O impacto físico da onda de rejeitos e detritos resultante do rompimento da barragem de Fundão foi progressivamente atenuado à medida que o fluxo se movia para jusante e a largura da bacia e do canal fluvial aumentava. As barragens existentes na bacia do alto rio Doce, especialmente Candonga, desempenharam um papel importante na atenuação dos impactos causados pela passagem da onda de rejeitos e detritos. Posteriormente, a onda de rejeitos ainda passou pelas UHEs Baguari, Aimorés e Mascarenhas.

Ressalta-se que o acúmulo de sedimentos, ou rejeitos no caso do rompimento da barragem de Fundão, pode ocorrer sem que haja extravasamento da calha regular de um canal, especialmente nas margens ou em bancos de areia. No caso das estações fluviométricas a jusante da barragem de Candonga, a vazão medida da onda de rejeitos e detritos associada ao rompimento da barragem de Fundão esteve abaixo de 2 anos de recorrência (CPRM, 2016). Dessa forma é esperado que a deposição de rejeitos a jusante da UHE Risoleta Neves durante a passagem da onda resultante do rompimento tenha ocorrido predominantemente nos ambientes intracalha (leito, sopé e bancos/margens). Posteriormente à passagem da onda de rejeitos ocorreu a remobilização de rejeitos depositados no sistema hídrico afetado, tanto em trechos a montante quanto a jusante da UHE Risoleta Neves, em função da dinâmica de sedimentos desse sistema. Notadamente no período de janeiro de 2016 houve extravasamento da água do rio Doce para planícies de inundação a jusante da UHE Risoleta Neves, resultando na deposição de rejeitos que se encontravam como sólidos em suspensão na água desse rio, em algumas partes dessas planícies de inundação. Essa deposição de rejeitos nas planícies de inundação a jusante da UHE Risoleta Neves ocorrida em janeiro de 2016 foi limitada e não pode ser comparada em termos de magnitude com a deposição das planícies de inundação a montante da UHE Risoleta Neves, que ocorreu com a passagem da onda de rejeitos. A Fundação Renova vem realizando monitoramento, estudos e projetos na área impactada e potencialmente impactada, visando avaliar e mitigar os efeitos do rompimento e avaliar a recuperação das condições hidrossedimentológicas do rio.

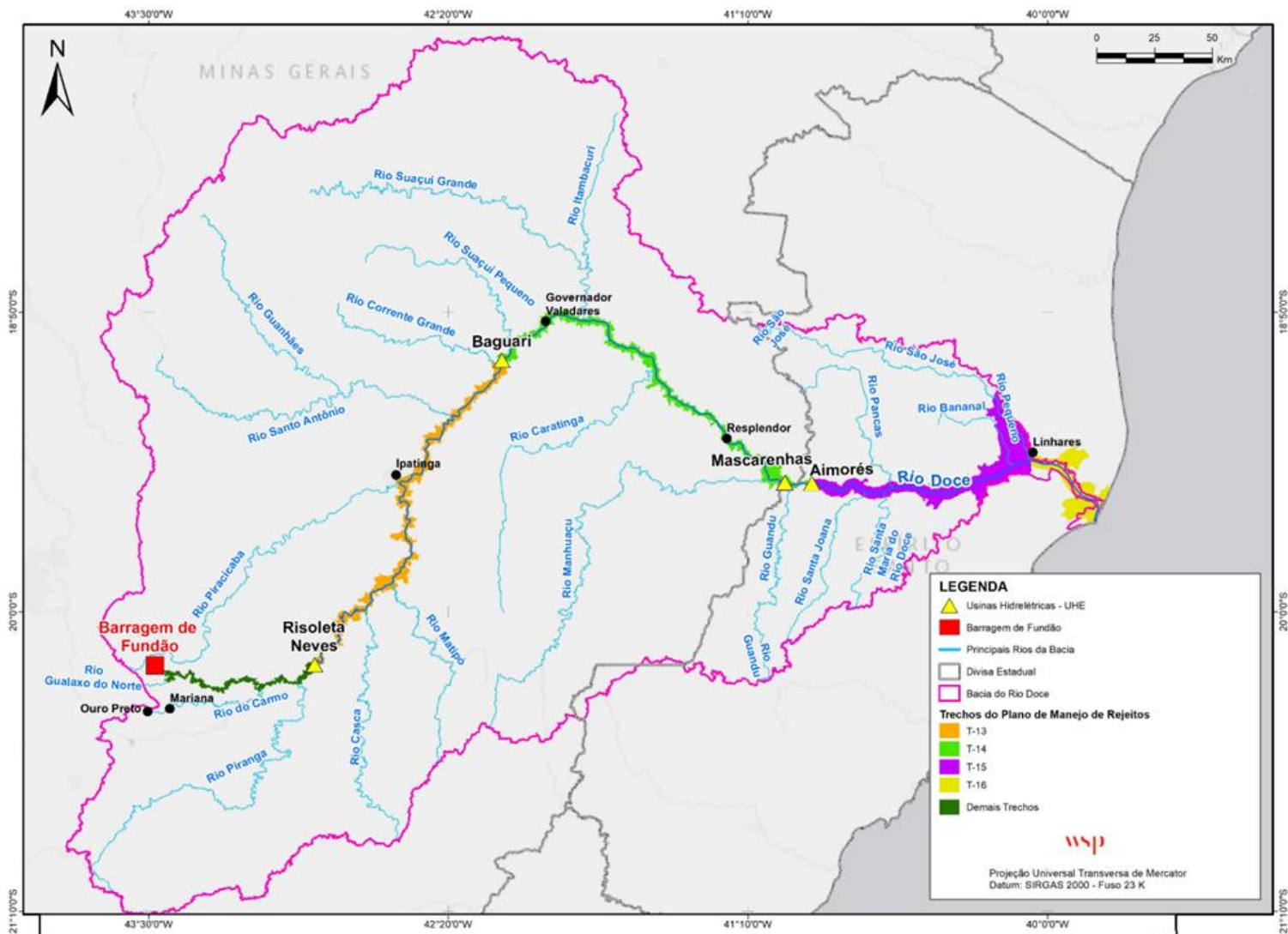
Na **Figura 2** é apresentado um registro de maio de 2022 do rio Doce na altura do município de Tumiritinga/MG (Trecho 14). Não se observa uma pluma de sólidos em suspensão na água, se comparada com a imagem apresentada na **Figura 1**.

Figura 2 – Foto (27/05/2022) do rio Doce no município de Tumiritinga. (Coordenadas aproximadas: - 18.967884°; - 41.680023°) (Fonte: O autor)



No contexto de diagnosticar e avaliar os cenários de recuperação física, é necessário conhecer de forma adequada a dinâmica fluvial e a geomorfologia dos trechos afetados do sistema fluvial do rio Doce, buscando identificar as eventuais alterações ocasionadas em decorrência do rompimento da barragem de Fundão. Assim, este documento visa apresentar o estudo de caracterização geomorfológica fluvial do trecho do rio Doce localizado a jusante da barragem da UHE Risoleta Neves até sua foz, no Oceano Atlântico (Trechos 13 a 16). A **Figura 3** apresenta a área de estudo para este trabalho.

Figura 3 – Área de estudo do estudo geomorfológico nos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves (Trechos 13 a 16)



2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar se há ocorrências de alterações da geomorfologia fluvial e aumento de feições deposicionais nos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves (Trechos 13 a 16) que podem ser associadas ao rompimento da barragem de Fundão.

Para tal, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização geomorfológica dos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves;
- Mapeamento geomorfológico das principais feições fluviais;
- Análise integrada comparativa de feições fluviais de antes e depois do rompimento da barragem de Fundão.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO – NT CT-GRSA Nº 17/2022

A avaliação do Plano de Trabalho deste estudo apresentado em 09 de agosto de 2022 durante a Reunião Gerencial nº 05/2022 da CT-GRSA resultou na Nota Técnica CT-GRSA nº 17/2022. No que tange ao Estudo Geomorfológico de Jusante da UHE Risoleta Neves, a nota técnica apresentou os posicionamentos apresentados na **Tabela 4**. Nesta mesma tabela, são apresentadas as formas em que tais posicionamentos foram tratados no âmbito do trabalho apresentado neste documento.

Tabela 4 – Posicionamentos da Câmara Técnica a respeito do plano de trabalho do estudo geomorfológico de jusante presentes na NT CT-GRSA nº 17/2022

POSICIONAMENTO CT-GRSA (NT 17/2022)	COMENTÁRIO FUNDAÇÃO RENOVA
“Assim, não é objetivo do estudo a realização de coletas físicas de material e sim apenas checagens de campo.” “Quanto às premissas apresentadas, a de ‘Nos trabalhos de campo as amostras de sedimento para análise granulométrica serão coletadas na superfície’ não deve ser considerada uma vez que não se aplica aos objetivos do estudo geomorfológico. Já em relação às ‘exclusões’ apresentadas no plano de trabalho, concorda com todas apresentadas, devendo, ainda, adicionar a identificação de rejeitos através de atividades de campo.”	Durante as atividades de campo, não foram realizadas coletas de campo para identificação de rejeito, conforme descrito na Seção 6.5
“Cabe esclarecer que a utilização de software para mapeamento das feições geomorfológicas e a aquisição de dados pré e pós rompimento trazem melhorias para a qualidade do produto, contudo, o plano de trabalho não informa qual será o software utilizado.”	Quando o Plano de trabalho foi desenvolvido, ainda não havia a definição do melhor software a ser utilizado. Foram utilizados 2 softwares para o trabalho de classificação de imagens, conforme descrito na Seção 6.3.2: • Software livre R, versão 4.2.2 • ArcGIS 10.8.1
“Por fim, quanto as limitações apresentadas todas são aceitáveis, contudo, devido à disponibilidade de imagens de satélite, deve-se utilizar todas as imagens disponíveis, independente da qualidade e ser corrigida através de software, e assim, não limitar o material de análise.” “Assim, entende-se que, inicialmente, o período delimitado pelo plano de trabalho seja suficiente, mas caso seja necessário, inclusive para diminuir dúvidas, o período pode ser aumentado. Inicialmente, a análise entre os anos de 2010 e 2022 é suficiente, uma vez que o rio Doce passou por uma cheia histórica no ano de 2013 e seguido por uma seca também histórica entre os anos de 2014 e 2015, permitindo, assim, identificar as feições geomorfológicas da bacia do rio Doce, permitindo a identificação real do impacto.”	Foram consideradas todas as imagens disponíveis entre 2010 e 2022 e o seu uso neste trabalho estão justificados nas Seções 6.3.2 e 6.4.1

Em abril/2024, no requerimento nº 1000412-91.2020.4.01.3800 do Comitê Interfederativo (CIF), foi requisitado à Fundação Renova a complementação dos estudos geomorfológicos de jusante, de modo a atender os ajustes e questionamentos formulados Nota Técnica CT-GRSA nº 05/2023.

Visando esclarecer os questionamentos apresentados na Nota Técnica CT-GRSA nº 05/2023, informações complementares foram adicionadas ao longo do texto e os principais itens solicitados estão dispostos na Seção 8.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desse relatório compreende o leito fluvial do Rio Doce, localizado a jusante da UHE Risoleta Neves (Candonga), até a sua foz, no município de Linhares/ES (Trechos 13 a 16). Compreende um trajeto de 558,50 km, com área de drenagem variando de aproximadamente 9007,55 a 82353,76 km². O regime fluvial do rio Doce é perene e, de modo geral, acompanha a pluviosidade (cheia, com os níveis máximos ocorrendo nos meses de dezembro, janeiro e março; e vazante de abril a setembro).

4.1 Clima

A bacia do Rio Doce é uma região no sudeste do Brasil que tem um clima tropical de altitude. Isso significa que as temperaturas são quentes e úmidas, mas há uma grande variação de temperatura entre o dia e a noite. A região também pode ser afetada por chuvas fortes e tempestades. Durante o inverno, as temperaturas podem cair e há risco de geadas em áreas mais elevadas.

Segundo Cupolillo (2008), o clima da bacia do rio Doce é influenciado pela dinâmica atmosférica regional, que atua no Estado de Minas Gerais, e pela de larga escala, que atua no Brasil. Nimer (1989) afirma que o sudeste do Brasil, devido ao posicionamento latitudinal, caracteriza-se por ser uma região de transição entre os climas quentes de latitudes baixas e os climas mesotérmicos de tipo temperado das latitudes médias.

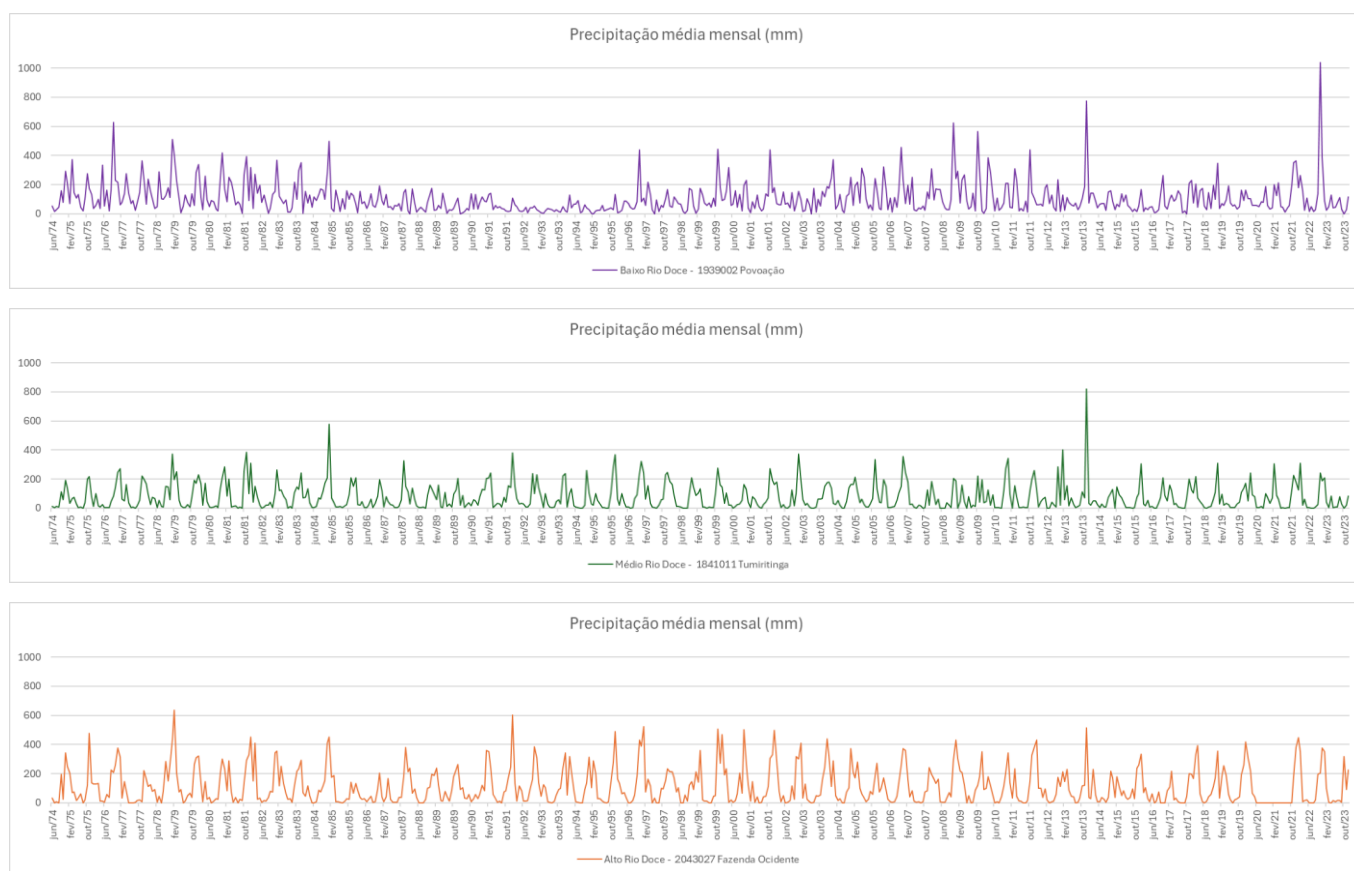
Strauch (1955), através da classificação climática de William Köppen e com os dados fornecidos pelas estações da bacia, tornou possível classificar os tipos de clima da região do rio Doce com maior nível de detalhe. De acordo com esse autor, tão logo aumentam as altitudes ao longo dos vales principais, caem as temperaturas médias de mês mais frio, e passa-se do grupo de climas de tipo A para o tipo C, chamados mesotérmicos – temperaturas médias de mês mais frio abaixo de 18 °C. Os climas do tipo C quanto às chuvas, podem ser úmidos (f) ou terem um período seco, no caso da bacia do rio Doce, é o inverno (w). Quanto às temperaturas, podem ser verões quentes (a) ou frescos (b) se a temperatura média do mês mais quente estiver acima ou abaixo de 22 °C.

De acordo com Nimer (1989), a bacia, a exemplo do Estado de Minas Gerais, é influenciada pelas massas de ar Tropical Atlântica (MTA), Polar Atlântica (MPA) e Equatorial Continental

(MEC), caracterizada pelas correntes de oeste. Segundo esse autor a MEC atua na primavera e no verão causando altas temperaturas médias anuais, mínima e máxima.

De acordo com Cupollilo et al. (2008), as regiões do médio e baixo rio Doce são influenciadas pela relativa proximidade do mar, o que resulta em temperaturas mais elevadas em locais como Baixo Guandu, no Espírito Santo, e Aimorés, Governador Valadares e a região do Vale do Aço (Timóteo, Coronel Fabriciano e Ipatinga), em Minas Gerais. Entretanto, em todo o curso superior do rio Doce, a temperatura é mais amena. Quanto ao regime pluvial, este apresenta dois períodos distintos: o chuvoso, de outubro a março, e o seco, de abril a setembro. O total de chuvas acumuladas é de aproximadamente 1200 mm, distribuídos principalmente entre dezembro, janeiro, fevereiro e março. A região sofre influência da maritimidade, provocando temperaturas mais elevadas em Baixo Guandu, no Espírito Santo, e em Aimorés, Governador Valadares Cupollilo et al (2008). Na **Figura 4** é apresentado a série histórica (1974 a 2023) de precipitação média mensal (mm) das estações pluviométricas do SNIRH (Sistema Nacional de Recursos Hídricos – ANA) localizadas no baixo (1939002 – Povoação), médio (1841011 – Tumiritinga), e alto Rio Doce (2043027 – Fazenda Ocidente).

Figura 4 – Série histórica (1974 a 2023) de precipitação média mensal (mm) das estações pluviométricas do SNIRH localizadas no baixo, médio e alto Rio Doce.



4.2 Hidrografia

A Bacia Hidrográfica do rio Doce está localizada na região leste de Minas Gerais, com 82,8% da área da bacia (68.431,25 km²), e no centro do Espírito Santo, que possui 17,2% da área da bacia (14.215,18 km²). A bacia possui uma área total de 82.646,44 km² e perímetro de 1.691,48 km, englobando um total de 269 municípios com parte ou todo território inserido na bacia. Desses, 235 municípios da bacia estão localizados no estado de Minas Gerais e 34 municípios no estado do Espírito Santo. O maior território municipal da bacia do Rio Doce pertence ao município de Governador Valadares (MG), e o menor, o município de São José do Mantimento (MG).

O canal do rio Doce apresenta padrões geomorfológicos diferenciados, com segmentos de meandros, retilíneos e anastomosados e ainda presença de ilhas, principalmente no médio curso. As planícies fluviais são amplas e os terraços, em sua maioria, constituídos por material arenoso e

argilo-arenoso, com cerca de 3 metros de desnível. Eventualmente, esses terraços são inundados durante cheias excepcionais (Ecoplan-Lume, 2010).

Os principais afluentes do rio Doce que desaguam no trecho 13, pela margem esquerda, são os rios Corrente Grande, do Peixe, Piracicaba, Santo Antônio e Sem-Peixe. Pela margem direita o rio Doce recebe a contribuição dos rios Branco, Casca e Matipó. No trecho 14, os principais afluentes na margem esquerda são os rios Suaçuí Grande e Suaçuí Pequeno e pela margem direita os rios Batatas, Caratinga, Guandu e Manhuaçu. Já no trecho 15 os principais afluentes da margem esquerda são os rios Mutum Preto, São João Pequeno, Pancas, Liberdade, Terra Alta, Ribeirão das Palmas, Bananal e São José / Pequeno e pela margem direita os rios Laje, Santa Joana, Santa Maria do Rio Doce, Baunilha, Pau Gigante e Cavalinho. O Trecho 16 não possui nenhuma contribuição lateral de grande porte.

A bacia possui relevância na geração hidrelétrica, sendo que atualmente encontram-se em operação 10 usinas hidrelétricas (UHEs), sendo 4 delas localizadas no rio Doce e 6 em seus afluentes. Há ainda 29 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) em operação e outros 148 outros aproveitamentos hidrelétricos na bacia, em funcionamento ou em outras fases de implantação, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Ecoplan-Lume, 2010).

A **Figura 5** ilustra o contexto hidrográfico da região.

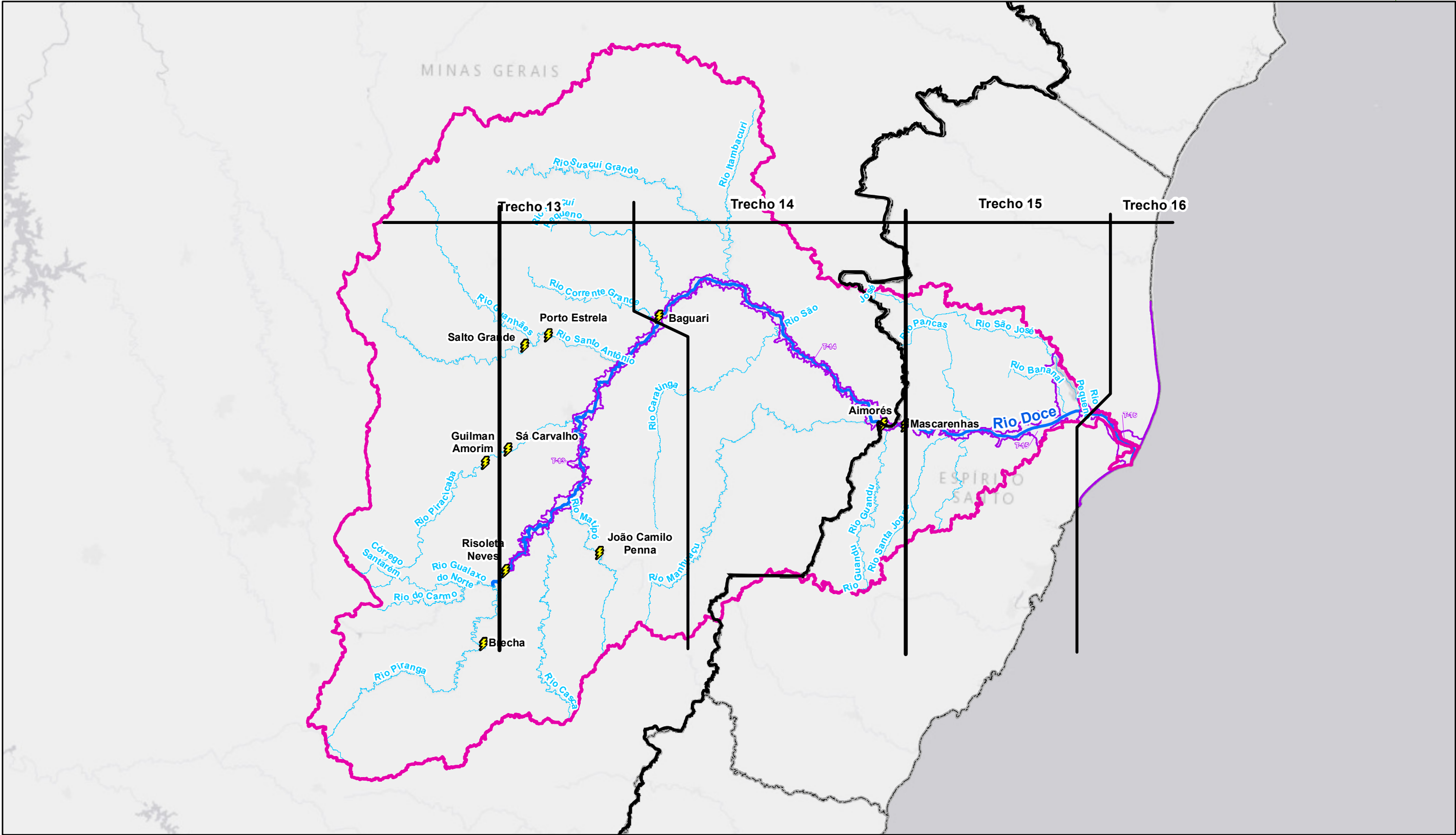


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos
- Principais Rios da Bacia Hidrográfica**
- Principais Rios da Bacia
- Rio Doce
- Usinas Hidrelétricas - UHE

- Referência:
- Hidrografia <R05_CartBasica\RENOVA_Rios_Principais_Bacia>.
Acessado em fev/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS 2000 - Fuso 23 K
0 30 60
Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
**ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO
TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA
NEVES**

TÍTULO:
HIDROGRAFIA DA ÁREA DE ESTUDO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA:	1:1.983.784
GIS	LPriolli	abr/2023	Figura 05
REV	MRamin	00	

4.2.1 Caracterização Fluviométrica

A representação do regime fluviométrico nos trechos dos cursos d'água do presente estudo foi realizada a partir de nove estações fluviométricas regionais localizadas no rio Doce, cujas séries históricas apresentaram-se mais longas. Os registros de vazões médias mensais dessas estações foram obtidos a partir do Sistema de Informações Hidrológicas Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023) e estão apresentados na **Figura 6**. Na **Tabela 5** são apresentadas as principais informações das estações fluviométricas localizadas no rio Doce.

Tabela 5 – Principais informações das estações fluviométricas consideradas neste estudo

CÓDIGO	NOME	PERÍODO		ESTADO	MUNICÍPIO	COORDENADAS		ELEVÇÃO (M)	ÁREA DE DRENAGEM (KM ²)
		Início	Fim			Latitude	Longitude		
56425000	Fazenda Cachoeira D'antas	1981	2022	MG	São José Do Goiabal	19° 59' 39.84"	42° 40' 27.84"	240	10100
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	1974	2022	MG	Córrego Novo	19° 46' 36.84"	42° 28' 35.04"	210	15900
56719998	Belo Oriente	1986	2022	MG	Belo Oriente	19° 19' 46.92"	42° 22' 33.96"	211	24200
56846080	UHE Baguari Barramento	2008	2015	MG	Governador Valadares	19° 1' 17.04"	42° 7' 30.00"	184	38400
56850000	Governador Valadares	1938	2017	MG	Governador Valadares	18° 52' 59.16"	41° 57' 2.88"	150	40500
56920000	Tumiritinga UHE	1972	2020	MG	Galileia	18° 58' 15.96"	41° 38' 30.12"	135	55100
56992400	Mascarenhas Barramento	1995	2015	ES	Colatina	19° 30' 2.88"	40° 55' 6.96"	71	73700
56994500	Colatina	1938	2022	ES	Colatina	19° 32' 0.00"	40° 37' 46.92"	62	76400
56994510	Colatina Corpo de Bombeiros	1985	2022	ES	Colatina	19° 31' 49.08"	40° 37' 24.96"	40	76400

No gráfico da **Figura 7** estão apresentadas as séries de vazões médias mensais das estações Fazenda Cachoeira D'antas, Tumiritinga e Colatina, que representam pontos de medição a montante e a jusante da área de estudo respectivamente. É notável que, desde 2013, as vazões médias mensais apresentaram uma tendência de diminuição nos meses chuvosos em todas as estações analisadas. Desde o rompimento da barragem de Fundão, em novembro/2015, as maiores vazões médias mensais foram registradas em março/2020 e fevereiro/2022, mas não superaram a cheia histórica de fevereiro/1979.

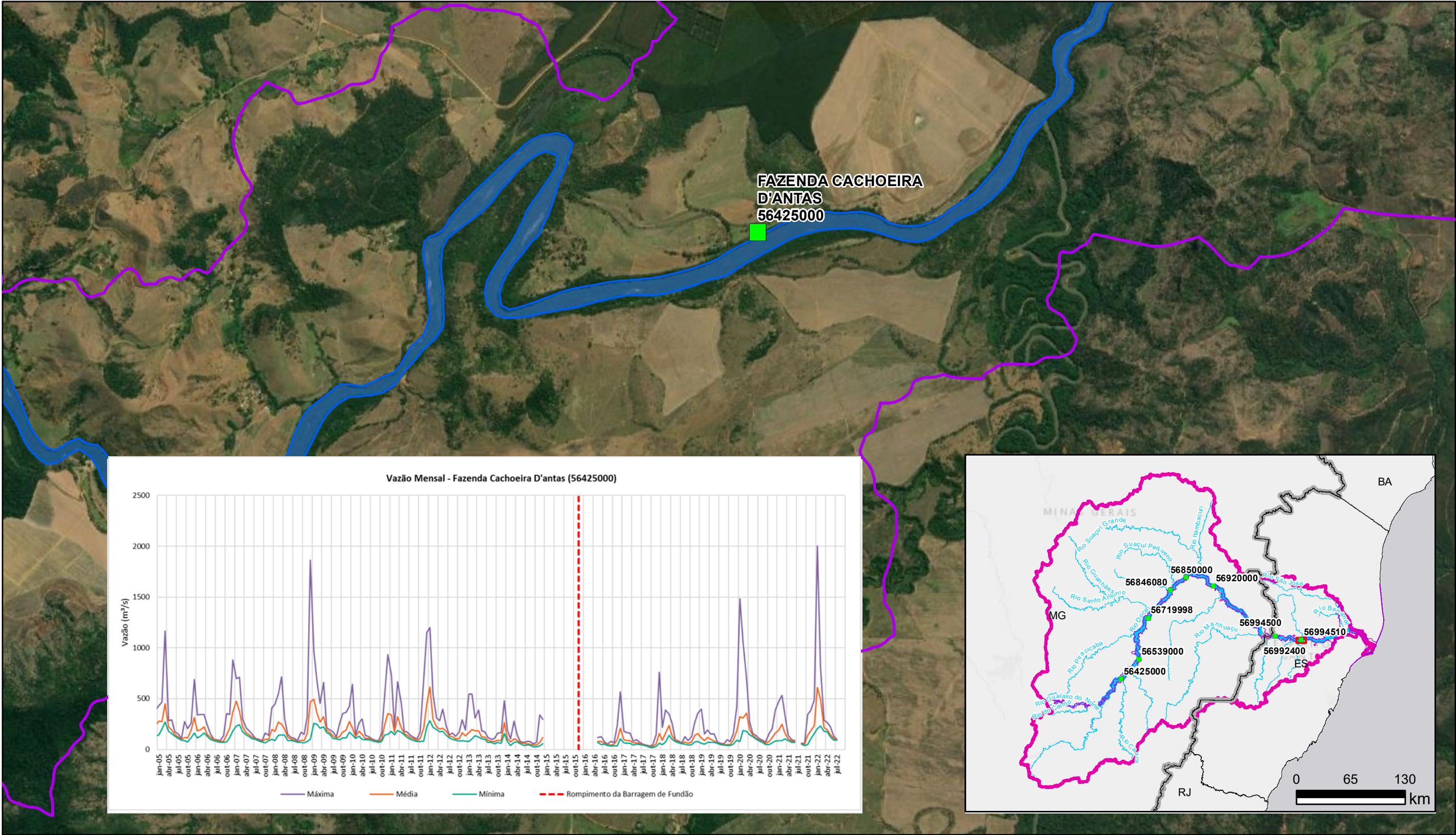
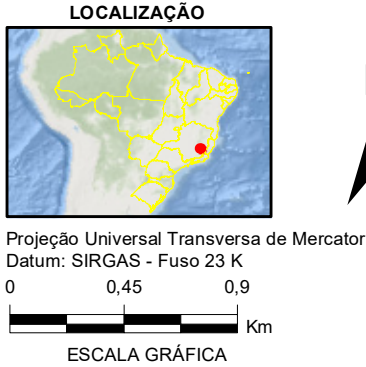


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

- LEGENDA**
- Divisa Estadual
 - Limites Municipais
 - Bacia do Rio Doce
 - Corpos d'água
 - Principais Rios da Bacia
 - Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156/>>.
Acessado em Jan/2023



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
GIS	gld_ipriolli	fev/2023
REV	MRamin	00

Figura
06.1

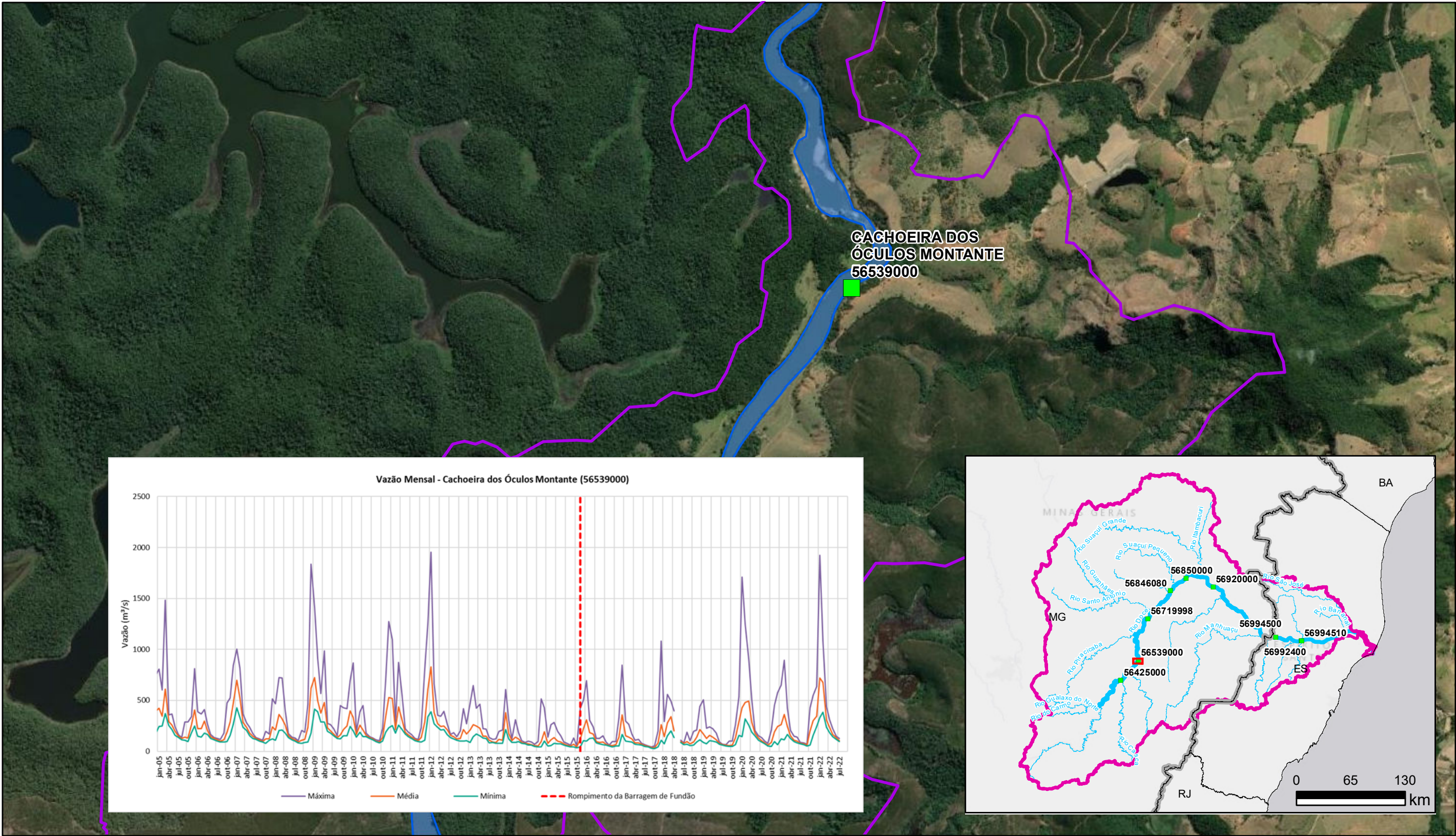


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156t/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 0,45 0,9
Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO: 22535632		ESCALA: 1:30.000	
GIS	gld_ipriolli	fev/2023	Figura 06.2
REV	MRamin	00	

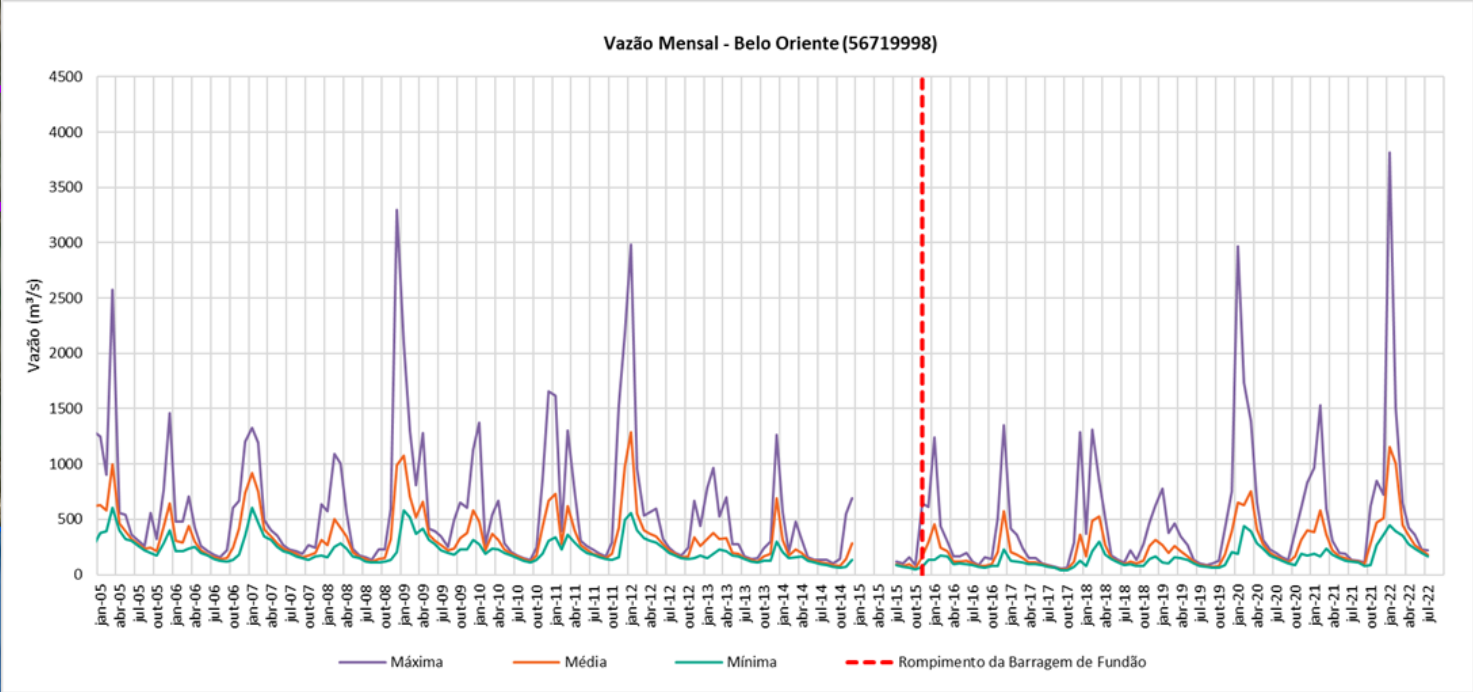
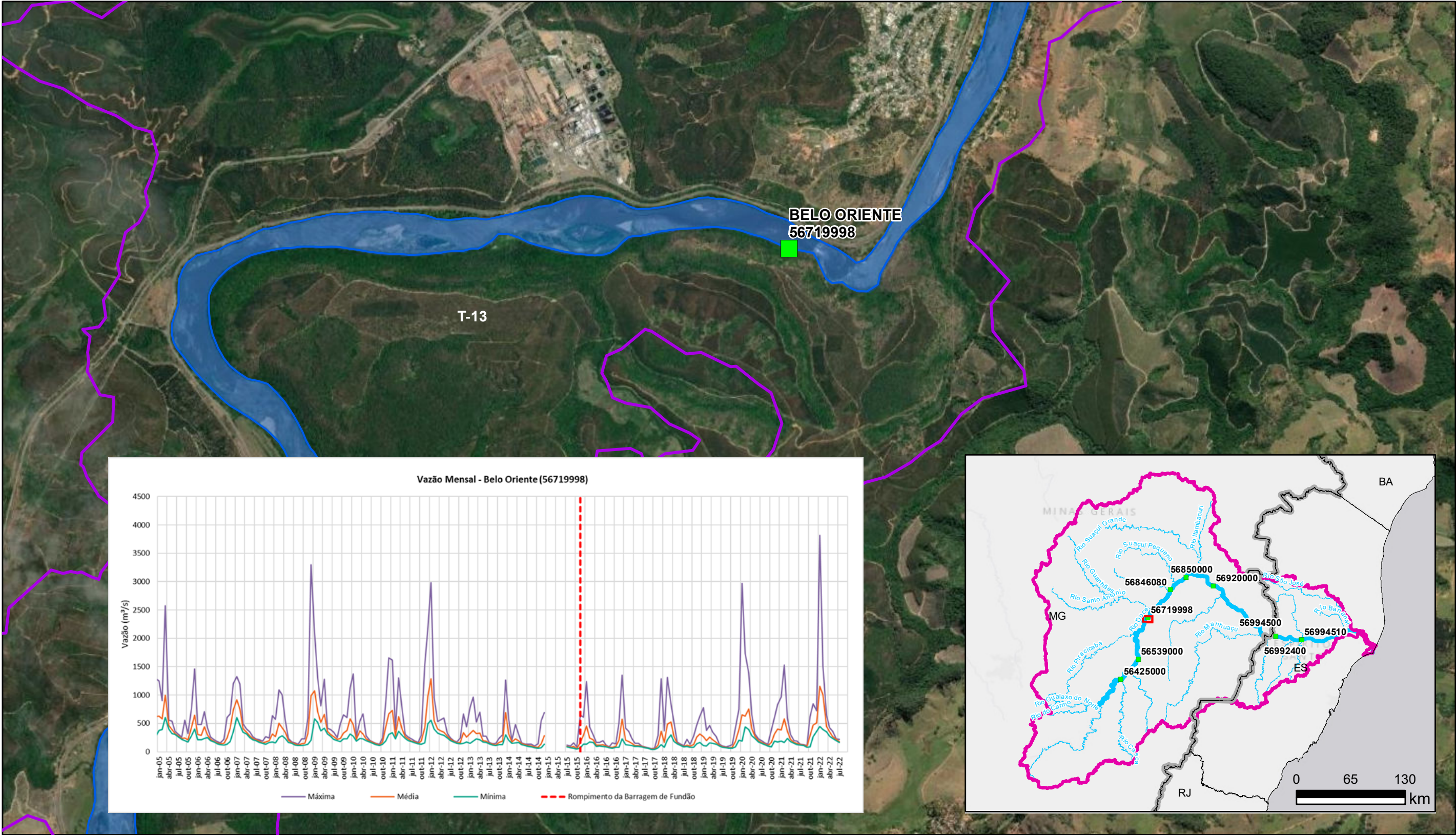


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 0,45 0,9 Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
GIS	gld_iprioli	fev/2023
REV	MRamin	00

Figura
06.3

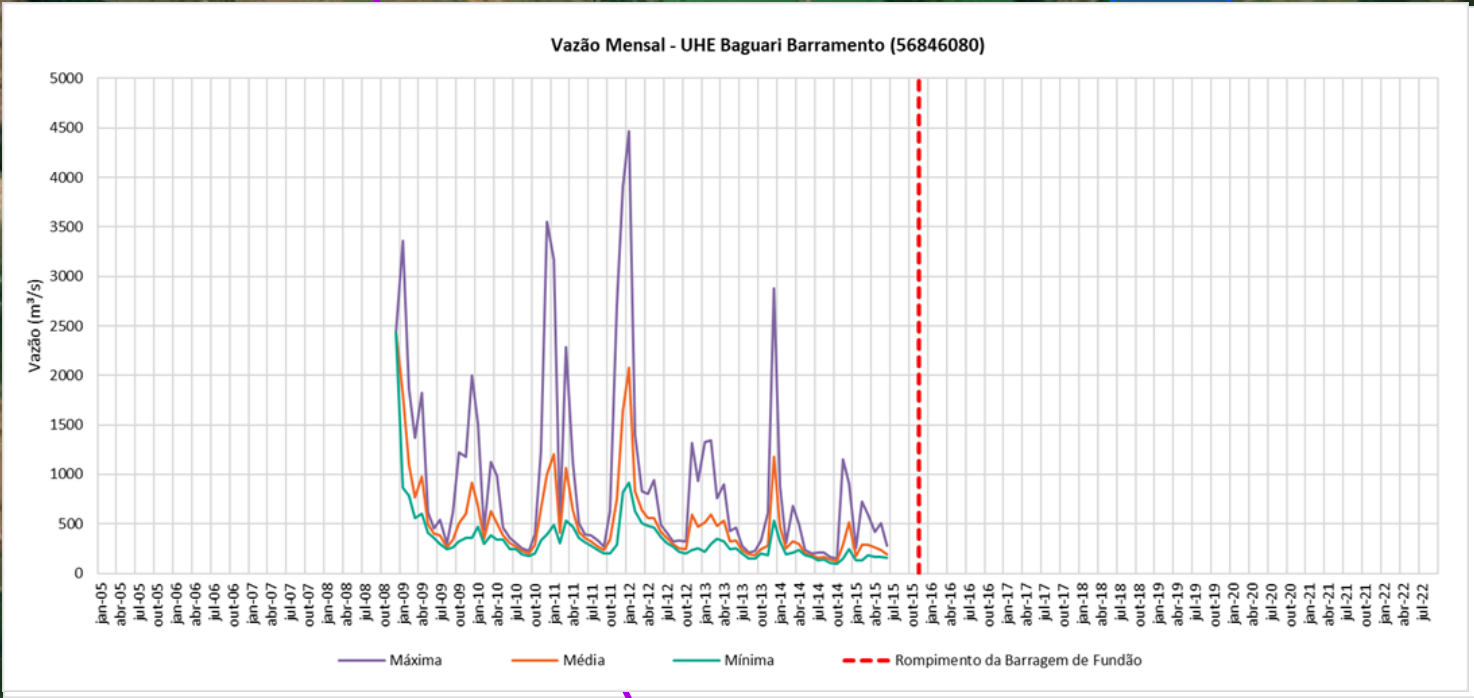
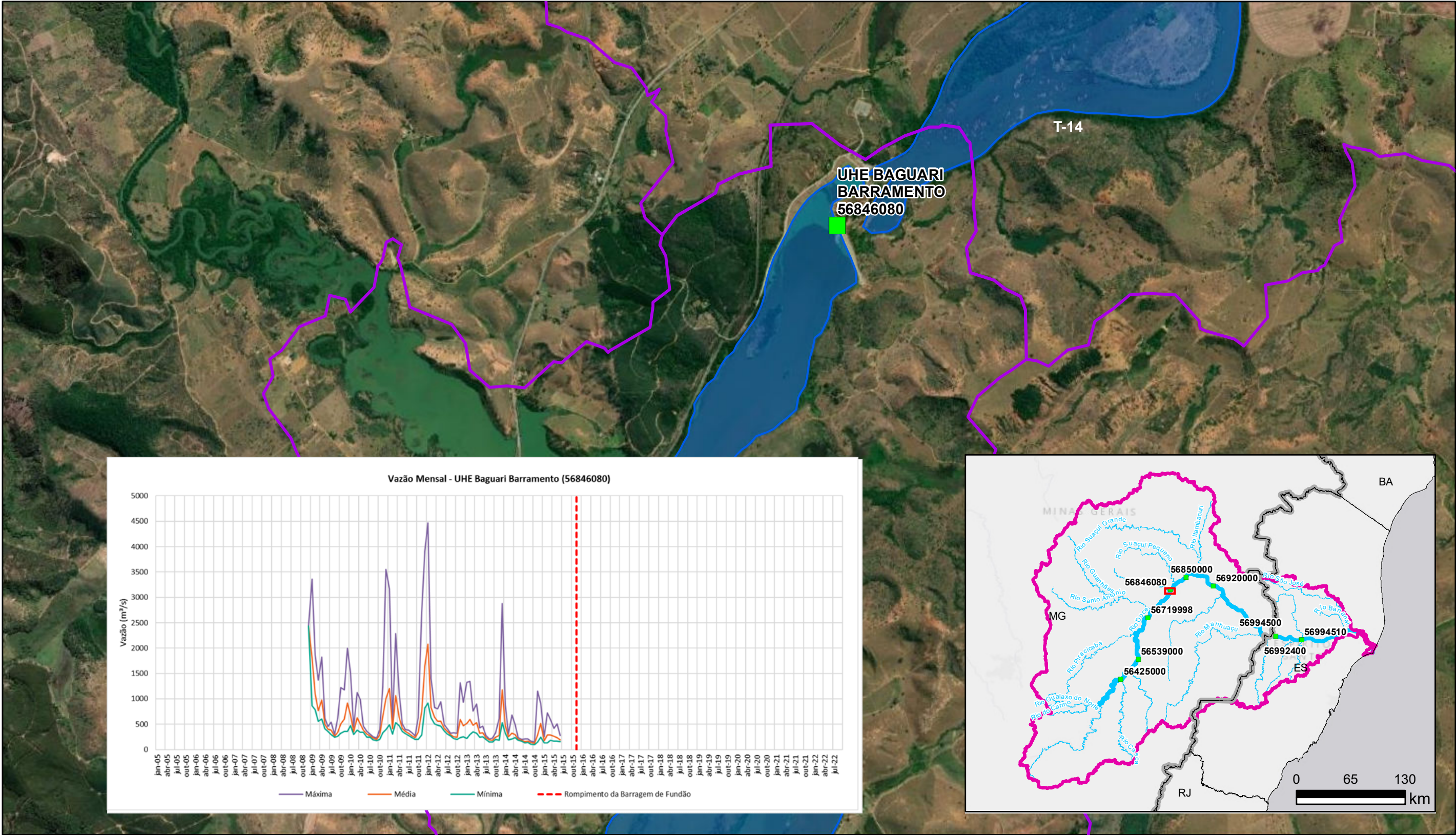
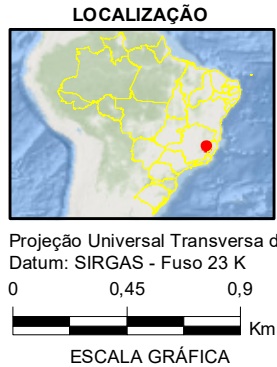


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156/>>.
Acessado em Jan/2023



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
GIS	gld_iprioli	fev/2023
REV	MRamin	00

Figura
06.4

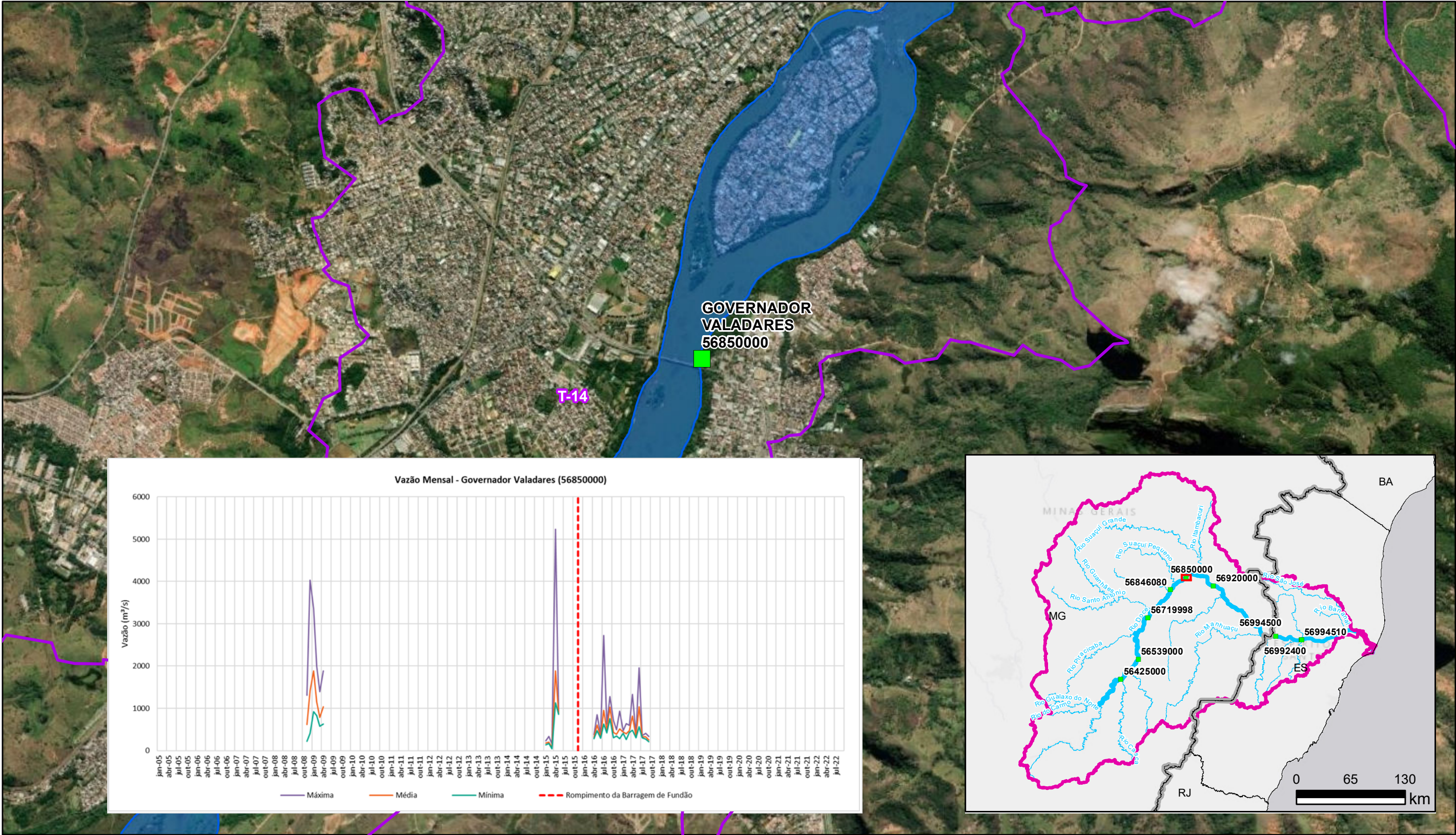


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156t/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K

0 0,45 0,9 Km

ESCALA GRÁFICA

PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO

wsp	Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
	GIS	gld_ipriolli	fev/2023
	REV	MRamin	00

Figura 06.5

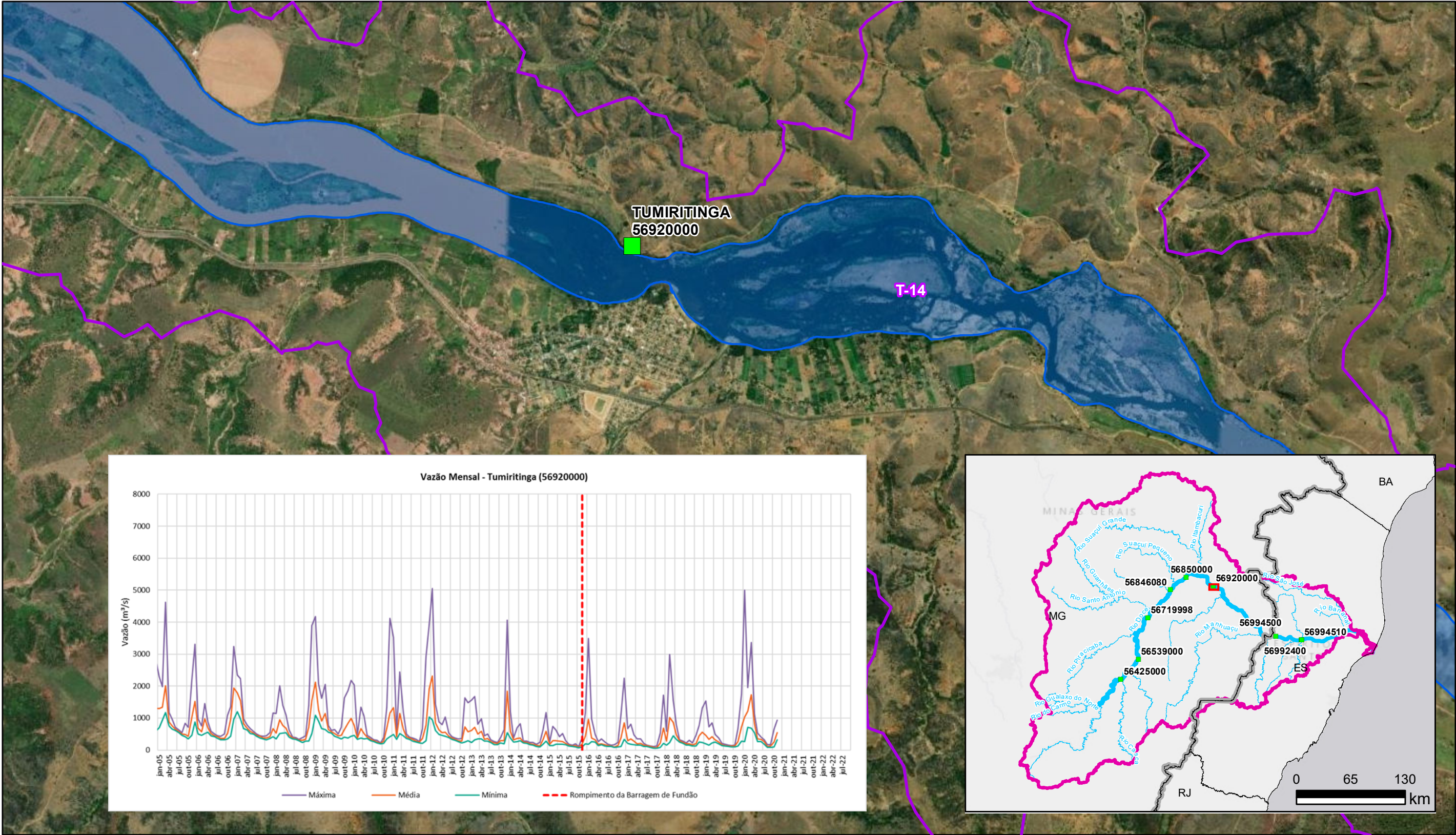


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

- LEGENDA**
- Divisa Estadual
 - Limites Municipais
 - Bacia do Rio Doce
 - Corpos d'água
 - Principais Rios da Bacia
 - Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K

0 0,45 0,9 Km

ESCALA GRÁFICA

PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO

	Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
	GIS	gld_ipriolli	fev/2023
	REV	MRamin	00

Figura 06.6

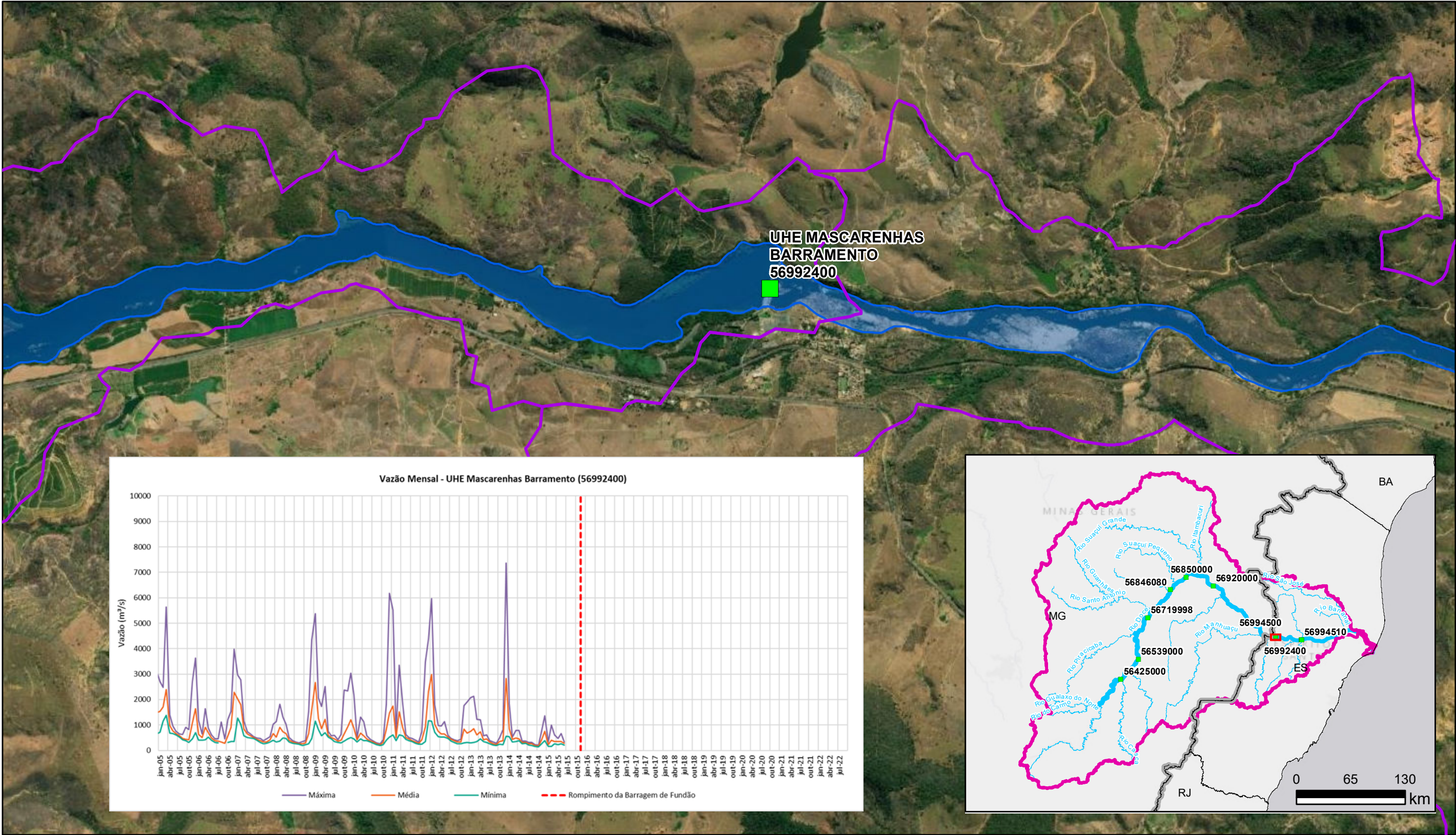


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156t/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 0,45 0,9 Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
GIS	gld_iprioli	fev/2023
REV	MRamin	00

Figura 06.7

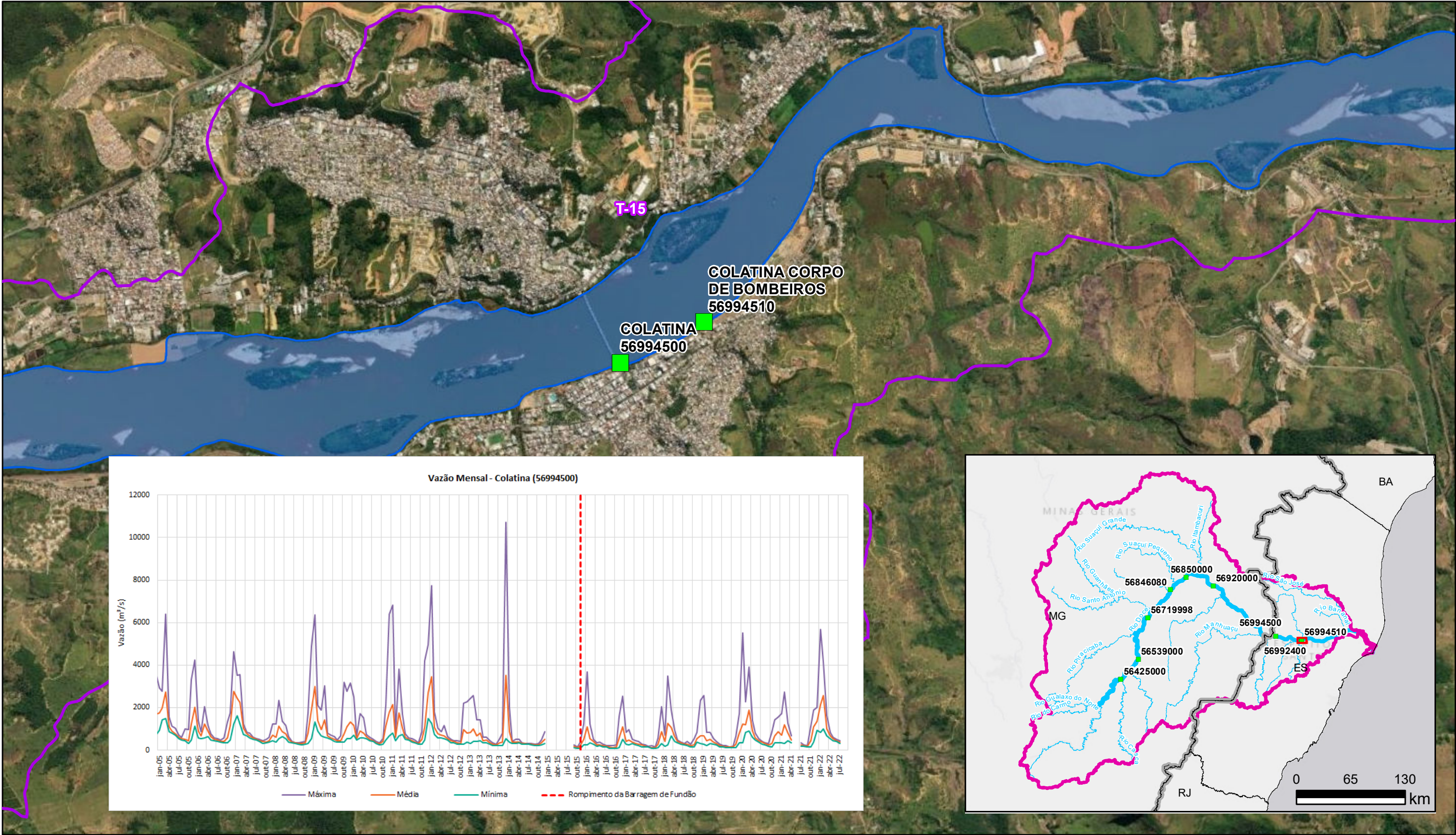


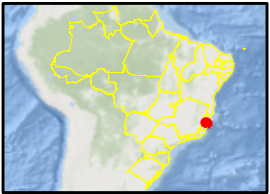
Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156t/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 0,45 0,9
Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
GIS	gld_ipriolli	fev/2023
REV	MRamin	00

Figura
06.8

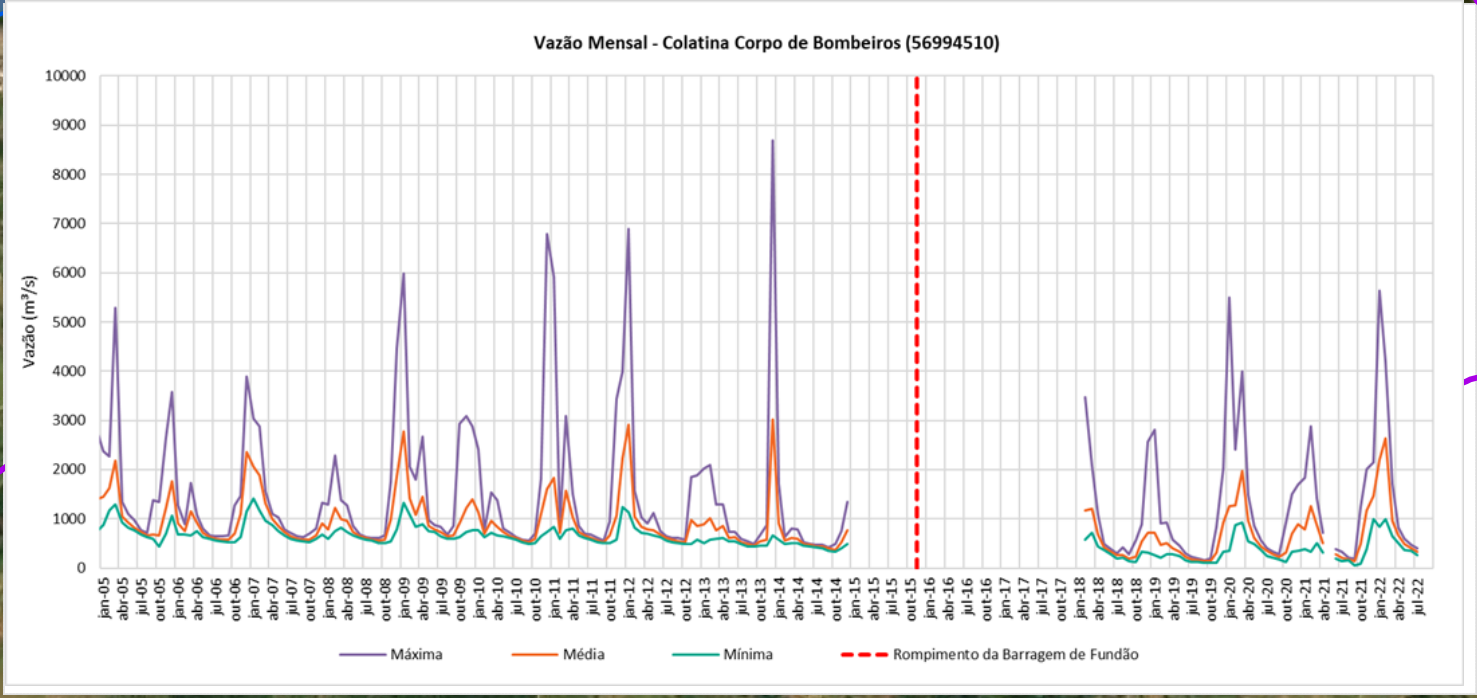
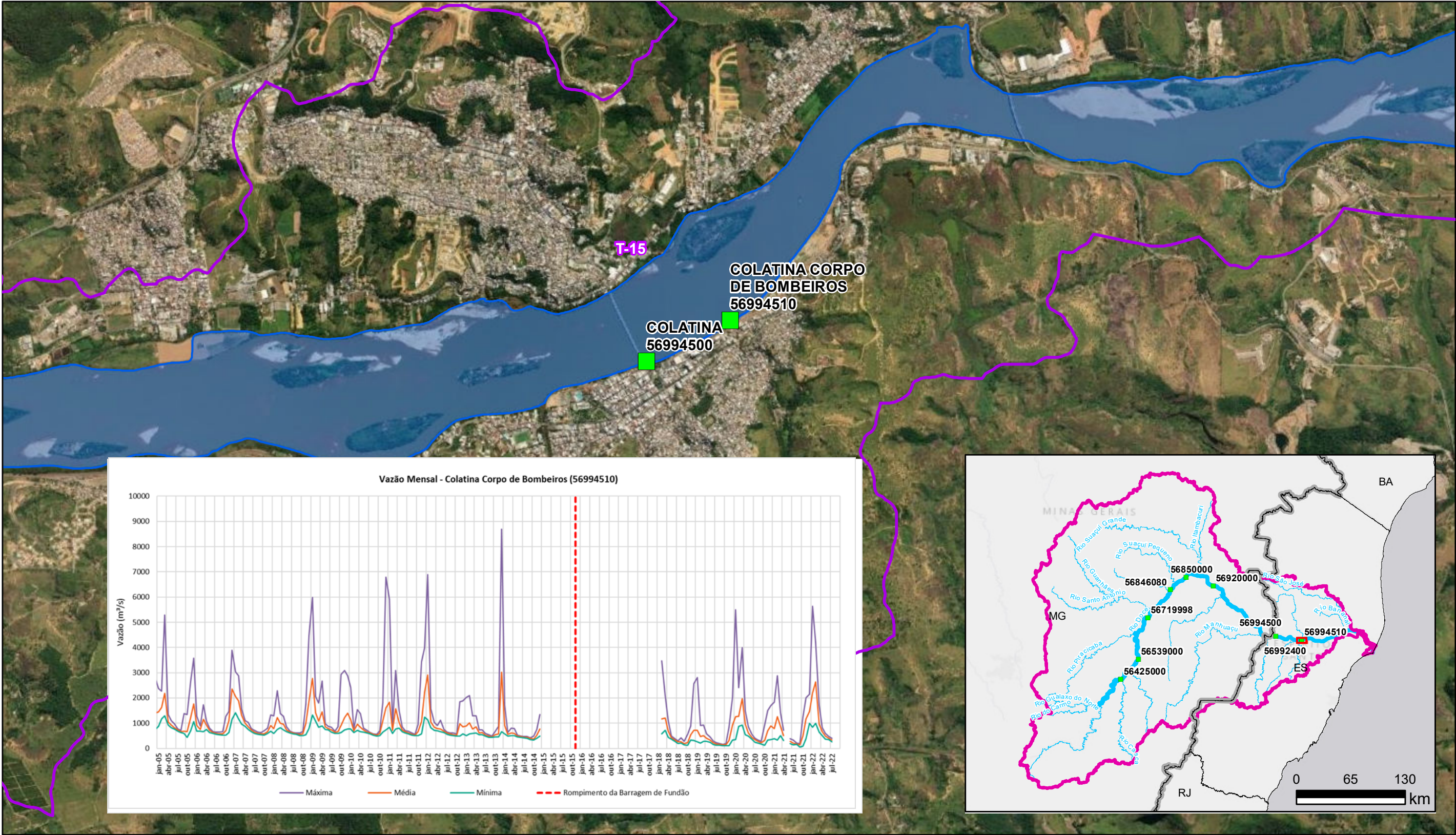


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Divisa Estadual
- Limites Municipais
- Bacia do Rio Doce
- Corpos d'água
- Principais Rios da Bacia
- Estações Fluviométricas

- Referência:
- Estações Fluviométricas
<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156?/>>.
Acessado em Jan/2023

LOCALIZAÇÃO

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 0,45 0,9 Km
ESCALA GRÁFICA

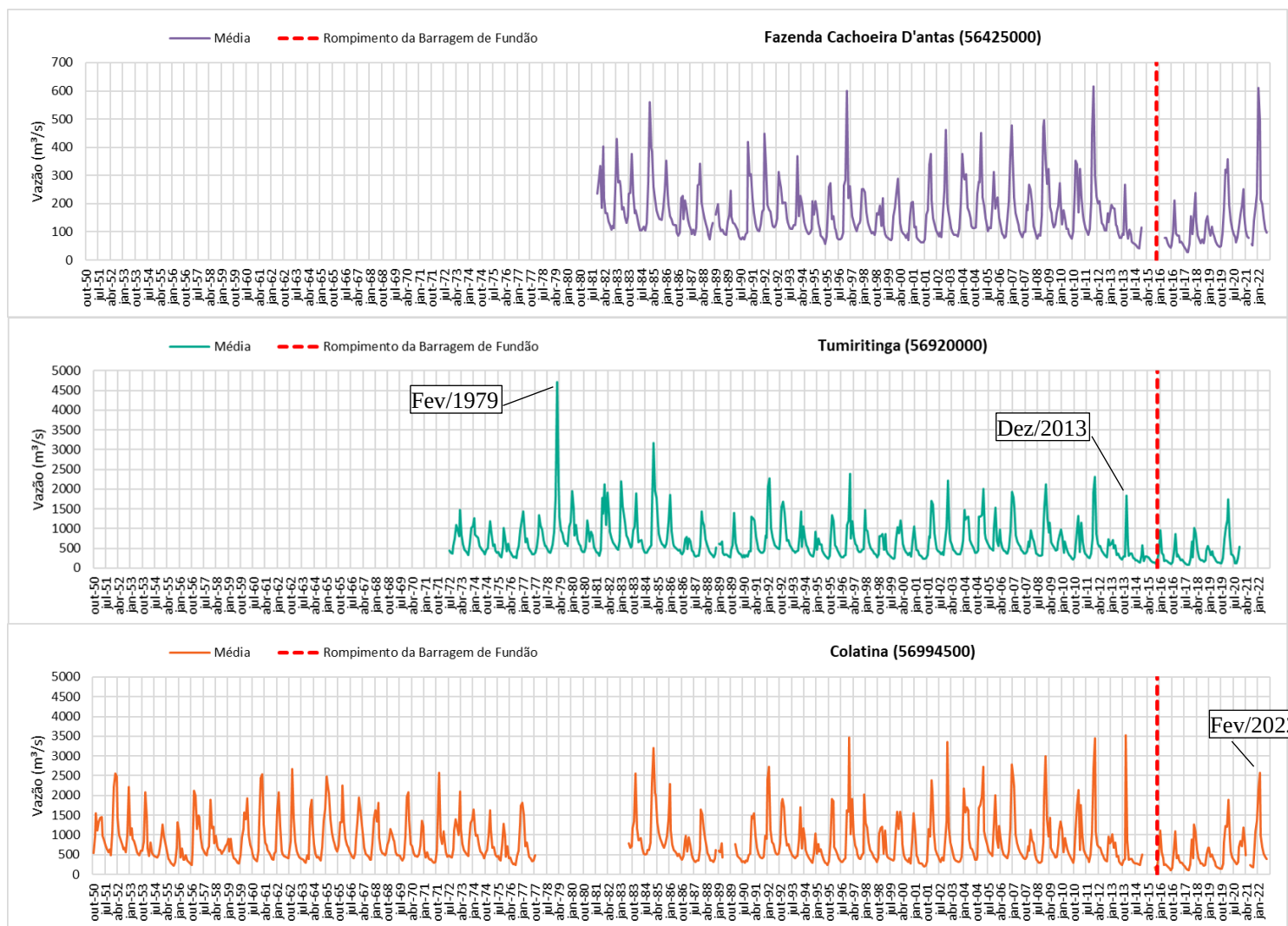
PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E DADOS DE VAZÃO

wsp	Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:30.000
	GIS	gld_iprioli	fev/2023
	REV	MRamin	00

Figura 06.9

Figura 7 – Gráfico da vazão média mensal medida nas estações fluviométricas Fazenda Cachoeira D'antas, Tumiritinga e Colatina.



4.3 Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica

De acordo com CBH-DOCE (2010) a bacia hidrográfica do rio Doce (BHRD) pode ser dividida em três áreas distintas de acordo com suas características físicas: Alto Doce, que vai desde as nascentes até a confluência com o rio Piracicaba, afluente pela margem esquerda, próximo a Ipatinga, em Minas Gerais; Médio Doce, que se estende da confluência com o rio Piracicaba até a divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo; e Baixo Doce, que se estende da divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo até a foz no Oceano Atlântico. Compreende 229 municípios, cujos territórios estão totalmente ou parcialmente nela inseridos, sendo 203 no estado de Minas Gerais e 25 no Espírito Santo. Destes, 18 deles possuem sedes urbanas fora do limite da bacia. Nesse sentido, são 201 sedes municipais localizadas no território da bacia, com uma população residente superior a 3,5 milhões de habitantes (Ecoplan-Lume, 2010). Segundo esses autores, a urbanização aumentou em todas as categorias de municípios na região da bacia hidrográfica do Rio Doce, mas áreas menores ainda possuem uma grande população rural, sendo a região metropolitana do Vale do Aço a área mais urbanizada da bacia, com uma população de mais de 438 mil pessoas, representando 13% da população total da região.

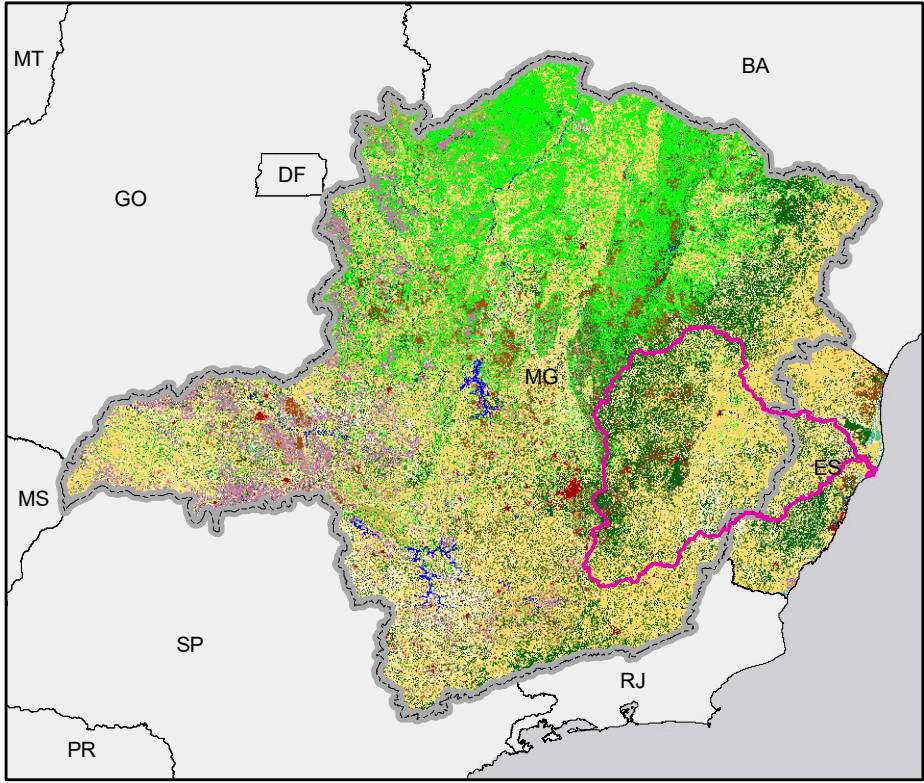
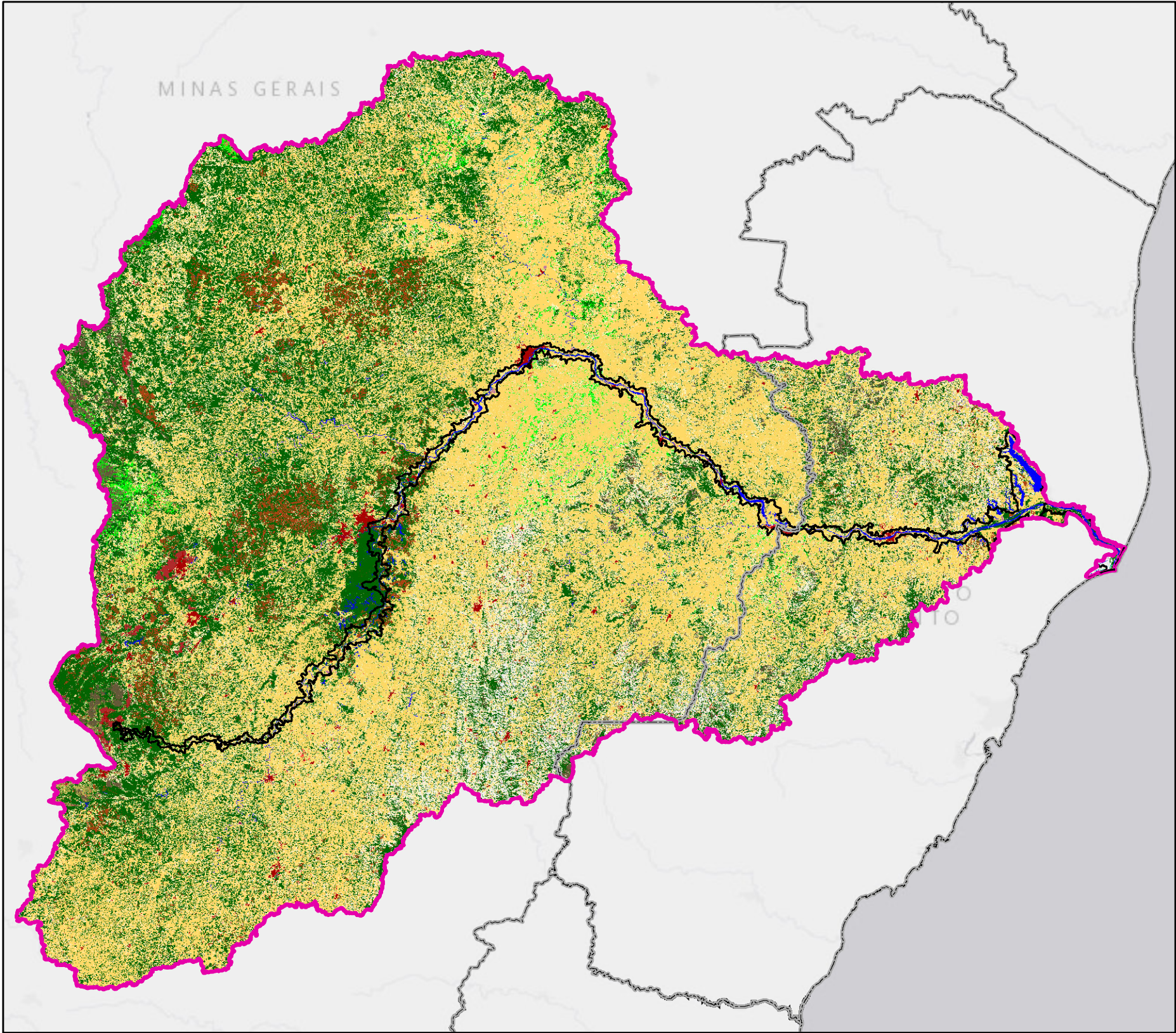
De acordo com ANA (2016) a topografia da região é bastante acidentada, fazendo parte de uma área conhecida como "mar de morros" no território brasileiro. As elevadas declividades da área limitam as atividades econômicas e o uso urbano do solo. O terreno irregular também influenciou a produção do espaço urbano na bacia, com a concentração das áreas urbanas próximas aos cursos de água e em áreas propensas a inundações.

Originalmente a BHRD era em grande parte coberta por florestas semidecíduas pertencentes à Mata Atlântica e apresentava uma rica biodiversidade, com muitas espécies da fauna e flora exclusivas desse ecossistema (Coelho, 2009). A bacia era predominantemente coberta por Campos de Altitude, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila Densa (ou Mata Atlântica) que, devido à sua localização, relevo, clima e latitude, criavam condições especiais para o desenvolvimento de uma grande diversidade de plantas.

De acordo com Calegario et al. (2020), no ano de 2019, a bacia do rio Doce era predominantemente composta por pastagens e áreas de agricultura perenes (74,1%), matas nativas (24,5%) e reflorestamento (1,5%). Esses números indicam que ocorreu uma grande supressão da cobertura vegetal na região, estando os remanescentes florestais restritos às áreas mais íngremes.

Segundo ANA (2016) a bacia do rio Doce apresenta uma grande supressão da cobertura vegetal, com remanescentes florestais restritos às áreas mais inclinadas do terreno. Nesse contexto, a retirada da cobertura vegetal acelera os processos morfodinâmicos, evidenciados por ravinas e sulcos, o que aumenta a remoção dos solos, como pode ser visto no mapa de cobertura do solo da **Figura 8**. Outro fator que contribui com a erosão do solo está relacionado a presença de pastagens degradadas, ocorrendo um transporte de grandes quantidades de sedimentos para os cursos de água. De acordo com Cunha (2001) e Almeida e Carvalho (1993), a Bacia Hidrográfica do Rio Doce é uma das regiões com maior produção de sedimentos no Brasil. Isso se deve a diversos fatores, incluindo a alta incidência de chuvas, as características do solo e as grandes declividades da região, que são agravadas pelo manejo inadequado do solo.

A **Figura 9** apresenta o mapa elaborado por ANA (2016) sobre o potencial de produção de sedimentos na bacia, calculado em toneladas por quilômetro quadrado por ano. Os resultados apontaram que as características de solo e relevo são os principais fatores que favorecem a erosão, com 58% da área sendo altamente suscetível e 30% moderadamente suscetível à erosão (ANA, 2016). Essas áreas localizam-se principalmente nas regiões de divisores topográficos, com destaque para as áreas localizadas na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, local de topografia movimentada e solos rasos.



Legenda

Uso do Solo (2021)

- Formação Florestal
- Formação Savânica
- Silvicultura
- Campo Alagado e Área Pantanosa
- Formação Campestre
- Outras Formações não Florestais
- Pastagem
- Agricultura
- Mosaico de Agricultura e Pastagem
- Área Urbanizada
- Outras Áreas não Vegetadas
- Afloramento Rochoso
- Mineração
- Rio, Lago e Oceano

Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors

- LEGENDA
- Divisa Estadual
 - Bacia do Rio Doce
 - Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos

- Referência:
- Uso do solo (2021): Mapbiomas - Coleção 7.0
<<https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>.
Acessado em fev/2023



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 25 50
Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
**ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO
TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA
NEVES**

TÍTULO:
MAPA DE USO DO SOLO REGIÃO DE ESTUDO



Nº PROJETO: 22535632		ESCALA: 1:10.953.421	
GIS	gld_lprioli	abr/2023	Figura 08
REV	MRamin	00	

4.4 Contexto Geológico

33

Espinhaço, que são formadas principalmente por rochas metamórficas e graníticas. A bacia também contém depósitos de minerais como ferro, manganês, estanho e bauxita (Lobato e Costa, 2018).

De acordo com CPRM, 2004, a bacia hidrográfica do rio Doce tem seu contexto geológico caracterizado por unidades arqueanas, proterozoicas e fanerozoicas, a qual foi separada por três setores definidos com base no tipo de rocha dominante e idade, sendo eles:

- **Setor 1:** contido no estado de Minas Gerais – MG, compreende as rochas metamórficas como metagranitos e gnaisses das Eras mesoarqueano e paleoproterozoica;
- **Setor 2:** presente nos estados de Minas Gerais – MG e Espírito Santo – ES, tem como tipo dominante as rochas ígneas, como os granitos;
- **Setor 3:** contido no estado do Espírito Santo – ES, tem como tipo predominante rochas sedimentares da Era cenozoica, com unidades aluviais e eluviais derivadas das unidades geológicas dos setores supracitados, sendo os materiais mais jovens da bacia do rio Doce.

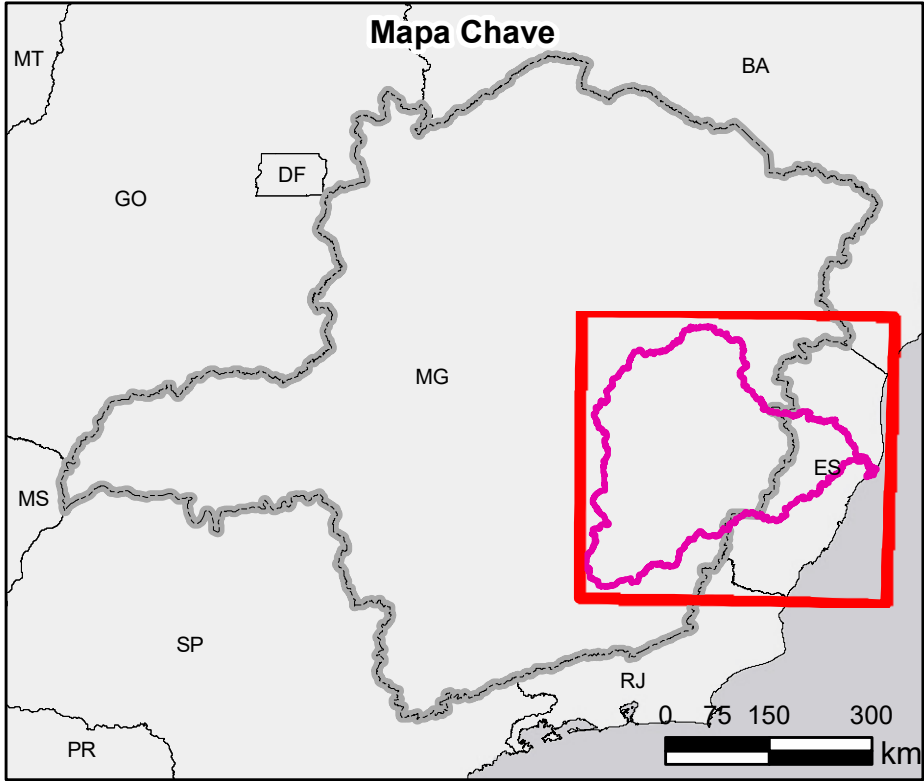
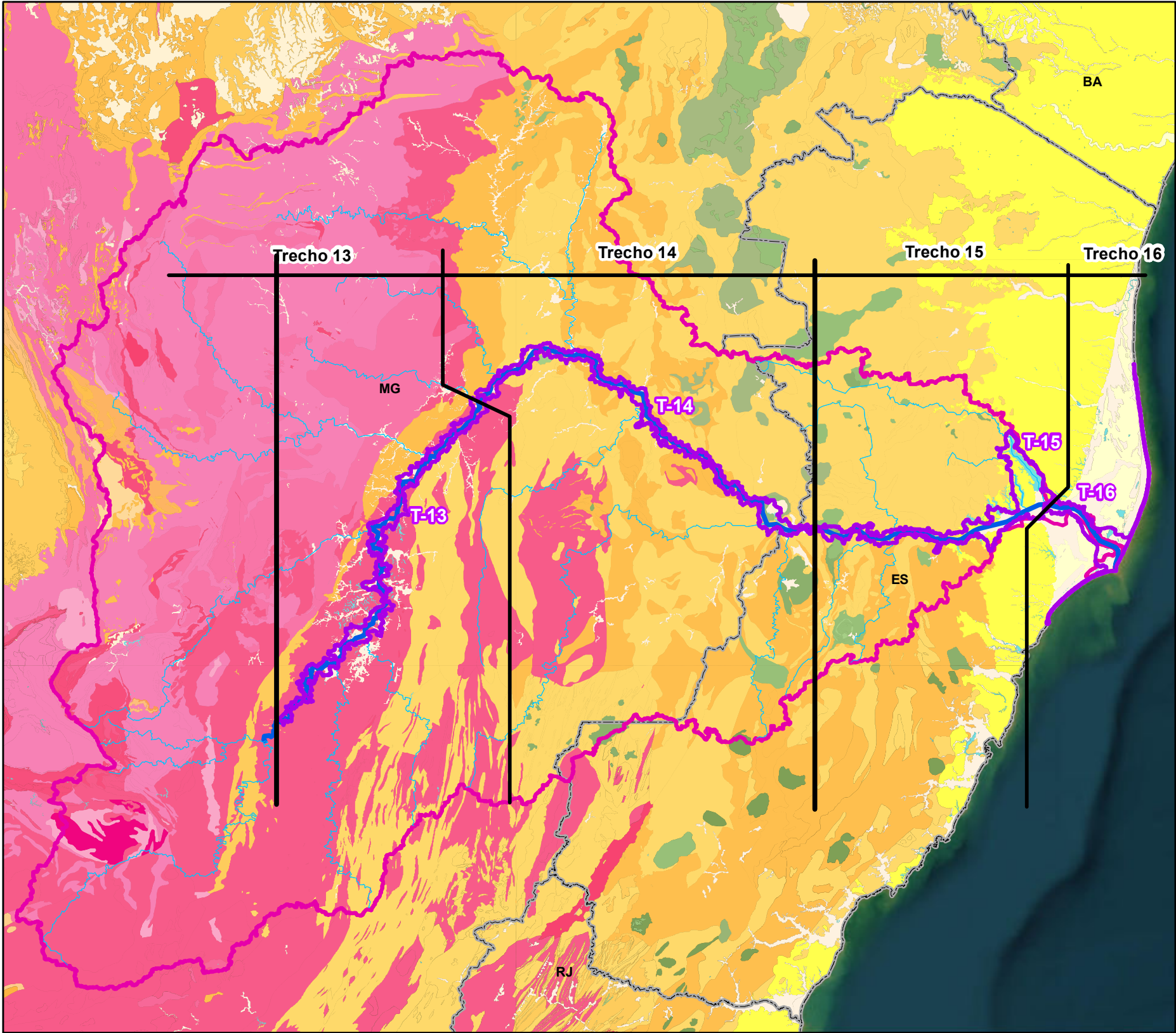
Conforme apresentado na **Figura 10** o contexto geológico do início do Trecho 13 até o município de Governador Valadares/MG é composto principalmente por rochas paleoproterozoicas do Complexo Mantiqueira (Ortognaisse, anfibolito, migmatito e metaultramáficas) e do Complexo São Sebastião do Soberbo (paragnaisse, quartzito, anfibolito, formação ferrífera e rochas calciossilicáticas), com coberturas aluvionares cenozoicas do período Neógeno. Outras litologias a serem destacadas neste trecho, também paleoproterozoicas, são os granitos pré-colisionais, representados pelo Granitoide Córrego Pedra Dourada, localizado no município de Santa Cruz do Escalvado – MG, e as litofácies ortognaisse migmatítico do Complexo Juiz de Fora em Fernandes Tourinho e Governador Valadares – MG.

A partir de Governador Valadares – MG, a geologia é predominantemente composta por rochas neoproterozoicas das Formações Tumiritinga (paragnaisse e mármore), São Tomé (xisto e quartzito) e João pinto (quartzito) do Grupo Rio Doce, bem como a presença de granitos pré-colisionais e sincolisionais, respectivamente, das Suítes Galiléia e Urucum, embora ainda haja a presença de depósitos aluvionares até os municípios de Galiléia e Tumiritinga – MG. Já em Aimorés – MG, destaca-se as Suítes Aimorés (biotita granito e charnockito calcialcalinos de alto teor de

potássio, porfiríticos) e Mascarenhas (granitoides foliados a gnáissicos predominantemente, calcialcalinos, Tipo I), sendo a primeira do Cambriano e a segunda do Neoproterozoico.

Na fronteira entre Minas Gerais e Espírito Santo, representada pelos municípios de Aimorés – MG e Baixo Guandu – ES, no Trecho 14, as unidades predominantes são o Ortognaisse Mascarenhas, do Neoproterozoico, seguido pelas coberturas de depósitos fluviais (sedimentos fluviais de deltas constituídos por areia e cascalho) e fluviolagunares (sedimentos arenoargilosos ricos em matéria orgânica, podendo conter grande quantidade de conchas de moluscos de ambientes lagunares) cenozoicos. Têm-se ainda a presença de rochas do Complexo Nova Venécia, como silimanita-granada-cordierita-biotita gnaiss bandado com intercalações de rochas calciossilicáticas e gnaisses quartzosos (Neoproterozoico), e do gabro da Supersuíte Aimorés Baunilha (Paleozoico).

A Bacia do rio Doce no Espírito Santo é composta principalmente por rochas sedimentares, como arenitos, argilitos, siltitos e calcários. Essas rochas foram formadas a partir da deposição de sedimentos provenientes da erosão de rochas adjacentes à bacia, como montanhas e planaltos. A litologia mais comum nessa porção da bacia é a formada por arenitos, que são rochas sedimentares feitas de grãos de areia e outros minerais cimentados. Esses arenitos são resultado da deposição de sedimentos em ambientes de rios, lagos e oceano.



Pedologia

Tempo Geológico

- Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno
- Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Superior
- Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Gelasiano
- Fanerozoico Cenozoica Neógeno Mioceno Langhiano
- Fanerozoico Cenozoica Paleógeno Oligoceno
- Fanerozoico Cenozoica Paleógeno
- Fanerozoico Paleozoica Cambriano Miaolingiano
- Fanerozoico Paleozoica Cambriano Série 2
- Fanerozoico Paleozoica Cambriano Terreneuviano Estágio 2
- Fanerozoico Paleozoica Cambriano Terreneuviano
- Fanerozoico Paleozoica Cambriano
- Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano
- Proterozoico Neoproterozoica Criogeniano
- Proterozoico Neoproterozoica Toniano
- Proterozoico Mesoproterozoica Esteniano
- Proterozoico Mesoproterozoica Calymmiano
- Proterozoico Mesoproterozoica
- Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano
- Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano
- Proterozoico Paleoproterozoica Riaciano
- Proterozoico Paleoproterozoica Sideriano
- Proterozoico Paleoproterozoica
- Arqueano Neoarqueana
- Arqueano Mesoarqueana
- Arqueano

Outros

- Corpo d'água continental

Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

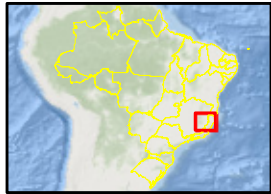
- Bacia do Rio Doce
- Divisa Estadual
- Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos

Principais Rios da Bacia Hidrográfica

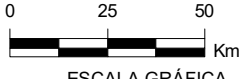
- Demais Rios
- Rio Doce

- Referência:
-Geologia 1:250.000 - IBGE 2021
<<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#!/consulta/geologia>>.
Acessado em fev/2023

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS 2000 - Fuso 23 K



ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
MAPA DO CONTEXTO GEOLÓGICO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:1.943.990
GIS	LPrioli	mar/2023
REV	MRamin	00

Figura
10

4.5 Contexto Pedológico

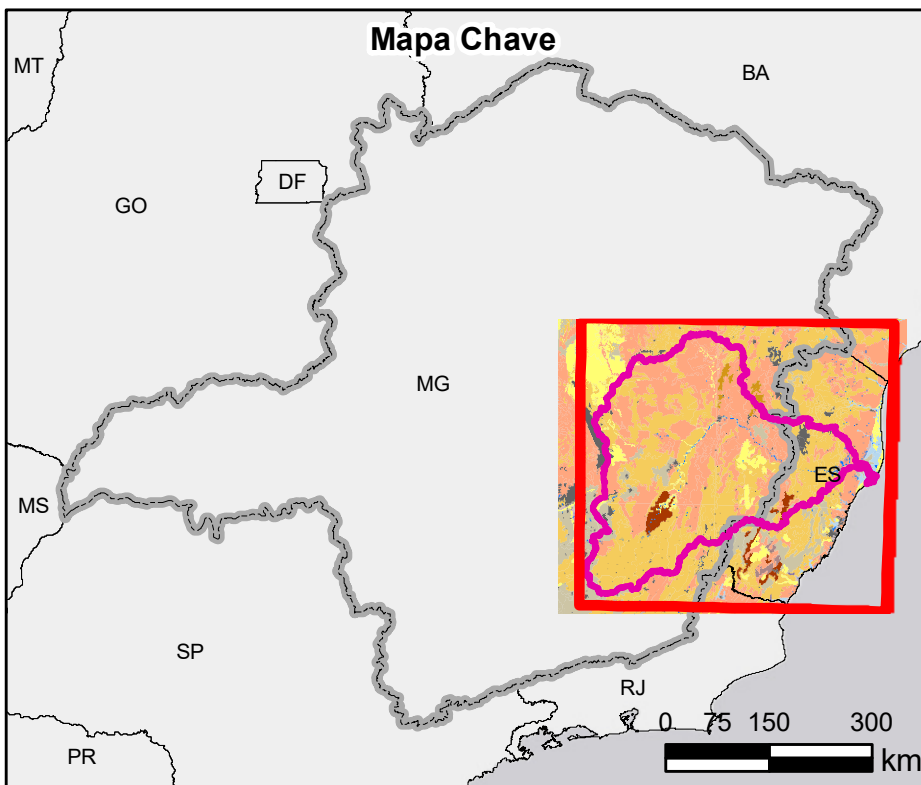
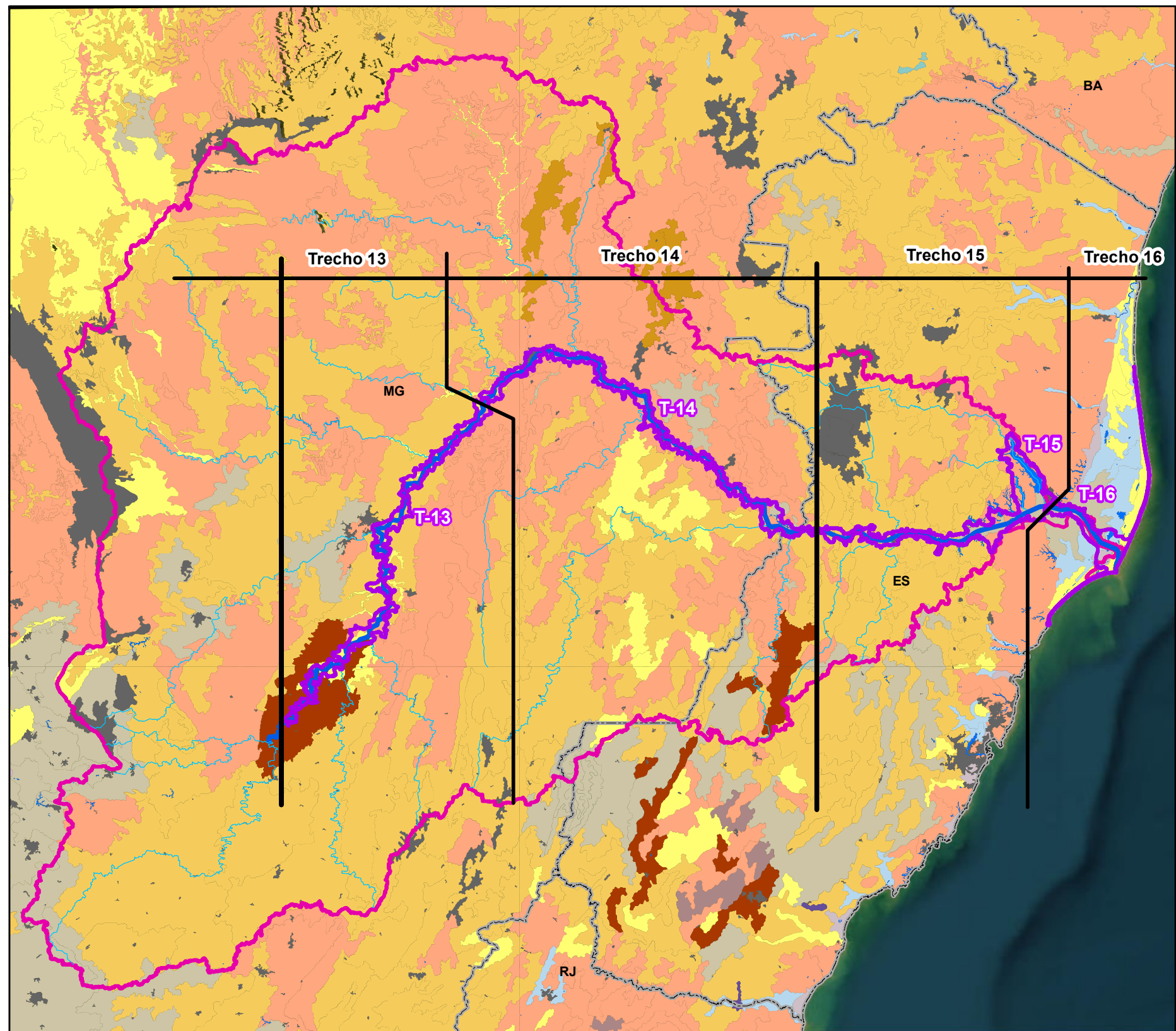
Para contextualização dos solos da bacia do rio Doce foi consultada a base de solos do IBGE (2001), considerando a classe do primeiro componente de associação das unidades. De modo geral a maior parte da bacia do rio Doce é composta por Latossolos Vermelho Amarelos e Argissolos Vermelhos, que representam 77,2% da área da bacia. Ocorrem ainda Cambissolos, Gleissolos e Neossolos (Litólicos, Flúvicos e Quartzarênicos).

O Latossolo Vermelho Amarelo é formado a partir de rochas gnáissicas e é encontrado principalmente nos planaltos dissecados. Este tipo de solo tem baixa saturação de bases e alta saturação com alumínio, é ácido e é usado principalmente para pastagem. Na paisagem do Médio Rio Doce, esses solos são os mais profundos, que ocupam as posições mais elevadas e são predominantemente distróficos, com altos teores de alumínio trocável e baixo ki^1 . Além da elevada profundidade, são bem drenados, friáveis e são usados principalmente para pastagem e agricultura.

As posições intermediárias são ocupadas pelos Argissolos, com frequente ocorrência de Argissolos Eutróficos. Estes solos correspondem à parte inferior do antigo pediplano, que perdeu sua camada superior por remoção. O Argissolo Vermelho é formado a partir de gnaisses diversos e é usado principalmente como pastagem e para cultivo de plantas de ciclo longo. O Argissolo Amarelo é formado a partir de sedimentos do Grupo Barreiras, é encontrado próximo ao litoral do estado do Espírito Santo e é usado principalmente para silvicultura. Este solo é profundo, coeso e tem baixa condutividade hidráulica, o que o torna menos propenso a erosão em relação a outros tipos de solos (Valente, 2005).

Os solos dos terraços vêm em seguida, seguidos pelos solos mais jovens do leito maior dos rios, que são predominantemente Neossolos Flúvicos, com Gleissolos em ambientes com drenagem deficitária. A gênese dos terraços fluviais, segundo o modelo proposto por Correa (1984), envolve sucessivas alterações climáticas, que levaram a um rápido aprofundamento dos cursos d'água em condições climáticas úmidas, formando os terraços atuais. Posteriormente, o aprofundamento de uma nova rede de drenagem promoveu a gênese dos leitos maiores dos rios (Valente, 2005).

¹ Ki - O índice Ki indica a relação molecular SiO_2/Al_2O_3 , refletindo a remoção de sílica e permanência do alumínio, devido seu acúmulo relativo no solo (MONIZ et al., 1973).



Pedologia

Classe de solo

- ARGISSOLO
- CAMBISSOLO
- CHERNOSSOLO
- VERTISSOLO
- ESPODOSSOLO
- GLEISSOLO
- LATOSSOLO
- LUVISSOLO
- NEOSSOLO
- NITOSSOLO
- ORGANOSSOLO
- PLANOSSOLO
- PLINTOSSOLO

Tipos de terreno

- OUTROS
- DUNAS

Outros

- CORPO D'ÁGUA CONTINENTAL

Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

LEGENDA

- Bacia do Rio Doce
- Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos
- Divisa Estadual

Principais Rios da Bacia Hidrográfica

- Demais Rios
- Rio Doce

- Referência:
- Pedologia 1:5.000.000 - IBGE 2021
<<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>.
Acessado em fev/2023



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS - Fuso 23 K
0 25 50 Km
ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
MAPA PEDOLÓGICO DA REGIÃO DE ESTUDO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA: 1:4.165.558
GIS	LPrioli	mar/2023
REV	MRamin	00

Figura 11

4.6 Contexto Geomorfológico

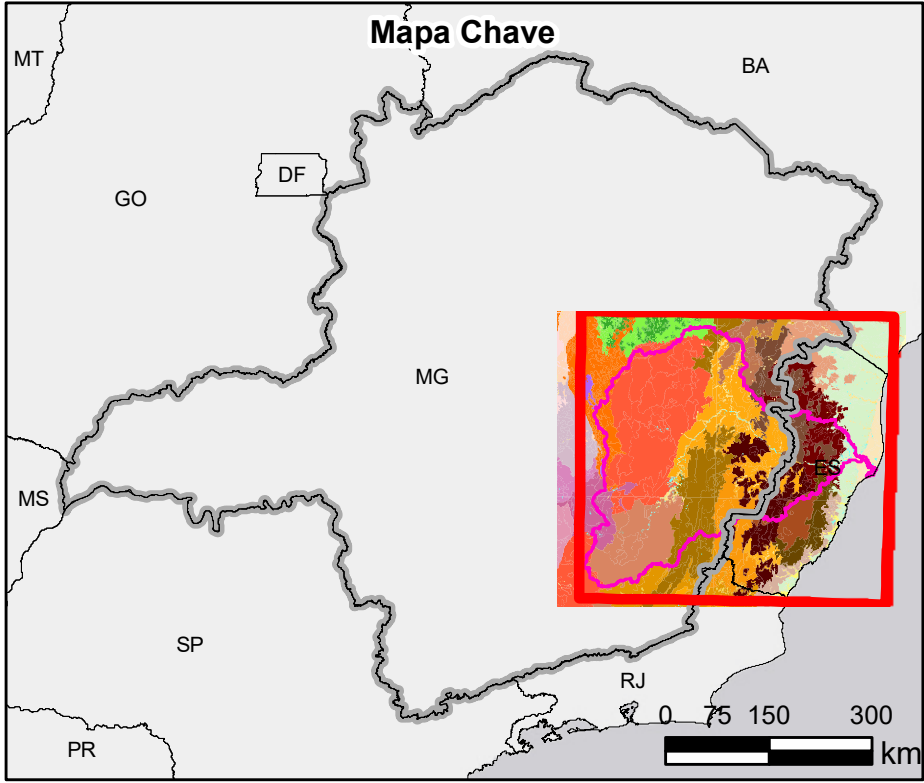
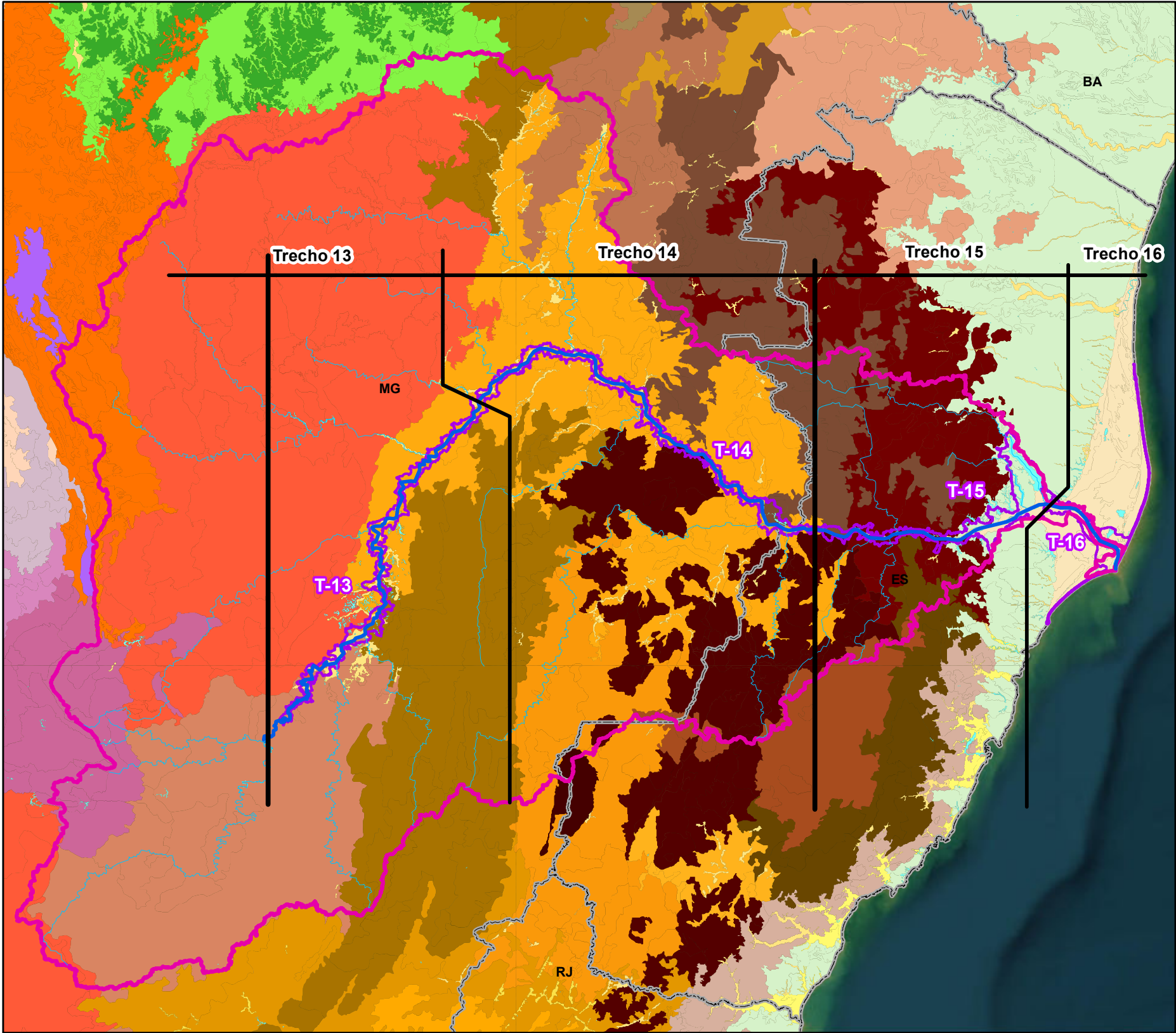
4.6.1 Contexto Geomorfológico da Bacia do Rio Doce

Segundo Strauch (1954) o reflexo da geologia se traduz na paisagem da bacia do rio Doce pelas formas do relevo. Ora a hidrografia se adapta à estrutura, ora se impõe à mesma. Strauch (1954) afirma que a erosão, ao afetar rochas variadas e de estruturas tão diferentes, deu origem a relevos bastante diversos em grandes unidades. Dessa forma, os aspectos geomorfológicos são diversificados na bacia do rio Doce e que, aliados aos mecanismos atmosféricos de larga escala, interferem no padrão de distribuição das chuvas na bacia.

A caracterização geomorfológica regional desse estudo tem como base o mapeamento geomorfológico em escala 1:250.000 do Projeto Mapeamento de Recursos Minerais realizado pelo IBGE, disponível no Banco de Dados de Informações Ambientais (IBGE, 2018). Conforme demonstrado na **Figura 12**, há 07 unidades geomorfológicas nos Trechos de interesse, que estão descritas a seguir.

Os Pontões das Bacias dos rios Doce e Itapemirim são parte da região geomorfológica da Serra da Mantiqueira Setentrional, localizados nos municípios de Conselheiro Pena e Resplendor, Minas Gerais. Está associada geologicamente às formações rochosas do Complexo Pocrane, Paraíba do Sul, Suítes Galiléia, Aimorés e Muniz Freire, Grupos Crenaque e São Tomé. Apresenta relevo com morros altos e montanhas, e morros baixos e colinas, além de drenagem dendrítica com enclaves radiais, canais retilíneos e estruturas geológicas. Sua formação é resultado da reativação tectônica do Cretáceo, seguida da denudação diferencial causada pelo clima úmido.

Os Patamares do Alto Rio Doce estão situados no Cinturão Araçuai, caracterizados por morros e colinas suaves e um padrão de drenagem dendrítico. Sua altimetria varia de 300 a 900 m, tendo variadas feições de relevo e uma gênese atribuída a um soerguimento ao longo do Cenozoico e erosão devido à variação climática no Paleógeno e Neógeno.



Unidades Geomorfológicas

Depósitos Sedimentares Quaternários

- Delta do Rio Doce
- Planície Costeira de Caravelas
- Planícies Litorâneas
- Planícies do rio Paraíba do Sul
- Planícies e Terraços Fluviais
- Planícies e Terraços Fluviais do Rio Doce

Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas

- Patamares das Chapadas do Jequitinhonha
- Chapadas do Jequitinhonha
- Tabuleiros Costeiros do Brasil Centro-Oriental

Cinturões Móveis Proterozóicos

- Morros e Montanhas do Centro-Sul Capixaba
- Patamar do Divisor dos Rios Doce, Mucuri e São Mateus
- Patamares do Alto Rio Doce
- Serras da Zona da Mata Mineira
- Depressão dos Rios Mucuri e Alcobaça
- Serras do Divisor do Médio Jequitinhonha - Mucuri
- Depressão Interplanáltica do Médio Rio Doce
- Planalto Dissecado Suaçuí Grande
- Alinhamentos de Cristas da Depressão do Rio Paraíba do Sul
- Bloco Montanhoso dos Pontões Capixabas e Mineiros

- Depressão do Rio Itapemirim
- Depressão dos Rios Pomba e Muriaé
- Patamar do Centro-Norte Capixaba
- Patamares de Juiz de Fora
- Planalto da Pedra Azul Capixaba
- Planalto da Zona Metalúrgica Mineira
- Serras do Alto Mucuri
- Patamares do Espinhaço
- Planalto dos Campos das Vertentes
- Colinas e Maciços Costeiros Capixabas
- Patamares Escalonados da Serra do Caparaó
- Pontões das Bacias dos Rios Doce e Itapemirim
- Serras do Espinhaço Meridional
- Patamar de Colinas Aplanadas do Mucuri e Adjacências
- Serra do Caparaó

Crátons Neoproterozóicos

- Depressão do Alto Rio São Francisco
- Depressões Interiores do Espinhaço
- Patamares de Belo Horizonte
- Serras do Quadrilátero Ferrífero

Outros

- Corpo d'água continental

Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

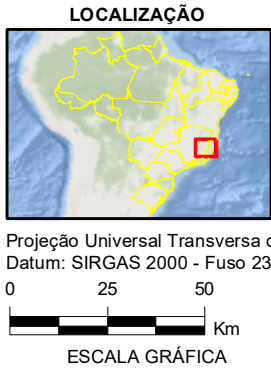
LEGENDA

- Bacia do Rio Doce
- Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos
- Divisa Estadual

Principais Rios da Bacia Hidrográfica

- Demais Rios
- Rio Doce

- Referência:
- Geomorfologia 1:250.000 - IBGE 2021
<<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geomorfologia>>.
Acessado em fev/2023



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
MAPA GEOMORFOLÓGICO DA REGIÃO DE ESTUDO



Nº PROJETO:	22535632	ESCALA:	1:1.943.990
GIS	gld_lprioli	abr/2023	Figura 12
REV	MRamin	00	

As Planícies e Terraços Fluviais do rio Doce são encontrados nos Trechos 13, 14, 15 e 16. Esta unidade possui importantes afluentes, como os rios Piracicaba, Suaçuí Grande, Santo Antônio, Itambacuri e Caratinga. Os terraços são geralmente arenosos e seixos arredondados. Entre Ipatinga e Governador Valadares, são utilizados para uso rural. Próximo à confluência com o rio Piracicaba, há depressões lacustres e lagos em processo de colmatagem. Esta unidade está associada à neotectônica, com o relevo formado pela evolução de meandros.

O Planalto da Zona Metalúrgica Mineira está localizado entre os municípios de Sem-Peixe e Dionísio, MG, com cotas altimétricas em torno de 1.000 m, formado por rochas pré-cambrianas. Sua gênese está ligada à dissecação e pediplanação durante o final do Cretáceo, seguida por um processo de epirogênese que resultou na inversão de parte do relevo, a subsidência de compartimentos e reativação de falhas antigas.

A Serrania da Zona da Mata Mineira é uma unidade geomorfológica situada entre os municípios de Raul Soares e Bom Jesus do Galho, com arcabouço geológico de tonalitos, granitos e charnockitos e com relevo NNE-SSO, dividido em três compartimentos de altimetrias médias de 600, 800 e 1300 m. Suas drenagens são, no geral, de padrão dendrítico, com forte controle estrutural. É resultado de uma reativação tectônica rúptil que provocou a denudação, destacando as diversas formas de relevo.

A Depressão Interplanáltica do Médio Rio Doce é uma unidade geomorfológica, que se estende desde Dionísio – MG até Baixo Guandu – ES, ao longo do rio Doce. O arcabouço geológico é formado por várias rochas e estruturalmente caracterizada por dobras, falhas e fraturas. O relevo é formado por morros baixos e colinas, além de pontões, cristas simétricas e linhas de cumeadas. Os afluentes do rio Doce apresentam padrão de drenagem principal dendrítico e alguns canais meândricos e retilíneos. A unidade apresenta níveis de terraços fluviais, depressões lacustres, solos profundos e material coluvial, formado por sedimentos e por linhas de pedras.

O Bloco Montanhoso dos Pontões Capixaba e Mineiro é uma região geomorfológica do Planalto Leste de Minas que abrange os municípios de Galiléia, Conselheiro Pena, Resplendor e Aimorés. Esta unidade possui forma irregular, com altitudes que variam de 500 a 1.000 m, e é caracterizada por rochas do Complexo Paraíba do Sul, Formações Tumiritinga e São Tomé, além de corpos intrusivos plutônicos. O relevo montanhoso desta região é influenciado por processos

erosivos e gera padrões de drenagem dendrítico, radial e retilíneo. O intemperismo resultante dá origem a depósitos de colúvio e aluviais.

A região da foz do rio Doce é classificada como planície litorânea, com restingas e planícies baixas. Seguindo sentido às partes mais altas da bacia, são encontrados os tabuleiros costeiros, seguidos de serras litorâneas e pontões. Na região centro sul está localizada a zona de maciços elevados dos rios Caratinga e Manhuaçu. A região de drenagem do curso principal, compondo suas planícies de inundação é classificada como planalto deprimido central. Já a região norte é classificada como zona ondulada norte, sendo o divisor topográfico oeste da bacia composto pela zona da Mantiqueira e Espinhaço. Próximo a Linhares, surgem relevos baixos com altitudes até 30 m, formados pela erosão. Esses tabuleiros correspondem a um nível marinho, delimitando a faixa das barreiras litorâneas. Nesse cenário são encontradas lagoas tanto nas zonas costeiras quanto nas regiões elevadas do cristalino, dividindo-se em garupas alongadas e vales de fundo chato, onde lagoas costumam se formar.

4.6.2 Contexto Geomorfológico Fluvial do Rio Doce

A geomorfologia fluvial do caminho percorrido pelo rejeito da barragem de Fundão até a sua foz é descrita por Saadi et al. (2015). Esses autores dividem a área afetada em 5 setores de acordo com as características morfodinâmicas do canal principal, conforme apresentado abaixo.

O setor 01 está localizado entre as cabeceiras do rio Gualaxo do Norte e a UHE Candonga (Risoleta Neves). Apresenta um comprimento de 191 km, declividade média de 0,30% e largura máxima de 50 metros. Possui um vale fluvial estreito, com corrente de elevada energia e poucas várzeas ou terraços aluviais. O rompimento da barragem de Fundão alterou essa dinâmica, acumulando grandes quantidades de sedimentos nas margens. Segundo Saadi et al. (2015) as condições da morfodinâmica fluvial mudam substancialmente logo a jusante da confluência dos rios Carmo e Piranga, quando se inicia o rio Doce cujo fundo de vale fica mais alargado. Esse setor compreende a área entre os Trechos 01 e 12 do Programa de Manejo de Rejeitos.

O setor 2 está localizado entre a UHE Candonga (Risoleta Neves) e a confluência do rio Santo Antônio com o rio Doce (município de Naque), tem aproximadamente 147 km de comprimento, uma declividade média de 0,06% e uma largura do canal principal variando de 70 a 300 metros. De acordo com Saadi et al. (2015), há uma redução significativa da declividade média

depois da UHE Risoleta Neves, indicando uma redução correspondente nas condições energéticas da corrente fluvial. Estes autores também destacam que o canal fluvial assume a forma de meandros livres em duas partes do trajeto, com curvas e cortes profundos, meio a um vale plano com planícies marginais amplas. Na região de Ipatinga, Vasconcelos (2002) e Vasconcelos e Saadi (2003) mostraram a existência de uma fossa neotectônica (com profundidade mínima de 80 metros) na área de confluência entre os rios Doce e Piracicaba, o que explica a gênese da região dos lagos do PERD (Parque Estadual do Rio Doce). Foram observados também barramentos naturais criados por cachoeiras e corredeiras, que indicam a presença de falhas que segmentam a grande depressão neotectônica: Cachoeira dos Óculos, na fronteira meridional do PERD, dois conjuntos de corredeiras da Ponte Queimada (PERD, município de Marliéria), Corredeiras de Sant'Ana (PERD, próximo de Belém, distrito de Bom Jesus do Galho) e Cachoeira Escura entre a usina da CENIBRA e a vila de Perpétuo Socorro. Esse setor encontra-se compreendido no Trecho 13 do Programa de Manejo de Rejeitos.

O setor 3 do rio Doce, situado entre a confluência do rio Santo Antônio e a periferia meridional da cidade de Governador Valadares, tem cerca de 60 km de comprimento com traçados retilíneos e sinuosos, uma declividade média de 0,08% e larguras variando entre 300 e 1500 metros. Esta parte do trecho apresenta extensas ilhas sustentadas por afloramentos do embasamento rochoso coberto por sedimentos aluviais, assim como afloramentos do embasamento rochoso, o que diminui a profundidade média e contribui para a retenção de sedimentos, já aumentados pela afluência do rio Santo Antônio. Esse setor encontra-se compreendido no final do Trecho 13 e início do Trecho 14 do Programa de Manejo de Rejeitos.

O setor 4 é um canal com 147 km de comprimento entre Governador Valadares e Baixo Guandu. Possui largura máxima de 1.000 metros e, às vezes, em partes mais estreitas até 150 metros. As margens são irregulares e a declividade média é de 0,07%. O canal tem alta frequência de extensos afloramentos rochosos e numerosas ilhas rochosas, que não são relacionadas às lâminas de água, mas às suas estreitas bases. O fluxo turbulento, durante as cheias, contribui para a transferência de sedimentos para jusante, modelando o trecho do rio Doce antes da conexão com o oceano. Este setor compreende o Trecho 14 do Programa de Manejo de Rejeitos.

O setor 5, entre Baixo Guandu e a desembocadura do rio Doce, tem 153 km de comprimento praticamente retilíneo. Apresenta margens bem delineadas, uma declividade média de 0,04% e

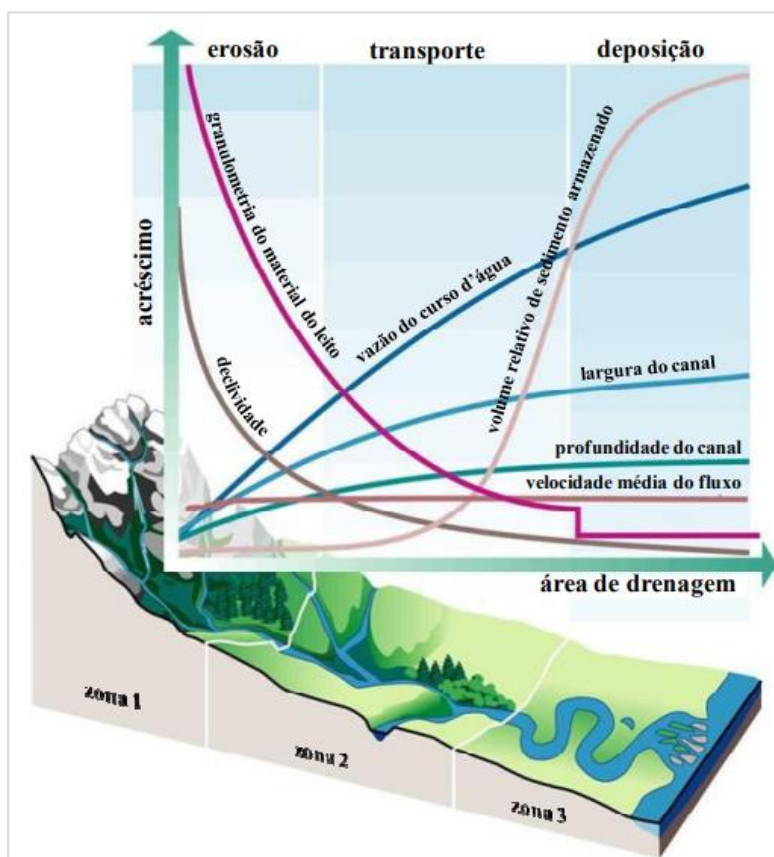
largura variável. Ao chegar às proximidades de Linhares, surge uma abertura no vale com largas margens suspensas. Logo a jusante, há um grande leque de planícies fluviais e marinhas com depressões, paleocanais e cordões. O rio Doce encurva para o sul na busca de uma saída para o oceano, pois encontra um barramento constituído por uma barra litorânea que se estende entre as vilas de Povoação e Regência. Segundo Soares e Landim (1977) e Dominguez et al. (1981), no ambiente deltaico, a forte carga sedimentar do rio e a fraquíssima declividade de seu canal não lhe permitem abrir uma passagem direta. Esse setor compreende a área entre os Trechos 15 e 16 do Programa de Manejo de Rejeitos.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Caracterização Geomorfológica

Ao longo do perfil longitudinal de um rio, à medida que seus rios tributários são encontrados, ocorre o aumento da área de drenagem de sua bacia e o aumento de sua vazão. Ao mesmo tempo, ocorrem mudanças na declividade, no transporte de sedimentos, tipo de material do leito, entre outras mudanças na geometria hidráulica do rio. Isso tudo constitui um sistema fluvial e Leopold et al. (1992) e Schumm (1977) fornecem um esquema idealizado de um sistema fluvial típico em que divide esse sistema em três diferentes zonas (**Figura 13**). A zona 1 representa a porção superior do sistema que é a cabeceira da bacia hidrográfica, e por isso é onde ocorre grande erosão e formação de sedimentos. A zona 2 representa a porção média do sistema fluvial que funciona como uma zona de transporte de sedimentos. A zona 3 representa a porção inferior do sistema onde ocorrem as formações de meandros, deltas e lagos. Essa zona do sistema funciona como a área de deposição.

Figura 13 – Modelo de sistema fluvial típico descrito por Schumm (1977). Fonte: FISRWG (1999)



Segundo Hoffmann et al. (2016) os sistemas fluviais possuem a capacidade de adaptação conforme os ambientes onde estão inseridos, o que resulta em ajustes nos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos de acordo com os pulsos de energia existentes no ambiente em determinado período do tempo geológico. Sendo assim, os processos de fluxo e transporte de sedimentos num determinado sistema fluvial são respostas ao estado de equilíbrio deste sistema (Christofolletti, 1977). Para Suguio e Bigarella (1979), este estado de equilíbrio depende de vários fatores, como o volume e carga da corrente, o tamanho e o peso da carga, declividade, mudanças no padrão de uso e ocupação da terra, dentre outros. Nesse sentido obter informações acerca dos principais fatores que influenciam no transporte de sedimentos em um sistema fluvial são necessários. Na geomorfologia fluvial são adotadas metodologias para classificação de canais fluviais como forma de reduzir as complexas unidades de estudos em unidades discretas que facilitem a compreensão (Fernandez, 2016).

Em Rosgen (1994) é apresentada uma síntese do histórico dos distintos sistemas utilizados para estudar sistemas fluviais. Davis (1899) adotou um sistema que separou o canal fluvial em três classes (juventude, maturidade e velhice), de acordo com o estágio relativo de ajuste. Sistemas adicionais de classificação de rios com base em delineamentos descritivos foram posteriormente desenvolvidos por Melton (1936) e Matthes (1956). Padrões retos, sinuosos e trançados foram descritos por Leopold e Wolman (1957). Para cobrir uma gama mais ampla de morfologias de fluxo, um esquema de classificação descritivo foi desenvolvido e aplicado nos rios canadenses por Kellerhals et al. (1972, 1976), Galay et al. (1973) e Mollard (1973).

Rosgen (1994) apresenta uma metodologia voltada para classificação de rios naturais, constituindo um marco na adoção e popularização de classificações geomorfológicas de rios, sendo uma proposta de ampla aceitação na comunidade científica internacional e nacional (Costa e Junior, 2015; Fernandez, 2016; Cota, 2019). É constituída por quatro níveis de detalhamento: I) caracterização morfológica básica; II) Descrição morfológica; III) Condição geral do córrego e IV) Verificação. Este sistema apresenta dois níveis de classificação principais que envolvem a caracterização geomorfológica (padrão, forma e dimensão do canal) e a descrição geomorfológica (grau de incisão, razão largura-profundidade, sinuosidade, materiais e declividade), resultando em uma quantidade finita e definida de tipos de rios, nomeados através de uma codificação de letras e números. Neste trabalho, dar-se-á ênfase aos dois primeiros níveis da classificação. Segundo

Fernandez (2016), para a utilização de uma classificação de geomorfológica fluvial, faz-se necessário que as variáveis estejam corretamente mensuradas e adequadamente enquadradas na metodologia escolhida. A classificação de Rosgen, embora amplamente difundida em estudos da América do Norte de Nova Zelândia, mostra-se sendo coerente para os objetivos determinados e dados coletados no presente estudo.

Segundo Rosgen (1994), a morfologia do canal atual é regida pelas leis da física através de recursos observáveis do canal de fluxo e processos fluviais relacionados. A morfologia do padrão é diretamente influenciada por oito variáveis principais, incluindo largura do canal, profundidade, velocidade, descarga, inclinação do canal, rugosidade dos materiais do canal, carga de sedimentos e tamanho do sedimento (Leopold et al., 1964 *apud* Rosgen, 1994). Uma mudança significativa em qualquer uma dessas variáveis pode configurar uma série de ajustes de canal que levam a uma mudança nos demais, resultando em alteração do padrão do canal. No caso do rompimento da barragem de Fundão, a principal alteração resultante desse evento poderia estar relacionada ao aumento de feições deposicionais (barras arenosas e ilhas Fluviais) que pudessem vir a alterar o padrão fluvial, passando de unicanal para multicanal, sendo essa avaliação realizada nos capítulos 6 e 7.

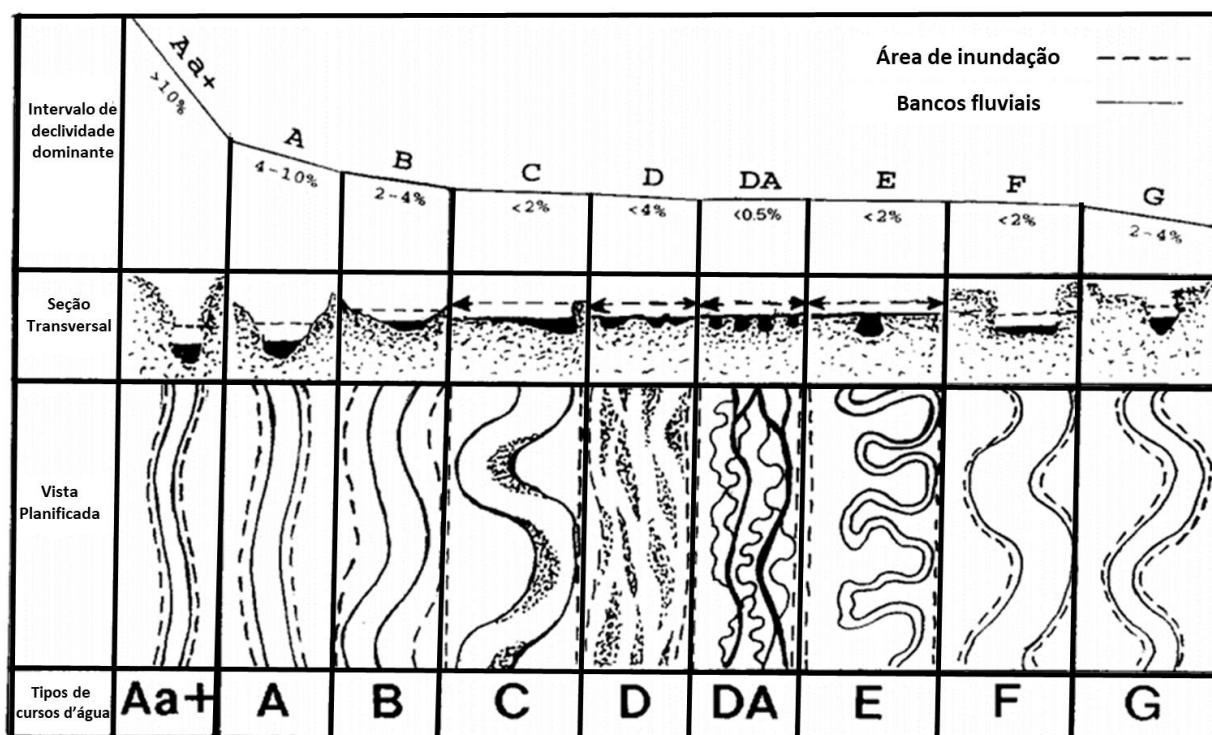
5.1.1 Nível de detalhe I da classificação de Rosgen (1994) – Ampla caracterização morfológica

O objetivo da delimitação neste nível é fornecer uma ampla caracterização que integra o relevo e as feições fluviais da morfologia do vale com o relevo do canal, padrão, forma e dimensão. A presença, descrição e dimensões de várzeas, terraços, leques, deltas e planícies são alguns exemplos de feições de vale identificadas. Para essa caracterização são utilizadas ferramentas de sensoriamento remoto, permitindo descrever feições fluviais generalizadas, evolução do relevo, morfologia do vale, história deposicional e declives de rios associados.

O perfil longitudinal apresentado na **Figura 14** pode ser obtido a partir de mapas topográficos e permite seccionar o curso d'água em categorias de inclinação que refletem o perfil morfológico. Os tipos de fluxo de Aa+ são muito íngremes, (declividade maior de 10%), com características de leito de queda vertical/escavação frequentemente espaçadas. Eles tendem a ser córregos de alto transporte de detritos, cachoeiras, etc. Córregos do tipo A são íngremes (4-10%

declive), com recursos íngremes, em cascata, degrau e formação de poços. Os fluxos do tipo B são dominados por corredeiras e poças de erosão pouco espaçadas em curvas ou áreas de constricção. Os tipos de fluxo C, DA, E e F são do tipo cascata/poça e de gradiente suave. Os fluxos do tipo G são "ravinas" que normalmente são canais de passagem. O de tipo D fluxos são canais trançados de processo de convergência/divergência que levam a formas de leitos deposicionais localizadas e frequentemente espaçadas.

Figura 14 – Vistas longitudinais, transversais e planas dos principais tipos de fluxo descritos por Rosgen (1994)



Fonte: (Rosgen, 1994)

As características do leito estão consistentemente relacionadas à inclinação do canal. Grant e colaboradores (1990) descreveram as características do leito de poços, corredeiras, cascatas e degraus como uma função de inclinação do leito. Rosgen (1994) usando as descrições de forma de leito, constatou que as faixas de inclinação correspondentes relatadas por Grant et al. (1990) apresentava relação com os padrões fluviais descritos por ele. Para rios com declividades abaixo de 2% estava relacionada aos tipos de corredeiras/poças (C, E e F), corredeiras (B e G) de 2 a 4%. Cascatas em declives no tipo A, apresentavam declividade de 4-10%, e riachos em degraus com declives de 4 a 40%, correspondem aos córregos tipos A e Aa +.

A forma da seção transversal indicaria um fluxo estreito e profundo como oposto a um amplo e raso. A maneira em qual o canal é inciso em seu vale também pode ser deduzido a este nível, bem como informações sobre várzeas, terraços, encostas coluviais, controle estrutural feições, confinamento (contenção lateral), entrincheiramento (contenção vertical), e dimensão vale vs. canal. Por exemplo, os córregos do tipo A são estreitos, profundos, confinados e entrincheirado. A largura do canal e do vale são semelhantes. Isso contrasta com os córregos do tipo C, onde o canal é mais largo e raso, com uma planície de inundação bem desenvolvida e um vale muito amplo. Os córregos do tipo E têm um canal estreito e canal profundo (baixa relação largura/profundidade), mas tem uma planície de inundação muito larga e bem desenvolvida. Os riachos do tipo F têm canais largos e rasos, mas são entrincheirados, com canais do tipo sinuoso, com pouca ou nenhuma planície de inundação desenvolvida. Canais tipo G têm baixa relação largura/profundidade, semelhantes aos fluxos do tipo E, exceto que são bem entrincheirados (sem planície de inundação), mais íngremes e menos sinuosos do que os córregos do tipo E. Na **Tabela 6** são apresentadas características consideradas por Rosgen (1994).

Tabela 6 – Padrões fluviais descritos por Rosgen (1994)

PADRÃO FLUVIAL	TIPO DE CANAL	E*	L/P*	S*	D* (M/M)	DESCRIÇÃO	RELEVO/SOLOS/CARACTERÍSTICAS
Multicanal	D	Na	> 40	Na	< 0,04	Canal entrelaçado com barras longitudinais transversais. Canal largo com margens instáveis.	Amplos vales com leques fluviais e aluviais. Detritos glaciais e características deposicionais. Ajuste lateral ativo com abundância de abastecimento de sedimentos.
	DA	> 4,0	< 40	Variável	<0,005	Canal anastomosado, com canais estreitos e profundos, com vegetação ripária bem desenvolvida. Relevo suave e canais com forte sinuosidade. Margens estáveis.	Amplos vales de baixo gradiente com solos aluvionares finos e/ou lacustres. Controle geológico anastomosado criando deposição de barras arenosas bem vegetadas que são lateralmente estáveis com amplas áreas úmidas e planícies de inundação.
Unicanal	Aa+	< 1,4	< 12	1,0-1,1	> 0,10	Canal com forte gradiente e entalhado, disponibilidade de sedimentos grossos para transporte.	Relevo muito alto. Erosivo. Características deposicionais do leito rochoso; potencial de fluxo de detritos. Córregos profundamente entrincheirados. Degraus verticais com piscinas profundas, cachoeiras
	A	< 1,4	< 12	1,0-1,2	0,04 a 0,10	Canal entalhado com forte declividade e sequência de cascatas e degrau-depressão. Ambiente de alta energia. Estável quando o leito é formado por rocha ou capeado por sedimentos rudáceos.	Relevo alto. Erosivo ou deposicional e formação de leito rochoso; Curso d'água entrincheirado ou confinado. Frequentemente espaçado, "deep pool" em associação com "step pool" na morfologia do leito.
	G	< 1,4	< 12	> 1,2	0,02 a 0,039	Canal entalhado com voçoramento, sequência de degrau-depressão, baixa relação largura/profundidade e gradiente moderado.	Ravia, corredeira em degrau com declividade moderada e baixa proporção de largura/declividade. Vales estreitos ou profundamente incrustados em material aluvionar ou coluvial. Leques ou deltas. Instável, com alto índice de erosão.
	F	< 1,4	> 12	> 1,4	< 0,02	Canal meândrico com sequência soleira-depressão e com forte entalhamento, baixo gradiente e alta relação largura/profundidade.	Entrincheirado com dominação de material desgastado. Gradiente sutil com baixa proporção largura/profundidade. Meândrico, lateralmente instável com alto índice de erosão de bancos. Morfologia de corredeira.
	B	1,4-2,2	> 12	> 1,2	0,02 a 0,039	Canal moderadamente entalhado, declive moderado, predomínio de soleiras. Margens estáveis.	Relevo moderado, deposição coluvial e /ou solo residual. Entrincheiramento moderado e proporção de Largura/Declividade. Estreito, vales ligeiramente inclinados. Predominância de corredeiras com piscinas fluviais ocasionais.
	E	> 2,2	< 12	> 1,5	< 0,02	Canal com baixo gradiente, padrão meândrico, com sequência de soleira e depressão, baixa relação largura/profundidade e baixa taxa de deposição.	Amplos vales/prados. Materiais aluviais com planície de inundação. Alta sinuosidade com bancos estáveis e bem vegetados. Morfologia de corredeira com baixa proporção entre largura/declividade.
	C	> 2,2	> 12	> 1,2	< 0,02	Baixo gradiente, canal meândrico, barras de pontal, sequência de soleiras e depressões, planície aluvial bem resolvida.	Amplos vales com terraços, em associação com planícies de inundação e solos aluviais. Ligeiramente entrincheirado com canal meândrico bem definido. Morfologia do leito apresenta piscinas e corredeiras

*Principais características dos tipos de canais classificados no nível I. E=grau de entrincheiramento do canal; L/P=relação largura/profundidade; S=índice de sinuosidade e D=declividade da lâmina d'água. NA= não aplicado

5.1.2 Nível de detalhe II da classificação de Rosgen (1994) – Descrição morfológica

Esse nível delinea tipos de fluxo homogêneos que descrevem inclinações específicas, materiais de canal, dimensões e padrões de medições de alcance de referência. Fornece um nível mais detalhado de interpretação e extrapolação do que o nível I. Descreve padrões de canal, relação de entrincheiramento, relação largura/profundidade, sinuosidade, material do canal e inclinação. Os tipos de fluxo são então quebrados em faixas de inclinação discretas e tamanhos de partícula de material de canal dominante, conforme apresentado na **Figura 15**.

Figura 15 – Guia ilustrativo mostrando configuração transversal, composição e critérios de delineamento dos principais tipos de fluxo. Fonte: Adaptado de Rosgen (1994),

Material dominante no leito	A	B	C	D	DA	E	F	G
1 Rocha								
2 Pedregulho								
3 Paralelepípedo								
4 Cascalho								
5 Areia								
6 Lodo/Argila								
<i>Entincheiramento</i>	< 1,4	1,4 – 2,2	> 2,2	N/A	> 2,2	> 2,2	< 1,4	< 1,4
<i>Sinuosidade</i>	< 1,2	> 1,2	> 1,4	< 1,1	1,1 – 1,6	> 1,5	> 1,4	> 1,2
<i>L/D</i>	< 12	> 12	> 12	> 40	< 40	< 12	> 12	< 12
<i>Declividade</i>	0,04 - 0,09	0,02 – 0,039	< 0,2	< 0,2	< 0,005	< 0,02	< 0,02	0,02 – 0,039

6 METODOLOGIA

A metodologia para este trabalho incluiu:

- Avaliação de dados e informações disponíveis de outros estudos visando identificar informações que pudessem ser utilizadas para o entendimento das características e dinâmica geomorfológica do rio Doce na área de estudo.
- Caracterização geomorfológica do rio Doce na área de estudo, com objetivo de identificar condições que podem influenciar na dinâmica geomorfológica desse rio.
- Mapeamento de feições geomorfológicas do rio Doce na área de estudo ao longo do período de 2013 a 2022, com objetivo de avaliar a dinâmica geomorfológica dessa área, bem como avaliar se há evidências de efeitos do rompimento da barragem de Fundão nessa dinâmica.
- Visita de campo em pontos selecionados, com objetivo de verificar em campo as feições geomorfológicas do rio Doce.

Considerou-se como premissa que eventuais efeitos do rompimento da barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica da área de estudo poderiam estar relacionados a assoreamentos devido à deposição de rejeitos, resultando em aumentos de áreas de bancos submersos, bancos emersos e/ou ilhas. Conforme apresentado no **Apêndice 01**, o potencial erosivo da onda de rejeitos resultante do rompimento da barragem de Fundão, já considerando as elevadas concentrações de sólidos em suspensão na água do rio Doce verificadas nesse período, corresponderia a vazões com tempos de recorrência entre 2 e 3 anos na estação Cachoeira dos Óculos e inferiores a 1 ano nas demais estações a jusante. Dessa forma, considerou-se como premissa que o rompimento da barragem de Fundão não gerou efeitos relevantes de erosão nos trechos a jusante da barragem de Candonga, que consistem na área de estudo deste trabalho.

Adicionalmente, conforme apresentado no **Apêndice 02**, considera-se que os efeitos de deposição associados ao rompimento estariam predominantemente associados a rejeitos, com uma contribuição limitada a desprezível da deposição de sedimentos erodidos (erosão ocorrida a montante de Candonga) quando do rompimento. Essa hipótese é baseada no fato que a quantidade

de material erodido teria sido muito menor que a quantidade de rejeito transportado com o rompimento e que os sedimentos fluviais erodidos provavelmente teriam uma mobilidade limitada, com grande parte possivelmente tendo sido depositada no reservatório da barragem da UHE Risoleta Neves e/ou nos trechos a montante.

Para a avaliação da dinâmica geomorfológica da área de estudo, bem como para avaliar eventuais evidências de efeitos do rompimento da barragem de Fundão nessa dinâmica, foi feito um mapeamento das feições correspondentes a bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos ao longo do rio Doce utilizando imagens de sensoriamento remoto de períodos secos disponíveis de 2013 a 2022. A avaliação consistiu em verificar alterações das áreas dessas feições ao longo do tempo considerando as diferentes condições hidrológicas existentes no período avaliado.

Vale ressaltar que a avaliação de alterações geomorfológicas em praias, no entorno da foz do rio Doce, região deltaica, lagoas marginais, tributários, planícies de inundação do rio Doce e qualquer área além da calha regular do rio Doce não foram incluídas neste estudo.

6.1 Metodologia para Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento)

A **Tabela 7** apresenta as bases de dados utilizadas neste estudo. Foram consultadas as bases de dados primários de estudos que levantaram informações acerca das características granulométricas dos sedimentos de fundo do Rio Doce, notadamente os Planos de Manejo de Rejeitos (PMRs) dos Trechos 13 a 16 (GOLDER, 2021; 2022ab).

Tabela 7 – Principais bases de dados utilizadas no trabalho

BASE DE DADOS	DESCRIÇÃO	RESOLUÇÃO ESPACIAL	PERÍODO	ÁREA DE COBERTURA
Base de dados da Fundação Renova	Arquivos vetoriais contendo a informações a respeito da área de estudo. Localização dos trechos utilizados para o manejo de rejeitos pela Fundação Renova	-	-	Trecho entre a Barragem de Fundão e a Foz do Rio Doce
Base de dados dos Planos de Manejo de Rejeito (PMR) dos trechos 13, 14, 15 e 16	Arquivos vetoriais e resultados analíticos de sondagens realizadas nos PMR's	-	2019-2021	Trechos 13, 14, 15 e 16
Arquivos vetoriais e matriciais produzidos por	Arquivos vetoriais e matriciais produzidos por	-	-	Da barragem de Fundão até a Foz do Rio Doce

BASE DE DADOS	DESCRIÇÃO	RESOLUÇÃO ESPACIAL	PERÍODO	ÁREA DE COBERTURA
Instituições Públicas e Privadas	instituições de pesquisa e disponibilizados em plataformas livres. Ex: Limites estaduais e municipais, Mapeamentos Geomorfológicos.			
Seções Transversais dos postos fluviométricos da ANA (e.g., Hidroweb da ANA)	Base de dados de acesso público, disponibilizada em formato de tabela. Total de 10 seções disponíveis para a região de trabalho	-	-	10 Estações ao longo do Rio Doce
Estações fluviométricas virtuais (Projeto THEIA)	Base de dados de acesso público (Webgis), utilizada como ferramenta auxiliar para obtenção da cota do rio Doce.	-	2016-2022	12 estações entre o município de São José do Goiabal e Linhares (Foz do Rio Doce)
Seções Topobatimétricas	ANA		2021	180 seções topobatimétricas
Seções Topobatimétricas	HidroBR		2021	40 seções topobatimétricas
Levantamento topográfico LiDAR (2019)	Arquivos Dados topográficos no formato Geotiff referente ao perfilamento a laser LIDAR, com a PEC Classe A	1,00 m	2019	300 metros ao longo do eixo fluvial no município de Mariana até Linhares (Foz do Rio Doce)
Ortofoto de imagens aéreas	Ortofoto aérea tomada com câmara de varredura VISIONMAP A3 Edge, com a PEC Classe A.	0,05 m	Novembro de 2015 (Pós rompimento)	Da barragem de Fundão até a Foz do Rio Doce
Imagens orbitais disponibilizadas pela Fundação Renova	Imagens orbitais obtidas por sensores com resolução variada, nas bandas R,G,B e infravermelho próximo	Geoeye - 0,50 m WorldView - 1,80 m Pleiades - 0,50 m Komsat - 1,00 m Spot - 1,5 m	2015-2019	Da barragem de Fundão até a Foz do Rio Doce
Imagens orbitais adquiridas para esse estudo	Imagens orbitais de alta resolução nas bandas R,G,B, IR (Adquiridas no período seco do ano)	0,5 m – 1,5 m	2013-2022	Buffer de 3km de cada margem dos rios principais. Trecho entre a UHE Risoleta Neves e a Foz do Rio Doce
Imagens orbitais a serem adquiridas para esse estudo	Imagens orbitais de média resolução nas bandas R,G,B, IR (Adquiridas no período seco do ano)	5 m – 15 m	2010-2013	Buffer de 3km de cada margem dos rios principais. Trecho entre a UHE Risoleta Neves e a Foz do Rio Doce

(-) não aplicável

6.2 Metodologia para Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta Neves

Para avaliação dos distintos ambientes fluviais, buscou-se na literatura trabalhos sobre a descrição da geomorfologia fluvial para embasar as primeiras análises. Após essa avaliação, aplicou-se os conceitos de Rosgen (1994) para agrupar segmentos do rio Doce com características semelhantes, sendo observadas características fluviais como declividade, entrincheiramento do canal, sinuosidade e material de fundo.

Para caracterizar os distintos ambientes fluviais do Rio Doce, optou-se pela utilização da classificação de Rosgen (1994), por constituir uma proposta de ampla aceitação na comunidade científica internacional, na caracterização morfológica e sedimentológica dos cursos fluviais. Essa metodologia é apresentada com maior detalhamento na Seção 5.

Após a obtenção e ajustes dos segmentos foi aplicado o nível II da classificação de Rosgen (1994) para caracterização. Esse nível delineia tipos de fluxo homogêneo que descrevem inclinações específicas, materiais de canal, dimensões e padrões de medições de alcance de referência.

As variáveis geomorfológicas utilizadas para essa classificação foram obtidas em ambiente GIS, contando com o uso do Modelo Digital de Elevação obtido pela tecnologia LiDAR no ano de 2019 pela Fundação Renova. As principais características ao longo dos cursos d'água foram observadas com uma escala de visualização de 1:10.000. Características-chave descritas por Rosgen (1994) foram observadas ao longo do rio principal para identificar e delinear as diferentes tipologias de segmentos geomorfológicos.

Nessa etapa do trabalho não foi realizada a identificação de mudanças em relação a cenários pré e pós-rompimento da barragem de Fundão, pois considerou-se que a vazão do rio Doce durante a passagem da lama não foi alterada de forma significativa após a UHE Risoleta Neves, não acarretando alterações geomórficas significantes na calha do rio Doce. De acordo com o levantamento realizado por CPRM (2016), as estações fluviométricas a jusante de Candonga não apresentaram uma mudança significativa na relação entre nível e descarga, cuja vazão máxima da onda de rejeitos e detritos foi estimada como não superior a um evento com tempo de recorrência

de 1 ou 2 anos (Golder, 2021). Ou seja, vazões similares àquela resultante do rompimento da barragem de Fundão teriam entre 50% e 100% de probabilidade de ocorrerem em um ano qualquer nessas estações fluviométricas. O CPRM (2016) concluiu que, ao se avaliar os perfis transversais pré e pós rompimento, as estações fluviométricas na calha do rio Doce não apresentaram mudanças significativas nos perfis transversais. Nesse sentido, neste presente relatório a avaliação de possíveis alterações na geomorfologia fluvial teve como foco a avaliação da dinâmica de feições geomorfológicas agradacionais (barras fluviais), formadas pelo acúmulo de sedimentos transportados pelo rio Doce. A metodologia e os resultados oriundos dessa avaliação são apresentados nas Seções 6 e 7.

6.2.1 Delimitação dos segmentos

Um segmento é uma porção de um sistema de fluxo que flui através de um único tipo de leito e delimitado por junções tributárias ou grandes cachoeiras. Além disso o segmento parece relativamente uniforme na inclinação em um perfil longitudinal derivado do mapa. Para a análise integrada considerou-se como material de referência a caracterização realizada por Saadi et al. (2015). A partir dessa caracterização inicial delimitou-se os segmentos seguindo os conceitos de Rosgen (1994).

Em ambiente GIS, o leito fluvial foi segmentado utilizando como referência inicial a UHE Risoleta Neves, e o ponto final, a foz do Rio Doce, consistindo em uma extensão de 558,50 km do Rio Doce. Essa extensão foi seccionada em segmentos de padrão fluvial homogêneo. Foram realizados alguns ajustes no tamanho de segmentos que se localizam em áreas de influência de UHEs e próximos a área de alteração de fuso UTM.

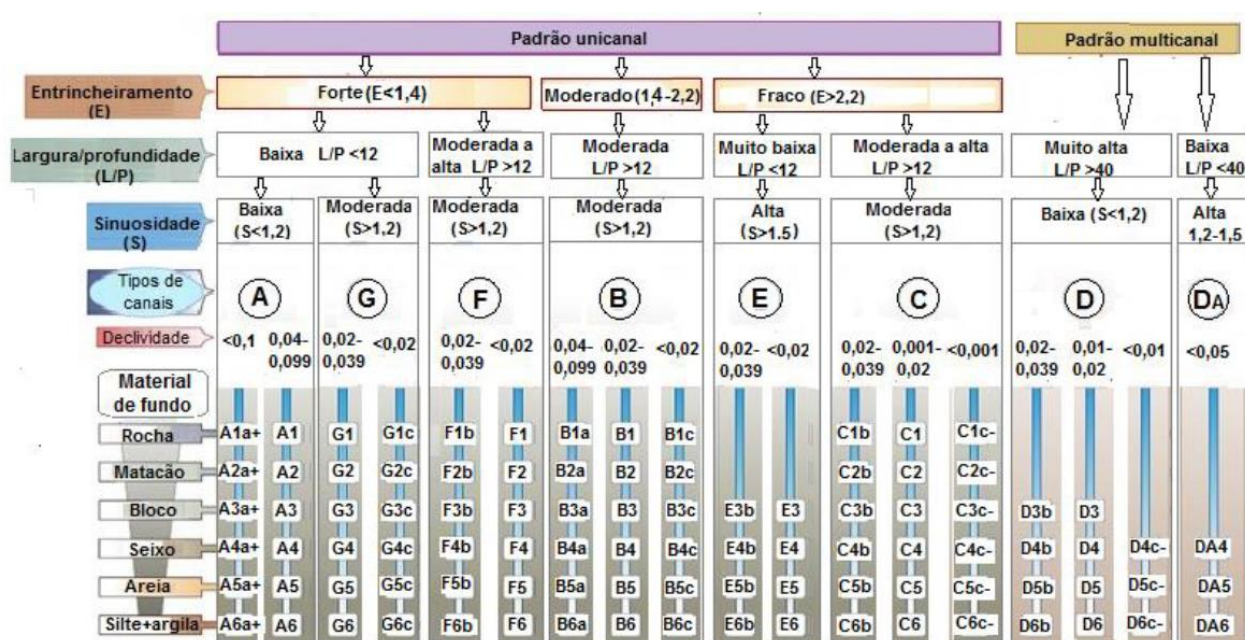
6.2.2 Padrão fluvial e Classificação de Rosgen (1994)

O padrão fluvial é o primeiro elemento classificatório aplicado nas tabelas de Rosgen. Assim, são definidos os tipos de canais com padrão unicanal (Aa+, A, B, C, E, F e G) e com padrão multicanal (Grupos D e DA). O padrão do rio é classificado como relativamente reto (tipos de córrego A), baixa sinuosidade (tipos de fluxo B), sinuosidade (tipos de fluxo C) e sinuosidade tortuosa (tipos de fluxo E). Padrões de fluxo complexos são encontrados no canal múltiplo, trançado (D) e tipos de fluxo anastomosado (DA). Nesse estudo o padrão fluvial foi obtido em ambiente GIS, utilizando-se a calha do rio Doce definida por Rhama (2020) e imagens de satélite. Na

Tabela 6, apresentada na seção 5.1.1 são apresentadas as principais características consideradas por Rosgen (1994) para essa definição.

Para a classificação dos trechos fluviais estudados no nível II de Rosgen (1994), foram utilizados os seguintes parâmetros calculados nas etapas anteriores: padrão fluvial, grau de entrincheiramento do canal, relação largura/profundidade, índice de sinuosidade, declividade da lâmina d'água e tipo de material de fundo. As distintas combinações podem totalizar até 94 subtipos de canais, conforme apresentado na **Figura 16**.

Figura 16 – Tipos de canais definidos pela classificação de Rosgen. Fonte: Fernandez (2016)



6.2.3 Área de drenagem

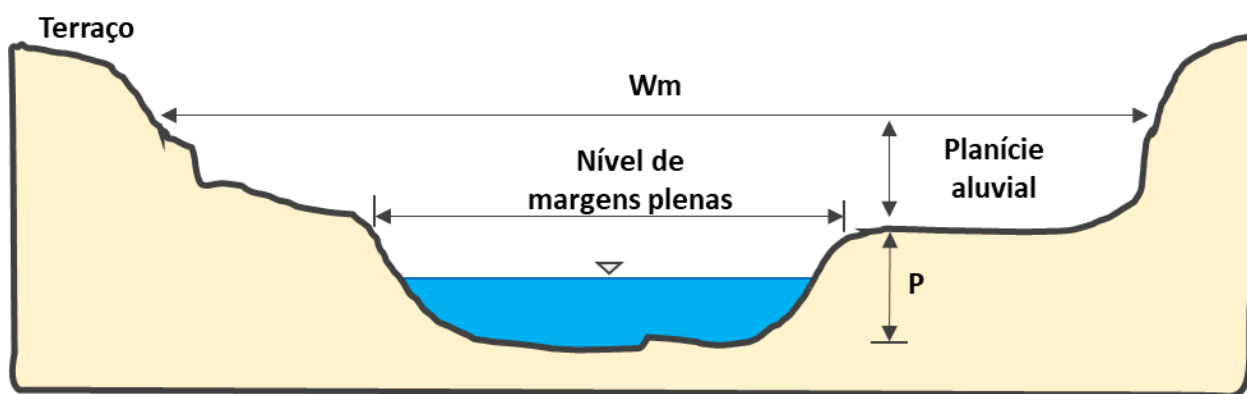
Realizada em ambiente GIS, foi obtida a partir da determinação visual das otobacias a montante do início dos segmentos. Para isso utilizou-se a base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) do Rio Doce, produzido pela ANA (2017). Esse produto é derivado do mapeamento sistemático terrestre na escala 1:50.000/1:100.000. As áreas de contribuição hidrográfica foram obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação hidrologicamente consistente, derivado dos dados do projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

6.2.4 Nível de margens plenas

Segundo Fernandez (2003), para definir o nível de margens plenas de uma seção transversal é necessária a identificação da planície de inundação ativa. Na maioria dos casos, esta superfície é de difícil detecção. Desde os trabalhos iniciais de Davis (1899), foram propostos numerosos critérios para encontrar uma superfície equivalente. A superfície do fundo de vale é considerada por Nixon (1959), Woodyer (1968) e Dury (1973), como critério de reconhecimento de superfície deposicional. Já o nível da planície de inundação ativa é considerado por Wolman & Leopold (1957). Esses autores ainda consideram o nível médio das partes mais altas das barras de canal como critério de determinação do nível de margens plenas. Critérios baseados em observações de características botânicas e sedimentológicas são descritos por Shumm (1960), Sigafos (1964), Speigth (1965), Nannally (1967) e Radecki-Pawlik (2002). Esses autores consideraram como critério de determinação do nível de margens plenas, o nível do limite inferior da vegetação perene.

Em termos científicos, a descarga de margens plenas representa a vazão que controla as dimensões do canal através dos processos erosivos e deposicionais. Nota-se na **Figura 17**, que o nível de margens plenas recobre tanto o leito quanto o sopé e os bancos que limitam a calha. Este nível de água permite, em eventos de vazão entre 1 e 3 anos de recorrência, a deposição e erosão de sedimentos sem que ocorra o extravasamento para a planície de inundação (Dunne & Leopold (1978), Rosgen (1994) e Rosgen e Silvey (1996).

Figura 17 – Determinação do nível de margens plenas a partir de perfil transversal de um curso d'água hipotético



Rhama (2020) determinou a partir de imagens de satélite, de forma detalhada, toda a margem do rio Doce, considerando principalmente o critério de cobertura vegetal. Nesse trabalho

adotou-se o arquivo vetorial da calha delimitada por esse autor como a margem do rio Doce em nível pleno, e posteriormente utilizada como elemento na classificação de Rosgen.

6.2.5 Grau de entrincheiramento do canal

O entrincheiramento (E) é definido pela relação entre a largura do canal em nível de margens plenas duplicado (W_m) e a largura do canal em nível de margens plenas (L) (**Figura 17**). Rosgen (1994) afirma que o nível W_m é atingido por cheias com até 50 anos de recorrência. Esse autor considera o entrincheiramento fraco quando $E > 2,2$ e forte quando $E < 1,4$.

Nesse estudo utilizou-se as manchas de inundação elaboradas pela NHC (2023), como referência para obtenção do nível W_m , visto que esse material contempla as principais áreas afetadas pelas cheias do rio Doce. Para isso utilizou-se o arquivo vetorial gerado por esse autor.

6.2.6 Largura e profundidade

Para obtenção da largura média utilizou-se o arquivo vetorial de margens do rio Doce definidas por Rhama (2020). Em ambiente GIS, foram gerados perfis transversais a cada 10 m, sendo calculada posteriormente, a largura média de cada segmento.

Para compor os dados de profundidade, foram utilizados os dados de seções topobatimétricas produzidos por ANA (2021) e HidroBR (2021). Como forma de adensar o conjunto de dados, foram utilizados dados de lâmina d'água obtidos durante os trabalhos de sondagem intracalha do PMR 13 e 14. Os dados coletados nos respectivos estudos consultados são de diferentes datas, em condições hidrológicas diferentes do rio Doce. Nesse sentido desconsiderou-se as possíveis variações de cota do nível de água dos dados secundários utilizados, sendo considerados neste relatório, para fins de caracterização, a profundidade média por segmento.

6.2.7 Declividade

A declividade foi obtida dividindo o desnível da lâmina d'água considerado o ponto de início e fim do segmento, pelo comprimento do canal no mesmo trecho. Para a obtenção do desnível da lâmina d'água utilizou-se o levantamento topográfico obtido por perfilamento a laser (LiDAR), realizado em 2019 pela Fundação Renova.

6.2.8 Índice de sinuosidade (Is)

Este parâmetro é definido pelo quociente do comprimento do canal, pelo comprimento do vale fluvial. Segundo Rosgen (1994), o índice de Sinuosidade é a relação entre a medida do trajeto real do canal e a medição em linha reta do rio entre a nascente e a foz. De acordo com esse autor, os valores de sinuosidade podem ser modificados por controle de leito rochoso, estradas, confinamento de canal, tipos vegetativos específicos, e outros.

Na Equação 1 abaixo o L é o comprimento do canal principal e dv é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal (nascente e foz).

$$Is = \frac{L}{dv} \quad \text{Equação 1}$$

Horacio (2014) descreve que, um alto nível de sinuosidade indica um rio com um curso sinuoso. Segundo Schumm (1981; 2005) os valores próximos a 1 indicam que o canal tende a ser retilíneo e os valores superiores a 2 sugerem canais sinuosos. Horacio (2014) sugeriu uma classificação baseada em 4 tipos de sinuosidade, onde:

- ✓ <1,05 (Em linha reta);
- ✓ 1.05-1.3 (sinuoso);
- ✓ 1.3-1.5 (meandros moderados);
- ✓ >1,5 (Meandrante).

Segundo Rosgen (1994), para o índice de sinuosidade (Is) e grau de entrincheiramento (E) podem ser aceitos valores de $\pm 0,2$ para os limites tabelados destes parâmetros, além de $\pm 2,0$ para a relação largura/profundidade (L/P).

O cálculo do índice de sinuosidade foi realizado em ambiente GIS, utilizando a linha central da calha do rio Doce delimitada por Rhama (2020).

6.2.9 Material de fundo

Foram consultadas as bases de dados de sondagens intracalha realizadas nos PMRs dos trechos 13, 14, 15 e 16. Por se tratar de uma base de dados secundária, os resultados referem-se para aquela época de coleta. Foram utilizadas as bases de dados mais recentes disponíveis na data da realização do trabalho. Considerou-se a utilização desses dados como forma de caracterização do material do leito de fundo. Foram utilizadas as amostras coletadas na parte superior do pacote sedimentar.

No ambiente de SIG, as amostras foram agrupadas em seus respectivos segmentos. Em seguida, os dados analíticos foram submetidos a uma análise estatística descritiva para calcular o valor médio de cada fração granulométrica por segmento. Os valores de areia grossa, média e fina foram combinados para obter o valor total de areia. Os dados de silte e argila foram agrupados para criar uma categoria de finos. Por fim, foi avaliado qual fração granulométrica predominava, permitindo a determinação da classe do material de fundo predominante.

6.3 Metodologia para Classificação das Feições Geomorfológicas

Este capítulo descreve a metodologia empregada para a obtenção dos dados quantitativos utilizados na avaliação da dinâmica de feições geomorfológicas do rio Doce, a partir do processo de classificação automática de imagens de satélite.

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma técnica para obter imagens da superfície terrestre sem a necessidade de contato físico entre o sensor e a superfície (FLORENZANO, 2002). Inicialmente, a técnica foi desenvolvida para fins militares, com câmeras fixadas em pombos-correios e balões não tripulados para capturar fotos de territórios inimigos. No entanto, a revolução do Sensoriamento Remoto ocorreu nos anos 60, conhecidos como a "corrida espacial", com o uso de satélites artificiais para a captura de imagens. A evolução dos sensores, sistemas de telemetria, processamento de imagens e lançadores foram determinantes para essa evolução tecnológica. (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Os sensores utilizados para dados em nível orbital tipicamente visam o estudo dos recursos naturais da Terra e operam em diferentes números de bandas que estão associadas aos comprimentos de onda. Esses sensores medem a radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos da superfície terrestre. Esta por sua vez, possui comportamento tanto de onda quanto de

energia, e é refletida de maneiras distintas por objetos com propriedades físico-químicas e biológicas diferentes. Essas variações permitem distinguir os diferentes objetos analisados nas imagens de sensores remotos, que são representados em diferentes tons de branco e preto.

6.3.1 Classificação de imagens

As imagens de sensoriamento remoto são utilizadas para extrair informações e transformá-las em gráficos, mapas ou tabelas para melhor análise pelos especialistas. A interpretação manual apresenta limitações, como a subjetividade humana e o custo elevado para grandes áreas. As técnicas automáticas de classificação de imagens surgem como solução, minimizando a subjetividade e melhorando a eficiência do trabalho dos especialistas. A classificação consiste em associar a cada pixel uma classe que represente uma categoria, como vegetação ou áreas alagadas, por exemplo, resultando em um mapa temático da área geográfica. A definição do conjunto de características é determinante para o sucesso da classificação, devendo possibilitar a discriminação de componentes pertencentes a classes distintas, mesmo quando similares. As características são baseadas em propriedades das regiões ou contornos de uma imagem, assumindo-se que uma região ou contorno fechado corresponde a uma entidade do objeto ou parte do objeto.

O processo de classificação de imagens de sensoriamento remoto envolve a extração de características de uma cena em diferentes bandas espectrais. Existem abordagens supervisionadas e não supervisionadas, sendo que a primeira é realizada por meio de exemplos previamente definidos pelo usuário, enquanto a segunda é feita com base na similaridade entre os padrões de treinamento. Na etapa de treinamento, um módulo extrai e seleciona características apropriadas para representar os padrões de entrada e o classificador é treinado para particionar o espaço de características. Na etapa de classificação, o classificador atribui novas entradas a uma das classes previamente estipuladas com base nas características comuns. A dificuldade está na otimização do classificador para garantir uma precisão máxima na classificação de futuras entradas.

Neste presente trabalho utilizou-se o método de classificação supervisionada, onde o treinamento ocorre diretamente nas imagens a serem classificadas, a partir da coleta de pontos de treinamento. O cérebro humano reconhece padrões através da classificação de texturas, formas e cores em classes alvos, enquanto um computador usa regras de decisão específicas para associar pixels a uma classe. A detecção de padrões em imagens de satélite tem sido utilizada para resolver

problemas, como identificar ocupações urbanas, cicatrizes de queimadas e mapear ambientes costeiros. Neste trabalho, os padrões extraídos estão relacionados às feições geomorfológicas encontradas ao longo do rio Doce. Para isso foram determinadas as feições água, banco submerso, banco emerso, ilhas fluviais e afloramentos rochosos. Além disso, foram identificadas nas imagens as áreas com nuvens, onde não foi possível classificar as feições encontradas no rio Doce.

6.3.2 Metodologia para classificação de imagens

As imagens de sensoriamento remoto utilizadas no presente trabalho foram adquiridas pela Fundação Renova junto às empresas Space Imaging Brasil e Digimap. O relatório completo sobre as características dos sensores, incluindo a qualidade posicional é apresentado no **Anexo 01**.

A identificação e quantificação das áreas das feições geomorfológicas por meio de imagens é influenciada pelo nível d'água do rio Doce. Em geral, quando o nível de água do rio Doce está mais elevado, as áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos tendem a ser menores se comparadas a períodos em que o nível do rio está mais baixo.

Como forma de minimizar o efeito da variação do nível de água do rio Doce na identificação de feições deposicionais, foram adquiridas imagens correspondentes ao período seco do ano, compreendendo os meses de maio a agosto de cada ano. Além disso utilizou-se dados de estações fluviométricas para que fosse estabelecida com maior precisão a influência do nível de água nos resultados. Por se tratar de dados históricos de uma grande área territorial, foi necessário, em algumas datas, confeccionar mosaicos utilizando sensores de diferentes resoluções espaciais. A premissa adotada inicialmente foi de utilizar as imagens de maior resolução (0,5 m), porém na ausência de imagens disponíveis para o período, eventualmente foram utilizadas imagens de resolução espacial inferiores (1,5 m, 5,0 m e 15,0 m).

Inicialmente no plano de trabalho foi proposto a avaliação do período entre 2010 e 2022. Porém a ausência de imagens em alta resolução disponíveis no período entre 2010 e 2012, e que fossem adequadas para comparação com as imagens de 2013 a 2022, fez com que a análise desse período não fosse realizada. Na **Tabela 8** são apresentadas as resoluções utilizadas para cada ano de análise. Por se tratar de imagens de diferentes resoluções espaciais convencionou-se a escala de mapeamento 1:10.000, correspondente a escala máxima de trabalho para o conjunto de imagens de 5,0 m (Boggione et al., 2009).

Tabela 8 – Resoluções de imagens utilizadas para os diferentes anos de análise

RESOLUÇÃO	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022	
	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24
0.5m	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
0.75m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-
0.8m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-
1.5m	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-	Sim	-	-	-	-	-	-	Sim	Sim
2m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
3m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-	-	-
5.0m	-	-	-	-	-	Sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.0m	Sim	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Sim – Conjunto de imagens foi utilizado; (-) Conjunto de imagens não utilizado

Após a aquisição das imagens procedeu-se a determinação das classes correspondentes às feições de interesse. Para os locais de ocorrência de nuvens em alguns trechos das imagens históricas, adicionou-se a classe “nuvens” devido a sua importância para a análise, ainda que não se trate de uma feição de interesse. Dessa forma, as classes mapeadas foram água, barra arenosa submersa, barra arenosa emersa, ilha vegetada, afloramento rochoso e nuvens. Vale ressaltar que para simplificar o procedimento de classificação, a classe ilha vegetada englobou além das ilhas fluviais, as áreas de vegetação extracalha. Posteriormente essas áreas foram eliminadas ao considerar apenas a área correspondente a calha do rio Doce criando-se a classe margem. Para a máscara de recorte utilizou-se o mesmo arquivo vetorial descrito na seção 6.2.6. A classe água englobou as águas com e sem sedimentos em suspensão. Na **Figura 18** são apresentadas as principais classes identificadas nesse estudo.

Figura 18 – Feições mapeadas nesse trabalho. 1-Água, 2-Banco submerso, 3-Banco emerso, 4-Ilha vegetada, 5-Afloramento rochoso, 6-Nuvens



Posteriormente procedeu-se a etapa de coleta de amostras para treinamento do classificador. Para essa etapa utilizou-se o software de SIG ArcGIS 10.8.1 para criar conjuntos de treinamento para cada conjunto de imagens, considerando o ano de coleta e a resolução da imagem. A partir desses conjuntos de dados foram extraídas as informações espectrais referentes às bandas do visível R, G, B, além da banda do infravermelho próximo (NIR), sendo concatenadas com a informação referente a classe mapeada. Para dar maior robustez ao processo de predição foram adicionados os índices NDVI e NDWI, calculados a partir da relação das bandas espectrais.

O índice NDVI é amplamente utilizado em aplicações de sensoriamento remoto, incluindo monitoramento de culturas, detecção de mudanças no uso do solo e estudos de ecologia de vegetação (Zanzarini et al., 2013). Ele é calculado a partir da diferença entre a reflectância no

infravermelho próximo (NIR) e a reflectância no vermelho (R), dividida pela soma dessas duas medidas (Equação 2).

$$NDVI = \left(\frac{NIR - Vermelho}{NIR + Vermelho} \right) \quad \text{Equação 2}$$

O NIR é altamente refletido pelas folhas verdes das plantas, enquanto o R é absorvido pelas folhas verdes. Portanto, a diferença entre as duas medidas fornece uma estimativa da quantidade de vegetação na área.

Já o índice NDWI possui aplicação em monitoramento de recursos hídricos, detecção de inundações e mudanças na cobertura da superfície da água (Pereira et al., 2018). O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) é um índice utilizado para detectar e monitorar a água em uma determinada área a partir de imagens de sensoriamento remoto (Equação 3). Ele é calculado a partir da diferença entre a reflectância no infravermelho próximo (NIR) e a reflectância no verde (G) dividida pela soma dessas duas medidas.

$$NDWI = \left(\frac{Verde - Infravermelho \text{ Próximo}}{Verde + Infravermelho \text{ Próximo}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

O NIR é altamente refletido pela água, enquanto o G é absorvido pela água. Portanto, a diferença entre as duas medidas fornece uma estimativa da quantidade de água na área, enquanto a soma das duas medidas fornece informações sobre o brilho geral da cena.

Após a etapa de extração das informações das imagens, procedeu-se a etapa de treinamento do algoritmo. Para tal foi necessário criar rotinas de processamento de imagens no software R (R Core Team, 2021), utilizando como dados de entrada os pontos extraídos na etapa de coleta de amostras de treinamento. Para a etapa de treinamento utilizou-se 75% dos dados coletados, sendo os 25% restantes utilizados como validadores externos para testar a qualidade do modelo.

A classificação de imagens é uma tarefa desafiadora que envolve a identificação de objetos ou padrões específicos em uma imagem. O algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) foi aplicado nesse trabalho por se tratar de uma técnica de classificação supervisionada que tem sido

amplamente utilizada na classificação de imagens por apresentar os melhores resultados frente a outros algoritmos (Gomes et. al., 2019; Adugna et. al., 2022; Amni et al., 2022). Nesse classificador, baseado no princípio de árvores de decisão, subamostras selecionadas aleatoriamente com repetição são utilizadas como variáveis preditivas para treinamento do classificador. Um terço dessas subamostras é selecionado para a etapa de validação, conhecida como “out of the bag”. Um variado número de árvores é construído na etapa de treinamento, combinando-as para se ter uma predição com maior acurácia e estabilidade (Belgiu & Drăguț 2016; Han, Kamber & Pei 2011). Uma das principais vantagens do algoritmo Random Forest é sua capacidade de lidar com grandes quantidades de dados de maneira eficiente. Além disso, o modelo é capaz de lidar com dados de diferentes tipos, incluindo dados categóricos e numéricos.

A avaliação qualitativa do modelo aplicado foi obtida a partir do índice Kappa. O índice Kappa é uma medida estatística comumente usada para avaliar a precisão da classificação de imagens de satélite. É uma medida de concordância entre as classificações realizadas por um algoritmo de classificação e as classificações reais, feitas por um especialista (Andrade, 2011). O índice Kappa varia de 0 a 1, onde 0 indica que não há concordância entre as classificações e 1 indica uma concordância perfeita. Em geral, quanto maior o valor de Kappa, melhor é a precisão da classificação. No entanto, é importante avaliar outros fatores, como o tamanho da amostra de dados usada para a classificação e a qualidade das imagens de satélite. Além disso, é importante lembrar que a classificação de imagens de satélite é uma tarefa complexa e que muitos fatores podem influenciar a precisão da classificação, como a resolução da imagem, a presença de nuvens e a presença de sombras. Esse índice é obtido a partir da matriz de confusão, cujo resultado é a frequência com que uma classificação de modelo se alinha com a classificação real, sendo demonstrado em forma de tabela.

Figura 19 – Exemplo de matriz confusão obtida a partir dos resultados do processamento

	Classe 1	Classe 2
Classe 1	A	B
Classe 2	C	D

O índice Kappa (Ullibarri & Pita Fernandez, 1999) por sua vez é obtido a partir da Equação 4, considerando que $P_o = A+D$; e $P_e = (A+B) (A+C) + (B+D) (C+D)$.

$$Kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Equação 4

Figura 20 – Valores de índice Kappa e a respectiva concordância (de Ullibarri & Pita Fernandez, 1999)

Valor do Kappa	Concordância
< 0,20	Pobre
0,21 - 0,40	Fraca
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Boa
0,81 - 1,00	Muito boa

Para que fosse possível a correção de possíveis erros no processo de classificação de imagens, foi realizada a transformação dos dados em formato matricial para o formato vetorial. Posteriormente em ambiente GIS os arquivos vetoriais foram submetidos a uma avaliação visual e foram corrigidas possíveis falhas ocorridas devido a diferenças espectrais existentes nos mosaicos (**Figura 21**), ocasionadas principalmente pela presença de nuvens e de classes que apresentavam respostas espectrais semelhantes (e.g bancos arenosos emersos e afloramentos rochosos). Após os ajustes necessários procedeu-se a conversão dos arquivos vetoriais para o formato matricial, de forma que fosse possível realizar o cálculo das áreas e posterior avaliação dos dados de forma quantitativa. Na **Figura 21** é apresentado um resumo das operações adotadas para a classificação dos conjuntos de imagens.

Figura 21 – Processo de edição manual devido a confusão de classes devido a presença de nuvens. A- Resultado da classificação com quatro classes representadas, B-Imagem RGB, C-Arquivo de classificação com correção da classe água

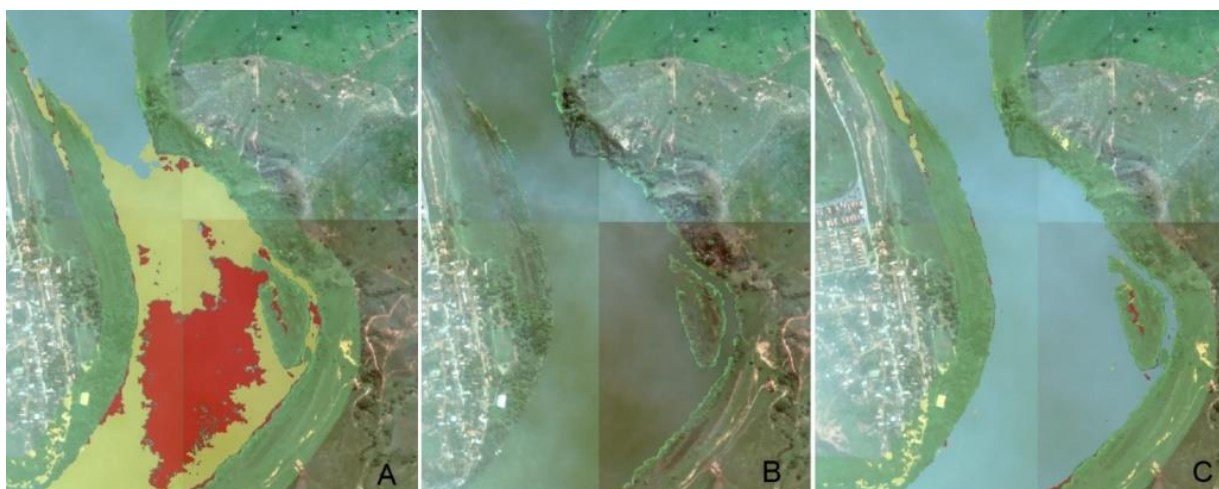
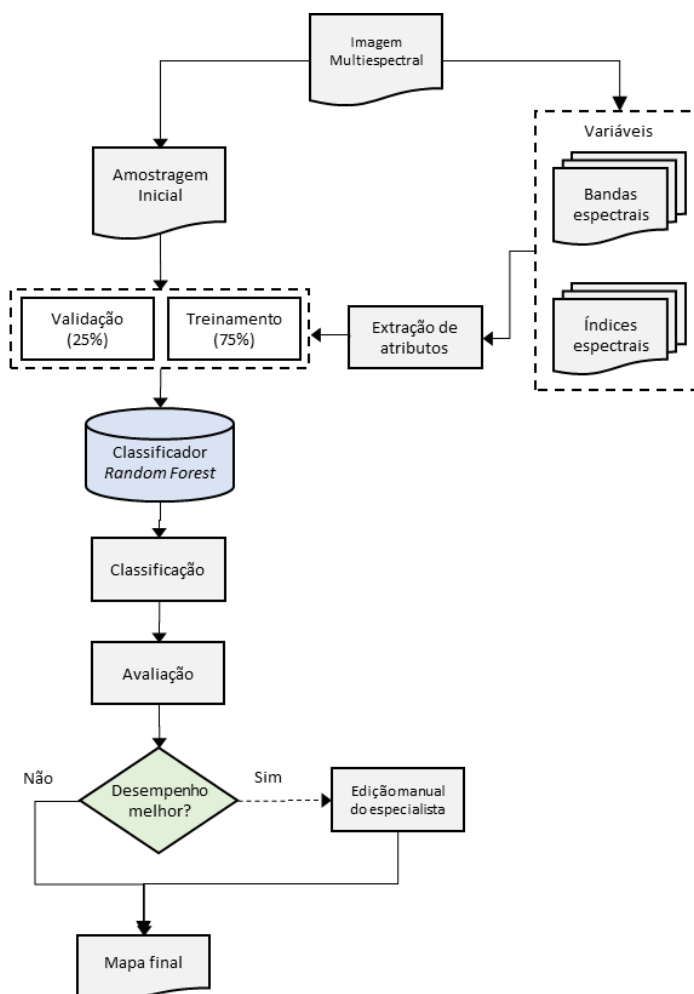


Figura 22 – Fluxograma de atividades adotado para a classificação de imagens



6.4 Metodologia para avaliação dos resultados da classificação de imagens

Considerou-se que as variações ao longo do tempo nas áreas das feições de bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos na área de estudo observadas por meio das imagens de sensoriamento remoto poderiam estar associadas aos seguintes aspectos:

- ✓ A dinâmica geomorfológica natural do sistema, associada a eventos de erosão e deposição de sedimentos, que pode levar a alterações das áreas em áreas de bancos de sedimentos submersos e emersos e de ilhas fluviais presentes na calha do rio.

- ✓ Crescimento de vegetação nas áreas de bancos emersos, que poderiam passar a ser classificados como ilhas fluviais.
- ✓ Variação do nível d'água do rio Doce, visto que em geral quando o nível de água do rio está mais elevado, as áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos visíveis nas imagens de sensoriamento remoto tenderiam a ser menores comparadas a períodos em que o nível do rio está mais baixo. Mesmo trabalhado com imagens de períodos secos, o nível de água do rio Doce na data da coleta das imagens em um determinado local pode variar de um ano para o outro.
- ✓ Incertezas na classificação das feições geomorfológicas, principalmente na diferenciação de bancos de sedimentos submersos e emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos e a presença de nuvens, que impossibilita a identificação dessas feições.
- ✓ Impactos do rompimento da barragem de Fundão, que poderiam estar relacionados a assoreamentos devido a deposição de rejeitos, resultando em aumentos de áreas de bancos submersos, bancos emersos e/ou ilhas.

Conforme indicado acima, devido aos vários fatores que podem influenciar nos resultados do mapeamento de feições geomorfológicas ao longo do tempo, a comparação pontual de imagens de dois momentos distintos, antes e após o rompimento, não permite concluir sobre impactos do rompimento na dinâmica geomorfológica do rio Doce nos trechos a jusante da UHE Risoleta Neves (Candonga). Em geral não é possível atribuir se as diferenças observadas na comparação pontual (i.e., imagens de dois momentos distintos), como por exemplo, o surgimento ou aumento da área de um banco de sedimentos, são de fato um impacto do rompimento ou se são resultantes de alguma das variáveis citadas acima.

Como forma de contornar a limitação da comparação pontual das imagens, buscou-se avaliar se as informações obtidas a partir do mapeamento das feições indicavam tendências que poderiam estar associadas a impactos do rompimento. Nesse caso, buscou-se avaliar a seguinte hipótese:

Hipótese: O rompimento da barragem de Fundão pode ter alterado a dinâmica geomorfológica do rio Doce nos trechos a jusante da barragem de Candonga, resultando em uma tendência de aumento das áreas de bancos submersos, bancos emersos e ilhas após o rompimento (i.e., a partir do período seco de 2016) comparado ao período antes do rompimento (períodos secos de 2013 a 2015).

Adicionalmente, considerando os fatores indicados acima que podem influenciar nos resultados do mapeamento das feições, foi considerado na avaliação dessa hipótese:

- ✓ Tendências de aumento de áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais foram avaliadas em termos de variação da soma das áreas dessas feições juntamente com as áreas de afloramentos rochosos. Desconsiderando os efeitos de variação do nível da água do rio Doce, e considerando que a área de afloramentos rochosos não variaria nesse cenário, a variação da soma das áreas dessas feições representaria a variação das áreas de bancos submersos, bancos emersos e ilhas fluviais devido a efeitos de erosão e deposição de sedimentos. Ao se trabalhar com a soma dessas áreas se minimiza o efeito da incerteza na classificação das feições geomorfológicas, conforme indicado acima, bem como o efeito de transição de bancos para ilhas fluviais identificado no mapeamento devido ao crescimento de vegetação.
- ✓ Na avaliação dos resultados foram consideradas as cotas do rio Doce nas datas de geração das imagens de sensoriamento remoto na avaliação dos resultados, visando identificar se eventuais tendências de variação verificadas nas áreas das feições poderiam estar associadas a variações da cota do rio. No caso de segmentos avaliados a partir de mais de uma imagem, coletadas em datas diferentes, considerou-se como referência a média das cotas nas datas da coleta das imagens. Conforme indicado acima, mesmo que as imagens tenham sido coletadas em períodos secos, a cota do rio Doce pode ter variado entre os momentos de coleta das imagens, podendo afetar a interpretação sobre a variação das áreas das feições geomorfológicas.

O nível de água do rio Doce foi obtido a partir de dados disponibilizados pela ANA (Portal Hidroweb v 3.2.7, do SNIRH) para as estações fluviométricas ao longo da área de estudo, bem como dados de nível de água dos reservatórios de Baguari, Aimorés e Mascarenhas (dados de operação dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional –

<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>). Como não há estações fluviométricas com dados de nível d'água em todos os segmentos fluviais delimitados, a cada segmento foi atribuída uma estação fluviométrica *de referência* para avaliação do nível de água do rio Doce. Dessa forma, o nível de água do rio Doce apresentado para cada segmento na data de coleta das imagens não necessariamente representa o nível do rio real para esse local específico. Considera-se que essa incerteza devido à diferença de localização do segmento e da estação fluviométrica de referência não afeta de forma significativa a avaliação, visto que o foco foi avaliar variações de nível de água ao longo do período avaliado, e não avaliar o nível de água em uma data específica. A **Tabela 9** apresenta as estações fluviométricas da ANA usadas como referência de nível de água e vazão do rio Doce para cada segmento.

Tabela 9 – Estações fluviométricas da ANA usadas como referência de nível de água do rio Doce para cada segmento

SEGMENTO	ESTAÇÃO USADA PARA REFERÊNCIA DE COTA
Seg01	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg02	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg03	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg04	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg05	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg06	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg07	Fazenda Cachoeira D'antas (56425000)
Seg08	Cachoeira dos Óculos Montante (56539000)
Seg09	Cachoeira dos Óculos Montante (56539000)
Seg10	Cachoeira dos Óculos Montante (56539000)
Seg11	Belo Oriente (56719998)
Seg12	Belo Oriente (56719998)
Seg13	Belo Oriente (56719998)
Seg14	Belo Oriente (56719998)
Seg15	Belo Oriente (56719998)
Seg16	Belo Oriente (56719998)
Seg17	Baguari*
Seg18	Governador Valadares (56850000)
Seg19	Governador Valadares (56850000)
Seg20	Governador Valadares (56850000)
Seg21	Governador Valadares (56850000)
Seg22	Governador Valadares (56850000)
Seg23	Governador Valadares (56850000)
Seg24	Aimorés*
Seg25	Mascarenhas*
Seg26	Mascarenhas*
Seg27	Colatina (56994500)
Seg28	Colatina (56994500)
Seg29	Colatina (56994500)
Seg30	Colatina (56994500)
Seg31	Colatina (56994500)

Nota: (*) Dados de operação dos reservatórios SIN do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da ANA (<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin#>)

- ✓ Na avaliação dos resultados foram consideradas as áreas com cobertura de nuvem, onde as feições geomorfológicas do rio Doce não puderam ser identificadas e quantificadas, visando verificar se eventuais tendências de variação verificadas nas áreas das feições poderiam estar associadas a variações da cobertura de nuvens.
- ✓ Dados da vazão fluvial, considerando os picos de vazão de cada período chuvoso, foram usados como uma referência qualitativa da intensidade da dinâmica geomorfológica natural do sistema ao longo do período avaliado.

A avaliação dos resultados foi feita inicialmente comparando valores de área das feições correspondentes a média do período antes do rompimento da barragem de Fundão (i.e., imagens dos períodos secos de 2013 a 2015) e a média do período posterior ao rompimento da barragem de Fundão (i.e., imagens dos períodos secos de 2016 a 2022). Posteriormente, foi avaliado se havia tendências de aumento das feições de bancos submersos e emersos e ilhas fluviais a partir de 2016 que eram nitidamente distintas das flutuações verificadas no período anterior ao rompimento da barragem de Fundão.

Para complementar as análises e investigar as principais relações entre os resultados obtidos nas classificações de imagens e os atributos físicos dos distintos segmentos, submeteu-se os resultados a avaliação de Correlação de Spearman ($p < 0,05$). Os resultados são apresentados na seção 7.5.

6.4.1 Limitações da avaliação dos resultados de classificação das imagens

São apresentadas a seguir as principais limitações da avaliação dos resultados de classificação das imagens:

- ✓ Conforme indicado acima, devido aos vários fatores que podem influenciar nos resultados, comparações pontuais (i.e., entre dois momentos distintos) dos resultados de classificação de imagens não permitem identificar de forma adequada potenciais impactos do rompimento da barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica do rio Doce nos trechos a jusante da barragem de Candonga. Por esse motivo, optou-se por avaliar tendências.
- ✓ A comparação entre área das feições correspondentes a média do período antes do rompimento da barragem de Fundão (i.e., imagens dos períodos secos de 2013 a 2015) e a

média do período posterior ao rompimento da barragem de Fundão (i.e., imagens dos períodos secos de 2016 a 2022) é considerada como um *screening* inicial, visto que os dados para o período anterior ao rompimento (3 anos, de 2013 a 2015) são relativamente limitados. Dessa forma, considera-se que essa comparação de resultados médios antes e após o rompimento não pode ser utilizada de forma independente para avaliar potenciais impactos do rompimento da barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica do rio Doce nos trechos a jusante da barragem de Candonga, devendo ser complementada pela avaliação de tendências indicada acima.

- ✓ Os resultados gerados apresentam incertezas que incluem:
 - o Resolução das imagens usadas como base para o mapeamento das feições geomorfológicas. Para mitigar essa questão, foram utilizadas imagens com a melhor de resolução espacial disponível para a área de estudo e período avaliado. Conforme indicado acima, optou-se por não utilizar imagens de 2010 a 2012, pois a resolução das imagens disponíveis era relativamente baixa e poderia afetar as conclusões relativas à variação temporal das feições geomorfológicas.
 - o Incertezas na classificação das imagens. Para mitigar essa questão, foi utilizado um processo de classificação supervisionada, que tende a minimizar essas incertezas. Adicionalmente, conforme indicado acima, foi usado como referência principal de avaliação a soma das áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilhas fluviais e afloramentos rochosos, de forma a minimizar o efeito dessa incerteza na classificação.
 - o Presença de nuvens. A presença de nuvens impossibilita a identificação das feições geomorfológicas do rio Doce nas imagens. Em alguns casos a variação das áreas mapeadas de uma determinada feição ao longo do tempo pode estar relacionada à variação da presença de nuvens nas imagens entre os períodos avaliados. Como forma de mitigar essa questão, a variação da cobertura de nuvens foi considerada na avaliação dos resultados de variação de área das feições geomorfológicas.

- o Variação do nível de água do rio Doce. Conforme indicado acima, a variação do nível d'água pode resultar em variações das áreas das feições mapeadas nas imagens. Para mitigar essa questão, foram utilizadas imagens de períodos secos de cada ano do período avaliado, quando o nível de água do rio estaria mais baixo e as feições geomorfológicas de interesse (bancos e ilhas) estariam mais aparentes. Entretanto, como as imagens correspondem a datas específicas (i.e., não são geradas de forma contínua) e há variações do nível de água entre períodos secos de anos diferentes, mesmo que se utilize imagens de períodos secos, há variação do nível de água entre as datas de coleta das imagens que pode afetar o resultado do mapeamento das feições de interesse. Uma ação adicional para mitigar essa questão foi levantar o nível de água do rio Doce nas datas em que as imagens foram geradas e considerar essa informação na avaliação dos resultados.

Ressalta-se que em alguns casos as imagens utilizadas para um determinado segmento e um determinado ano consistem de um mosaico de imagens coletadas em datas diferentes. Nesses casos, foi utilizado o nível de água médio entre as datas de coleta, o que gera uma incerteza em relação ao nível de água de referência.

Adicionalmente, o banco de dados da ANA com dados de nível de água medidos nas estações fluviométricas apresentava alguns períodos sem resultados. Nos casos em que o banco de dados da ANA não dispunha de dado de nível de água na data de coleta de imagem, foi usada como referência a média do nível de água entre as primeiras datas antes e após a data da imagem que tinham resultados disponíveis no banco de dados da ANA.

- ✓ No período seco de 2016, e em menor escala no período seco de 2017, a água do rio do Doce apresentava elevada turbidez e coloração alaranjada, o que dificultou a identificação de ilhas submersas nas imagens desses anos. Em alguns segmentos foi observada uma grande redução da área mapeada de bancos submersos entre 2015 e 2016, que pode ter relação direta com essa limitação associada à turbidez e cor da água.

6.5 Inspeção de Campo

Conforme apresentado no início desta seção, a inspeção de campo teve como objetivo a verificação in situ de feições geomorfológicas em alguns pontos do rio Doce, visando complementar a avaliação apresentada neste trabalho. A escolha dos locais se deu a partir da caracterização realizada na Seção 7.2, de forma que as distintas características físicas do leito fluvial do rio Doce e de áreas adjacentes fossem registradas.

Nesse sentido, optou-se por visitar segmentos que representassem as três diferentes zonas do sistema fluvial proposto por Schumm (1977). Conforme já descrito anteriormente, esse sistema é composto por três zonas, sendo a zona 1 representada pela porção superior do sistema, onde ocorre grande erosão e formação de sedimentos. Já a zona 2 representa a porção média do sistema fluvial, funcionando como uma zona de transporte de sedimentos. A zona 3 representa a porção inferior do sistema onde ocorrem a formação dos sistemas deposicionais em maior expressão.

A Zona 1 nesse trabalho foi representada pelos segmentos mais próximos à UHE Risoleta Neves, cujo leito fluvial apresenta-se moldado principalmente pela geologia local, com a presença de trechos mais entrincheirados e declivosos, cuja energia para transporte de sedimentos é maior. A Zona 2 é representada pelos segmentos localizados no médio rio Doce até a UHE Mascarenhas, sendo a Zona 3 representada pelos segmentos a jusante dessa UHE até a foz do rio Doce.

Outro aspecto que foi levado em consideração na escolha dos pontos de visita está relacionado à importância ambiental e econômica dos trechos do rio Doce, tais como as áreas de confluência de tributários e região da foz do rio Doce, e reservatórios de UHE's e as regiões de maior concentração urbana, como os municípios de Governador Valadares, Colatina e Linhares. Além disso, buscou-se evidências em campo das principais feições geomorfológicas utilizadas no processo de classificação de imagens, de forma que o material fotográfico obtido auxiliasse no processo de validação do processo de classificação.

Ressalta-se que o cronograma inicialmente proposto previa a realização da inspeção de campo no meio do período seco de 2023, quando o nível de água do rio Doce estaria mais baixo e possibilitaria uma melhor visualização das feições geomorfológicas comparado a períodos chuvosos. Entretanto, isso levaria à extensão do cronograma do trabalho como um todo, o que não atenderia ao prazo de entrega do relatório acordado entre a Fundação Renova e a Câmara Técnica

de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA). Dessa forma, a inspeção de campo foi realizada no período de 17 a 21/04/2023, consistindo na transição do período chuvoso para o seco de 2023. Como resultado, o nível de água do rio Doce estava relativamente alto comparado ao esperado no meio do período seco, limitando as informações obtidas na inspeção de campo. A visita de campo não incluiu a identificação de evidências visuais de rejeito com coleta de sedimentos² e nem a realização de medições em campo. Na **Tabela 10** são apresentados os pontos determinados para registro.

Tabela 10 – Pontos determinados para a visita de campo

NOME PONTO	X	Y	SEGMENTO	TRECHO	MUNICÍPIO
Ponto 01	-42,852552	-20,194628	01	T13	Rio Doce - MG
Ponto 02	-42,825564	-20,196453	02	T13	Santa Cruz do Escalvado - MG
Ponto 03	-42,793621	-20,131256	03	T13	Santa Cruz do Escalvado - MG
Ponto 04	-42,760123	-20,120915	04	T13	Rio Casca - MG
Ponto 05	-42,414746	-19,348186	15	T13	Santana do Paraíso - MG
Ponto 06	-42,348165	-19,265006	16	T13	Belo Oriente - MG
Ponto 07	-42,143032	-19,045028	17	T13	Periquito - MG
Ponto 08	-42,040386	-18,933209	19	T14	Governador Valadares - MG
Ponto 09	-41,706166	-18,949921	20	T14	Galiléia - MG
Ponto 10	-41,52501	-19,068587	22	T14	Conselheira Pena - MG
Ponto 11	-41,307624	-19,246266	23	T14	Resplendor - MG
Ponto 12	-41,236789	-19,343095	24	T14	Resplendor - MG
Ponto 13	-41,094683	-19,486115	25	T14	Aimorés - MG
Ponto 14	-41,014059	-19,506481	26	T14	Baixo Guandu -ES
Ponto 15	-40,809006	-19,528699	27	T15	Colatina -ES
Ponto 16	-40,603245	-19,513962	28	T15	Colatina -ES
Ponto 17	-40,189744	-19,45605	29	T15	Linhares -ES
Ponto 18	-40,066306	-19,412739	30	T16	Linhares -ES
Ponto 19	-39,823266	-19,64619	31	T16	Linhares -ES

^(a) Classe de Rosgen (1994)

² Conforme descrito na Nota Técnica CT-GRSA nº 17/2022, a CT-GRSA solicitou a adição da “identificação de rejeitos através de atividades de campo” na lista de exclusões do estudo.

7 RESULTADOS

7.1 Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento)

Para compor os dados de profundidade do rio Doce foram consultados os dados de seções topobatimétricas disponibilizadas pela ANA. Ao todo foram utilizadas 109 seções topobatimétricas levantadas no rio Doce (DC-003 a DC0111). Além disso foram utilizadas 40 seções topobatimétricas complementares (SC-1 a SC-40) levantadas pelas empresas HIDROGEST, HGT e TOPGEO. Dados obtidos no PMR 13 e 14, relativos à lâmina d'água, foram utilizados para complementar a informação de profundidade do curso d'água.

A base topográfica utilizada nesse trabalho foi obtida em 2019, a partir da tecnologia LiDAR. Nesse estudo utilizou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado a partir da interpolação da nuvem de pontos do LiDAR. Foram extraídas informações a respeito da cota de início e fim de cada segmento com o objetivo de obter a declividade do segmento avaliado.

Para compor a informação a respeito do material de fundo no leito do rio Doce, foram consultadas as bases de dados dos PMRs dos trechos 13, 14, 15 e 16.

7.2 Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Jusante da UHE Risoleta Neves

7.2.1 Delimitação dos segmentos

Classificações baseadas em processos físicos que ocorrem em rios (Schumm, 1977; Rosgen, 1994; Montgomery, 1999; Buffington, 1997) costumam dividi-los em produção ou fonte de sedimentos, transferência ou transporte, deposição ou resposta do rio às zonas de sedimentos. Montgomery (1999) desenvolveu o conceito de domínios de processo, ou seja, porções do rio caracterizada por um conjunto específico inter-relacionado de processos e distúrbios, morfologias de canais e habitats aquáticos que correspondem aproximadamente à produção, transporte e zonas de deposição. Além disso, a classificação dos rios baseada em domínios de processo identifica unidades geomórficas fundamentais para a paisagem que estrutura o comportamento do rio.

Ao todo foram gerados 31 segmentos (**Tabela 11**) ao longo dos 558,5 km de trecho do rio Doce. Conforme descrito na metodologia, foram realizados pequenos ajustes para contemplar os

reservatórios em apenas 1 segmento. A delimitação dos segmentos foi realizada de acordo com as principais características geomorfológicas descritas por Rosgen (1994), de forma a agrupar setores do rio que apresentassem homogeneidade em relação ao padrão fluvial. Posteriormente para cada segmento foram calculadas as métricas definidas por Rosgen (1994). Na **Figura 23** é apresentada a localização dos segmentos considerados. No final dessa seção, no item 7.2.8 é apresentado um resumo com as principais métricas obtidas para os segmentos em questão.

Tabela 11 – Segmentos geomorfológicos gerados ao longo dos 558,5 km dos trechos a jusante da barragem da UHE Risoleta Neves no rio Doce

SEGMENTO	TRECHO	INÍCIO		FIM		EXTENSÃO (M)
		Longitude	Latitude	Longitude	Latitude	
S01	Trecho 13	-42,850007	-20,208767	-42,833592	-20,199891	4513
S02		-42,833592	-20,199891	-42,815210	-20,149422	8043
S03		-42,815210	-20,149422	-42,766516	-20,121369	7472
S04		-42,766516	-20,121369	-42,762886	-20,091738	5699
S05		-42,762886	-20,091738	-42,752176	-20,051322	11087
S06		-42,752176	-20,051322	-42,744865	-20,020586	6716
S07		-42,744865	-20,020586	-42,697345	-19,994457	9188
S08		-42,697345	-19,994457	-42,652317	-19,984577	7575
S09		-42,652317	-19,984577	-42,636427	-19,965472	2914
S10		-42,636427	-19,965472	-42,492470	-19,791926	30649
S11		-42,492470	-19,791926	-42,492568	-19,725599	10011
S12		-42,492568	-19,725599	-42,496125	-19,630761	13332
S13		-42,496125	-19,630761	-42,490183	-19,585094	5629
S14		-42,490183	-19,585094	-42,478519	-19,480168	21736
S15		-42,478519	-19,480168	-42,360078	-19,312032	30418
S16	Trecho 14	-42,360078	-19,312032	-42,234497	-19,158558	28850
S17		-42,234497	-19,158558	-42,122187	-19,019516	22767
S18		-42,122187	-19,019516	-42,078138	-18,967451	8556
S19		-42,078138	-18,967451	-41,786024	-18,871240	38255
S20		-41,786024	-18,871240	-41,640000	-18,972850	23528
S21		-41,640000	-18,972850	-41,542660	-19,009257	12107
S22		-41,542660	-19,009257	-41,440555	-19,179307	24668
S23		-41,440555	-19,179307	-41,258406	-19,298237	25955
S24		-41,258406	-19,298237	-41,095418	-19,456606	31070
S25		-41,095418	-19,456606	-41,017040	-19,505688	11619
S26	Trecho 15	-41,017040	-19,505688	-40,918700	-19,500527	10895
S27		-40,918700	-19,500527	-40,744316	-19,507344	21472
S28		-40,744316	-19,507344	-40,365268	-19,532342	44033
S29		-40,365268	-19,532342	-39,976024	-19,427339	45125
S30	Trecho 16	-39,976024	-19,427339	-39,976024	19,427339	19994
S31		-39,814010	-19,648888	-39,856288	-19,555089	14627

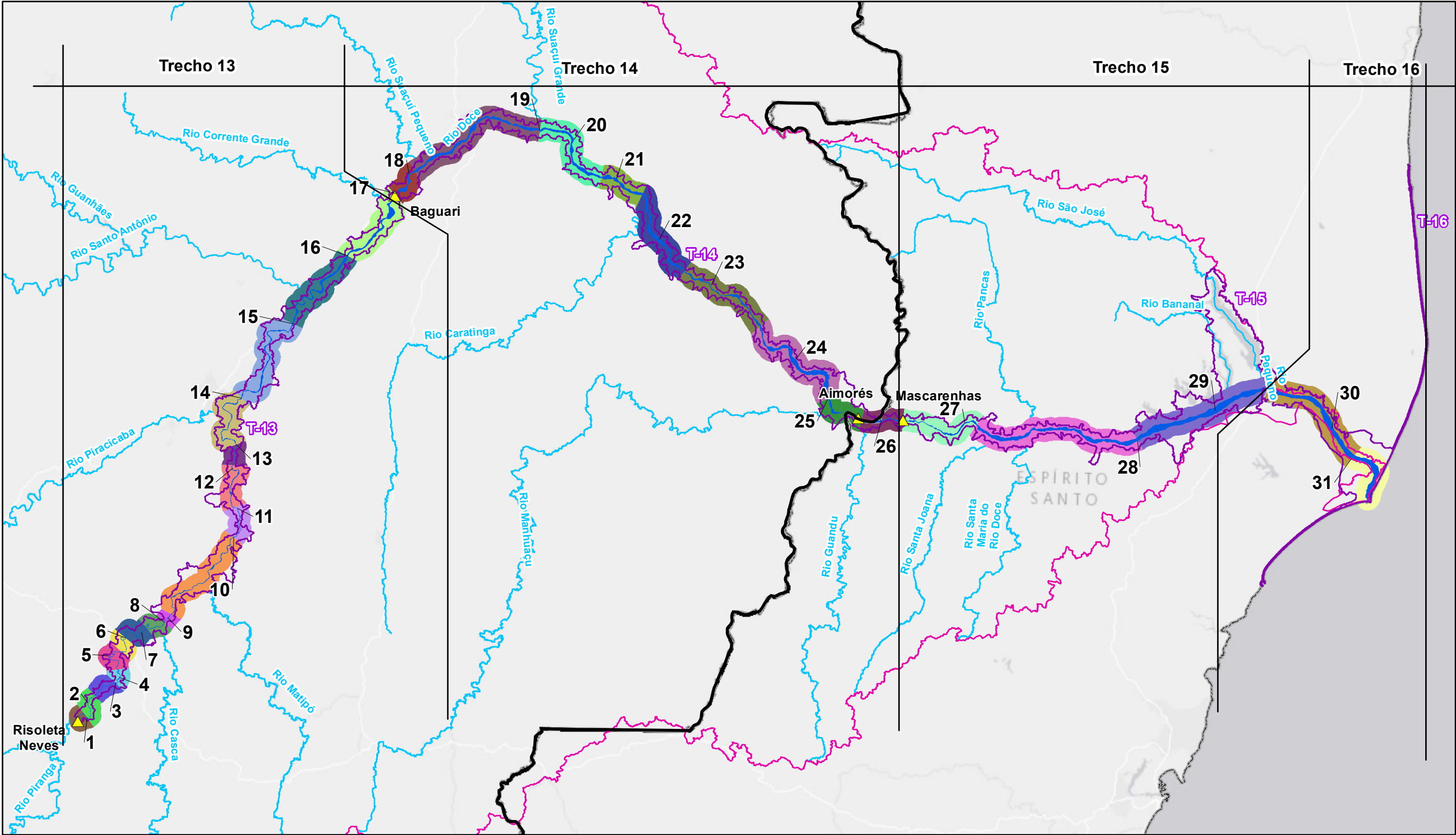


Imagem: Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors

LEGENDA

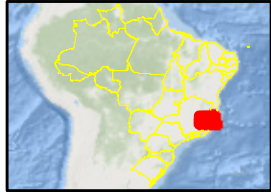
- Divisa Estadual
- Bacia do Rio Doce
- Trechos do Plano de Manejo de Rejeito
- Cursos d'água
- Usinas Hidrelétricas - UHE

Segmentos ¹

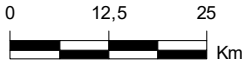
1	8	15	22	29
2	9	16	23	30
3	10	17	24	31
4	11	18	25	
5	12	19	26	
6	13	20	27	
7	14	21	28	

(1) Os segmentos estão representados com buffer de 2,5 km da calha do Rio Doce para melhor visualização

LOCALIZAÇÃO



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SIRGAS 2000 - Fuso 23 K



ESCALA GRÁFICA



PROJETO:
ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO GEOMORFOLÓGICO DO TRECHO DO RIO DOCE A JUSANTE DE UHE RISOLETA NEVES

TÍTULO:
SEGMENTOS DA CALHA DO RIO DOCE



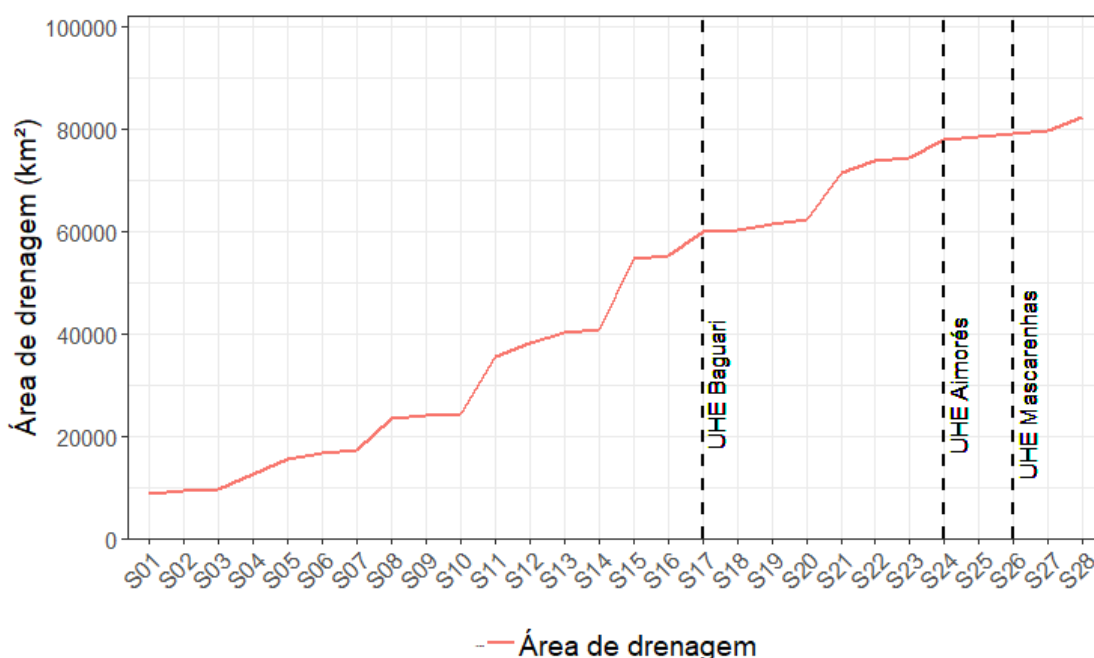
Nº PROJETO:	22535632	ESCALA:	1:959.947
GIS	gld_lprioli	mai/2023	Figura 23
REV	MRamin	00	

7.2.2 Área de drenagem

A área de contribuição, ou área de drenagem, é a área total da bacia hidrográfica que contribui para o escoamento de água em um ponto específico (Ramos et al., 2003). Ao longo da área de estudo o rio Doce recebe a contribuição de diversos afluentes, sendo estes drenados por distintas superfícies geológicas. Como ocorre em todas as bacias hidrográficas, à medida que o rio se aproxima da sua foz, aumenta também a sua área de drenagem.

Nesse estudo destaca-se o aumento mais expressivo da área de drenagem nos segmentos 16, 20 e 25. No segmento 16 o rio recebe a contribuição do rio Santo Antônio, com uma área de 10.768,86 km² de drenagem. A nascente desse rio está localizada na Serra do Espinhaço, e sua bacia hidrográfica abrange 41 municípios, com destaque para as cidades de Conceição de Mato Dentro e Ferros. O segmento 20, com área de drenagem adicional de 14.194,44 km², recebe a contribuição dos rios Suaçuí Grande na margem esquerda e do Ribeirão Traíras na margem direita. No segmento 25 o Rio Manhuaçu contribui com uma área de drenagem de 8.990,75 km². Esse rio possui nascente localizada na região do município de Manhuaçu, com foz na cidade de Aimorés-MG. Na **Figura 24** é apresentado o incremento na área de drenagem ao longo do Rio Doce.

Figura 24 – Área de drenagem ao longo dos segmentos



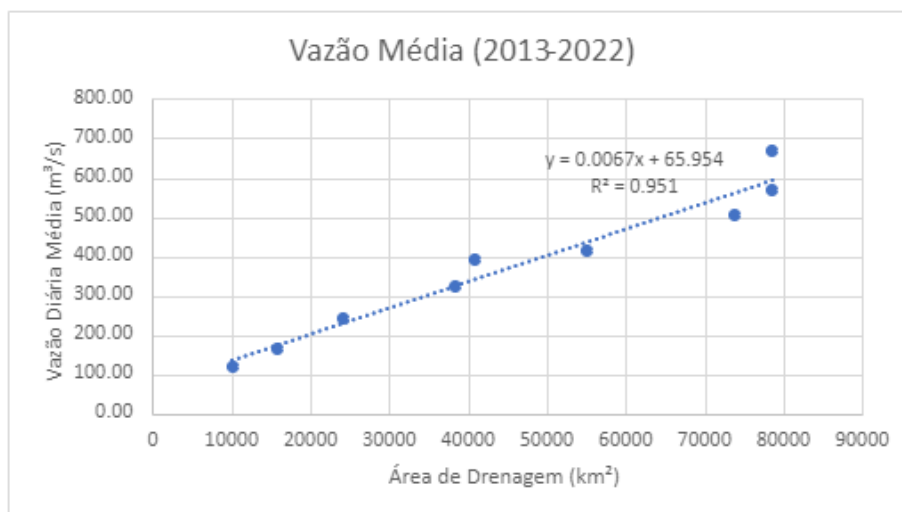
A vazão é a quantidade de água que passa por uma seção transversal de um curso d'água em uma unidade de tempo, e geralmente quanto maior a área de contribuição de uma bacia hidrográfica, maior será a vazão do rio ou córrego que a drena.

Ao avaliar as relações entre área de contribuição da bacia do rio Doce e suas vazões médias mensais, utilizando dados disponibilizados pela ANA (**Tabela 12**), observa-se uma correlação significativa alta, com r^2 de 0,95 (**Figura 25**).

Tabela 12 – Vazões médias mensais e áreas de drenagem das estações fluviométricas.

ESTAÇÃO	SEGMENTO	DISTÂNCIA DE CANDONGA (M)	ÁREA DE DRENAGEM (KM ²)	VAZÃO MÉDIA (2013-2022)
Fazenda Cachoeira D'antas	8	68154	10066	118,52
Cachoeira dos Óculos Montante	11	106974	15860	161,50
Belo Oriente	15	181646	24233	243,13
UHE Baguari Barramento	17	234909	38344	321,10
Governador Valadares	19	260866	40930	389,81
Tumiritinga UHE	20	304216	55125	411,30
Mascarenhas Barramento	26	419615	73803	503,00
Colatina	28	454489	78643	565,63
Colatina Corpo de Bombeiros	28	455199	78643	668,27

Figura 25 – Correlação entre área de contribuição e a vazão do rio Doce



7.2.3 Grau de entrincheiramento do canal

A taxa de entrincheiramento mede como um rio é escavado na paisagem, mostrando a limitação lateral dos rios devido a bancos e encostas (Rosgen, 1994). Ela se relaciona com a contenção vertical dos rios e pode ser usada para inferir sobre a área adjacente ao canal. Esta taxa é calculada com base na relação entre a área propensa a inundações e a largura do canal. Rios montanhosos apresentam baixos valores, enquanto rios não montanhosos apresentam altos valores deste parâmetro, indicando que eles não possuem uma significativa limitação lateral nas margens e bancos, o que permite a grande extensão do canal e a ligação com rios, lagos e curvas durante eventos de inundação.

Neste estudo foi utilizada a mancha de inundação produzida por NHC (2023), obtida a partir de modelos computacionais utilizando um MDT de alto detalhamento como forma de obter a área sujeita a inundação dos trechos avaliados.

Em ambiente GIS calculou-se o comprimento transversal ao rio correspondente a área máxima de inundação em ambas as margens do rio. Os transectos transversais foram calculados a cada 100 metros e posteriormente obtida a média para cada segmento. Posteriormente relacionou-se esse valor à largura média entre margens. Os resultados obtidos serviram de apoio para a classificação de Rosgen de cada segmento apresentada na seção 7.2.8.

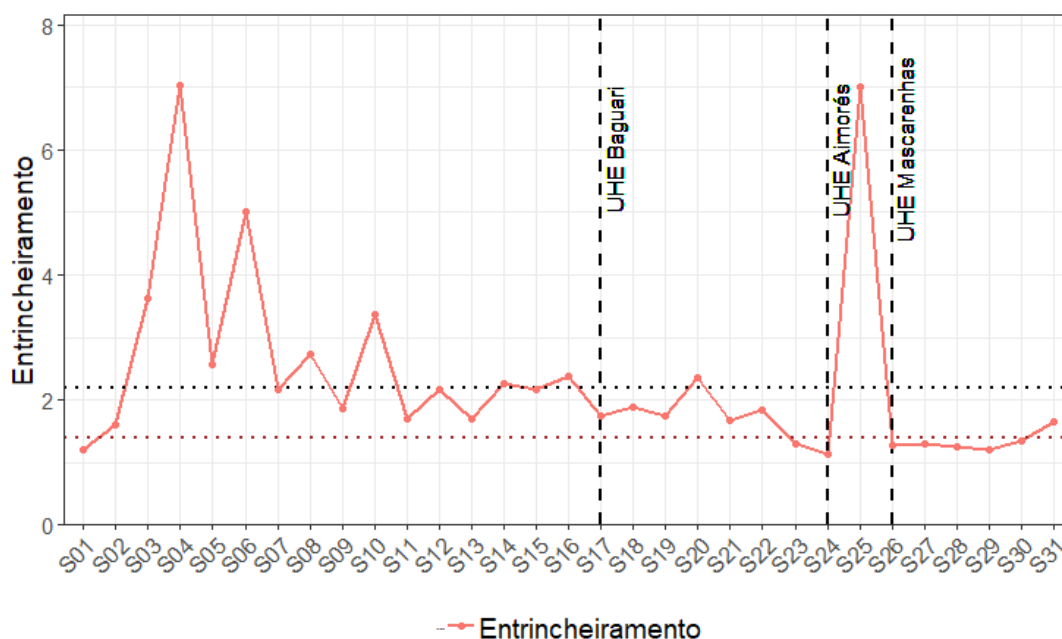
Os resultados obtidos apontam que os segmentos do rio apresentam diferentes graus de entrincheiramento ao longo de toda a extensão do rio Doce. O primeiro segmento foi o que apresentou o maior grau de entrincheiramento, indicando que a erosão nesta área do rio, em épocas de maior vazão, pode ser significativa, podendo afetar a estabilidade da margem quando se encontra desprotegida. Indica também a menor ocorrência de planícies aluvionares, uma vez que o rio segue um curso mais encaixado no vale. Já no segundo segmento, o entrincheiramento é moderado. Este nível moderado de entrincheiramento pode ser influenciado por fatores como a presença de obstáculos no rio, como rochas e ilhas, ou uma variação na velocidade da corrente. A partir do terceiro até o sétimo segmento, é observado um baixo entrincheiramento devido à presença de planícies aluvionares nesses trechos. Este tipo de paisagem fluvial é caracterizado por uma ampla extensão de terra plana formada pelo acúmulo de sedimentos na calha do rio, e ajuda a mitigar a erosão da calha fluvial durante os períodos de maior volume de água.

Entre o sétimo e o décimo primeiro segmento, há uma alternância entre trechos mais entrincheirados e menos entrincheirados. Neste ponto, é observado um entrincheiramento moderado no trecho do Parque Estadual do Rio Doce (PERD) (Segmentos 11, 12 e 13) devido à ausência de planícies e à forma como o rio corre mais encaixado, com alta diferença de nível existente entre o terraço e a calha do rio.

A partir do décimo quarto segmento, há uma tendência ao entrincheiramento moderado, com um pico no vigésimo quinto segmento, localizado entre as usinas hidrelétricas de Aimorés e Mascarenhas. Neste local, onde o fluxo de água se reduz, a largura da calha se reduz e há uma grande área disponível área de inundação.

Em resumo, os resultados apresentados mostram que o grau de entrincheiramento varia ao longo do rio, sendo influenciado por diversos fatores como substrato geológico, a presença de planícies aluviais, forma como o rio corre e a presença de obstáculos como presença de afloramentos rochosos e quedas d'água. A **Figura 26** apresenta os resultados médios de entrincheiramento para cada segmento estudado.

Figura 26 – Grau de entrincheiramento ao longo dos segmentos delimitados. As linhas pontilhadas representam os limites inferiores (1,4) e superiores (2,2) de entrincheiramento (2,2) de acordo com Rosgen (1994)



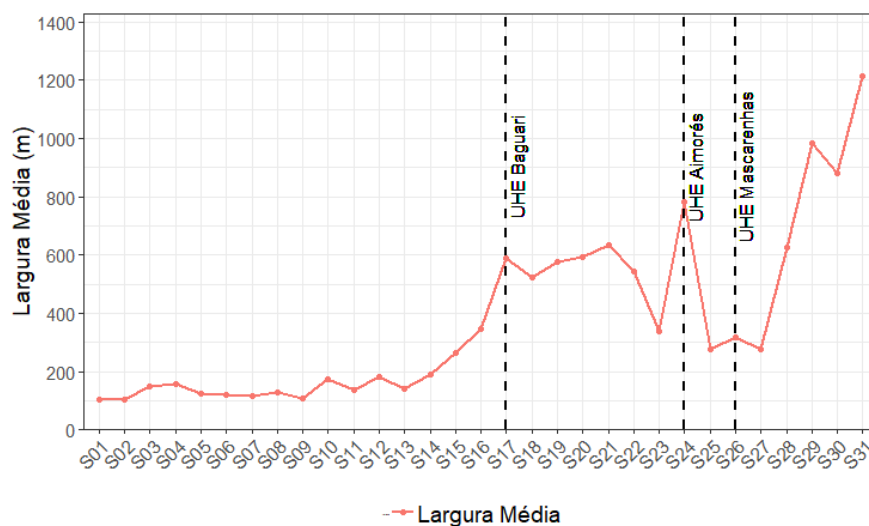
7.2.4 Largura e profundidade

A área de contribuição da bacia apresenta uma relação direta com a largura medida do rio Doce. A erosão e a deposição fluvial são dois processos que atuam na modificação da forma do canal, principalmente com o aumento gradativo do nível d'água na seção do rio, provocando um aumento da velocidade e das forças de cisalhamento. Isso possibilita que as forças erosivas remanejem o material sedimentar do leito, o que promove a erosão do canal. Ao contrário, uma diminuição gradativa do volume do fluxo na seção é provocada pelo acúmulo da carga detrítica vindo da área de montante. A deposição dessa carga consequentemente promove a elevação do nível do leito (Christofolletti, 1981).

No trecho estudado observa-se uma largura média inferior a 200 m para os segmentos 01 a 13. Destaca-se o aumento expressivo da largura do rio Doce após o segmento 13, sendo este um reflexo direto do aumento da área de contribuição da área de drenagem. As maiores larguras médias foram observadas nos segmentos mais a jusante, sendo observada a maior largura média no segmento 31, correspondente a foz do rio Doce. Durante todo o trajeto do rio Doce são observadas algumas variações em relação a largura média, estando essas relacionadas a alterações da

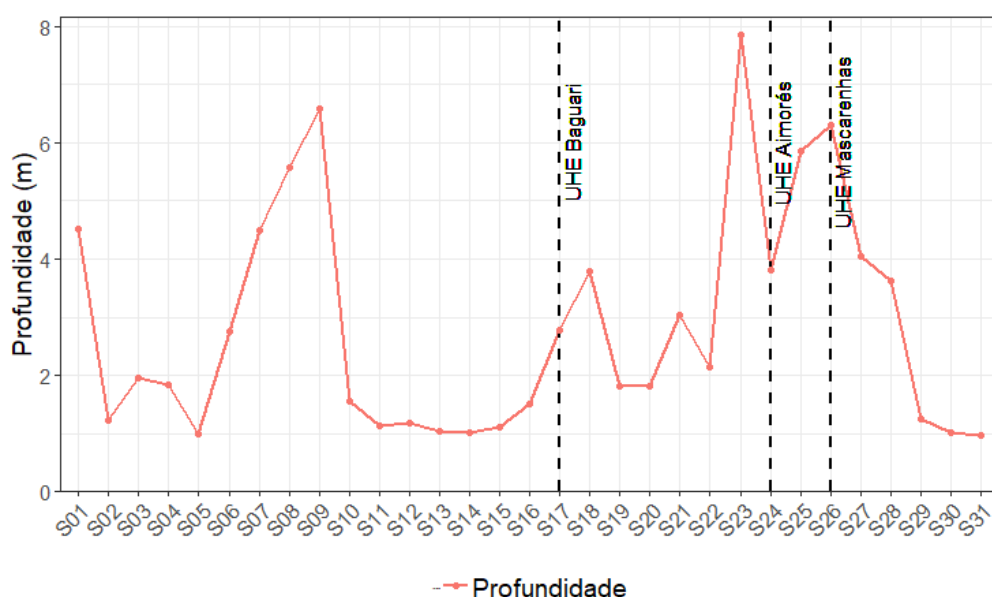
geomorfologia e a presença de barramentos das UHE's (Segmentos 17, 24 e 26). Os resultados são apresentados na **Figura 27**.

Figura 27 – Largura média do rio Doce nos segmentos avaliados



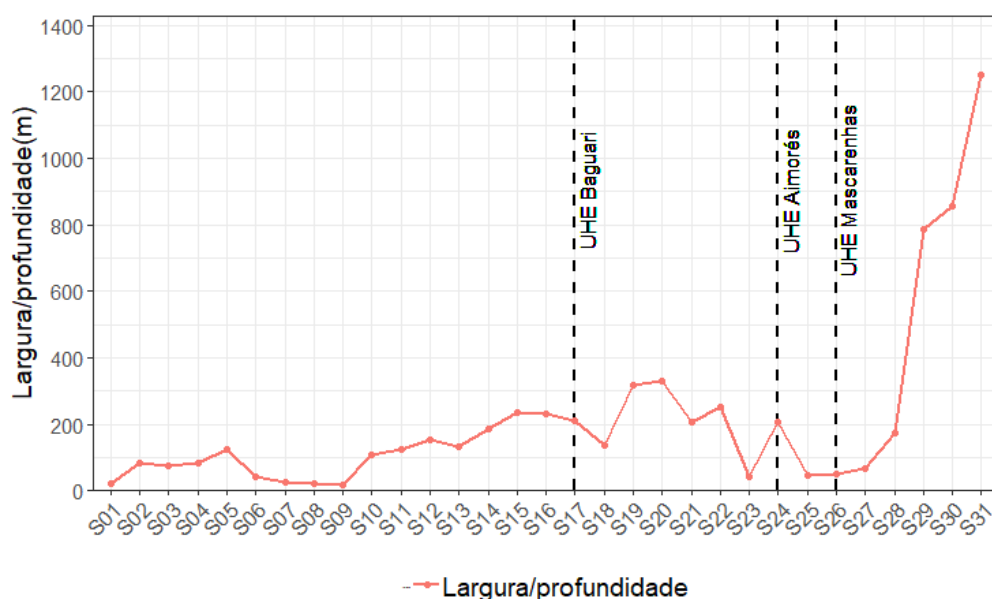
A profundidade média ao longo do rio Doce apresentou-se variável, com valores mais elevados ocorrendo nos segmentos 1, 7 a 9, 18 e 23 a 28. Destaca-se no segmento 23 o maior valor encontrado (7,84 m). Nesse segmento encontra-se no início do lago da UHE Aimorés. Os segmentos 29, 30 e 31, localizados na região da foz do rio Doce apresentaram valores de profundidade próximo a 1 m. Os resultados de largura e profundidade são apresentados na **Figura 27** e **Figura 28**.

Figura 28 – Profundidade média do rio Doce nos segmentos avaliados



A relação largura/profundidade (L/P) (**Figura 29**) apresenta uma variação nos primeiros segmentos devido principalmente a valores mais elevados de profundidade nesses segmentos (1, 6, 7, 8 e 9), uma vez que a largura média do rio Doce é semelhante entre os segmentos 1 e 14. Após o segmento 27, a relação L/P volta a crescer consideravelmente, provocada pelo aumento da área de drenagem da bacia, que por consequência aumenta a largura do rio Doce. Nesse cenário é constatada também a redução da profundidade média.

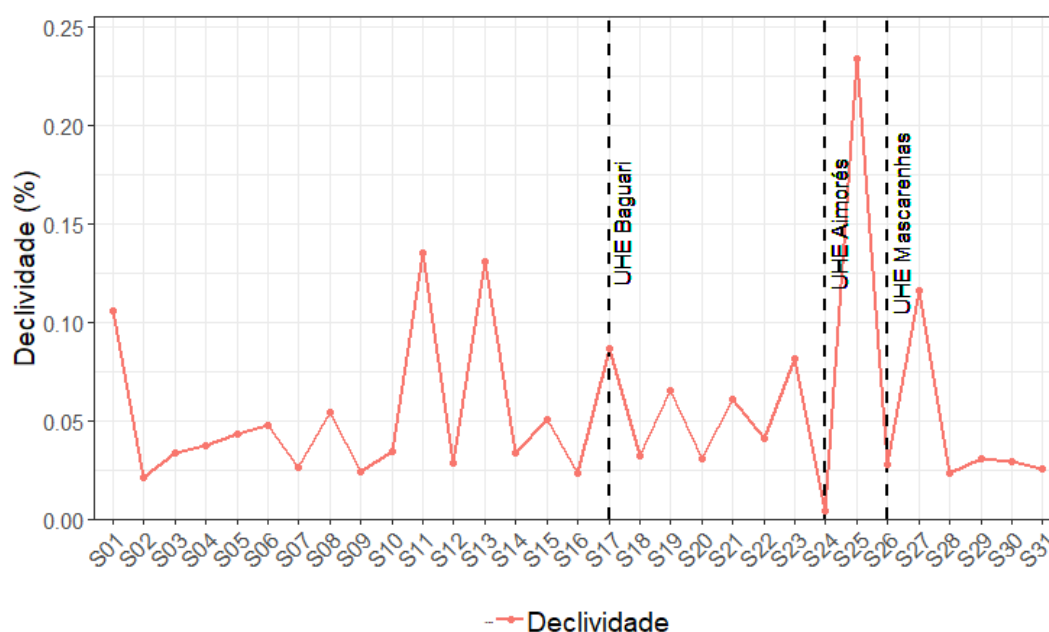
Figura 29 – Relação largura e profundidade nos segmentos avaliados



7.2.5 Declividade

A declividade de um rio é uma medida da sua inclinação, e é importante para compreender a dinâmica fluvial e a capacidade do rio de transportar sedimentos e água. De acordo com os resultados apresentados (**Figura 30**), foram encontrados valores gerais de declividade baixos ao longo de todo o rio Doce. No entanto, há exceções em alguns segmentos, como o primeiro, o décimo terceiro, o vigésimo quinto e o vigésimo sétimo, onde os valores de declividade atingem picos acima de 0,10%. O maior valor observado está localizado no segmento 25, entre o reservatório da Usina Hidrelétrica Aimorés e o reservatório da Usina Hidrelétrica Mascarenhas. Por outro lado, o trecho de menor declividade está localizado entre os segmentos 24 (UHE Aimorés) além dos trechos após a UHE Mascarenhas entre os segmentos 28 e 31.

Figura 30 – Declividade média nos segmentos estudados

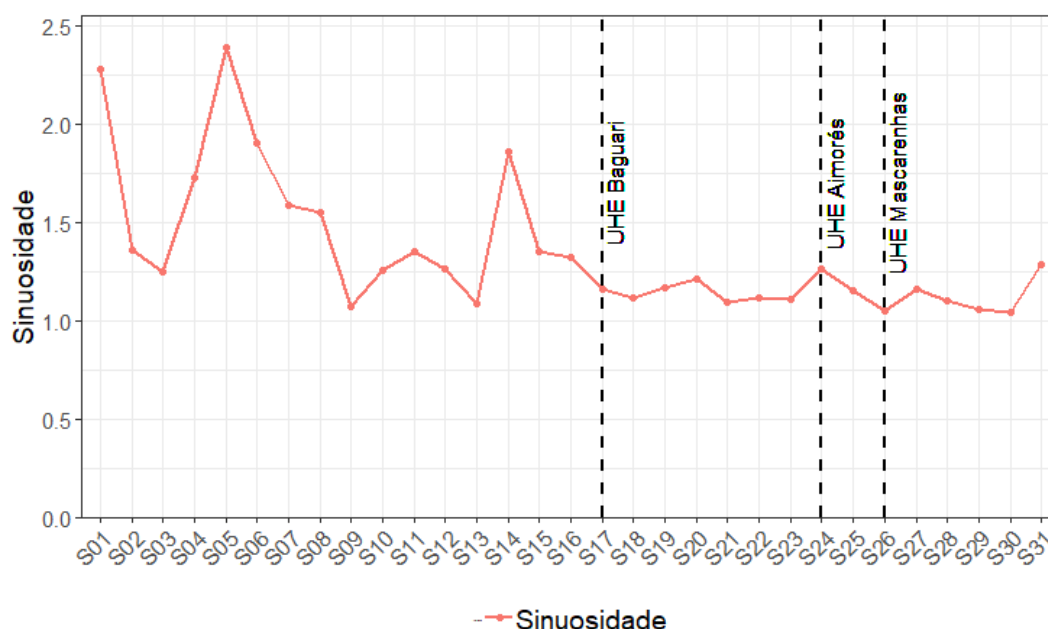


7.2.6 Índice de Sinuosidade

Conforme observado na **Figura 31**, o rio Doce no trecho estudado apresenta uma variação em relação a sinuosidade, sendo constatado valores mais elevados de sinuosidade ($>1,2$) do segmento 01 ao segmento 14, (exceção dos segmentos 09 e 13), apresentando nesse caminho um comportamento meandrante e sinuoso. Após o segmento 14, o rio Doce apresenta um padrão fluvial de multicanaís, cujos valores de sinuosidade estabilizam-se abaixo de 1,2. No trecho estudado os

valores mais elevados são constatados nos segmentos 01 e 05 e 06, sendo constatado no segmento 30 o valor mais baixo.

Figura 31 – Valores de sinuosidade ao longo dos trechos estudados



7.2.7 Material de fundo

Segundo Silva et al. (2008), a dimensão dos sedimentos no fundo dos canais indica a dinâmica das correntes. Além da fração dominante de sedimentos, há também uma fração subordinada de tamanho diferente. Canais com leito de cascalho, seixos pequenos e grandes geralmente possuem uma pequena quantidade de areia e areão, geralmente menos de 10%. Canais em áreas montanhosas podem ter blocos. A presença de partículas de tamanhos variados causa interações complexas durante processos de erosão, transporte e deposição. A diferença entre canais com leito de cascalho, areia e blocos depende não apenas do tamanho das partículas, mas também da topografia da área e da morfologia do canal. Canais com leito arenoso geralmente têm baixo gradiente e estão em vales amplos, enquanto os com leito de blocos têm canais inclinados em áreas montanhosas íngremes. Existem exceções. Canais com leito de cascalho são comuns em vales de montanha com declive moderado. Por outro lado, rios aluviais surgem quando a oferta de sedimentos é equivalente ou maior do que a capacidade de transporte. Benda (1990) também menciona que rios de cascalho podem se formar em trechos onde houve fluxo de detritos, sem precisar ter características fluviais.

Para cada segmento delimitado foi atribuída uma classe de material predominante do leito. Os resultados de granulometria demonstram um predomínio em quase todo o rio Doce das frações de areia em relação as frações silte e argila. Apenas o segmento 01, localizado após a UHEs Risoleta Neves, apresentou concentração média de cascalho acima de 30%. De acordo com Montgomery et al. (1996), rios com predominância de cascalho ocorrem em áreas onde a habilidade de transportar sedimentos é maior, apresentando trechos com vales encaixados e trechos sinuosos, com declividades mais elevadas, cuja energia de fluxo é maior que as demais. Tal observação indica que nesses setores o rio possui uma competência mais elevada quando comparada com os demais segmentos localizados a jusante.

Os resultados médios das diferentes frações granulométricas são apresentados na tabela **Tabela 13**. Os segmentos 03, 06, 09, 11, 13 e 23 não possuem informações acerca da constituição granulométrica dos sedimentos de fundo devido à inexistência de dados nas bases de dados consultadas.

Tabela 13 – Resultados médios das diferentes frações granulométricas presentes nos segmentos estudados

Nº	AREIA GROSSA + AREIA MUITO GROSSA ¹	AREIA MÉDIA ¹	AREIA FINA + AREIA MUITO FINA ¹	SILTE ¹	ARGILA ¹	CASCALHO ¹	SILTE + ARGILA ²	AREIA TOTAL ²	CLASSE TEXTURAL PREDOMINANTE ³
01	276,85	55,75	215,15	102,90	13,75	335,55	116,65	547,75	Areia
02	365,87	118,33	273,80	51,63	20,08	170,28	71,72	758,00	Areia
03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04	342,88	146,25	199,58	86,23	15,21	209,88	101,44	688,71	Areia
05	345,35	227,35	225,45	27,43	10,63	163,80	38,05	798,15	Areia
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	353,62	302,28	265,72	13,14	14,10	51,08	27,24	921,62	Areia
08	391,23	167,00	236,95	54,88	29,75	120,17	84,63	795,18	Areia
09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	431,31	176,04	244,06	16,98	18,67	112,92	35,65	851,42	Areia
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	387,30	326,93	230,60	9,33	35,83	10,03	45,17	944,83	Areia
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	422,43	209,57	235,98	12,49	8,50	111,05	20,99	867,98	Areia
15	409,19	240,03	246,27	39,62	21,60	43,29	61,22	895,49	Areia
16	429,62	269,80	235,21	12,67	17,67	35,03	30,34	934,63	Areia

Nº	AREIA GROSSA + AREIA MUITO GROSSA ¹	AREIA MÉDIA ¹	AREIA FINA + AREIA MUITO FINA ¹	SILTE ¹	ARGILA ¹	CASCALHO ¹	SILTE + ARGILA ²	AREIA TOTAL ²	CLASSE TEXTURAL PREDOMINANTE ³
17	158,62	86,46	150,19	409,45	179,80	15,48	589,25	395,27	Silte+Argila
18	285,10	47,20	374,30	8,90	26,50	258,00	35,40	706,60	Areia
19	302,53	183,50	246,32	134,38	59,83	73,43	194,22	732,35	Areia
20	423,65	314,95	178,55	38,90	9,92	34,05	48,82	917,15	Areia
21	388,87	155,13	283,17	54,67	7,83	110,33	62,50	827,17	Areia
22	433,66	232,21	238,56	22,31	8,78	64,52	31,09	904,43	Areia
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	183,27	129,40	158,51	263,20	242,30	23,30	505,51	471,18	Silte+Argila
25	415,59	173,49	259,06	38,89	78,33	34,64	117,22	848,14	Areia
26	299,80	146,89	298,98	94,02	101,60	58,71	195,63	745,67	Areia
27	675,45	273,55	20,91	3,36	26,73	0	30,09	969,91	Areia
28	704,29	240,29	33,93	10,21	11,29	0	21,50	978,50	Areia
29	588,79	240,47	112,60	25,05	32,72	0	57,77	941,85	Areia
30	614,25	296,75	57,83	22,92	7,75	0	30,67	968,83	Areia
31	649,50	256,23	60,41	21,14	11,55	0	32,69	966,14	Areia

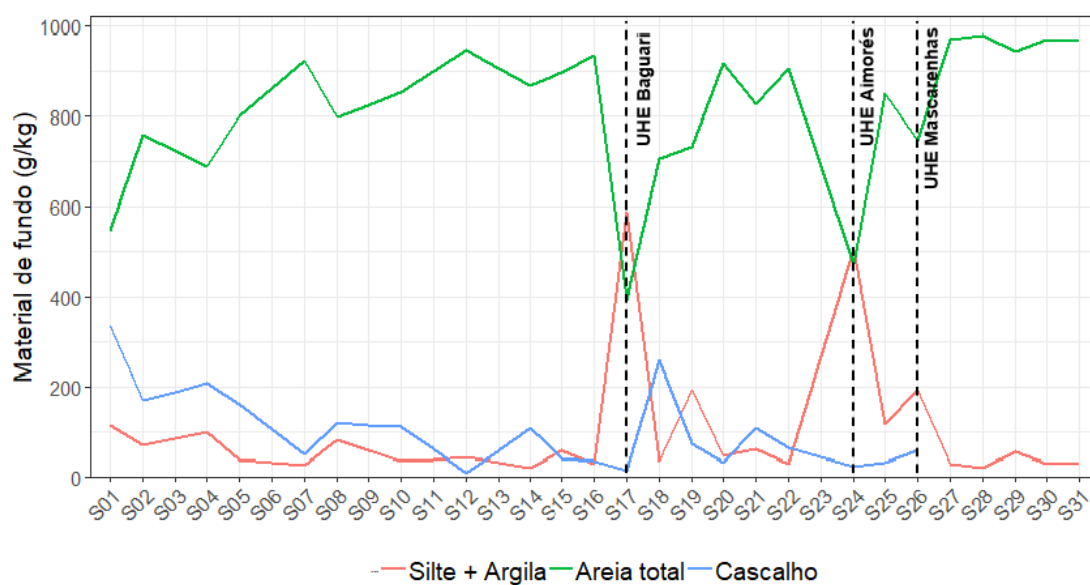
¹ Valores g/kg; ² Somatória de Silte + Argila e de todas as classes de areia (g/kg); ³ Predomínio do material considerando as classes cascalho, silte+argila e somatória das frações de areia; (-) sem dados.

Segundo Suguio (2003), o limite topográfico abaixo do qual uma drenagem é incapaz de causar erosão é chamado de nível de base, o qual representa o estado de equilíbrio do sistema fluvial, num dado momento, entre os processos de erosão e deposição. Portanto, qualquer modificação neste nível de base causa consequentemente o reajustamento dos processos no sistema fluvial. Assim, mudanças no nível do mar em decorrência de alterações climáticas resultam em variações nos pulsos de energia recebidos pelo sistema fluvial e, consequentemente, nos processos de erosão e deposição de sedimento em regiões próximas a foz dos rios. Suguio (2003) cita que o aumento no nível de base, que poderia ser causado pela construção de barragens ou aumento do nível do mar, causa redução da velocidade da água e consequentemente a redução da competência e capacidade do rio. Ou seja, há redução do tamanho máximo do material que pode ser removido e do volume de carga transportado.

Tal comportamento é observado nos segmentos 17 e 24. Nesses segmentos estão localizados os lagos das UHE de Baguari e UHE de Aimorés. A redução da velocidade do rio proporcionou a

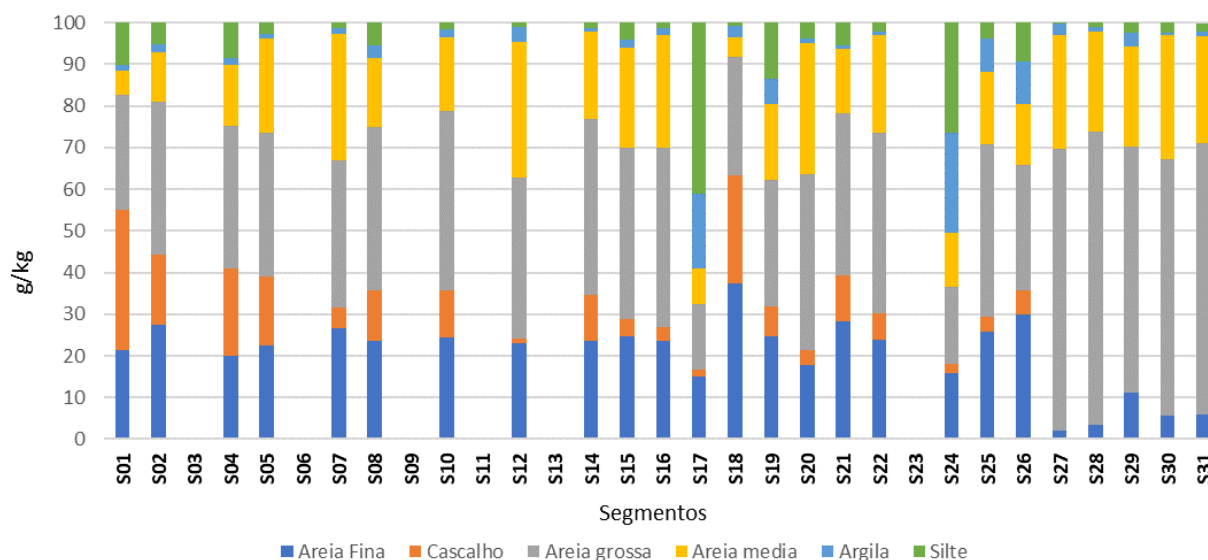
sedimentação de partículas mais finas, sendo observado nesses dois segmentos o predomínio de finos (Silte+Argila). Além desses dois segmentos, constatou-se concentração de finos próximo de 20% nos segmentos 19 e 26 (**Figura 32**).

Figura 32 – Granulometria de sedimentos ao longo dos segmentos avaliados no período entre 2019 e 2021.



Ao avaliar a concentração das 3 classes texturais compostas pelos menores tamanhos de grãos, observa-se um predomínio da fração silte nos segmentos 17 e 24. Nota-se que, a concentração de silte é mais expressiva no segmento 17, cujo valor médio é quase 2 vezes a concentração de argila. Observa-se também picos de aumento na concentração de areia muito fina, porém sem contribuição expressiva na granulometria total dos sedimentos avaliados. Nos demais segmentos são observados picos de aumento na concentração de finos, porém de forma equilibrada entre as 3 classes avaliadas.

Figura 33 – Concentração média de cascalho, areia fina, média e grossa, silte e argila nos segmentos avaliados. Segmentos em branco não possuem dados válidos



Ao avaliar as diferentes classes de areia presentes nos sedimentos de fundo, observa-se que a fração areia grossa apresentou-se com distribuição mais homogênea ao longo do Rio Doce com base nos dados avaliados. A exceção ocorre nos segmentos 17 e 24, cuja concentração de areia grossa reduz para aproximadamente 10%, assim como para as demais frações de areia. Conforme já descrito anteriormente, nesses segmentos estão localizados os lagos das UHE's Baguari e Aimorés, sendo apontado por Golder (2021) a presença de rejeitos nesses locais.

Apesar da presença de finos não ser predominante na composição do material de fundo, os segmentos 19 e 26 apresentam médias de concentração de silte e argila mais elevadas que nos demais trechos fluviais (i.e., fora dos reservatórios) avaliados, com concentrações médias próximas a 20%. No segmento 19, localizado na região de Governador Valadares, observa-se uma ocorrência de Ilhas fluviais, em maior quantidade e tamanho comparado a outros trechos fluviais, provocando a formação de múltiplos canais do rio Doce, com eventual redução da vazão do canal principal, aumento da proporção Largura/profundidade, reduzindo também a velocidade no trecho, o que pode ter contribuído com a presença de materiais mais finos nessa região. Já no segmento 26 a presença do barramento da UHE Mascarenhas contribui para o aumento de material fino, porém em menor proporção comparado aos demais reservatórios.

Ao avaliar a tendência da distribuição granulométrica em todos os segmentos, observa-se um aumento na concentração de areia grossa e média após o segmento 27, à medida que se aproxima da foz do Rio Doce, setores estes que apresentam as maiores vazões da bacia (seção 7.2.2). Já a concentração de areia fina apresenta uma tendência de redução na concentração nos sedimentos mais próximos a foz do rio Doce, influenciados pela presença de barramentos até o segmento 26 (UHE Mascarenhas). Após esse segmento não há represamentos, ocorrendo um aumento da velocidade do rio, com aumento expressivo da vazão do rio Doce, influenciando nos valores mais elevados de largura média do rio (Seção 7.2.4). Tal comportamento também foi constatado para as frações silte e argila.

O predomínio de areia grossa no trecho final do rio Doce também foi constatado por Fest (2019), cujos resultados apontaram que o sedimento de fundo é composto por areias, correspondendo a 92% das amostras coletadas, não indicando deposição significativa de sedimentos finos neste setor do rio Doce, mesmo em períodos de baixas vazões.

Apesar do predomínio de materiais finos apenas nos segmentos correspondentes aos reservatórios das UHE's, maiores concentrações de sedimentos finos em comparação com a média dos trechos fluviais (i.e., fora de reservatórios) podem eventualmente ocorrer em segmentos fluviais onde há uma redução da velocidade de escoamento, como trechos de em que há uma redução da declividade (sem alteração da largura) e onde há aumento da largura do rio (sem alteração da declividade).

Para investigar como se dá a dinâmica e transporte dos sedimentos a Fundação Renova elaborou o Estudo Hidrossedimentológico e de Balanço de Massa de Sedimentos nos Rios Afetados Pelo Rompimento da Barragem de Fundão (NHC e Rhama, 2023).

7.2.8 Padrão fluvial e Classificação de Rosgen (1994)

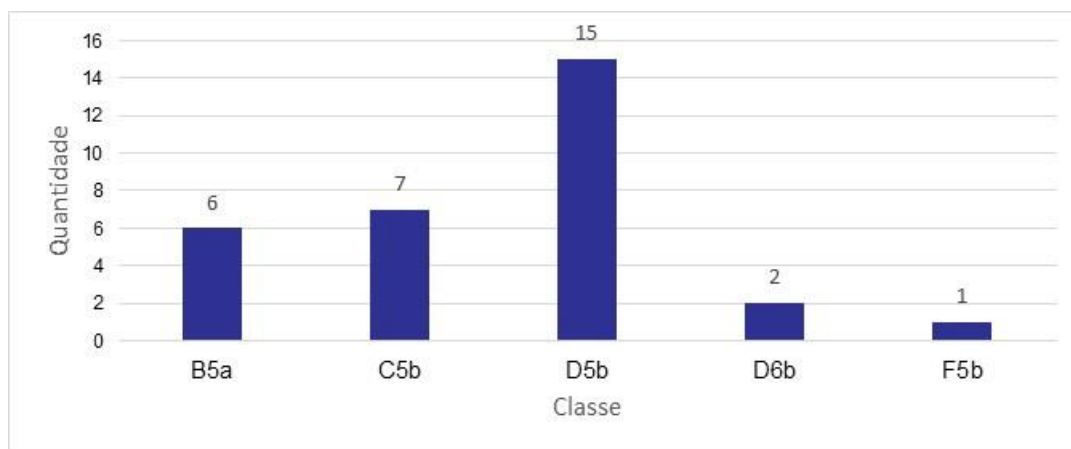
Neste trabalho foi aplicado o nível II da classificação por representar um instrumento útil para inventariar as condições morfológicas e sedimentológicas dos cursos fluviais de uma região.

Na área de estudo foram identificadas 4 classes de canais principais conforme a classificação de Rosgen (**Figura 14**). A região localizada mais a montante da área de estudo (segmentos 01 a

07), apresentou canais do tipo unicanal, das classes F, B e C, com valores de sinuosidade mais elevados nos segmentos 1, 4, e 5. O segmento 1 foi o segmento com as características mais distintas, com o menor grau de entrincheiramento, maior sinuosidade e maior declividade. Essas características podem ter contribuído para os maiores teores de cascalho encontrados nesse segmento, devido a maior competência do rio nessa região. Nos setores de montante também foram encontrados os menores valores da relação largura/profundidade. Nesses segmentos o rio Doce apresenta um comportamento meandrante e sinuoso. De acordo com Rosgen (1994), as principais características encontradas em corpos d'água classe F são canais com alto entrincheiramento, com relação largura/profundidade moderada. Canais do tipo B são canais moderadamente entrincheirados, com gradiente moderado, dominado por riffles e com poças pouco espaçadas, apresentando ainda bancos de sedimentos estáveis.

Ao se aproximar da região do Parque Estadual do Rio Doce (Segmento 11) o padrão fluvial tipo C apresenta-se mais presente. Nesta classe é observado um gradiente baixo, sinuoso, com presença de pontas de barras, com corredeiras e poças, apresentando canais aluviais com planícies de inundação amplas e bem definidas. Começam a ocorrer ilhas fluviais ao longo desses segmentos, porém o padrão fluvial é predominantemente unicanal.

No segmento 17 está localizada a UHE de Baguari. Nesse segmento ocorre uma alteração da morfologia fluvial para um padrão multicanal (classe D). Ocorre também a alteração do material de fundo, ocorrendo nesse segmento um predomínio de frações mais finas (silte e argila), tal como ocorreu no reservatório da UHE de Aimorés, localizada no segmento 24. Do segmento 15 ao segmento 31 o rio apresenta um padrão multicanal, sendo alterada por vezes a declividade ao longo do caminho. O padrão D é caracterizado por apresentar um padrão fluvial multicanal, apresentando baixa sinuosidade, com barras longitudinais e transversais, com canal largo e margens instáveis, com material predominante de fundo composto por areia. A variação entre D5 e D6 se dá devido ao predomínio do material de fundo, sendo segmentos da classe D6 composto por materiais finos (silte+argila).

Figura 34 – Número de segmentos por classe de Rosgen

A **Figura 34** apresenta um resumo da frequência de ocorrência das distintas classes no rio Doce. A **Tabela 14** e a **Tabela 15** e apresentam a ocorrências de classes por trechos. Observa-se um predomínio de padrão fluvial tipo F, B e tipo C no trecho 13. Já nos trechos 14, 15 e 16 ocorre o predomínio de canais fluviais com padrão tipo D.

Tabela 14 – Quantidade de segmentos por classes e por trecho.

TRECHO	B5A	C5B	D5B	D6B	F5B	TOTAL GERAL
Trecho 13	6	7	2	1	1	17
Trecho 14	0	0	8	1	0	9
Trecho 15	0	0	3	0	0	3
Trecho 16	0	0	2	0	0	2
Total Geral	6	7	15	2	1	31

Tabela 15 – Porcentagem de ocorrência das classes considerando a totalidade dos trechos.

TRECHO	B5A	C5B	D5B	D6B	F5B	TOTAL GERAL
Trecho 13	8,79%	16,28%	10,61%	4,08%	0,81%	40,57%
Trecho 14	0,00%	0,00%	27,86%	5,56%	0,00%	33,42%
Trecho 15	0,00%	0,00%	19,81%	0,00%	0,00%	19,81%
Trecho 16	0,00%	0,00%	6,20%	0,00%	0,00%	6,20%
Total Geral	8,79%	16,28%	64,48%	9,64%	0,81%	100,00

Nota: Percentuais relacionados à extensão total de cada trecho

Os dados apresentados mostram a variabilidade de segmentos classificados de acordo com a metodologia de Rosgen (1994). É possível observar que o trecho 13 é a região com maior diversidade de classes, com predomínio das classes com padrão unicanal, com entrincheiramento

forte a moderado (F5b, B5b e C5b). No final do trecho 13 o rio Doce começa a apresentar o predomínio dos padrões multicanais, influenciados principalmente pela ocorrência em mais expressão de ilhas e barras fluviais, além de afloramentos rochosos. Tal comportamento resultou no predomínio das classes D5b e D6b nos trechos 14, 15 e 16.

Em resumo, os resultados indicam que a distribuição das classes fluviais varia significativamente entre os trechos avaliados, o que pode ser indicativo de diferenças no tipo de curso de água, no regime de fluxo e na presença de obstáculos e características geomorfológicas. Esses dados podem ser importantes para a compreensão da dinâmica dos rios e ajudar na elaboração de estratégias de gestão dos recursos hídricos.

Na **Tabela 16** são elencados os dados de localização, a área de drenagem total da bacia à montante do trecho estudado e o respectivo aumento dessa área por segmento (Contribuição do Segmento), além dos dados necessários para a aplicação da classificação no nível II (grau de entrincheiramento (E), relação largura/profundidade (L/P), índice de sinuosidade (S), declividade da lâmina d'água (D), tipo de material de fundo) e, finalmente a classificação dos trechos estudados. As figuras **Figura 35** à **Figura 43** apresentam a distribuição dessas variáveis por segmento em função da distância da barragem de Candonga, juntamente com a classificação de Rosgen.

Tabela 16 – Aplicação do sistema de classificação de Rosgen (Nível II) nos segmentos do Rio Doce. Comp= Comprimento do segmento, E=grau de entrenchamento, L e P= largura e profundidade do canal medida em nível de margens plenas, IS=índice de sinuosidade, D=declividade da lâmina d'água.

Nº	TRECHO PMR	PONTO DE REFERÊNCIA	ÁREA DE DRENAGEM (KM²)	CONTRIBUIÇÃO DO SEGMENTO (KM²)	COMP. (M)	E	L	P	L/P	D	IS	CLASSE (IS)	MATERIAL DE FUNDO	CLASSE ROSGEN (1994)
01	T13	Primeiro segmento a Jusante da UHE Risoleta Neves	9007,55	352,00	4513	1,21	105,87	4,52	23,42	0,11	2,28	Meandrante	Areia	F5b
02	T13		9359,55	102,29	8043	1,62	104,70	1,24	84,70	0,02	1,36	Meandrante	Areia	B5a
03	T13		9461,84	51,33	7472	3,63	149,95	1,96	76,44	0,03	1,25	Meandrante	Areia	C5b
04	T13		9513,17	277,85	5699	7,02	156,18	1,84	84,79	0,04	1,72	Sinuoso	Areia	C5b
05	T13		9791,03	97,29	11087	2,57	124,43	1,00	124,43	0,04	2,39	Sinuoso	Areia	C5b
06	T13		9888,32	16,98	6716	5,02	118,85	2,75	43,19	0,05	1,90	Sinuoso	Areia	C5b
07	T13		9905,30	160,35	9188	2,17	118,11	4,50	26,22	0,03	1,59	Meandrante	Areia	B5a
08	T13		10065,66	2532,93	7575	2,73	130,36	5,57	23,41	0,05	1,55	Sinuoso	Areia	C5b
09	T13		12598,59	10,07	2914	1,86	107,66	6,58	16,37	0,02	1,07	Meandrante	Areia	B5a
10	T13		12608,66	3251,32	30649	3,38	172,54	1,56	110,36	0,03	1,25	Sinuoso	Areia	C5b
11	T13	Início do Parque Estadual do Rio Doce	15859,98	1050,50	10011	1,71	138,56	1,13	122,83	0,13	1,35	Sinuoso	Areia	B5a
12	T13		16910,48	390,66	13332	2,17	182,29	1,18	154,70	0,03	1,26	Sinuoso	Areia	B5a
13	T13		17301,14	18,81	5629	1,70	141,01	1,05	134,30	0,13	1,09	Sinuoso	Areia	B5a
14	T13	Final do Parque Estadual do Rio Doce	17319,95	6244,32	21736	2,26	188,54	1,01	185,90	0,03	1,86	Sinuoso	Areia	C5b
15	T13		23564,27	669,14	30418	2,17	262,93	1,11	237,26	0,05	1,35	Sinuoso	Areia	D5b
16	T13	Afluência com o rio Santo Antônio	24233,41	10768,86	28850	2,37	346,18	1,51	229,56	0,02	1,32	Sinuoso	Areia	D5b
17	T13	UHE Baguari	35002,27	3341,44	22767	1,75	588,15	2,78	211,93	0,09	1,16	Sinuoso	Silte + Argila	D6b
18	T14		38343,71	150,56	8556	1,90	521,85	3,79	137,81	0,03	1,12	Sinuoso	Areia	D5b
19	T14	Governador Valadares	38494,27	2435,86	38255	1,74	575,74	1,82	316,86	0,07	1,17	Sinuoso	Areia	D5b
20	T14		40930,13	14194,44	23528	2,35	594,44	1,81	328,17	0,03	1,21	Sinuoso	Areia	D5b
21	T14		55124,57	1082,37	12107	1,67	634,61	3,04	208,63	0,06	1,10	Sinuoso	Areia	D5b
22	T14		56206,94	3163,32	24668	1,83	542,69	2,15	252,86	0,04	1,12	Sinuoso	Areia	D5b
23	T14		59370,26	1845,88	25955	1,30	337,53	7,85	43,00	0,08	1,11	Sinuoso	Areia	D5b
24	T14	UHE Aimorés	61216,14	1232,33	31070	1,14	783,80	3,81	205,89	0,005	1,26	Sinuoso	Silte + Argila	D6b
25	T14		62448,47	8990,75	11619	7,00	275,00	5,86	46,89	0,23	1,16	Retilíneo	Areia	D5b
26	T14	UHE Mascarenhas	71439,22	2363,45	10895	1,27	318,90	6,30	50,58	0,03	1,05	Retilíneo	Areia	D5b
27	T15		73802,66	816,24	21472	1,30	278,36	4,05	68,66	0,12	1,16	Sinuoso	Areia	D5b
28	T15		74618,90	4023,97	44033	1,26	627,11	3,63	172,96	0,02	1,10	Sinuoso	Areia	D5b
29	T15		78642,88	3590,77	45125	1,20	982,99	1,25	785,40	0,03	1,06	Sinuoso	Areia	D5b
30	T16		82233,65	120,11	19994	1,34	880,46	1,03	855,13	0,03	1,05	Retilíneo	Areia	D5b
31	T16	Foz do Rio Doce	82353,76		14627	1,65	1212,96	0,97	1250,48	0,03	1,28	Sinuoso	Areia	D5b

Figura 35 – Área de drenagem ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

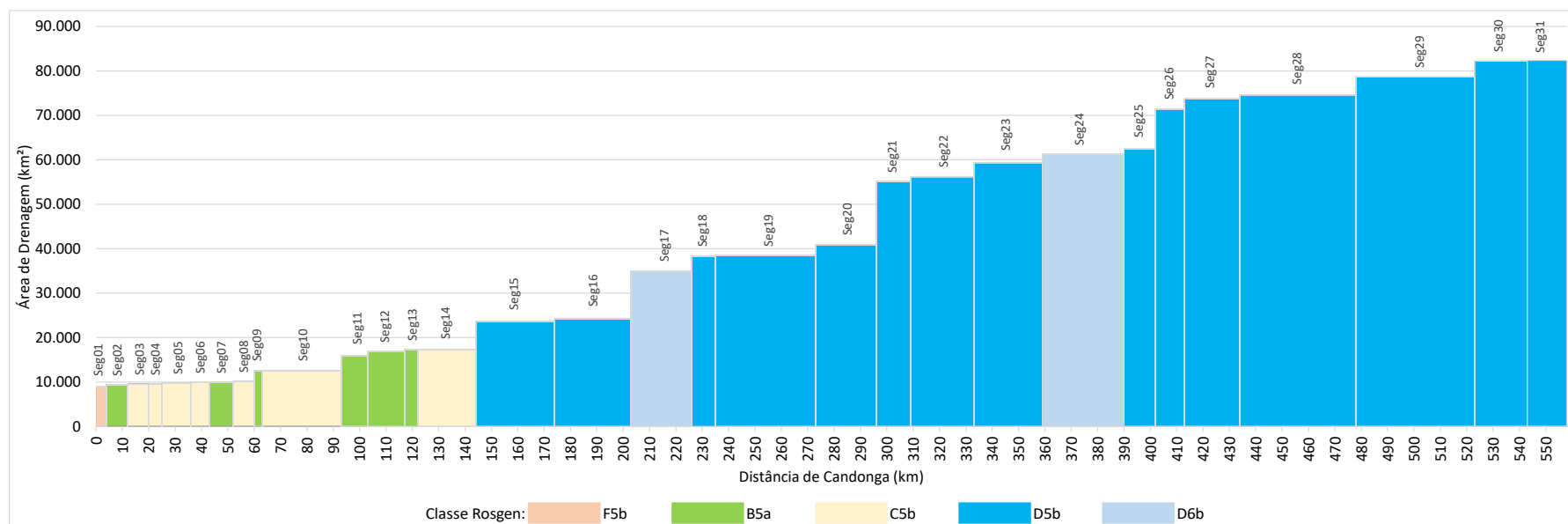


Figura 36 – Grau de entrincheiramento ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

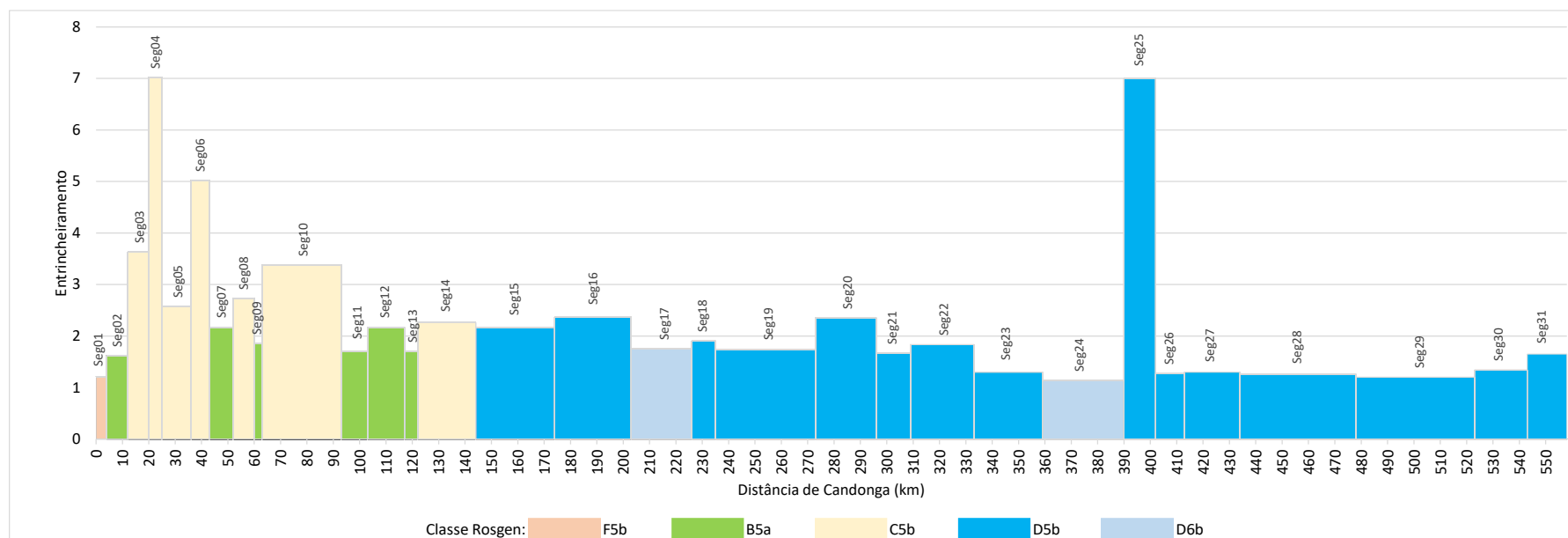


Figura 37 – Largura média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

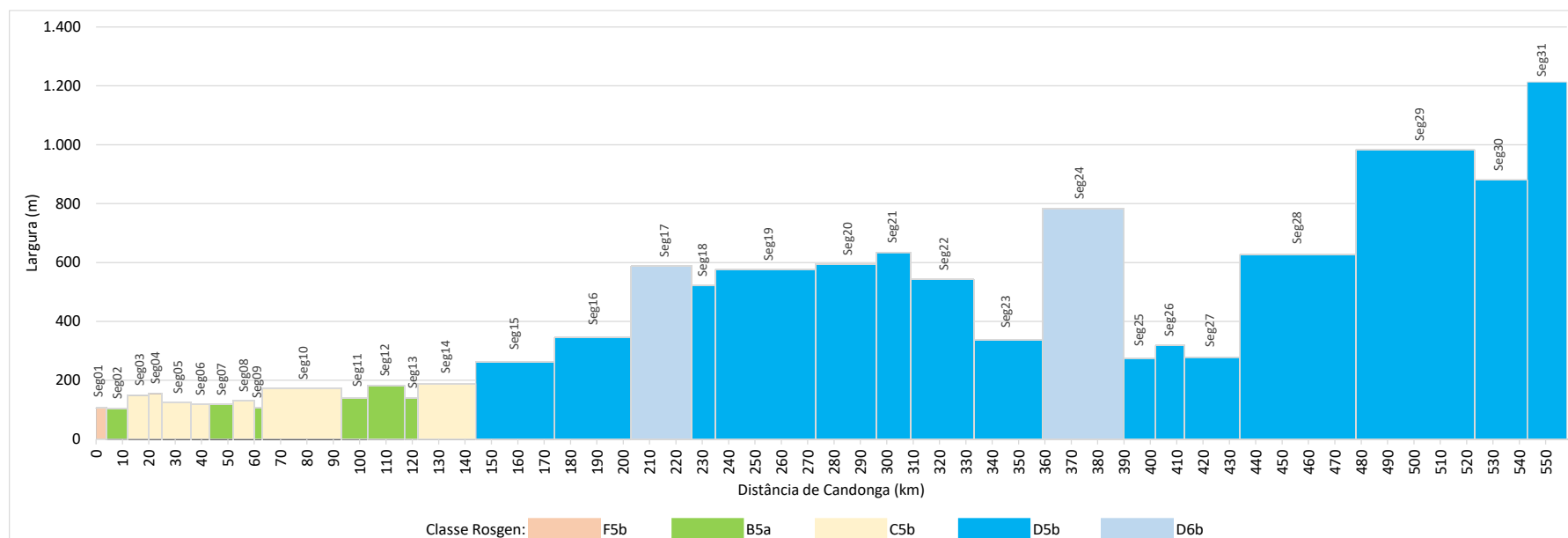


Figura 38 – Profundidade média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

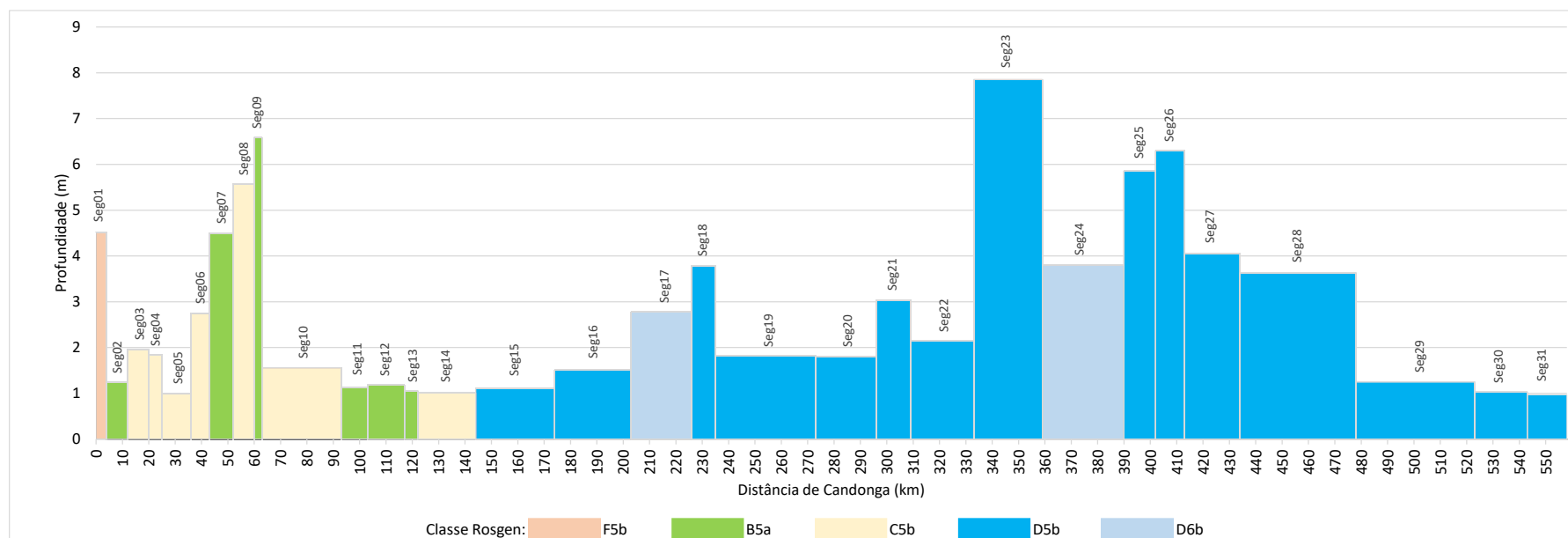


Figura 39 – Relação entre largura e profundidade ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

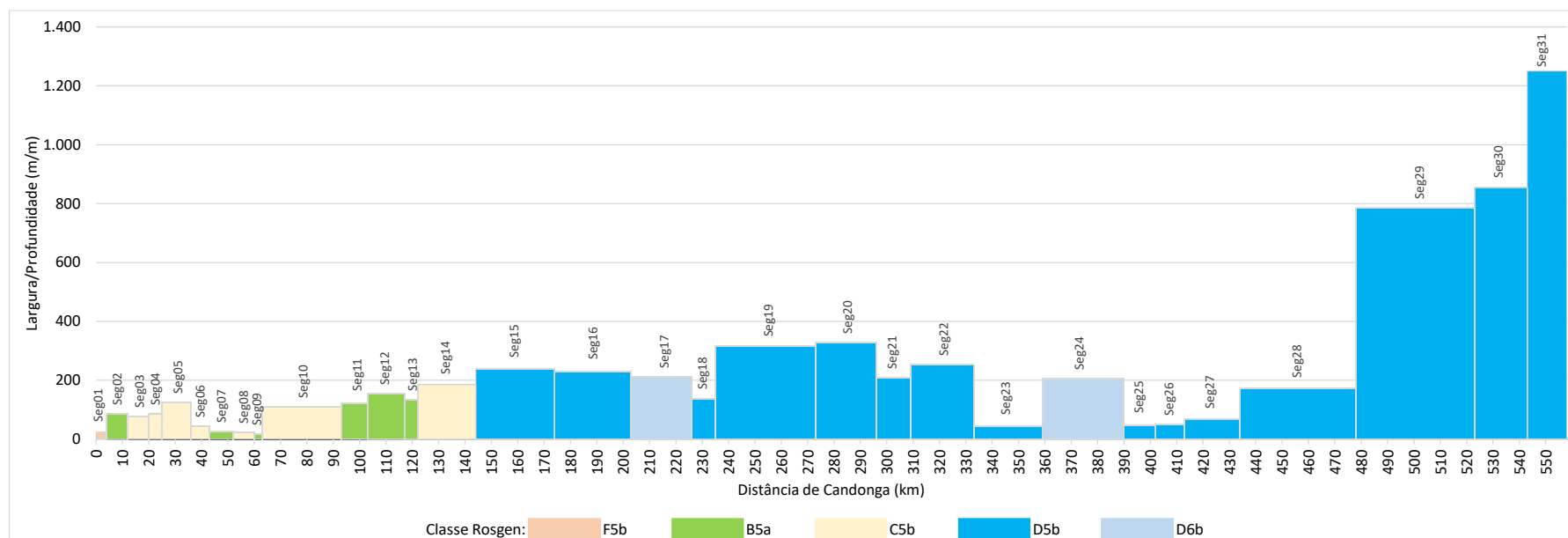


Figura 40 – Declividade média ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

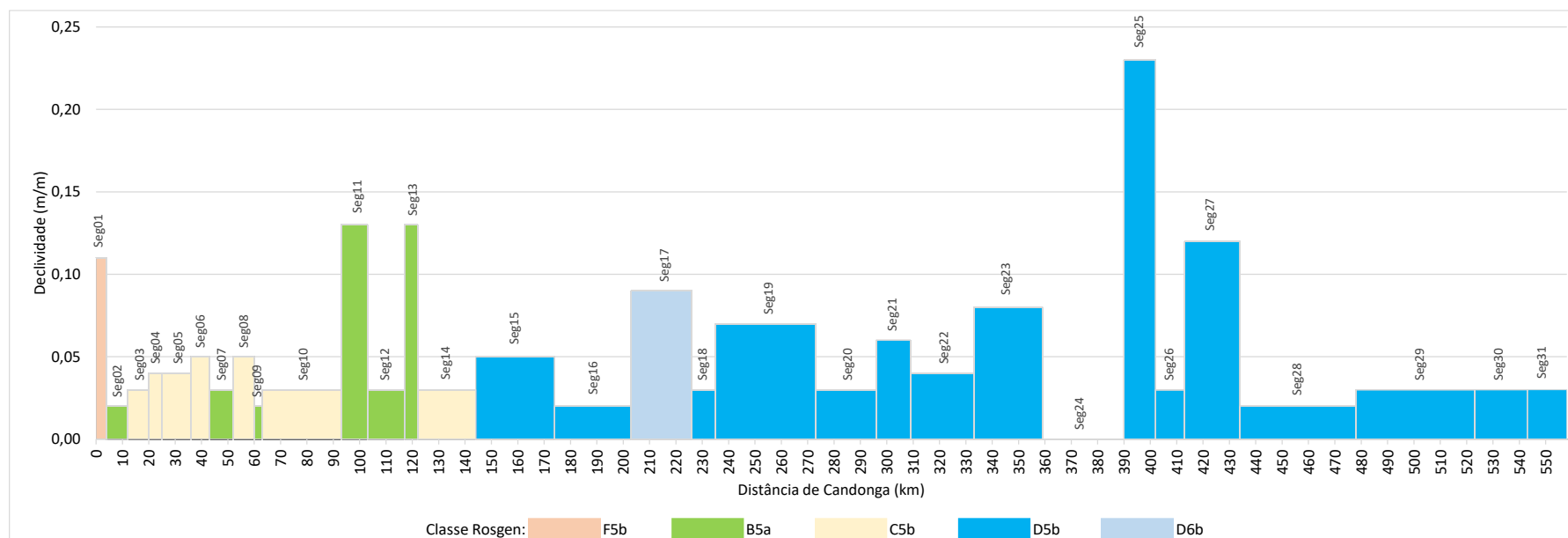


Figura 41 – Valores de sinuosidade ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga

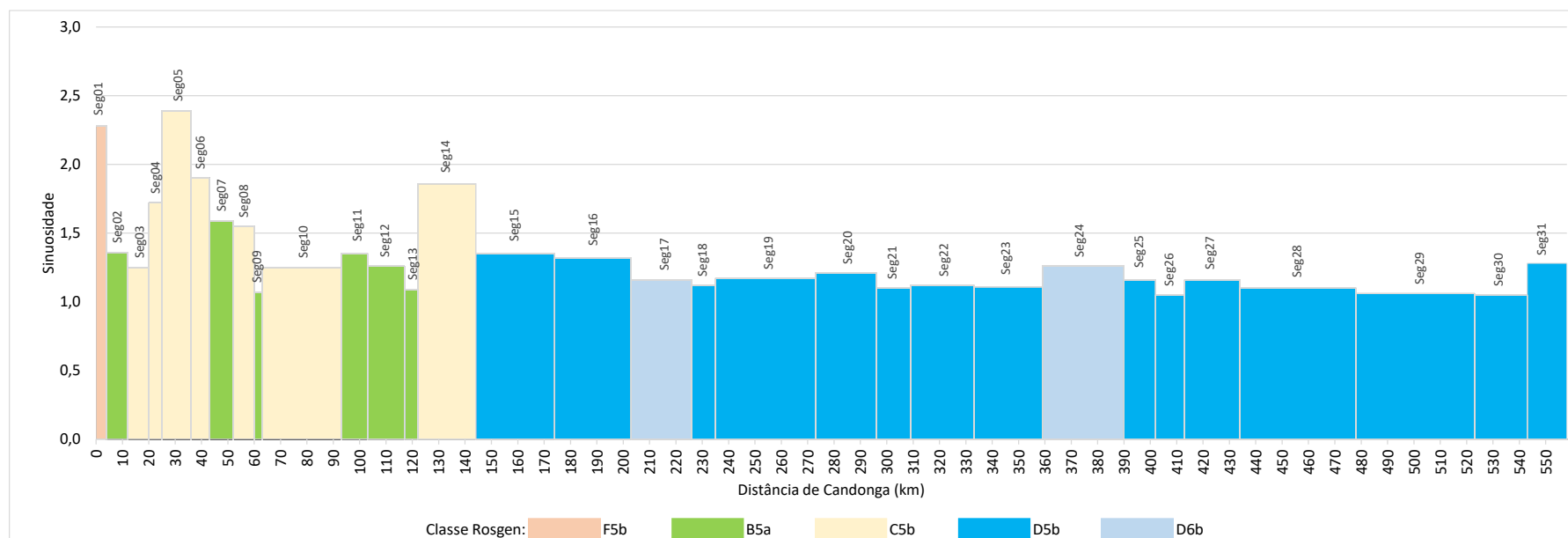


Figura 42 – Concentração de areia total nos sedimentos do leito ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga (nota: alguns segmentos não tinham dados disponíveis)

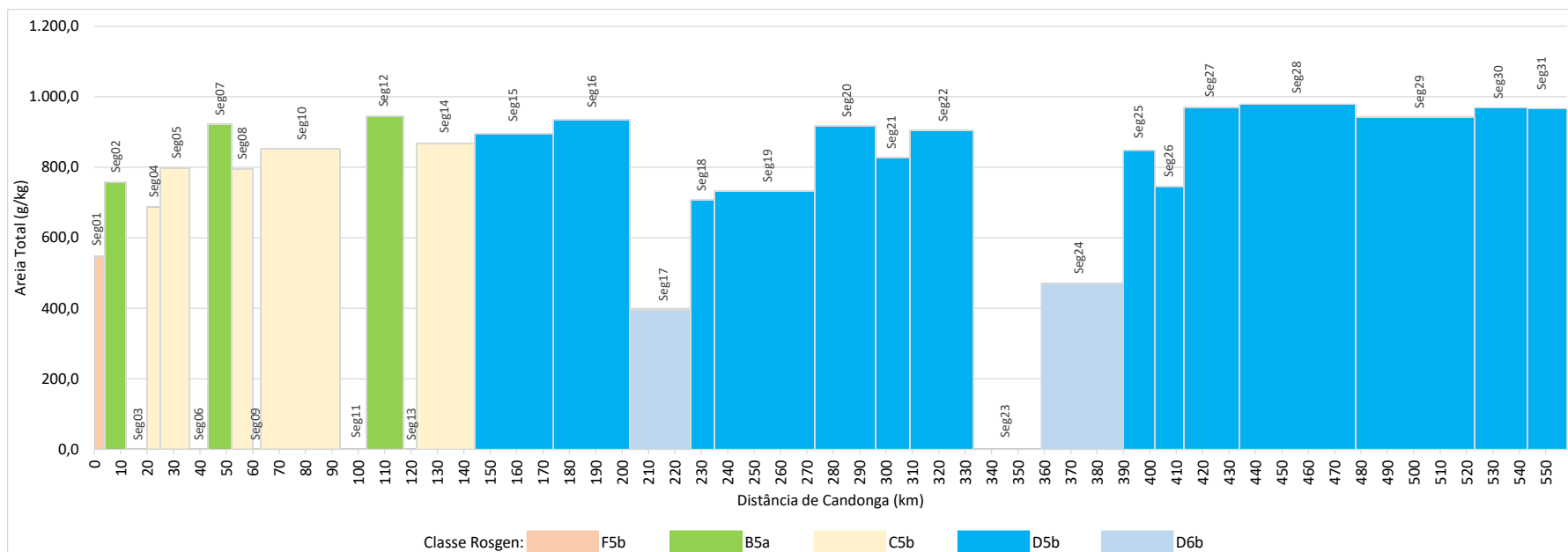
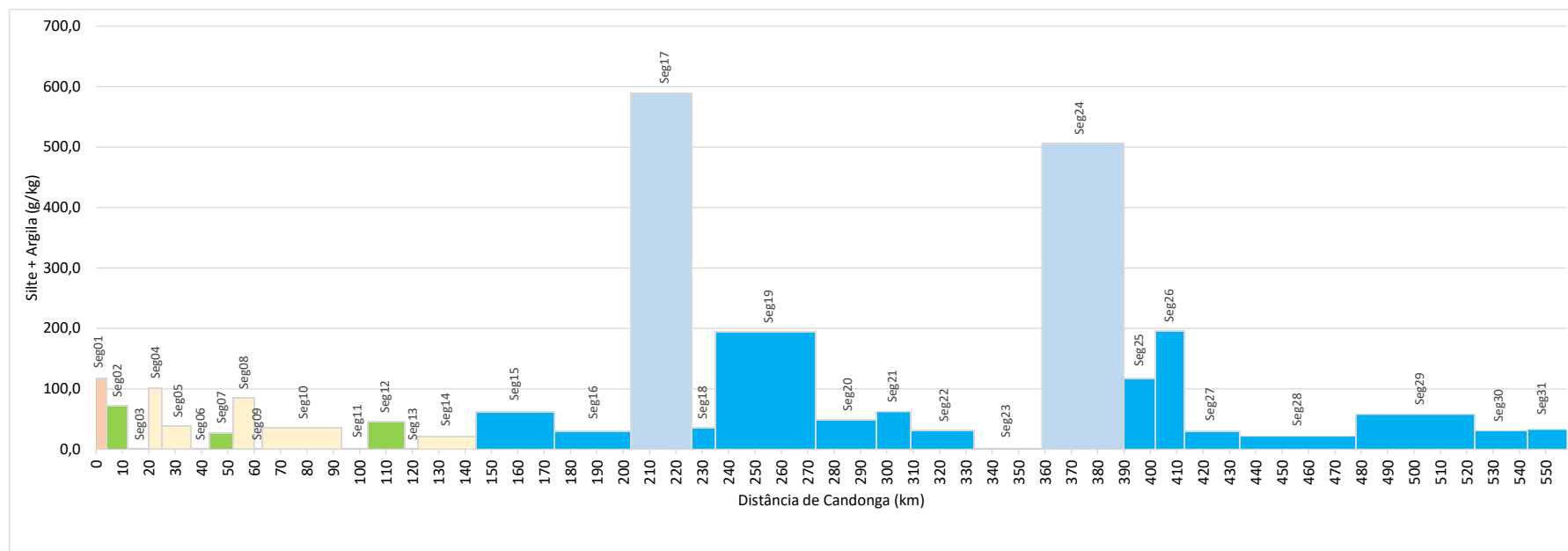


Figura 43 – Concentração de silte + argila nos sedimentos do leito ao longo dos segmentos avaliados e classificação de Rosgen em função da distância da barragem de Candonga (nota: alguns segmentos não tinham dados disponíveis)



7.3 Resultados do ajuste do modelo de classificação de imagens

Para a avaliação do resultado do processo de classificação de imagens foi utilizada a matriz confusão considerando as seis classes pré-determinadas. A partir dessa matriz foram extraídas a informação em relação ao erro do treinamento (**Tabela 17**), além do erro na validação externa (**Tabela 18**). Como exemplo de resultado obtido para os conjuntos de treinamento é exibida na **Figura 33** a respectiva matriz confusão. Na **Figura 34** é apresentada a matriz confusão para o conjunto de validação externa. Os resultados discutidos a seguir são referentes ao conjunto de imagens do ano de 2014, para fuso 24 (F24) e na resolução espacial de 0,5m.

A avaliação dos acertos da matriz confusão é feita analisando a diagonal principal, identificando-se o número de acertos referente a cada classe. Os valores acima de 0 localizados fora da diagonal principal representam os erros relativos às trocas de classes. Para o caso da matriz confusão apresentada na **Figura 33**, a classe com maior erro durante o processo de treinamento do algoritmo foi a 5 (Afloramento Rochoso). Neste caso a maior confusão foi com a classe 3 (Banco arenoso emerso), demonstrando que a resposta espectral dessas duas classes apresenta certa semelhança, sendo uma fonte potencial de erros durante o processo de classificação de imagens. Nesse sentido, durante o processo de coleta de treinamento, outros atributos da imagem como a textura do objeto foram considerados ao se realizar a coleta de amostras, de forma que a coleta de amostras fosse realizada em locais na imagem cujas características visuais da respectiva classe estivessem melhor representadas, permitindo reduzir os erros nas etapas posteriores.

Já a classe 4 (Ilha fluvial) apresentou o menor erro durante o processo de classificação. Isso se deve principalmente à presença de vegetação, cuja resposta espectral se difere com mais nitidez das demais classes. Contribuiu também a utilização da variável preditora NDVI no processo de classificação.

A classe 1 (Água) por sua vez apresentou a segunda melhor performance no processo de treinamento do algoritmo. Semelhante ao ocorrido para a classe 4 (Ilha Fluvial), a classe de Água apresenta uma resposta espectral destacada das demais, sendo explorada tal característica com maior potencial através da utilização do índice NDWI. Nesse sentido a utilização dessa variável preditora possibilitou uma maior assertividade da classe Água no produto final, visto que as classes não-água apresentam os menores valores de NDWI. Fato esse que foi constatado que o maior erro

se deu com a classe 2 (Banco submerso), cuja resposta da classe é uma mistura entre Água e Banco arenoso emerso.

Figura 44 – Matriz confusão para conjunto de treinamento do modelo

OOB estimate of error rate: 6.28%

Confusion matrix:

	1	2	3	4	5	class.error
1	385	15	0	1	0	0.03990025
2	16	244	4	1	2	0.08614232
3	0	5	279	0	7	0.04123711
4	0	0	0	88	1	0.01123596
5	0	4	12	1	34	0.33333333

Na **Figura 45** é apresentada a matriz confusão do conjunto de validação externo. Este conjunto é composto por amostras que não entraram no processo de treinamento do modelo. Os resultados demonstram o mesmo comportamento observado para o conjunto de treinamento, sendo o maior percentual de erro entre as classes 3 (Banco arenoso emerso) e 5 (Afloramento rochoso), e o maior índice de acerto para a classe 4 (Ilha fluvial).

Figura 45 – Matriz confusão para conjunto de validação externa do modelo

Confusion Matrix and Statistics

Prediction	Reference				
	1	2	3	4	5
1	129	6	0	0	0
2	4	82	1	0	0
3	0	0	93	0	6
4	0	0	0	28	0
5	0	1	2	1	11

Na **Tabela 17** são apresentados os erros globais relativos ao processo de treinamento do modelo de classificação. Ao avaliar todos os conjuntos de dados observa-se que os menores erros foram nos conjuntos de 0,75m (2020-F24), 0,80m (2021-F23), 2,0m (2020-F23). As menores taxas de erro nesses conjuntos se devem principalmente ao fato que essas imagens foram utilizadas apenas como complemento de alguns pedaços do mosaico, resultando em uma maior densidade amostral em uma região com respostas espectrais mais homogêneas. Ao avaliar uma grande extensão territorial é natural que a taxa de densidade amostral se reduza, ocorrendo menores taxas de acerto do algoritmo preditor. Ao avaliar os conjuntos de 0,5 m, para todos os anos e fusos, observa-se que a menor taxa de erro para conjunto de treinamento foi para o conjunto do ano de

2021 no fuso 24 (4,51). Já a maior taxa de erro foi constatada para o conjunto de 2017 no fuso 24 (13,3%).

Os bons resultados alcançados na etapa de treinamento do modelo foram fundamentais para os valores elevados do índice Kappa (**Tabela 18**). Considerando apenas os conjuntos de imagens com a resolução de 0,5m, observa-se que o menor e maior valor de índice Kappa está relacionado ao menor e maior valor de assertividade no processo de treinamento, respectivamente. No geral todos os valores do índice Kappa para as imagens de 0,5m apresentaram-se acima de 0,81, sendo classificado como de Muito Boa a concordância. A única exceção se deu para o conjunto de imagens da resolução de 2,0m do ano de 2021 fuso 23, que apresentou valor abaixo de 0,81, sendo classificado como de boa concordância (de Ullibbarri & Pita Fernandez, 1999).

Tabela 17 – Resultados do treinamento do modelo. Valores correspondentes ao erro total do treinamento considerando todas as seis classes. Valores em %.

RESOLUÇÃO	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022	
	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24
0,5 m			6,28	7,78	7,71	9,5	7,53	5,25	13,3	8,39	4,34	6,29	10,67	7,93	5,02	4,77	4,85	4,51	5,59	9,98
0,75 m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-
0,8 m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,85	-	-	-
1,5 m			6,75	9,12	4,64	6,39	1,62	6,56	4,17	-	-	4,37	-	-	-	-	-	-	3,33	5,02
2 m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27	-	0,22	3,9	13,39	0,29	2,09	3,76
3 m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,39	-	-	-	-	-	-	-
5,0 m			-	-	-	2,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,0 m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

F23: Imagens do fuso 23. F24: imagens do fuso 24

Tabela 18 – Resultados do índice Kappa realizados a partir dos dados de validação externa

RESOLUÇÃO	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022	
	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24	F23	F24
0,5m			0,92	0,88	0,87	0,86	0,91	0,94	0,85	0,88	0,93	0,9	0,85	0,89	0,93	0,93	0,92	0,94	0,9	0,86
0,75m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
0,8m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99	-	-	-
1,5m			0,93	0,91	0,93	0,91	0,97	0,92	-	-	-	0,94	-	-	-	-	-	-	0,88	0,94
2m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98	-	0,99	0,96	0,79	0,99	1	0,94
3m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,97	-	-	-	-	-	-	-
5,0m			-	-	-	0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,0m			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

F23: Imagens do fuso 23. F24: imagens do fuso 24

7.4 Classificação de Feições Geomorfológicas

A classificação das feições geomorfológicas dos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves seguiu a metodologia descrita na **Seção 6.3**. A partir das imagens de satélite, para cada um dos 31 segmentos do rio Doce delimitados após a caracterização geomorfológica (**Seção 7.2.1**) obteve-se a área ocupada pelas feições “banco submerso”, “banco emerso”, “ilha”, “rocha”, “água”, “margem” e “nuvem” em cada ano de análise. Ressalta-se que “água” e “nuvem” não correspondem a feições geomorfológicas de fato, mas suas áreas foram reportadas para fins de comparação dos resultados ao longo do tempo, visto que a presença de água e nuvens pode ocultar as feições. A contabilização dessas variáveis auxiliou na avaliação das variações das áreas das feições geomorfológicas mapeadas observadas ao longo do período avaliado.

A **Tabela 19** apresenta a área ocupada, em km², por cada feição nos segmentos para cada ano analisado. Na figura articulada do **Apêndice 03** apresenta graficamente o resultado da classificação das feições geomorfológicas em formato de mapa. A **Figura 46** exemplifica o formato de apresentação desse resultado. Considerando toda a extensão do rio, foi identificado, em média, predomínio da feição “água”, seguido das feições “ilha”, “banco submerso”, “banco emerso”, “margem”, “rocha” e “nuvem”, com variações temporais e espaciais, conforme será avaliado na próxima seção.

Tabela 19 – Resultados da classificação das feições geomorfológicas a partir das imagens de satélite entre os anos de 2013 e 2022 em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.

Trecho	Segmento	Classe	Área (km ²)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T13	Seg01	Água	0,336	0,269	0,240	0,330	0,254	0,250	0,232	0,251	0,272	0,309
T13	Seg01	Banco submerso	0,015	0,020	0,021	-	0,004	0,011	0,004	0,018	0,003	-
T13	Seg01	Banco emerso	0,000	0,019	0,032	0,019	0,020	0,043	0,030	0,023	0,010	0,012
T13	Seg01	Ilha	-	-	-	0,001	-	-	-	-	-	-
T13	Seg01	Rocha	0,004	0,033	0,005	0,015	0,014	0,024	0,036	0,014	0,040	0,020
T13	Seg01	Margem	0,115	0,131	0,173	0,106	0,135	0,144	0,168	0,164	0,127	0,128
T13	Seg01	Nuvem	-	-	-	-	0,044	0,000	-	-	0,017	-
T13	Seg01	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,019	0,071	0,058	0,034	0,038	0,077	0,070	0,056	0,054	0,033
T13	Seg02	Água	0,700	0,531	0,475	0,616	0,465	0,521	0,507	0,576	0,610	0,677
T13	Seg02	Banco submerso	0,009	0,075	0,073	-	0,004	0,041	0,016	0,053	0,000	0,003
T13	Seg02	Banco emerso	0,041	0,100	0,150	0,119	0,194	0,146	0,183	0,070	0,067	0,041
T13	Seg02	Ilha	-	-	-	-	0,000	-	-	-	-	-
T13	Seg02	Rocha	0,003	0,003	0,002	0,003	0,000	0,004	0,001	0,002	0,011	0,000
T13	Seg02	Margem	0,042	0,085	0,094	0,055	0,086	0,082	0,088	0,093	0,085	0,073
T13	Seg02	Nuvem	-	-	-	-	0,045	-	-	-	0,021	-
T13	Seg02	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,052	0,179	0,224	0,123	0,198	0,191	0,199	0,124	0,078	0,044
T13	Seg03	Água	0,798	0,545	0,504	0,716	0,667	0,526	0,547	0,604	0,715	0,789
T13	Seg03	Banco submerso	0,027	0,240	0,165	-	0,099	0,128	0,024	0,094	0,015	0,018

Trecho	Segmento	Classe	Área (km2)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T13	Seg03	Banco emerso	0,088	0,121	0,199	0,196	0,140	0,240	0,315	0,174	0,166	0,095
T13	Seg03	Ilha	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
T13	Seg03	Rocha	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000
T13	Seg03	Margem	0,032	0,038	0,078	0,034	0,040	0,053	0,060	0,074	0,050	0,045
T13	Seg03	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg03	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,117	0,363	0,365	0,196	0,240	0,368	0,341	0,269	0,181	0,114
T13	Seg04	Água	0,513	0,383	0,350	0,500	0,480	0,363	0,439	0,442	0,521	0,504
T13	Seg04	Banco submerso	0,092	0,149	0,150	0,012	0,064	0,085	0,025	0,079	0,008	0,027
T13	Seg04	Banco emerso	0,039	0,110	0,106	0,125	0,093	0,168	0,158	0,091	0,098	0,078
T13	Seg04	Ilha	0,078	0,078	0,088	0,083	0,084	0,089	0,087	0,093	0,091	0,094
T13	Seg04	Rocha	-	0,002	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,001	-	-
T13	Seg04	Margem	0,038	0,038	0,066	0,040	0,040	0,056	0,051	0,053	0,043	0,056
T13	Seg04	Nuvem	-	-	-	-	-	0,000	-	-	-	-
T13	Seg04	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,209	0,339	0,344	0,220	0,241	0,342	0,271	0,265	0,196	0,200
T13	Seg05	Água	1,173	0,795	0,839	1,120	1,146	0,780	1,087	1,076	1,205	1,185
T13	Seg05	Banco submerso	0,070	0,426	0,307	0,007	0,065	0,327	0,019	0,080	0,028	0,020
T13	Seg05	Banco emerso	0,020	0,033	0,044	0,093	0,043	0,098	0,130	0,060	0,028	0,016
T13	Seg05	Ilha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg05	Rocha	-	0,001	0,000	0,000	-	0,001	0,001	0,003	-	0,000
T13	Seg05	Margem	0,070	0,078	0,144	0,113	0,080	0,127	0,097	0,115	0,073	0,113
T13	Seg05	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg05	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,090	0,460	0,351	0,100	0,107	0,426	0,149	0,143	0,056	0,036
T13	Seg06	Água	0,714	0,453	0,474	0,661	0,672	0,469	0,646	0,657	0,712	0,698
T13	Seg06	Banco submerso	0,027	0,275	0,203	-	0,017	0,171	0,004	0,052	0,002	0,023
T13	Seg06	Banco emerso	0,020	0,039	0,067	0,054	0,063	0,100	0,117	0,034	0,036	0,032
T13	Seg06	Ilha	-	-	0,000	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg06	Rocha	0,000	0,001	0,000	-	-	0,000	0,001	0,001	-	0,000
T13	Seg06	Margem	0,053	0,045	0,069	0,098	0,062	0,072	0,044	0,069	0,064	0,061
T13	Seg06	Nuvem	-	-	-	-	-	-	0,001	-	-	-
T13	Seg06	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,047	0,315	0,270	0,054	0,080	0,271	0,123	0,087	0,038	0,054
T13	Seg07	Água	0,944	0,688	0,695	0,818	0,835	0,670	0,818	0,845	0,874	0,907
T13	Seg07	Banco submerso	0,035	0,267	0,193	-	0,011	0,156	0,007	0,067	0,012	0,016
T13	Seg07	Banco emerso	0,014	0,026	0,060	0,113	0,131	0,122	0,102	0,036	0,072	0,039
T13	Seg07	Ilha	0,018	0,018	0,022	0,023	0,019	0,024	0,031	0,033	0,022	0,021
T13	Seg07	Rocha	-	0,002	0,001	-	-	0,000	0,003	0,001	0,000	0,001
T13	Seg07	Margem	0,075	0,084	0,115	0,132	0,091	0,113	0,082	0,104	0,106	0,102
T13	Seg07	Nuvem	-	-	-	-	-	0,000	0,043	-	-	-
T13	Seg07	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,067	0,313	0,276	0,136	0,160	0,302	0,143	0,136	0,106	0,076
T13	Seg08	Água	0,823	0,587	0,495	0,754	0,773	0,678	0,758	0,812	0,739	0,808
T13	Seg08	Banco submerso	0,020	0,237	0,287	-	0,015	0,077	0,028	0,005	0,044	0,003
T13	Seg08	Banco emerso	0,006	0,014	0,028	0,043	0,052	0,052	0,042	0,012	0,025	0,003
T13	Seg08	Ilha	-	-	-	-	-	0,000	-	-	-	-
T13	Seg08	Rocha	-	0,001	-	-	-	0,000	0,002	0,000	-	-
T13	Seg08	Margem	0,069	0,079	0,107	0,121	0,078	0,111	0,077	0,089	0,110	0,104
T13	Seg08	Nuvem	-	-	-	-	-	-	0,010	-	-	-
T13	Seg08	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,026	0,252	0,316	0,043	0,067	0,129	0,073	0,017	0,069	0,006
T13	Seg09	Água	0,275	0,231	0,216	0,259	0,267	0,270	0,257	0,279	0,269	0,277
T13	Seg09	Banco submerso	0,003	0,048	0,060	-	0,003	0,003	0,022	0,006	0,005	-
T13	Seg09	Banco emerso	0,001	0,000	0,001	0,014	0,015	0,010	0,003	0,001	0,005	0,003
T13	Seg09	Ilha	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,001	-	-	-

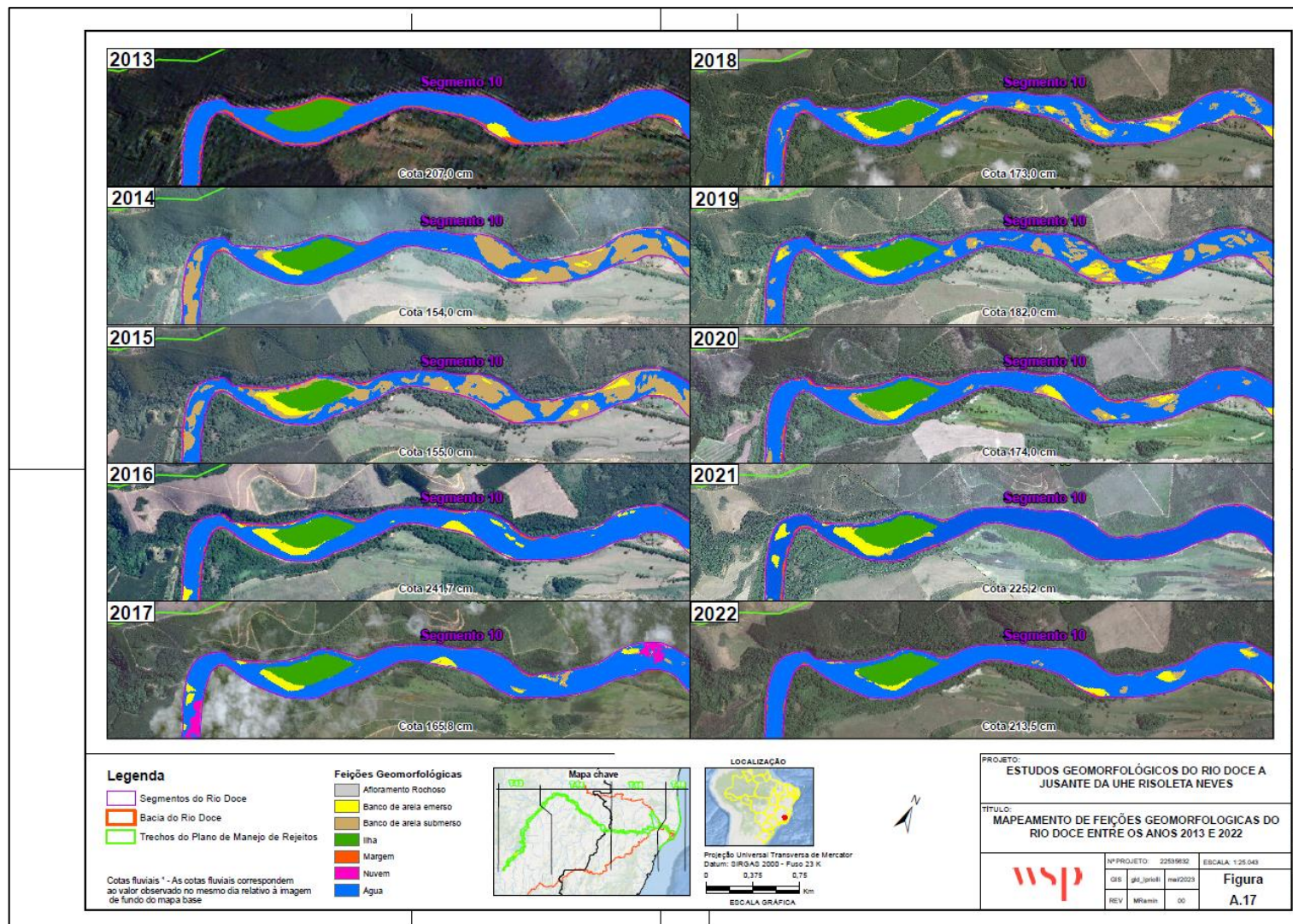
Trecho	Segmento	Classe	Área (km2)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T13	Seg09	Rocha	0,002	0,002	0,000	0,003	-	0,000	0,002	0,000	-	-
T13	Seg09	Margem	0,033	0,032	0,035	0,037	0,029	0,029	0,029	0,027	0,035	0,033
T13	Seg09	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg09	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,006	0,051	0,062	0,017	0,017	0,014	0,027	0,007	0,010	0,003
T13	Seg10	Água	4,281	2,948	2,713	4,130	3,752	3,961	3,505	3,996	4,036	3,926
T13	Seg10	Banco submerso	0,105	1,395	1,632	-	0,368	0,216	0,718	0,316	0,138	0,034
T13	Seg10	Banco emerso	0,060	0,154	0,165	0,278	0,283	0,346	0,208	0,137	0,184	0,179
T13	Seg10	Ilha	0,357	0,363	0,351	0,363	0,339	0,355	0,370	0,359	0,373	0,344
T13	Seg10	Rocha	0,001	0,024	0,000	0,001	0,005	0,000	0,008	0,000	0,045	0,000
T13	Seg10	Margem	0,374	0,294	0,317	0,406	0,261	0,300	0,370	0,370	0,394	0,318
T13	Seg10	Nuvem	-	-	-	-	0,170	-	-	-	0,008	0,377
T13	Seg10	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,523	1,936	2,148	0,642	0,995	0,917	1,303	0,812	0,740	0,557
T13	Seg11	Água	1,187	0,888	1,156	1,146	0,982	1,072	1,124	1,107	1,065	1,170
T13	Seg11	Banco submerso	0,020	0,285	0,018	-	0,154	0,054	0,002	0,045	0,006	-
T13	Seg11	Banco emerso	0,044	0,059	0,078	0,100	0,080	0,093	0,093	0,058	0,031	0,062
T13	Seg11	Ilha	-	0,000	0,001	0,000	-	-	-	-	-	-
T13	Seg11	Rocha	0,034	0,037	0,023	0,022	0,040	0,042	0,012	0,044	0,022	0,033
T13	Seg11	Margem	0,069	0,085	0,078	0,086	0,098	0,092	0,123	0,099	0,064	0,089
T13	Seg11	Nuvem	0,000	-	-	-	-	-	-	-	0,167	0,000
T13	Seg11	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,098	0,381	0,120	0,122	0,274	0,189	0,107	0,147	0,058	0,094
T13	Seg12	Água	1,919	1,153	1,234	1,945	1,714	1,775	1,430	1,860	1,887	1,965
T13	Seg12	Banco submerso	0,039	0,797	0,705	-	0,259	0,114	0,528	0,068	0,039	0,001
T13	Seg12	Banco emerso	0,005	0,020	0,014	0,032	0,021	0,034	0,025	0,011	0,023	0,016
T13	Seg12	Ilha	0,325	0,329	0,332	0,328	0,325	0,334	0,330	0,332	0,330	0,324
T13	Seg12	Rocha	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000
T13	Seg12	Margem	0,150	0,140	0,154	0,135	0,121	0,183	0,124	0,168	0,150	0,134
T13	Seg12	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	0,010	-
T13	Seg12	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,371	1,146	1,052	0,360	0,605	0,481	0,886	0,411	0,393	0,341
T13	Seg13	Água	0,690	0,495	0,646	0,637	0,550	0,607	0,595	0,669	0,666	0,705
T13	Seg13	Banco submerso	0,022	0,183	0,028	0,005	0,044	0,031	0,051	0,010	0,007	-
T13	Seg13	Banco emerso	0,009	0,044	0,047	0,080	0,103	0,071	0,084	0,034	0,041	0,025
T13	Seg13	Ilha	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg13	Rocha	0,010	0,015	0,014	0,002	0,016	0,008	0,001	0,010	0,008	0,008
T13	Seg13	Margem	0,042	0,036	0,038	0,049	0,060	0,057	0,042	0,051	0,052	0,036
T13	Seg13	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T13	Seg13	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,041	0,242	0,090	0,088	0,163	0,110	0,137	0,054	0,056	0,033
T13	Seg14	Água	3,591	2,367	3,298	3,313	3,236	3,168	3,002	3,296	3,434	3,359
T13	Seg14	Banco submerso	0,165	1,322	0,351	0,005	0,256	0,319	0,571	0,244	0,082	0,012
T13	Seg14	Banco emerso	0,060	0,133	0,160	0,452	0,205	0,237	0,141	0,163	0,220	0,163
T13	Seg14	Ilha	0,051	0,051	0,057	0,048	0,075	0,066	0,024	0,018	-	-
T13	Seg14	Rocha	0,007	0,008	0,008	0,007	0,003	0,005	0,000	0,007	0,007	0,003
T13	Seg14	Margem	0,191	0,185	0,192	0,241	0,290	0,270	0,328	0,339	0,322	0,245
T13	Seg14	Nuvem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,284
T13	Seg14	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,283	1,514	0,576	0,512	0,539	0,628	0,736	0,431	0,309	0,178
T13	Seg15	Água	6,393	5,004	5,303	5,456	4,862	5,145	4,950	5,653	5,543	5,883
T13	Seg15	Banco submerso	0,579	1,599	1,073	-	0,836	0,420	0,627	0,438	0,157	0,083
T13	Seg15	Banco emerso	0,234	0,535	0,539	1,247	0,503	1,109	0,748	0,518	0,641	0,618
T13	Seg15	Ilha	0,511	0,538	0,748	0,887	1,189	0,876	1,148	0,832	1,212	1,032
T13	Seg15	Rocha	0,009	0,021	0,033	0,010	0,019	0,012	0,015	0,009	0,010	0,011
T13	Seg15	Margem	0,209	0,238	0,239	0,335	0,368	0,373	0,448	0,485	0,372	0,281

Trecho	Segmento	Classe	Área (km2)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T13	Seg15	Nuvem	-	-	-	-	0,158	-	-	-	-	0,027
T13	Seg15	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,333	2,693	2,394	2,144	2,548	2,417	2,537	1,797	2,020	1,744
T13	Seg16	Água	6,665	4,538	5,245	6,211	5,786	6,264	5,309	7,272	6,802	6,704
T13	Seg16	Banco submerso	1,151	2,599	2,196	0,085	0,425	0,427	0,913	0,204	0,340	0,442
T13	Seg16	Banco emerso	0,478	1,065	0,728	1,506	1,691	1,115	0,966	0,306	0,588	0,866
T13	Seg16	Ilha	1,848	1,941	2,002	2,181	2,148	2,263	2,217	2,224	2,207	2,080
T13	Seg16	Rocha	0,005	0,003	0,019	0,018	0,013	0,001	0,000	-	0,002	0,000
T13	Seg16	Margem	0,369	0,370	0,326	0,515	0,453	0,447	0,639	0,510	0,578	0,423
T13	Seg16	Nuvem	-	-	-	-	-	0,000	0,473	-	-	-
T13	Seg16	Soma Bancos, Ilha e Rocha	3,482	5,608	4,946	3,790	4,277	3,805	4,096	2,734	3,137	3,389
T13	Seg17	Água	10,552	10,583	9,984	10,933	10,323	10,433	9,788	10,210	9,814	10,145
T13	Seg17	Banco submerso	0,362	0,067	0,278	0,031	0,140	0,144	0,118	0,132	0,035	0,117
T13	Seg17	Banco emerso	0,008	0,037	0,015	0,143	0,024	0,102	0,085	0,126	0,049	0,132
T13	Seg17	Ilha	1,374	1,678	1,587	1,515	1,965	1,731	2,015	1,748	2,260	2,093
T13	Seg17	Rocha	0,014	0,033	0,057	0,022	0,054	0,013	0,015	0,008	0,008	0,006
T13	Seg17	Margem	0,653	0,565	0,526	0,320	0,458	0,539	0,942	0,740	0,635	0,470
T13	Seg17	Nuvem	-	-	0,516	-	-	0,000	-	-	0,162	0,000
T13	Seg17	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,758	1,815	1,937	1,710	2,183	1,991	2,233	2,013	2,352	2,349
T14	Seg18	Água	3,158	2,999	3,126	2,921	2,747	3,072	2,726	3,142	3,114	3,186
T14	Seg18	Banco submerso	0,050	0,084	0,087	0,049	0,128	0,047	0,054	0,058	0,011	0,001
T14	Seg18	Banco emerso	0,003	0,011	0,002	0,086	0,082	0,043	0,111	0,041	0,023	0,032
T14	Seg18	Ilha	1,144	1,225	1,210	1,206	1,253	1,248	1,299	1,188	1,238	1,209
T14	Seg18	Rocha	0,031	0,107	0,037	0,104	0,253	0,050	0,208	0,022	0,044	0,013
T14	Seg18	Margem	0,170	0,205	0,168	0,193	0,167	0,171	0,232	0,163	0,200	0,183
T14	Seg18	Nuvem	0,074	-	-	0,072	-	-	-	0,017	-	0,006
T14	Seg18	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,228	1,426	1,336	1,445	1,716	1,388	1,672	1,309	1,316	1,255
T14	Seg19	Água	13,446	11,846	11,751	12,547	11,089	12,274	11,572	13,145	13,187	13,610
T14	Seg19	Banco submerso	0,215	1,344	0,214	0,350	1,183	0,150	0,203	0,222	0,039	0,369
T14	Seg19	Banco emerso	0,035	0,122	0,060	0,195	0,105	0,180	0,229	0,068	0,037	0,120
T14	Seg19	Ilha	7,405	7,189	5,659	7,100	6,822	8,176	7,747	6,867	7,198	6,604
T14	Seg19	Rocha	0,347	0,911	0,777	1,511	1,568	0,452	1,779	1,428	0,892	0,037
T14	Seg19	Margem	0,813	0,692	0,981	0,618	0,709	1,020	0,790	0,592	0,677	0,537
T14	Seg19	Nuvem	0,061	0,217	2,880	0,001	0,845	0,070	-	-	0,292	1,045
T14	Seg19	Soma Bancos, Ilha e Rocha	8,001	9,566	6,709	9,156	9,679	8,957	9,959	8,584	8,165	7,130
T14	Seg20	Água	8,307	7,081	8,281	7,454	7,203	6,685	8,088	9,284	9,453	9,788
T14	Seg20	Banco submerso	1,185	2,558	1,447	1,629	1,321	2,525	1,285	0,931	0,260	0,167
T14	Seg20	Banco emerso	0,497	0,620	0,338	1,309	0,553	0,450	0,366	0,145	0,339	0,123
T14	Seg20	Ilha	3,138	2,966	3,137	2,848	3,860	3,310	3,213	2,868	3,084	3,048
T14	Seg20	Rocha	0,098	0,001	0,013	0,033	0,212	0,020	0,122	0,121	0,095	0,000
T14	Seg20	Margem	0,519	0,514	0,532	0,475	0,599	0,758	0,486	0,400	0,516	0,623
T14	Seg20	Nuvem	0,005	0,007	0,000	0,000	-	-	0,187	-	-	-
T14	Seg20	Soma Bancos, Ilha e Rocha	4,917	6,146	4,935	5,819	5,946	6,306	4,987	4,064	3,779	3,337
T14	Seg21	Água	4,694	3,093	3,427	2,556	3,076	2,829	2,837	3,841	4,164	4,257
T14	Seg21	Banco submerso	0,328	0,491	0,532	0,702	0,760	1,155	1,062	0,362	0,168	0,752
T14	Seg21	Banco emerso	0,098	0,203	0,157	1,030	0,271	0,399	0,129	0,059	0,203	0,148
T14	Seg21	Ilha	2,143	2,356	2,531	2,485	2,627	2,490	2,479	2,107	2,346	2,200
T14	Seg21	Rocha	0,253	0,972	0,775	0,585	0,599	0,439	0,908	0,682	0,573	0,108
T14	Seg21	Margem	0,172	0,239	0,262	0,330	0,353	0,375	0,272	0,198	0,233	0,222
T14	Seg21	Nuvem	-	0,333	0,002	-	-	-	-	0,437	-	-
T14	Seg21	Soma Bancos, Ilha e Rocha	2,821	4,022	3,995	4,801	4,257	4,483	4,578	3,210	3,289	3,208

Trecho	Segmento	Classe	Área (km2)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T14	Seg22	Água	8,169	7,466	5,920	5,122	5,658	7,133	5,172	8,655	8,146	8,783
T14	Seg22	Banco submerso	1,084	1,334	2,263	1,588	2,355	0,930	2,654	0,475	1,212	0,471
T14	Seg22	Banco emerso	0,389	0,590	0,441	1,953	1,012	0,889	0,964	0,311	0,335	0,265
T14	Seg22	Ilha	2,867	2,887	3,233	3,125	3,097	3,138	3,319	2,890	2,582	2,974
T14	Seg22	Rocha	0,271	0,396	0,584	0,653	0,476	0,453	0,448	0,360	0,401	0,157
T14	Seg22	Margem	0,239	0,322	0,580	0,580	0,423	0,478	0,464	0,329	0,345	0,371
T14	Seg22	Nuvem	0,000	0,025	-	-	-	-	-	0,001	-	-
T14	Seg22	Soma Bancos, Ilha e Rocha	4,612	5,207	6,520	7,319	6,939	5,409	7,385	4,035	4,530	3,866
T14	Seg23	Água	3,961	3,459	3,151	2,802	2,613	3,235	2,811	4,124	3,375	5,186
T14	Seg23	Banco submerso	0,682	0,631	0,102	0,583	0,527	0,193	0,653	0,136	0,230	0,394
T14	Seg23	Banco emerso	0,775	0,405	0,350	0,606	0,235	0,174	0,963	0,083	0,093	0,317
T14	Seg23	Ilha	1,245	1,134	1,900	1,021	1,277	1,448	1,845	1,116	1,287	1,116
T14	Seg23	Rocha	1,990	2,988	2,857	3,599	3,843	3,328	2,097	3,065	3,604	1,630
T14	Seg25	Margem	0,228	0,249	0,470	0,271	0,386	0,505	0,512	0,358	0,294	0,239
T14	Seg24	Nuvem	0,000	0,016	0,051	-	-	-	-	-	-	-
T14	Seg23	Soma Bancos, Ilha e Rocha	4,693	5,158	5,209	5,809	5,883	5,142	5,559	4,400	5,213	3,457
T14	Seg24	Água	19,108	23,180	22,281	22,901	22,347	22,435	22,706	22,942	22,126	22,872
T14	Seg24	Banco submerso	0,492	0,346	0,067	0,194	0,346	0,140	0,088	0,048	0,486	0,180
T14	Seg24	Banco emerso	0,010	0,259	0,001	0,039	0,075	0,077	0,009	0,037	0,058	0,111
T14	Seg24	Ilha	0,971	1,028	1,619	1,189	1,611	1,134	1,271	1,164	1,250	1,161
T14	Seg24	Rocha	0,024	0,006	0,064	0,031	0,014	0,034	0,020	0,047	0,316	0,032
T14	Seg24	Margem	0,813	0,633	1,017	1,115	0,938	1,214	1,377	1,232	1,235	1,113
T14	Seg24	Nuvem	4,052	0,019	0,421	0,002	0,139	0,437	-	-	-	0,001
T14	Seg24	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,497	1,638	1,752	1,453	2,046	1,384	1,388	1,296	2,110	1,485
T14	Seg25	Água	0,749	1,341	1,157	1,398	1,623	1,617	1,364	1,587	1,355	1,521
T14	Seg25	Banco submerso	0,215	0,387	0,065	0,039	0,343	0,082	0,049	0,158	0,001	0,112
T14	Seg25	Banco emerso	0,050	0,025	0,005	0,014	0,028	0,052	0,050	0,039	0,009	0,036
T14	Seg25	Ilha	0,738	0,731	0,966	0,801	1,011	0,867	1,323	1,144	1,392	1,104
T14	Seg25	Rocha	0,115	0,662	0,429	0,937	0,129	0,382	0,300	0,201	0,284	0,358
T14	Seg25	Margem	0,086	0,076	0,123	0,077	0,131	0,128	0,179	0,136	0,224	0,134
T14	Seg25	Nuvem	1,312	0,043	0,520	0,000	-	0,137	-	-	-	-
T14	Seg25	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,118	1,805	1,465	1,790	1,511	1,382	1,722	1,541	1,686	1,610
T14	Seg26	Água	2,770	3,228	2,555	3,239	3,223	3,222	3,187	3,226	3,178	3,241
T14	Seg26	Banco submerso	0,008	0,037	0,002	0,001	0,022	0,006	0,003	0,002	0,000	0,011
T14	Seg26	Banco emerso	0,001	0,004	0,000	0,004	0,003	0,006	0,001	0,001	0,000	0,009
T14	Seg26	Ilha	0,113	0,098	0,087	0,111	0,141	0,132	0,167	0,155	0,114	0,105
T14	Seg26	Rocha	0,009	0,057	0,010	0,013	0,000	0,012	0,013	0,006	0,004	0,001
T14	Seg26	Margem	0,328	0,113	0,221	0,172	0,150	0,161	0,168	0,148	0,242	0,172
T14	Seg26	Nuvem	0,311	0,002	0,662	0,000	-	0,000	-	-	-	-
T14	Seg26	Soma Bancos, Ilha e Rocha	0,130	0,196	0,100	0,128	0,166	0,155	0,184	0,165	0,118	0,126
T15	Seg27	Água	4,069	4,369	3,725	3,198	3,581	4,616	3,704	4,329	3,910	4,115
T15	Seg27	Banco submerso	0,452	0,344	0,401	0,341	0,427	0,139	0,358	0,315	0,231	0,122
T15	Seg27	Banco emerso	0,409	0,642	0,948	0,985	0,826	0,490	0,875	0,524	0,809	0,361
T15	Seg27	Ilha	0,433	0,386	0,430	0,319	0,490	0,414	0,457	0,434	0,441	0,323
T15	Seg27	Rocha	0,347	0,114	0,271	0,179	0,345	0,094	0,255	0,164	0,327	0,129
T15	Seg27	Margem	0,207	0,057	0,142	0,139	0,248	0,163	0,266	0,151	0,199	0,243
T15	Seg27	Nuvem	-	0,005	0,000	0,757	-	0,001	-	-	-	0,624
T15	Seg27	Soma Bancos, Ilha e Rocha	1,641	1,486	2,049	1,823	2,087	1,137	1,946	1,437	1,807	0,935
T15	Seg28	Água	18,780	12,699	9,318	6,378	10,871	15,147	10,150	18,322	18,579	17,704
T15	Seg28	Banco submerso	4,866	7,474	9,378	8,495	7,530	6,019	8,454	2,905	4,189	5,244

Trecho	Segmento	Classe	Área (km2)									
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
T15	Seg28	Banco emerso	3,211	5,725	6,829	10,442	7,881	4,894	7,609	3,794	3,744	3,734
T15	Seg28	Ilha	5,130	4,974	5,078	4,626	5,483	5,024	5,418	5,024	5,270	5,044
T15	Seg28	Rocha	-	0,046	0,000	0,039	-	0,020	0,086	0,069	0,009	0,020
T15	Seg28	Margem	0,408	0,534	0,407	0,449	0,631	0,649	0,679	0,406	0,604	0,649
T15	Seg28	Nuvem	-	0,943	1,386	1,966	-	0,643	-	1,876	-	-
T15	Seg28	Soma Bancos, Ilha e Rocha	13,207	18,219	21,285	23,603	20,893	15,957	21,567	11,792	13,212	14,042
T15	Seg29	Água	19,328	13,867	15,188	5,457	17,686	16,947	13,445	15,686	15,169	17,639
T15	Seg29	Banco submerso	6,965	10,960	6,128	14,633	5,311	4,322	11,036	8,290	8,831	4,416
T15	Seg29	Banco emerso	1,238	2,381	5,739	7,194	3,258	3,167	2,372	2,828	1,640	1,651
T15	Seg29	Ilha	13,622	13,809	13,823	13,702	13,416	12,271	14,157	14,214	14,559	13,885
T15	Seg29	Rocha	0,000	0,000	0,006	0,003	-	0,111	0,000	0,018	0,050	0,001
T15	Seg29	Margem	0,280	0,403	0,365	0,338	0,379	0,552	0,398	0,397	0,557	0,574
T15	Seg29	Nuvem	-	0,013	0,185	0,107	1,383	4,064	0,025	-	0,626	3,268
T15	Seg29	Soma Bancos, Ilha e Rocha	21,825	27,150	25,695	35,532	21,985	19,871	27,565	25,350	25,081	19,952
T16	Seg30	Água	17,797	17,043	13,546	9,895	11,889	20,046	9,096	15,955	8,059	18,696
T16	Seg30	Banco submerso	5,348	6,401	6,719	8,991	5,352	0,794	12,988	6,377	10,347	2,737
T16	Seg30	Banco emerso	2,198	1,970	4,203	6,286	5,952	3,675	2,294	1,936	2,081	2,593
T16	Seg30	Ilha	6,173	6,086	5,970	6,171	6,448	6,639	6,920	7,067	6,971	7,064
T16	Seg30	Rocha	0,010	0,001	0,016	0,045	0,000	-	-	0,024	0,001	-
T16	Seg30	Margem	0,322	0,296	0,322	0,326	0,462	0,536	0,418	0,476	0,549	0,780
T16	Seg30	Nuvem	0,030	0,081	1,102	0,164	1,774	0,187	0,162	0,042	3,869	0,007
T16	Seg30	Soma Bancos, Ilha e Rocha	13,728	14,457	16,907	21,492	17,753	11,108	22,201	15,404	19,400	12,394
T16	Seg31	Água	8,028	11,256	9,606	6,269	10,375	6,218	4,593	10,469	8,658	13,344
T16	Seg31	Banco submerso	5,860	3,382	4,272	6,475	1,754	5,894	8,742	3,847	5,601	0,882
T16	Seg31	Banco emerso	1,911	1,366	1,758	2,507	3,420	2,900	1,681	0,695	0,843	0,958
T16	Seg31	Ilha	2,502	2,448	2,722	3,038	2,895	3,314	3,382	3,381	3,316	3,260
T16	Seg31	Rocha	-	-	0,001	0,021	-	-	-	0,003	-	0,000
T16	Seg31	Margem	0,190	0,208	0,184	0,310	0,220	0,290	0,258	0,270	0,247	0,221
T16	Seg31	Nuvem	0,174	0,004	0,123	0,045	-	0,049	0,010	-	-	-
T16	Seg31	Soma Bancos, Ilha e Rocha	10,273	7,197	8,753	12,041	8,069	12,108	13,805	7,926	9,760	5,100
Total	Total	Água	173,917	155,385	146,899	131,682	150,747	162,427	136,445	174,312	161,637	183,954
Total	Total	Banco submerso	30,490	45,755	39,419	44,213	30,120	25,117	51,306	26,038	32,527	16,656
Total	Total	Banco emerso	11,954	16,833	23,264	37,263	27,361	21,481	21,082	12,412	12,496	12,839
Total	Total	Ilha	52,186	52,312	53,553	53,169	56,574	55,342	59,221	55,257	57,540	55,084
Total	Total	Rocha	3,586	6,451	6,004	7,856	7,606	5,506	6,340	6,311	6,756	2,568
Total	Total	Margem	7,359	7,066	8,523	8,215	8,547	10,050	10,207	8,809	9,382	8,772
Total	Total	Nuvem	6,018	1,708	7,849	3,113	4,556	5,590	0,909	2,372	5,173	5,639
Total	Total	Soma Bancos, Ilha e Rocha	98,217	121,352	122,240	142,500	121,661	107,445	137,949	100,018	109,319	87,146

Figura 46 – Exemplo de uma página da figura articulada (Apêndice 03) com o resultado espacial da classificação das feições geomorfológicas obtido a partir das imagens de satélite dos anos de 2013 a 2022 do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.



7.5 Análise Integrada dos Resultados

Uma análise integrada dos resultados com avaliação das variações temporais e espaciais é apresentada nesta seção. Primeiramente, são apresentados os resultados gerais da área de estudo, com uma média dos resultados obtidos ao longo do período avaliado (2013 a 2022), para avaliar a variação espacial das feições. Posteriormente, é apresentada uma comparação das áreas médias pré e pós rompimento, sendo utilizada como uma etapa de *screening* para avaliação de eventuais impactos do rompimento da barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica da área de estudo. Em seguida, os resultados são discutidos considerando cada um dos segmentos apresentados.

Como descrito na **Seção 6.4**, foram considerados os níveis d'água do rio Doce nas datas de geração das imagens de sensoriamento remoto na avaliação dos resultados, visando identificar se eventuais tendências de variação verificadas nas áreas das feições poderiam estar associadas a variações do nível d'água e da vazão. Na **Tabela 20** são apresentados os valores do nível d'água do rio na data da imagem de cada segmento.

Na **Tabela 21** são apresentadas as vazões de pico de cada período chuvoso desde 2012, visando fornecer uma informação qualitativa sobre a intensidade da dinâmica geomorfológica ao longo do período estudado. Os gráficos da **Figura 47** apresentam os resultados dos picos de vazão e nível d'água em cada segmento.

Tabela 20 – Nível d'água na data das imagens.

SEGMENTO	ESTAÇÃO USADA PARA REFERÊNCIA DE COTA	NÍVEL D'ÁGUA (CM)*									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Seg01	Fazenda Cachoeira D'antas	166,0	112,5	104,0	126,0	81,0	115,0	95,0	112,0	136,0	176,0
Seg02	Fazenda Cachoeira D'antas	166,0	123,0	104,0	126,0	96,3	115,0	95,0	112,0	136,0	176,0
Seg03	Fazenda Cachoeira D'antas	159,7	123,0	105,3	126,0	109,0	115,0	95,0	112,0	128,0	167,5
Seg04	Fazenda Cachoeira D'antas	151,0	123,0	105,0	126,0	108,0	115,0	95,0	112,0	120,0	159,0
Seg05	Fazenda Cachoeira D'antas	156,5	123,0	105,0	119,5	107,0	115,0	95,0	112,0	120,0	165,0
Seg06	Fazenda Cachoeira D'antas	151,0	123,0	105,0	113,0	107,0	115,0	95,0	112,0	120,0	159,0
Seg07	Fazenda Cachoeira D'antas	151,0	123,0	105,0	113,0	106,0	115,0	95,0	123,5	114,0	159,0
Seg08	Cachoeira dos Óculos Montante	199,0	164,0	155,0	154,0	149,0	168,5	146,0	174,0	143,0	214,0
Seg09	Cachoeira dos Óculos Montante	207,0	159,0	155,0	154,0	158,5	176,0	154,0	174,0	143,0	214,0
Seg10	Cachoeira dos Óculos Montante	207,0	154,0	155,0	241,7	165,8	173,0	182,0	174,0	225,2	213,5
Seg11	Belo Oriente	81,0	41,0	33,0	154,0	124,7	134,0	183,0	150,0	165,0	179,0
Seg12	Belo Oriente	81,0	48,0	61,3	154,0	106,0	134,0	150,0	150,0	160,0	179,0
Seg13	Belo Oriente	81,0	55,0	115,0	139,0	106,0	134,0	117,0	150,0	148,0	196,5

SEGMENTO	ESTAÇÃO USADA PARA REFERÊNCIA DE COTA	NÍVEL D'ÁGUA (CM)*									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Seg14	Belo Oriente	81,0	56,0	115,0	124,0	118,3	134,0	124,3	150,0	141,0	214,0
Seg15	Belo Oriente	81,0	52,0	62,3	132,8	125,7	134,0	121,0	187,0	144,5	193,7
Seg16	Belo Oriente	80,0	37,0	36,0	137,7	109,0	134,0	111,5	207,0	151,5	172,2
Seg17	Baguari*	184,9	184,8	184,8	184,7	184,8	184,9	184,7	184,7	184,8	184,9
Seg18	Governador Valadares	147,5	116,5	120,0	107,0	92,0	122,0	101,5	161,0	125,5	153,5
Seg19	Governador Valadares	133,5	114,8	113,3	101,4	101,0	120,0	103,6	145,3	118,7	155,7
Seg20	Governador Valadares	134,5	114,3	120,8	96,0	95,0	107,0	104,0	149,0	134,0	159,0
Seg21	Governador Valadares	155,0	115,2	108,0	92,0	106,0	107,0	105,5	153,0	138,0	152,0
Seg22	Governador Valadares	147,5	127,0	108,5	92,0	112,0	115,0	110,0	153,0	123,0	155,7
Seg23	Governador Valadares	140,0	125,7	101,0	95,0	106,0	115,0	110,0	162,0	142,0	154,0
Seg24	Aimorés*	89,8	89,8	89,6	89,6	89,8	89,8	89,9	89,8	89,7	89,8
Seg25	Mascarenhas*	60,6	59,7	59,8	59,6	59,9	60,0	59,1	59,5	59,8	59,7
Seg26	Mascarenhas*	60,1	59,7	59,8	59,9	59,9	59,9	59,1	59,7	59,8	59,9
Seg27	Colatina	63,0	56,0	54,9	111,0	100,0	166,0	97,0	133,0	112,5	147,3
Seg28	Colatina	63,0	54,0	54,9	93,3	111,0	149,5	97,0	144,7	125,8	166,0
Seg29	Colatina	67,0	55,5	110,5	87,3	116,0	150,3	112,5	107,0	126,7	158,0
Seg30	Colatina	79,0	56,0	63,0	99,5	113,0	203,3	115,3	129,0	125,5	164,0
Seg31	Colatina	57,8	54,0	37,5	109,0	126,0	138,5	109,0	151,0	116,0	183,0
Total	Média	125,4	96,5	96,8	123,1	113,2	134,1	115,5	144,4	136,4	173,5

Nota: (*) cota dos segmentos 17, 24, 25 e 26 em metros

Tabela 21 – Vazões de pico (m³/s) dos períodos chuvosos (outubro a março) de 2012 a 2022.

PERÍODO CHUVOSO (OUT- MAR)	FAZENDA CACHOEIRA D'ANTAS	CACHOEIRA DOS ÓCULOS MONTANTE	BELO ORIENTE	BAGUARI	GOVERNADOR VALADARES	AIMORÉS	MASCARENHAS	COLATINA
2012/2013	545,51	643,77	966,64	1.315,46	-	1.878,07	2.172,33	2.557,42
2013/2014	478,06	608,57	1.262,53	3.701,16	-	5.782,50	6.869,78	10.715,94
2014/2015	339,49	516,29	690,82	946,36	336,21	1.303,25	1.490,41	870,93
2015/2016	-	692,66	1.240,11	2.998,07	-	3.522,20	3.965,57	3.667,73
2016/2017	566,90	847,65	1.348,93	1.849,28	930,84	2.271,45	2.550,23	2.549,49
2017/2018	758,29	1.083,20	1.312,89	2.334,32	-	2.996,74	3.390,49	3.491,98
2018/2019	398,64	508,18	781,28	1.376,97	-	2.061,49	2.417,62	2.562,22
2019/2020	1.481,40	1.710,02	2.969,09	4.120,04	-	4.190,64	4.343,49	5.501,96
2020/2021	531,64	895,68	1.528,63	1.536,50	-	2.288,36	2.686,23	2.731,77
2021/2022	2.000,47	1.923,86	3.818,41	4.869,48	-	5.179,20	5.877,89	5.665,55

Nota: (-) Sem informação

Figura 47 – Gráficos de picos de vazão e nível d'água das estações.

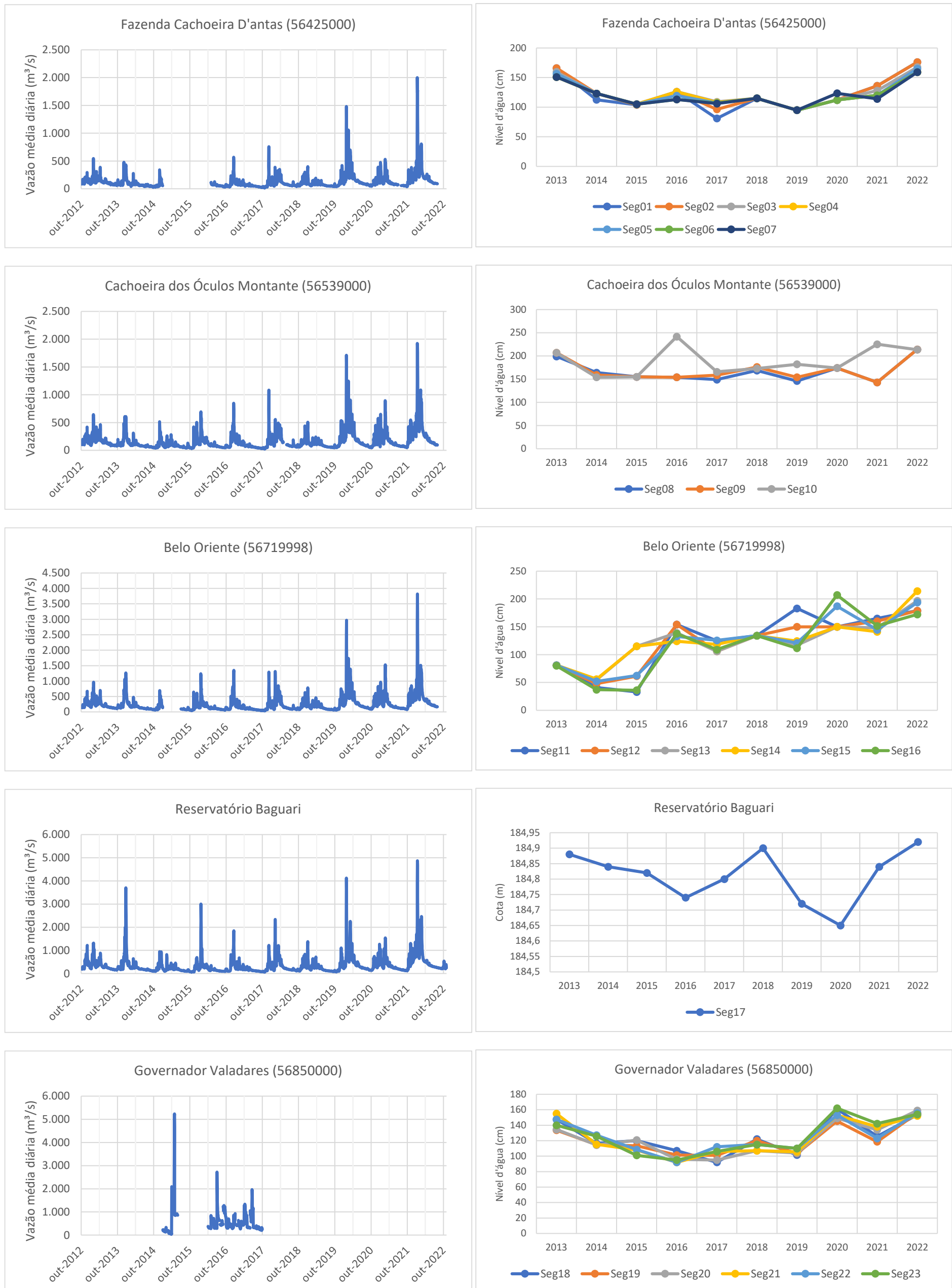
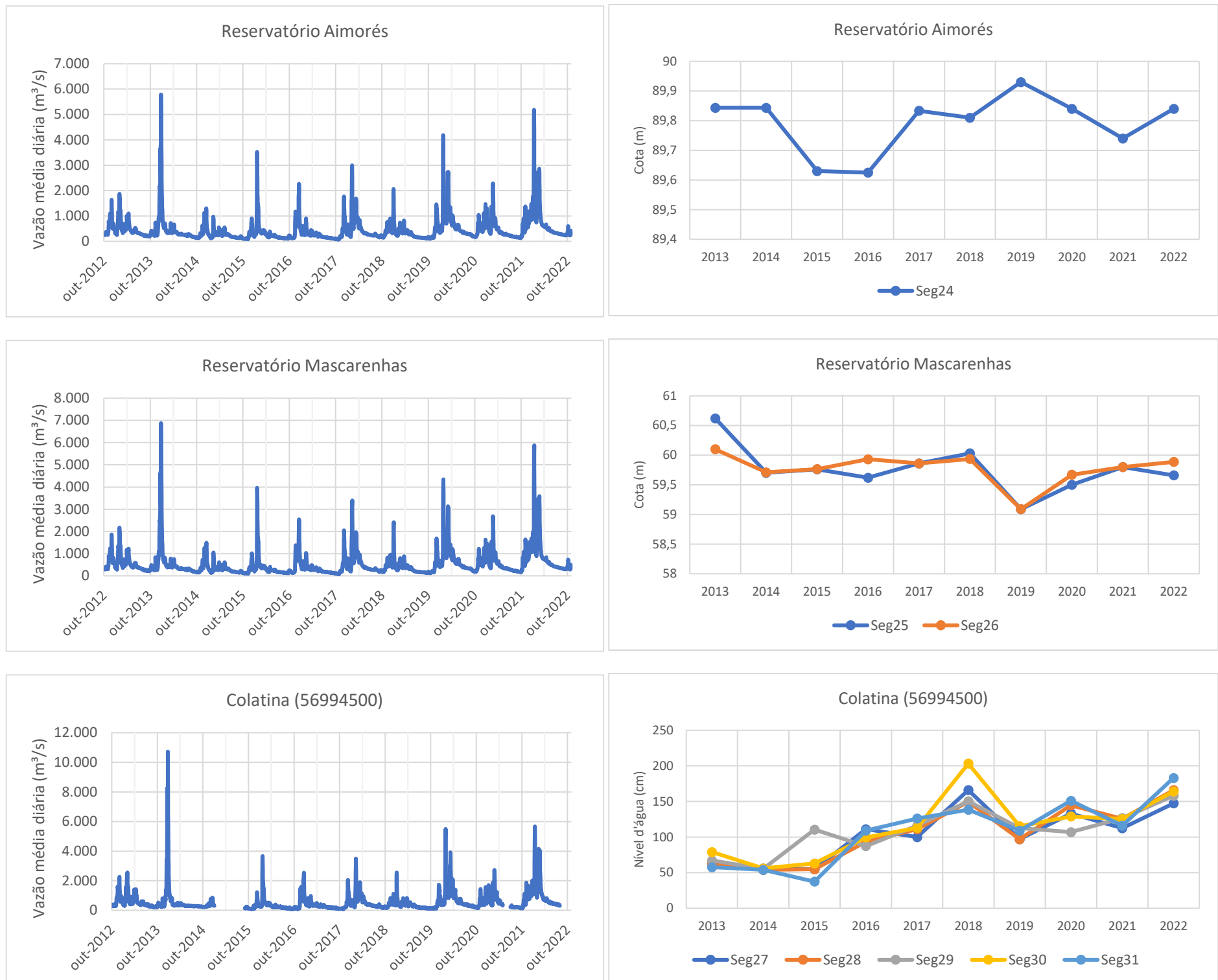


Figura 47 (continuação) – Gráficos de picos de vazão e nível d'água das estações.



7.5.1 Avaliação Geral

A **Tabela 22**, a **Figura 48** e a **Figura 49** apresentam as médias das áreas de cada feição geomorfológica avaliada por segmento ao longo do período avaliado (2013-2022).

Tabela 22 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica ao longo do período avaliado (2013 a 2022).

SEGMENTOS	ÁREA MÉDIA 2013-2022 (km²)								Total
	Água	Banco submerso	Banco emerso	Ilha	Rocha	Nuvem	Margem	Soma Bancos, Ilha e Rocha	
Seg01	0,274	0,012	0,021	0,001	0,020	0,020	0,139	0,054	0,488
Seg02	0,568	0,031	0,111	0,000	0,003	0,033	0,078	0,144	0,824
Seg03	0,641	0,090	0,173	0,000	0,001	0,000	0,050	0,264	0,956
Seg04	0,449	0,069	0,107	0,086	0,001	0,000	0,048	0,263	0,760
Seg05	1,041	0,135	0,056	0,000	0,001	0,000	0,101	0,192	1,334
Seg06	0,616	0,086	0,056	0,000	0,001	0,001	0,063	0,143	0,823
Seg07	0,809	0,085	0,071	0,023	0,001	0,021	0,100	0,180	1,112
Seg08	0,723	0,080	0,028	0,000	0,001	0,010	0,095	0,108	0,936
Seg09	0,260	0,019	0,005	0,000	0,001	0,000	0,032	0,026	0,318
Seg10	3,725	0,547	0,199	0,357	0,008	0,185	0,340	1,112	5,362
Seg11	1,090	0,073	0,070	0,000	0,031	0,056	0,088	0,174	1,408
Seg12	1,688	0,283	0,020	0,329	0,001	0,010	0,146	0,633	2,477
Seg13	0,626	0,042	0,054	0,000	0,009	0,000	0,046	0,106	0,778
Seg14	3,207	0,333	0,193	0,049	0,006	0,284	0,260	0,580	4,331
Seg15	5,419	0,646	0,669	0,897	0,015	0,093	0,335	2,227	8,074
Seg16	6,080	0,878	0,931	2,111	0,007	0,236	0,463	3,927	10,706
Seg17	10,276	0,142	0,072	1,796	0,023	0,169	0,585	2,034	13,065
Seg18	3,019	0,057	0,043	1,222	0,087	0,042	0,185	1,409	4,656
Seg19	12,447	0,429	0,115	7,077	0,970	0,676	0,743	8,591	22,457
Seg20	8,162	1,331	0,474	3,147	0,072	0,040	0,542	5,024	13,768
Seg21	3,477	0,631	0,270	2,376	0,589	0,257	0,266	3,866	7,867
Seg22	7,022	1,436	0,715	3,011	0,420	0,009	0,413	5,582	13,026
Seg23	3,472	0,413	0,400	1,339	2,900	0,023	0,351	5,052	8,898
Seg24	22,290	0,239	0,068	1,240	0,059	0,724	1,069	1,605	25,688
Seg25	1,371	0,145	0,031	1,008	0,380	0,402	0,129	1,563	3,466
Seg26	3,107	0,009	0,003	0,122	0,012	0,195	0,188	0,147	3,636
Seg27	3,962	0,313	0,687	0,412	0,223	0,277	0,181	1,635	6,055
Seg28	13,795	6,455	5,786	5,107	0,036	1,363	0,542	17,385	33,084
Seg29	15,041	8,089	3,147	13,746	0,021	1,209	0,424	25,003	41,677
Seg30	14,202	6,605	3,319	6,551	0,014	0,742	0,449	16,489	31,881
Seg31	8,882	4,671	1,804	3,026	0,006	0,067	0,240	9,507	18,696

Figura 48 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.

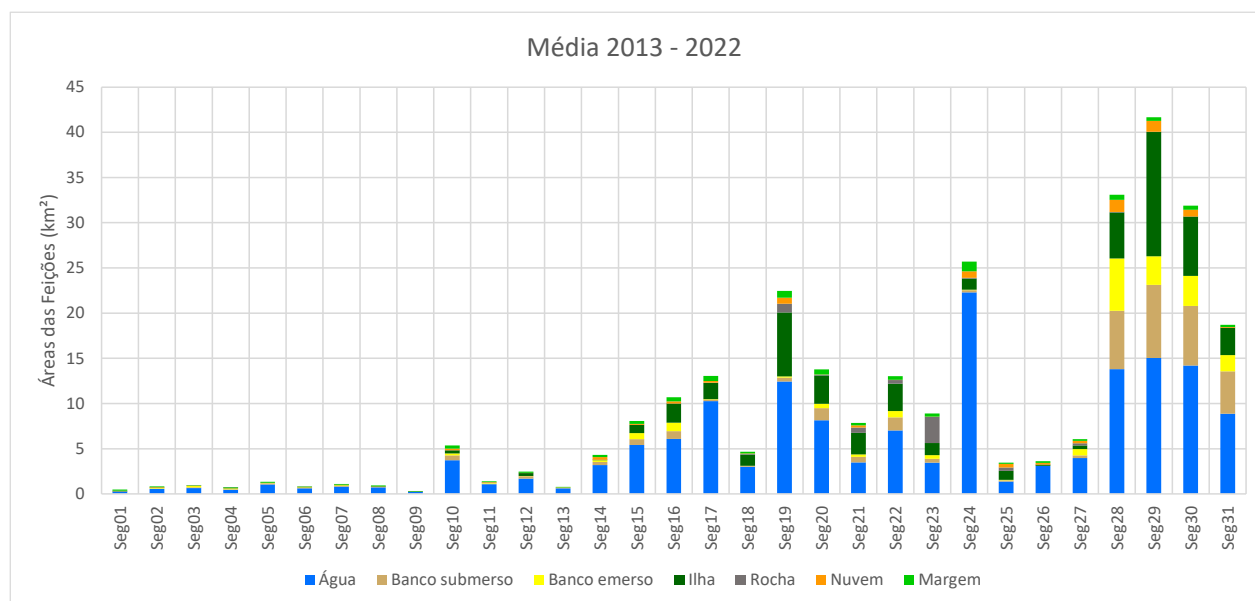
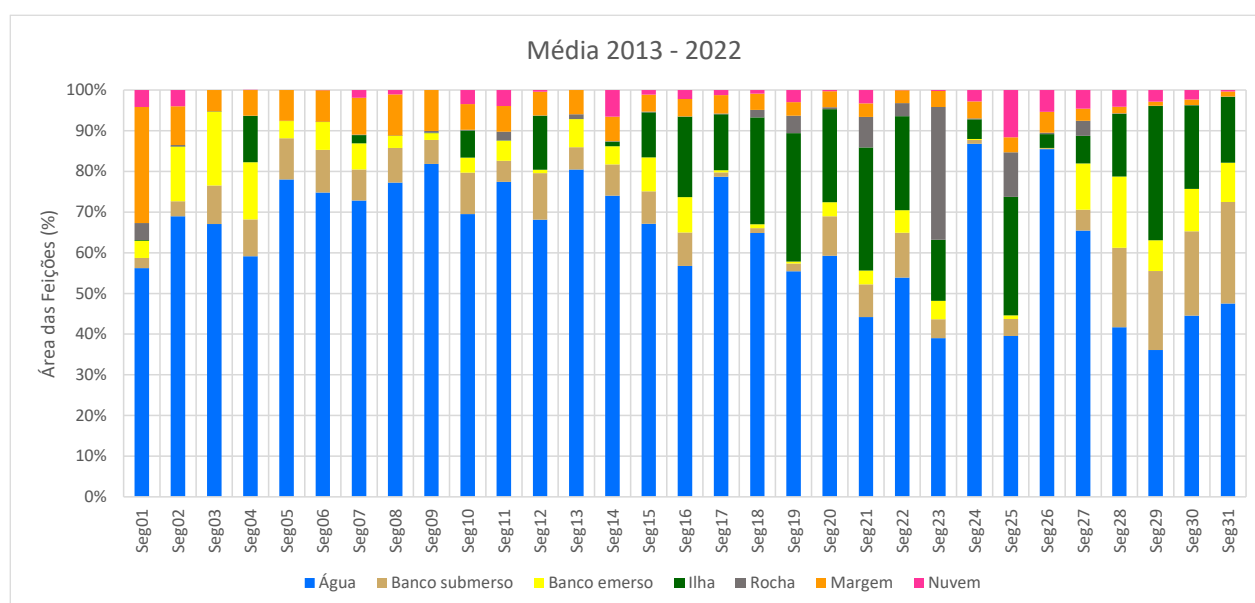


Figura 49 – Percentual de distribuição da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.



Ao avaliar as áreas das feições deposicionais (banco submerso, banco emerso e ilha) por segmento, observa-se que ocorrem picos de aumento de área dessas feições em segmentos que precedem os níveis de base locais³, representados pelos barramentos das UHE's (Segmentos 17, 24 e 26), além dos segmentos mais próximos ao oceano Atlântico (Segmentos 30 e 31), que funciona como último nível de base do rio Doce. Ao relacionar esses dados com a classificação de Rosgen

³ O nível de base local refere-se ao limite inferior para um processo de erosão

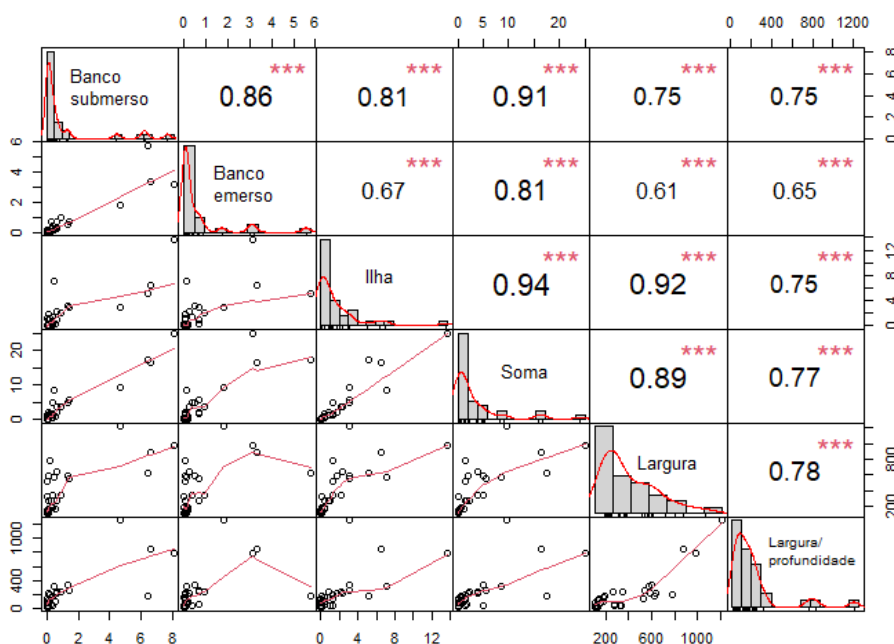
(1994) apresentada na seção 7.2.8, observa-se que os segmentos de padrão fluvial F, B e C (Segmentos de 1 a 14) apresentam os menores valores absolutos de área de feições deposicionais. A partir do segmento 15 o padrão fluvial do rio Doce é alterado para a classe D, sendo essa mudança gerada principalmente pela presença em maior expressão de ilhas fluviais e barras arenosas, tornando o leito do rio com padrões multicanais. Os dados da classificação de imagens apontam um aumento de área de 349% em relação a presença de bancos arenosos emersos e 1900% de ilhas, quando comparado o segmento 14 e o segmento 15. Nessa classe o canal apresenta-se entrelaçado com barras longitudinais e transversais, com canal largo e margens formadas por depósitos aluvionares, com predomínio de solos arenosos apresentando consistência fraca, sendo mais vulneráveis aos processos de erosão de margens por possuírem baixa adesão e coesão entre as partículas (Galdino et al., 2004). Caracteriza-se por apresentar amplos vales com leques fluviais e aluviais com abundante abastecimento de sedimentos.

Nos trechos próximos à região de foz do rio Doce, é notável um aumento significativo na relação largura/profundidade, devido ao alargamento do canal e à diminuição da profundidade. Isso resulta em uma maior incidência de bancos submersos, como ilustrado na **Figura 49**. Segundo Rosgen (1944), os canais de tipo D, como foram classificados os segmentos nessa região, apresentam canais trançados de processo de convergência/divergência que levam a formas de leitos deposicionais localizadas e frequentemente espaçadas. A geomorfologia é composta por amplos vales de baixo gradiente com a presença de solos aluvionares, com controle geológico anastomosado criando deposição de barras arenosas que são lateralmente estáveis com amplas áreas úmidas e planícies de inundação.

Nessas áreas, observa-se que o sedimento presente na superfície do leito consiste predominantemente em areia, com a maior parte classificada como grossa e muito grossa, conforme evidenciado na **Figura 53** e **Figura 54**, respectivamente.

Ao analisar a correlação entre a presença de feições deposicionais e as variáveis investigadas na seção 6.2, destaca-se que a largura do canal e a relação largura/profundidade apresentam as correlações mais significativas com a formação dessas feições. Evidencia-se uma correlação positiva significativa de 0,92 e 0,75 entre a largura do canal e a presença de ilhas e barras arenosas submersas, respectivamente (**Figura 50**~~Erro! Fonte de referência não encontrada.~~).

Figura 50 – Correlação de Spearman entre as classes geomorfológicas mapeadas e características físicas do canal do rio Doce. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.



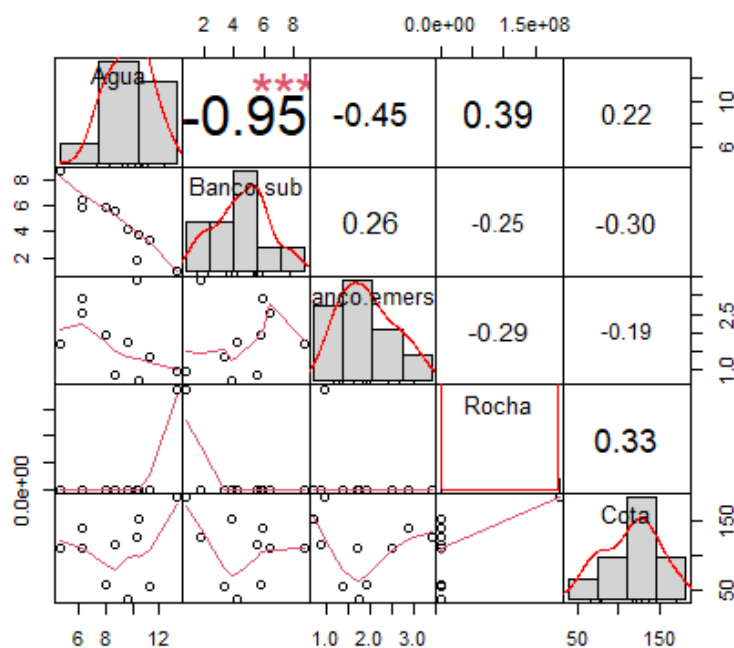
Isso indica que a presença de feições deposicionais, tanto em forma de bancos emersos quanto submersos, é mais pronunciada em locais onde a profundidade da água é reduzida, como nas áreas internas das curvas do rio. Além disso, em locais onde o rio Doce é mais largo e menos profundo (maior relação largura / profundidade), como nos segmentos 29, 30 e 31, sua capacidade de remobilização de sedimentos de fundo é reduzida, o que favorece a formação de bancos arenosos, tanto submersos quanto emersos.

Durante períodos de menor vazão do rio Doce, resultantes de uma diminuição na precipitação ao longo da bacia, a presença de feições deposicionais torna-se mais proeminente, como demonstrado nos gráficos individuais dos segmentos apresentados na seção 7.5.3 e Apêndice IV.

Como pode ser observado na **Figura 54**, existe uma correlação negativa entre a cota do rio Doce e a presença de bancos arenosos, ou seja, quando há um aumento na cota do rio Doce ou aumento na cobertura de água, ocorre uma diminuição das áreas de bancos arenosos que pode ser identificada através de imagens de satélite, conforme a abordagem utilizada neste estudo, sendo essa alteração mais expressiva em bancos submersos. Essa redução da área de bancos arenosos com o aumento da cota pode estar associada tanto a remobilização de material nos bancos, devido ao

aumento da vazão do rio, quanto ao fato do aumento da cota ocultar bancos arenosos nas imagens de satélite.

Figura 51 – Correlações entre classes mapeadas e a cota do rio Doce no segmento 31, considerando os dados do período entre 2013 e 2022. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.



A contribuição percentual da categoria "Margem" excede 10% apenas no segmento 01, em ambos os períodos avaliados (pré e pós-rompimento). Nos demais segmentos, essa contribuição é próxima de 10%, diminuindo consideravelmente à medida que o rio se alarga (segmentos finais).

As pequenas variações observadas em alguns segmentos dessa classe estão associadas às flutuações do nível da água, influenciadas pela dinâmica da vazão fluvial ao longo do tempo. Além disso, a presença de nuvens é um fator que pode reduzir a visibilidade de todas as categorias, incluindo a classe "Margem". É importante mencionar que erros de posicionamento das imagens também podem afetar esses resultados, especialmente considerando que essa categoria está localizada nas bordas da área de trabalho definida. Apesar da existência de eventuais desvios espaciais, os resultados do estudo não são afetados, uma vez que na etapa de delimitação da área de mapeamento essas incertezas foram mitigadas.

O aumento da área de rochas à jusante da UHE Risoleta Neves na comparação entre períodos avaliados está diretamente correlacionado à redução da vazão do rio. Quando a vazão do rio

diminui, especialmente em períodos de menor pluviosidade ao longo da bacia, o nível da água reduz e expõe os afloramentos rochosos, sendo essas alterações atribuídas à dinâmica natural do rio Doce. Como pode ser observada **Figura 52**, é observada uma correlação negativa (-0,75) entre a área de rocha e a cota do rio Doce, evidenciando a relação inversamente proporcional entre esses dois parâmetros. Por sua vez a correlação entre água e a cota é positiva, evidenciando a relação entre a cobertura de água nesse segmento e o aumento da cota do rio Doce.

Figura 52 – Correlações entre classes mapeadas e a cota do rio Doce no segmento 19, considerando os dados do período entre 2013 e 2022. Três asteriscos indicam a significância das correlações, onde $p < 0,001$, dois asteriscos indicam p entre 0,001 e 0,01, e um asterisco indica p entre 0,01 e 0,05.

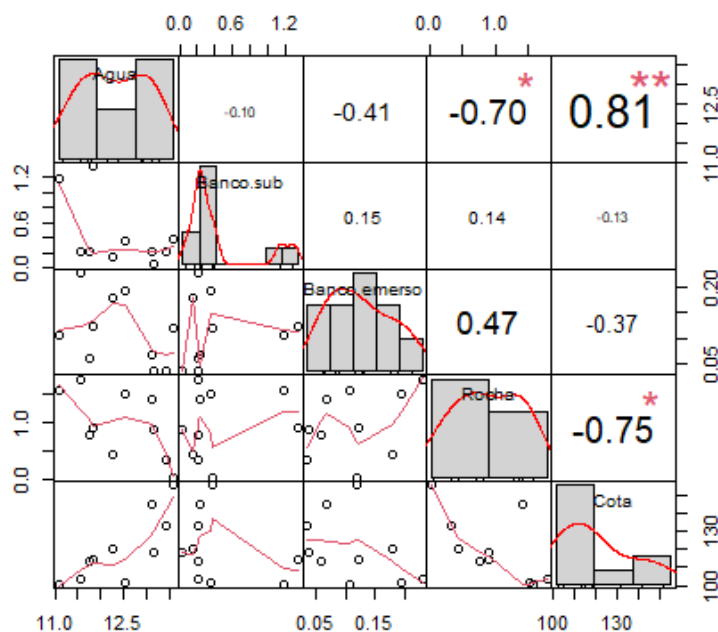


Figura 53 – Relação da largura/profundidade e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados

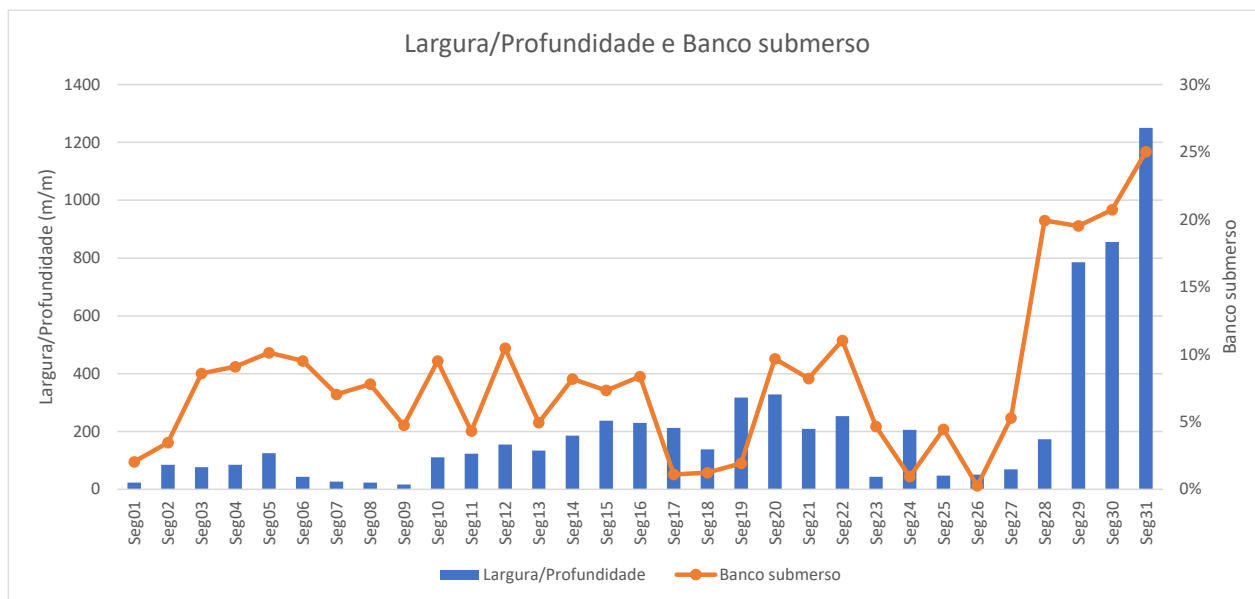


Figura 54 – Concentração de areia total e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados

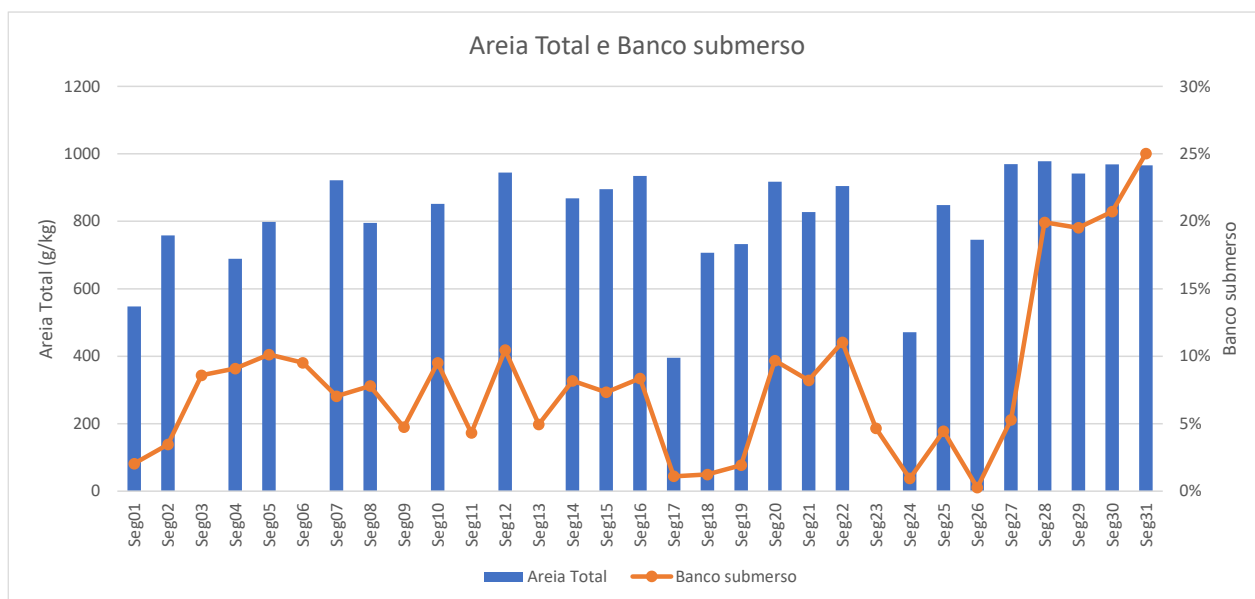
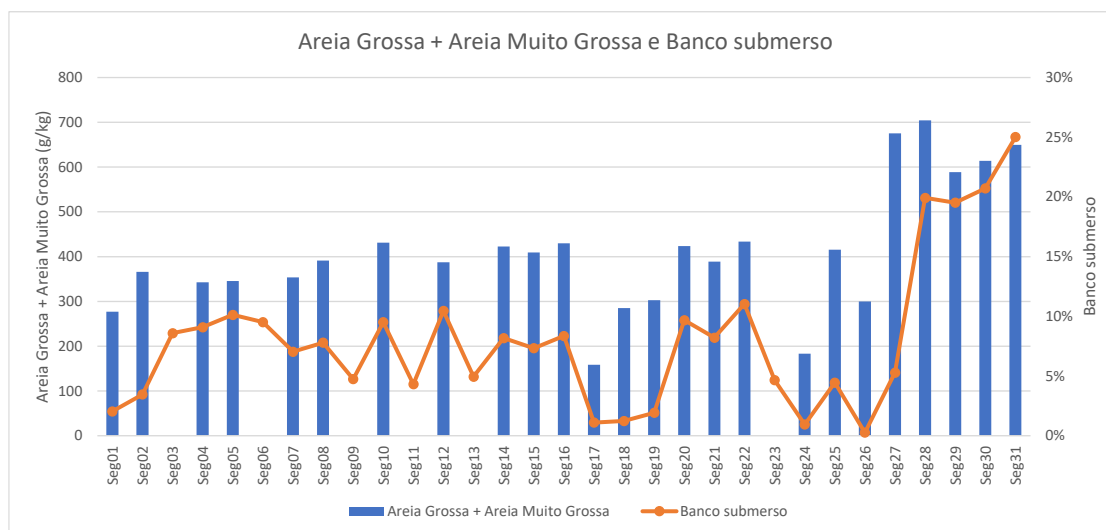


Figura 55 – Concentração de areia grossa + areia muito grossa e a proporção de bancos submersos para os segmentos avaliados



Não foi identificada uma relação entre a redução das margens de um mesmo segmento ao longo do período avaliado com erosão fluvial resultante de uma maior concentração de sedimentos em suspensão na água. Como descrito no Apêndice 01 deste relatório, o impacto físico do rompimento da barragem de Fundão foi gradualmente reduzido à medida que a onda de rejeitos se deslocava rio abaixo. Isso ocorreu devido ao aumento da largura da bacia e do canal fluvial, bem como pelas estruturas de barragens, especialmente a UHE Risoleta Neves (Candonga), o que ajudou a mitigar os impactos da onda de lama.

Para avaliar o potencial impacto da onda de lama resultante do rompimento da barragem de Fundão em processos erosivos a jusante da barragem de Candonga, foram calculados e comparados os potenciais erosivos associados à onda de lama e associados a vazões do rio Doce correspondentes a diferentes períodos de retorno e sem o impacto da onda de lama (i.e., concentração de sólidos em suspensão obtidas de dados históricos, anteriores ao rompimento). Foram utilizados como referência dados das estações fluviométricas da ANA de Cachoeira dos Óculos, Belo Oriente, Governador Valadares, Tumiritinga e Colatina.

Verificou-se que o potencial erosivo da onda de lama correspondeu a vazões não impactadas pelo rompimento (i.e., com concentração de sólidos em suspensão obtidas de dados históricos) com tempo de recorrência inferior a 3 anos na estação Cachoeira dos Óculos e tempo de recorrência inferior a 1 ano nas demais estações fluviométricas. Dessa forma, é improvável que a onda de lama resultante do rompimento da barragem de Fundão tenha resultado em processos erosivos perceptíveis nas áreas avaliadas neste estudo.

7.5.2 Avaliação dos Resultados Médios Antes e Após o Rompimento da Barragem de Fundão

A **Tabela 23** apresenta as médias das áreas de cada feição geomorfológica dos períodos pré (2013-2015) e pós rompimento (2016-2022). A seguir são apresentados também os resultados médios do período anterior ao rompimento (2013 a 2015) em área (**Figura 56**) e em porcentagem (**Figura 57**), assim como para o período posterior ao rompimento (2016 a 2022) em área (**Figura 58**) e em porcentagem (**Figura 59**).

Tabela 23 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica nos períodos pré (2013-2015) rompimento da barragem de Fundão.

SEGMENTO	ÁREA MÉDIA 2013 – 2015 (km ²)								
	Água	Banco submerso	Banco emerso	Ilha	Rocha	Nuvem	Margem	Soma ^(a)	Total ^(b)
Seg01	0,282	0,018	0,017	0,000	0,014	0,000	0,139	0,050	0,470
Seg02	0,569	0,052	0,097	0,000	0,002	0,000	0,074	0,152	0,794
Seg03	0,616	0,144	0,136	0,000	0,001	0,000	0,049	0,282	0,947
Seg04	0,415	0,130	0,085	0,081	0,001	0,000	0,048	0,297	0,760
Seg05	0,936	0,268	0,032	0,000	0,001	0,000	0,097	0,301	1,334
Seg06	0,547	0,168	0,042	0,000	0,001	0,000	0,055	0,211	0,813
Seg07	0,776	0,165	0,034	0,019	0,002	0,000	0,091	0,219	1,086
Seg08	0,635	0,181	0,016	0,000	0,001	0,000	0,085	0,198	0,919
Seg09	0,241	0,037	0,001	0,000	0,001	0,000	0,033	0,040	0,314
Seg10	3,314	1,044	0,126	0,357	0,008	0,000	0,328	1,536	5,178
Seg11	1,077	0,108	0,060	0,000	0,031	0,000	0,077	0,200	1,354
Seg12	1,435	0,514	0,013	0,329	0,001	0,000	0,148	0,856	2,440
Seg13	0,610	0,078	0,033	0,000	0,013	0,000	0,039	0,124	0,773
Seg14	3,086	0,612	0,118	0,053	0,008	0,000	0,190	0,791	4,066
Seg15	5,566	1,084	0,436	0,599	0,021	0,000	0,229	2,140	7,935
Seg16	5,483	1,982	0,757	1,931	0,009	0,000	0,355	4,679	10,517
Seg17	10,373	0,236	0,020	1,546	0,035	0,516	0,582	1,837	13,307
Seg18	3,094	0,074	0,005	1,193	0,058	0,074	0,181	1,330	4,680
Seg19	12,348	0,591	0,072	6,751	0,678	1,053	0,829	8,092	22,321
Seg20	7,889	1,730	0,485	3,080	0,037	0,004	0,522	5,333	13,748
Seg21	3,738	0,450	0,153	2,343	0,667	0,167	0,224	3,613	7,742
Seg22	7,185	1,560	0,473	2,996	0,417	0,012	0,380	5,447	13,024
Seg23	3,524	0,472	0,510	1,427	2,612	0,023	0,316	5,020	8,882
Seg24	21,523	0,302	0,090	1,206	0,032	1,497	0,821	1,629	25,471
Seg25	1,082	0,222	0,027	0,812	0,402	0,625	0,095	1,462	3,265
Seg26	2,851	0,016	0,001	0,099	0,025	0,325	0,221	0,142	3,539
Seg27	4,054	0,399	0,667	0,416	0,244	0,002	0,135	1,725	5,917
Seg28	13,599	7,239	5,255	5,061	0,023	1,164	0,450	17,578	32,791
Seg29	16,128	8,018	3,119	13,751	0,002	0,099	0,349	24,890	41,466
Seg30	16,129	6,156	2,790	6,076	0,009	0,404	0,313	15,031	31,877
Seg31	9,630	4,505	1,678	2,557	0,001	0,100	0,194	8,741	18,665

(a) Soma das áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilha e rocha.

(b) Total equivale à soma das áreas de água, bancos submersos, bancos emersos, ilha, rocha e nuvem. Como o nível d'água pode variar com os anos, a média da área total pode variar também entre os períodos avaliados (2013-2015 x 2016-2022)

Tabela 24 – Médias das áreas de cada feição geomorfológica no período pós (2016-2022) rompimento da barragem de Fundão.

SEGMENTO	MÉDIA 2016 – 2022								
	Água	Banco submerso	Banco emerso	Ilha	Rocha	Nuvem	Margem	Soma ^(a)	Total ^(b)
Seg01	0,271	0,008	0,022	0,001	0,023	0,020	0,139	0,054	0,485
Seg02	0,568	0,020	0,117	0,000	0,003	0,033	0,080	0,140	0,821
Seg03	0,652	0,063	0,189	0,000	0,000	0,000	0,051	0,253	0,956
Seg04	0,464	0,043	0,116	0,089	0,000	0,000	0,048	0,248	0,760
Seg05	1,085	0,078	0,067	0,000	0,001	0,000	0,102	0,146	1,334
Seg06	0,645	0,045	0,062	0,000	0,001	0,001	0,067	0,108	0,821
Seg07	0,824	0,045	0,088	0,025	0,001	0,021	0,104	0,158	1,108
Seg08	0,760	0,029	0,033	0,000	0,001	0,010	0,099	0,062	0,932
Seg09	0,268	0,008	0,007	0,001	0,001	0,000	0,031	0,017	0,316
Seg10	3,901	0,298	0,231	0,358	0,008	0,185	0,345	0,895	5,326
Seg11	1,095	0,052	0,074	0,000	0,031	0,084	0,093	0,157	1,428
Seg12	1,797	0,168	0,023	0,329	0,001	0,010	0,145	0,521	2,472
Seg13	0,632	0,025	0,063	0,000	0,008	0,000	0,049	0,095	0,777
Seg14	3,259	0,213	0,226	0,046	0,005	0,284	0,291	0,489	4,323
Seg15	5,356	0,427	0,769	1,025	0,012	0,093	0,380	2,233	8,062
Seg16	6,335	0,405	1,005	2,189	0,006	0,236	0,510	3,605	10,686
Seg17	10,235	0,102	0,094	1,904	0,018	0,054	0,586	2,119	12,994
Seg18	2,987	0,050	0,060	1,234	0,099	0,031	0,187	1,443	4,648
Seg19	12,489	0,359	0,133	7,216	1,095	0,451	0,706	8,804	22,450
Seg20	8,279	1,160	0,469	3,176	0,086	0,093	0,551	4,891	13,815
Seg21	3,366	0,709	0,320	2,390	0,556	0,437	0,283	3,975	8,061
Seg22	6,953	1,383	0,818	3,018	0,421	0,001	0,427	5,641	13,021
Seg23	3,450	0,388	0,353	1,302	3,024	0,000	0,366	5,066	8,882
Seg24	22,619	0,212	0,058	1,254	0,071	0,145	1,175	1,595	25,533
Seg25	1,495	0,112	0,033	1,092	0,370	0,069	0,144	1,606	3,314
Seg26	3,217	0,006	0,003	0,132	0,007	0,000	0,173	0,149	3,539
Seg27	3,922	0,276	0,696	0,411	0,213	0,461	0,201	1,596	6,180
Seg28	13,879	6,119	6,014	5,127	0,041	1,495	0,581	17,301	33,255
Seg29	14,576	8,120	3,159	13,743	0,030	1,579	0,456	25,052	41,663
Seg30	13,377	6,798	3,545	6,754	0,017	0,886	0,507	17,115	31,885
Seg31	8,561	4,742	1,858	3,227	0,008	0,035	0,260	9,835	18,690

(a) Soma das áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilha e rocha.

(b) Total equivale à soma das áreas de água, bancos submersos, bancos emersos, ilha, rocha e nuvem. Como o nível d'água pode variar com os anos, a média da área total pode variar também entre os períodos avaliados (2013-2015 x 2016-2022)

Figura 56 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2015 (pré-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.

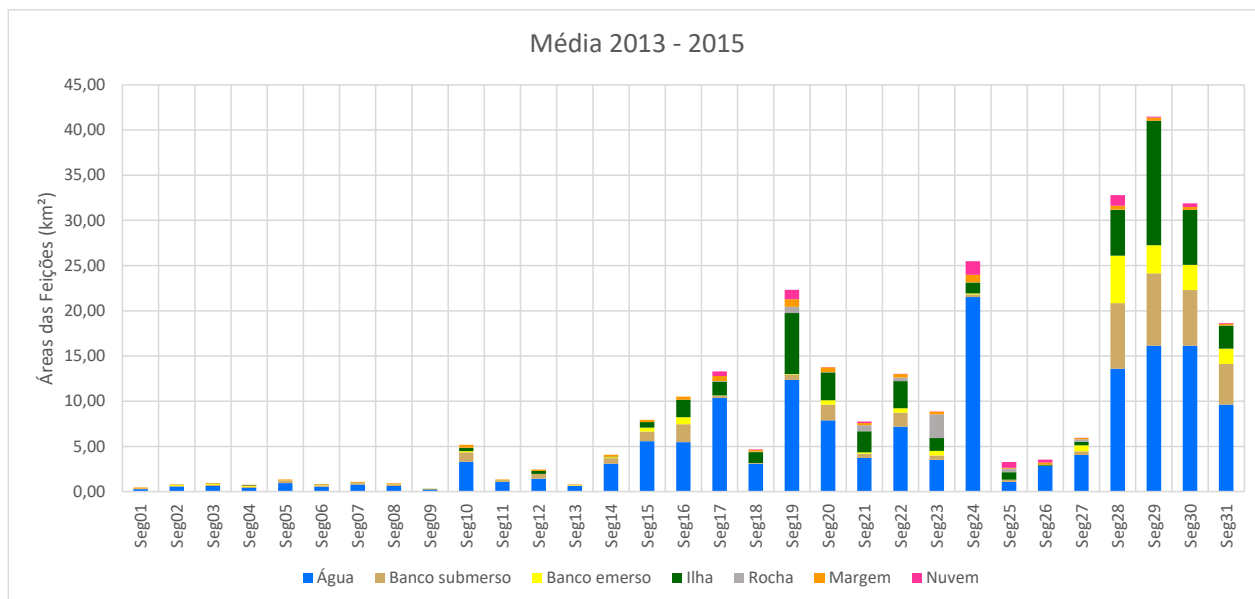


Figura 57 – Distribuição em porcentagem da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2015 (pré-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.

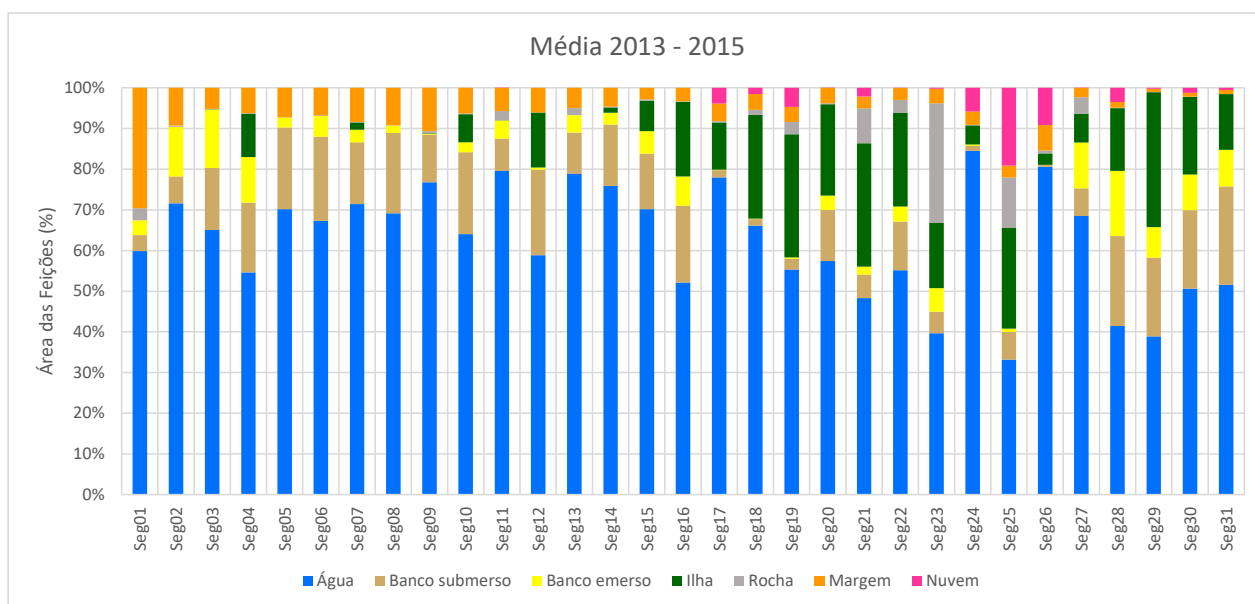


Figura 58 – Média das áreas das feições geomorfológicas entre 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.

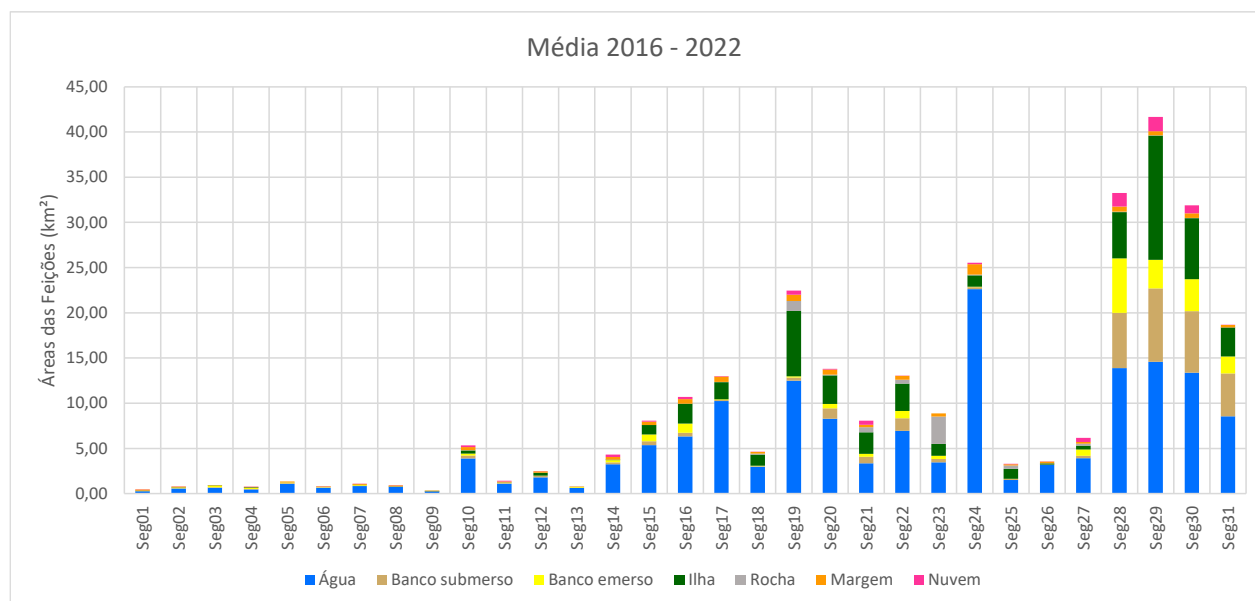
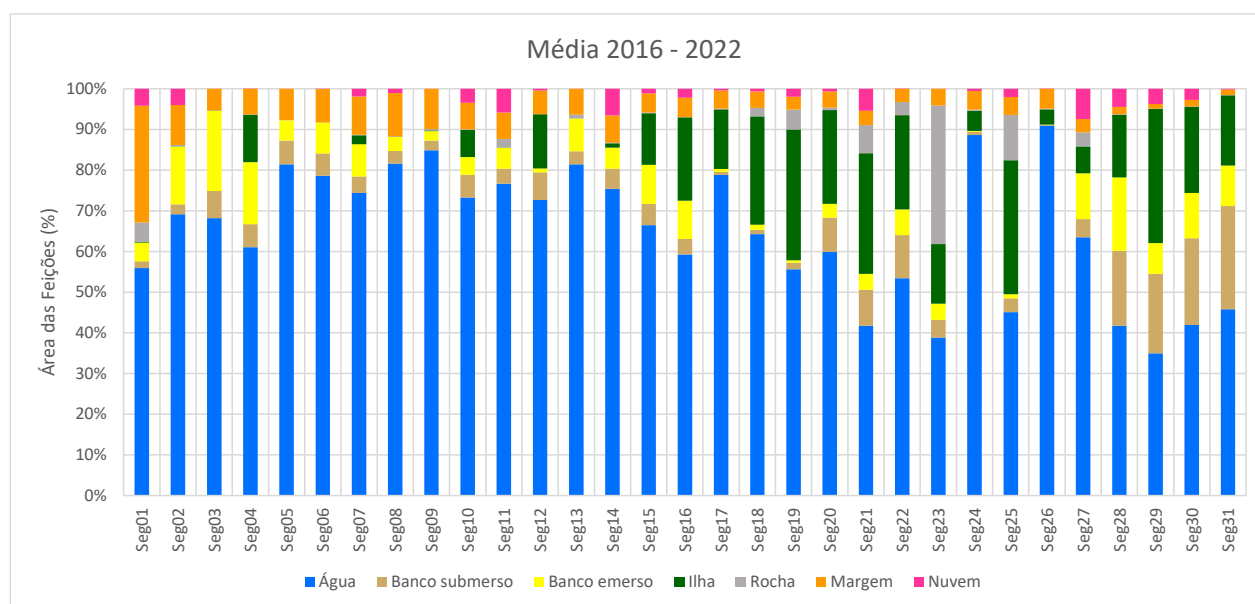


Figura 59 – Distribuição em porcentagem da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.



Considerando-se a média de todos os segmentos avaliados, em geral, não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas entre o período de 2013 a 2015 e o período de 2016 a 2022, conforme apresentado na **Tabela 25**. Os gráficos da **Figura 60** e da **Figura 61** também ilustram as diferenças entre as médias das áreas das feições geomorfológicas

ocupadas nos períodos pré e pós rompimento para os seguimentos e indicam onde essas diferenças são maiores.

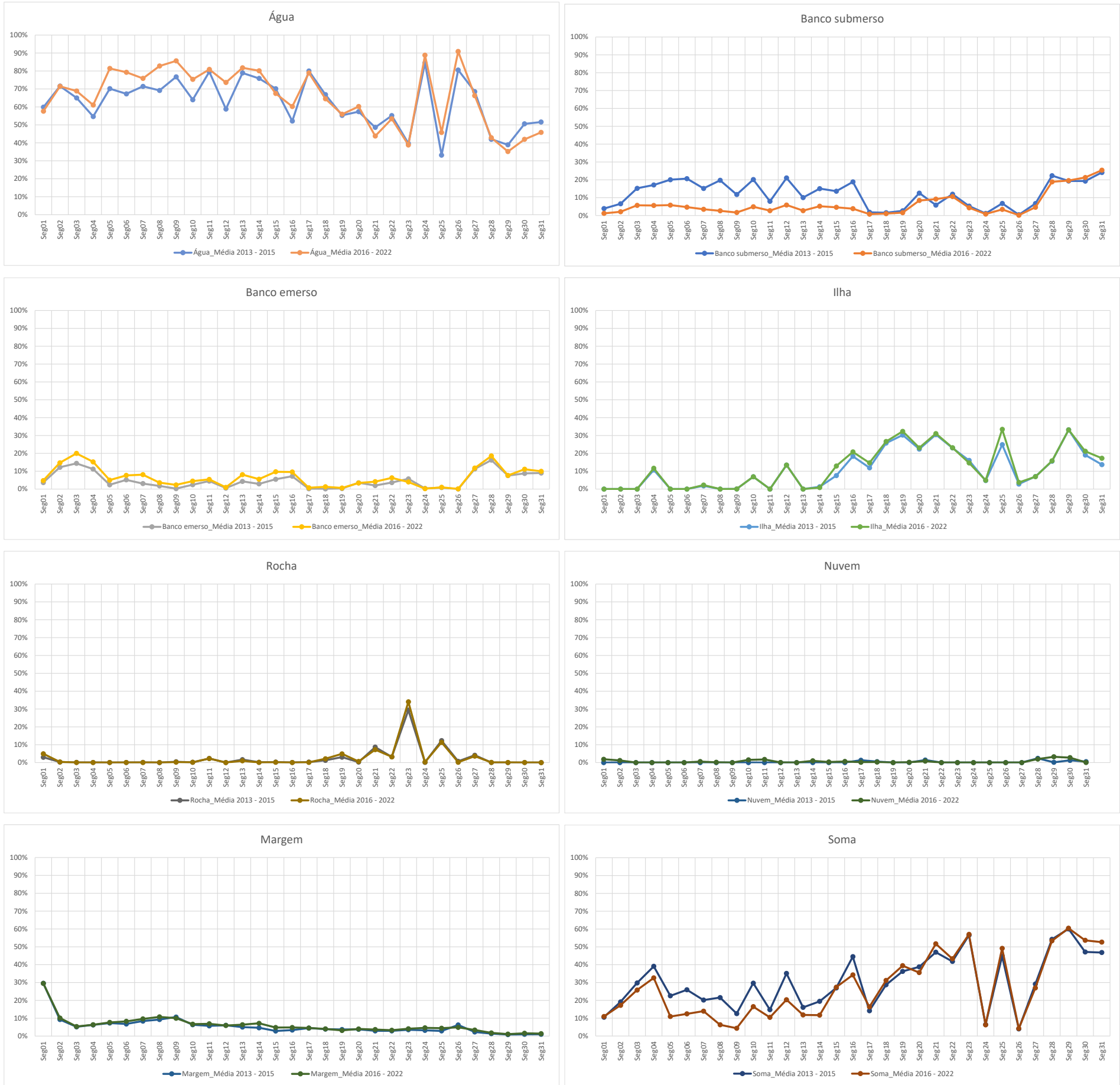
Tabela 25 – Diferença entre as porcentagens médias ocupadas pelas feições geomorfológicas de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós- rompimento) – Total de todos os segmentos.

FEIÇÃO	MÉDIA DE 2013 A 2015	MÉDIA DE 2016 A 2022	DIFERENÇA NAS MÉDIAS
Banco submerso	12,24%	6,25%	-5,99%
Banco emerso	4,87%	6,64%	1,77%
Ilhas fluviais	11,00%	11,97%	0,97%
Rochas	2,34%	2,50%	0,17%
Soma de bancos, ilhas e rochas	30,44%	27,37%	-3,07%

Figura 60 – Comparação da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013-2015 (pré) e 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.



Figura 61 – Comparação das porcentagens de distribuição da média das áreas das feições geomorfológicas entre 2013-2015 (pré) e 2016 e 2022 (pós-rompimento) em cada segmento do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves.



7.5.3 Avaliação Por Segmento

Com os resultados da classificação de feições geomorfológicas obtidos, foi possível analisar de forma mais detalhada a evolução das feições distribuídas em cada segmento ao longo dos anos analisados.

No **Apêndice 04** são apresentados os gráficos de cada segmento considerando a seguinte estrutura de apresentação:

- ✓ Distribuição percentual de cada feição ao longo dos anos e cota d'água nas datas das imagens.
- ✓ Evolução anual das áreas de água, nuvem e soma das feições banco submerso, banco emerso, ilha e rocha, junto com a cota d'água.
- ✓ Evolução anual das feições banco submerso, banco emerso, ilha e rocha, separadas, junto com as cotas d'água e às linhas de tendência de cada feição.

A **Figura 62**, correspondente ao segmento 1, ilustra a apresentação das informações acima.

De maneira geral, na avaliação por segmento ao longo dos anos:

- ✓ Não se observou uma tendência nas áreas das feições que possa estar relacionada ao rompimento da barragem de Fundão.
- ✓ Entre 2019 e 2022 se observa uma redução da área de bancos submersos e bancos emersos, que pode estar relacionada a uma maior cota média do rio Doce nesses períodos secos.
- ✓ Se observa uma diminuição significativa nas áreas de banco submersos no ano de 2016. Essa redução está associada à coloração alaranjada da água, que interferiu na classificação dessa feição nas imagens.

A **Tabela 26** apresenta uma avaliação individual de cada segmento da evolução das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022. Tal avaliação foi realizada observando-se os gráficos e tendências do **Apêndice 04** e os resultados da classificação em mapas (**Apêndice 03**).

Figura 62 – Exemplo de apresentação dos resultados do Apêndice 4 para o Segmento 01.

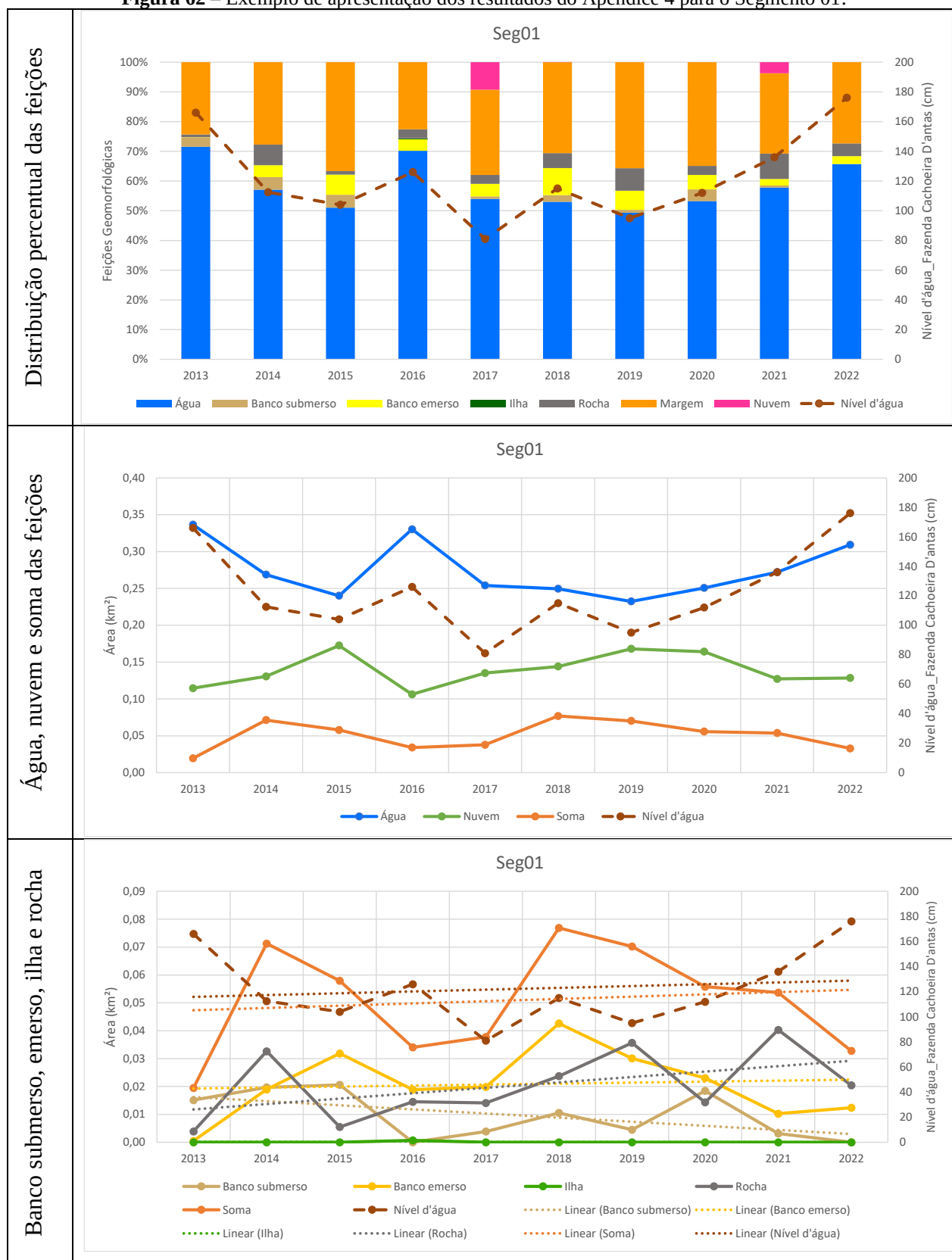


Tabela 26 – Avaliação individual de cada segmento da evolução das áreas das feições geomorfológicas entre 2013 e 2022.

SEGMENTO	AValiação
Segmento 01	• Não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Se observa uma tendência de redução das áreas de bancos submersos no período avaliado. Essa tendência não afeta significativamente a soma de áreas indicada acima.
Segmento 02	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas, influenciada por uma tendência de redução das áreas de bancos submersos e emersos. • Áreas de bancos emersos mais elevadas entre 2015 (pré-rompimento) e 2019 (pós-rompimento) dentre os anos analisados, período em que essa foi a feição predominante, com tendência de redução após 2019, que pode ter relação com a elevação da cota do rio.
Segmento 03	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas, influenciada pela tendência de diminuição dos bancos submersos. • Áreas de bancos emersos (feição predominante em todo o período avaliado) apresentaram redução após 2019, acompanhada pelo aumento do nível d'água.
Segmento 04	• Tendência de redução das áreas de bancos submersos. • Áreas de bancos emersos e ilhas (feições predominantes após 2016) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 05	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas, desde 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos, que foi a feição predominante em todos os anos analisados, exceto 2016 e 2019. • Áreas de bancos emersos (feição predominante em 2016 e 2019) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 06	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos, que foi a feição predominante em 2013, 2014, 2015, 2018, 2020 e 2021. • Áreas de bancos emersos (feição predominante em 2016, 2017 e 2019) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 07	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de diminuição das áreas de bancos submersos, que foi a feição predominante em 2014, 2015, 2018, 2020 e 2021. • Áreas de bancos emersos (feição predominante em 2016, 2017 e 2019) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 08	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2015, influenciada pela tendência de redução das áreas de banco submerso, que foi a feição predominante em 2013, 2014, 2015 e 2018. • Áreas de bancos emersos não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 09	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2015, influenciada pela tendência de redução das áreas de banco submerso, que foi a feição predominante em 2013, 2014, 2015, 2019, 2020 e 2021.

SEGMENTO	AVALIAÇÃO
Segmento 10	• Áreas de bancos emersos (feição predominante nos demais períodos) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado. • Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2015, influenciada pela tendência de redução das áreas de banco submerso, que foi a feição predominante em 2013, 2014, 2015, 2017 e 2019. • Áreas de bancos emersos e ilhas (feição predominante nos demais períodos) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 11	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de banco submerso, que foi a feição predominante em 2014 e 2017, e consonante com o aumento da cota do rio. • Áreas de bancos emersos (feição predominante nos demais anos) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 12	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submerso, que foi a feição predominante em 2014, 2015 e 2019, e consonante com a elevação da cota do rio. • Áreas de bancos emersos e ilhas (feição predominante nos demais períodos) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 13	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos, que foi a feição predominante em 2013 e 2014, e consonante com a de elevação da cota do rio. • Tendência de redução das áreas de bancos emersos (feição predominante de 2015 a 2022) a partir de 2017.
Segmento 14	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos emersos e submersos, ilha se rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos, que foi a feição predominante em 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021, e consonante com a elevação da cota do rio. • Áreas de bancos emersos apresentaram um pico em 2016, mas que retornou aos patamares de 2013, 2014 e 2015 a partir de 2019. Esse pico em 2016 coincide com uma redução da área de bancos submersos, resultando que a soma das áreas de bancos, ilhas e rochas não apresenta variação relevante nesse ano. Esse comportamento de aumento de bancos emersos coincidente com redução de bancos submersos pode estar relacionado a incerteza na classificação de bancos submersos em 2016, conforme discutido anteriormente nesta seção. • Áreas de ilhas não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 15	• Leve tendência de redução da soma das áreas de bancos emersos e submersos, ilhas e rochas a partir de 2014, acentuada a partir de 2019, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos, feição predominante em 2013, 2014, 2015 e 2017, e consonante com o aumento da cota do rio. • Leve tendência de aumento da área de ilhas fluviais (feição predominante em 2017 e a partir de 2019) a partir de 2014, possivelmente associada à cobertura de bancos de areia emersos por vegetação rasteira.
Segmento 16	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submerso (feição predominante em 2014 e 2015) e emerso.

SEGMENTO	AVALIAÇÃO
Segmento 17 (Reservatório de Baguari)	• Áreas de ilhas (feição predominante nos demais períodos) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado. • Leve tendência de aumento da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas desde 2013, influenciado por uma tendência de aumento das áreas de ilhas fluviais (feição predominante em todo o período avaliado). Ao se avaliar o comportamento das áreas de ilhas em intervalos menores de tempo, se observa uma pequena redução entre 2015 (antes do rompimento) e 2016 (após o rompimento), um aumento mais relevante entre 2016 e 2017 e entre 2017 e 2022 uma tendência de estabilidade das áreas. Dessa forma, a tendência indicada acima é causada principalmente por uma variação pontual entre 2016 e 2017, período que não coincide com aquele onde houve o maior transporte de sedimentos associados ao rompimento da barragem de Fundão, entre 2015 e 2016, quando se observou uma pequena redução das áreas de ilhas. Dessa forma, a leve tendência de aumento indicada acima não pode ser associada a impactos do rompimento da barragem de Fundão. Essa variação não apresenta uma relação clara com flutuações da cota do reservatório ou com vazões do rio Doce, de forma que não foi possível identificar o que teria causado o aumento das áreas de ilhas entre 2016 e 2017. • Áreas de bancos submersos e emersos não apresentaram tendências de variação ao longo do período. Essas áreas são relativamente pequenas comparadas às áreas de ilhas fluviais.
Segmento 18	• Não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado), rochas e bancos emersos não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado. • Se observa uma leve tendência de redução das áreas de bancos submersos a partir de 2017. Essa tendência não afeta significativamente a soma de áreas indicada acima.
Segmento 19	• Não se observa uma tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado. • Presença relevante de afloramento rochosos (segunda feição mais abundante no segmento).
Segmento 20	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2014, acentuada e a partir de 2018, influenciada pela tendência de redução das áreas de bancos submersos e emersos. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 21	• Não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 22	• Leve tendência de redução soma das áreas de soma de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2016, influenciada por uma tendência de redução das áreas de bancos submersos e emersos e consonante com o de aumento da cota do rio. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.

SEGMENTO	AVALIAÇÃO
Segmento 23	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2017, influenciada por uma tendência de redução das áreas de bancos submersos e emersos, consonante com o aumento da cota do rio. • Áreas de ilhas não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado. • Presença majoritária de afloramentos rochosos em todos os anos avaliados.
Segmento 24 (Reservatório de Aimorés)	• Não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Áreas de ilhas (feição predominante em todo o período avaliado) não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 25	• Tendência de aumento da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas desde 2013, influenciada por uma tendência de aumento da área de ilhas (feição predominante), e consonante com a tendência de redução da cota do rio. • A tendência indicada acima parece ter relação direta com a elevada presença de nuvens em 2013 (cerca de 40% da área), que resultou em um valor mais baixo da soma das feições bancos submersos e emersos, ilhas e rochas comparado a todo o restante do período avaliado. Se o ano de 2013 for removido da análise, não se observa uma tendência de variação dessa soma de áreas no período de 2014 a 2022. • Desconsiderando-se o ano de 2013, verifica-se, entretanto, uma tendência de aumento das áreas de ilhas e uma tendência de redução das áreas de afloramentos rochosos. Considera-se que isto pode ter relação com incertezas na classificação das imagens, resultando na classificação de afloramentos rochosos como ilhas. Essa hipótese é consistente com a observação apresentada acima, que no período de 2014 a 2022 não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de ilhas, rochas e bancos.
Segmento 26 (Reservatório de Mascarenhas)	• Áreas da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas não apresentaram tendências de variação ao longo do período avaliado.
Segmento 27	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2017, influenciada por uma tendência de redução das áreas de bancos emersos (feição predominante desde 2014) e de bancos submersos, e consonante com o aumento da cota do rio. • Não se observa uma tendência de variação das áreas de ilhas.
Segmento 28	• Tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2016, influenciada por uma tendência de redução das áreas de bancos emersos e submersos, e consonante com a tendência de aumento da cota do rio. • Não se observa uma tendência de variação das áreas de ilhas. • Bancos emersos e submersos e ilhas se alternaram entre as feições predominantes ao longo do período avaliado.
Segmento 29	• Leve tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2016, influenciada por uma leve tendência de redução das áreas de bancos emersos e submersos, e consonante com o aumento da cota do rio. • Não se observa uma tendência de variação das áreas de ilhas, que foi feição predominante em todo o período avaliado, exceto em 2016, onde se observou a predominância de bancos submersos.

SEGMENTO	AVALIAÇÃO
Segmento 30	• Não se observa uma tendência de variação da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas. • Bancos submersos e ilhas se alternaram entre as feições predominantes ao longo do período avaliado. • Bancos submersos apresentaram maior flutuação de área no período avaliado, com o valor mais elevado ocorrendo em 2019.
Segmento 31	• Leve tendência de redução da soma das áreas de bancos submersos e emersos, ilhas e rochas a partir de 2019, influenciado por uma tendência de redução das áreas de bancos submersos (feição predominante na maior parte do período avaliado) e bancos emersos, e consonante com o aumento da cota do rio. • Tendência de aumento da área de ilhas considerando todo o período avaliado. A tendência do aumento da área de ilhas ao passo que se verifica uma tendência de redução da área de bancos emersos pode ter relação com o desenvolvimento de vegetação nesses bancos, alterando sua classificação.

A **Tabela 27** apresenta as diferenças entre as médias de 2013 a 2015 e de 2016 a 2022 para cada segmento. Considerando-se todos os segmentos avaliados (**Tabela 27**), em geral não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas quando observados os períodos pré (2013 a 2015) e pós-rompimento (2016 a 2022). Considerando cada segmento individualmente, as maiores diferenças de áreas entre os períodos avaliados foram verificadas em:

- Segmentos 5, 6, 8, 10, 12 e 16: redução de bancos submersos e da soma de bancos emersos, bancos submersos, ilhas e rochas.
- Segmentos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, e 16: redução de bancos submersos.

Tabela 27 – Diferença entre as médias das áreas das feições geomorfológicas entre os anos de 2013 a 2015 (pré-rompimento) e de 2016 a 2022 (pós-rompimento).

SEGMENTO	BANCO SUBMERSO	BANCO EMERSO	ILHAS	ROCHA	SOMA ^(a)
Seg01	-2,70%	1,14%	0,02%	1,98%	0,44%
Seg02	-4,46%	2,49%	0,00%	0,07%	-1,90%
Seg03	-9,53%	5,60%	0,00%	-0,06%	-3,99%
Seg04	-11,49%	4,06%	0,98%	-0,05%	-6,50%
Seg05	-14,23%	2,60%	0,00%	0,01%	-11,62%
Seg06	-15,95%	2,48%	0,00%	-0,03%	-13,50%
Seg07	-11,66%	5,00%	0,47%	-0,02%	-6,22%
Seg08	-17,08%	1,80%	0,00%	0,02%	-15,26%
Seg09	-10,05%	2,09%	-0,01%	-0,26%	-8,23%
Seg10	-15,23%	2,02%	0,01%	0,00%	-13,20%
Seg11	-5,19%	0,97%	-0,02%	-0,04%	-4,28%
Seg12	-15,15%	0,42%	0,01%	-0,02%	-14,74%
Seg13	-7,33%	3,80%	0,00%	-0,68%	-4,21%
Seg14	-9,83%	2,66%	-0,49%	-0,08%	-7,74%
Seg15	-9,05%	4,20%	5,37%	-0,11%	0,41%

SEGMENTO	BANCO SUBMERSO	BANCO EMERSO	ILHAS	ROCHA	SOMA ^(a)
Seg16	-14,99%	2,36%	2,45%	-0,04%	-10,22%
Seg17	-1,03%	0,57%	2,76%	-0,13%	2,17%
Seg18	-0,52%	1,17%	0,90%	0,88%	2,44%
Seg19	-1,04%	0,27%	2,08%	1,87%	3,19%
Seg20	-4,15%	-0,11%	0,69%	0,36%	-3,21%
Seg21	3,36%	2,17%	0,61%	-1,43%	4,72%
Seg22	-1,36%	2,65%	0,17%	0,03%	1,49%
Seg23	-0,94%	-1,77%	-1,41%	4,64%	0,52%
Seg24	-0,35%	-0,13%	0,19%	0,15%	-0,14%
Seg25	-3,39%	0,18%	8,58%	-0,98%	4,40%
Seg26	-0,27%	0,06%	0,93%	-0,52%	0,19%
Seg27	-2,08%	0,49%	-0,09%	-0,51%	-2,18%
Seg28	-3,46%	2,34%	0,20%	0,06%	-0,85%
Seg29	0,25%	0,09%	-0,02%	0,06%	0,38%
Seg30	2,01%	2,37%	2,13%	0,00%	6,51%
Seg31	1,27%	0,96%	3,58%	0,02%	5,83%
Média	-5,99%	1,77%	0,97%	0,17%	-3,07%

(a) Soma das áreas de bancos submersos, bancos emersos, ilhas e rocha.

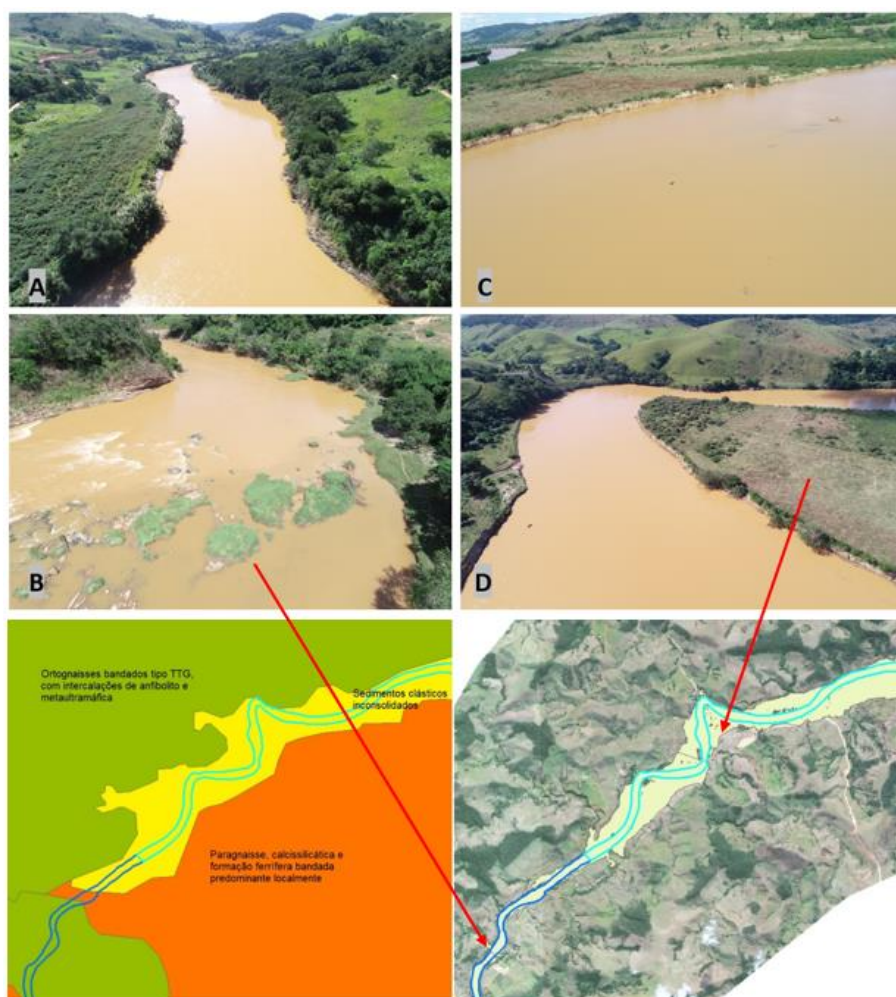
Nota: Valores negativos significam que a média dos valores de 2016 a 2022 foi menor que a média dos valores de 2013 a 2015. Valores positivos significam que a média dos valores de 2016 a 2022 foi maior que a média dos valores de 2013 a 2015.

7.5.4 Avaliação Específica – Inspeção de Campo

O trabalho de campo teve o objetivo de identificar feições geomorfológicas do leito fluvial do rio Doce, a partir da classificação de Rosgen (1994). Buscou-se nessa etapa registrar as principais características físicas dos trechos estudados, possibilitando obter um panorama geral acerca da geomorfologia fluvial, tipo e condições de conservação das margens do rio Doce, presença de bancos arenosos, além do registro das principais feições geomorfológicas de ocorrência na área. Conforme indicado na Seção 5.5, no período da inspeção de campo, definido em função de limitações do cronograma do trabalho, o nível de água do rio Doce estava relativamente alto comparado ao esperado no meio do período seco, limitando as informações obtidas na inspeção de campo. Independentemente dessa limitação, os resultados do levantamento de campo corroboraram as análises realizadas em escritório e os registros estão apresentados no **Apêndice 05**.

Durante o trabalho de campo foram registrados os distintos padrões fluviais encontrados ao longo da área estudada, e que foram apresentados na seção 7.2.8. Na área localizada mais a montante, localizada entre os segmentos 1 a 14, o padrão fluvial do rio Doce é unicanal (**Figura 63**). Neste padrão o canal principal possui um fluxo constante e relativamente uniforme, seguindo uma única direção ao longo do seu percurso. Nesse setor a topografia regional apresenta-se acidentada, com a presença de um canal controlado pela geologia local (ortognaisses), cujo grau de entrincheiramento do canal apresenta-se alto, com a presença de pequenas planícies de inundação e leito rochoso (**Figura 63-A e B**). À medida que o canal vai se tornando mais largo e o rio Doce começa a correr no substrato formado por coberturas sedimentares (sedimentos clásticos inconsolidados), a presença de terraços torna-se mais presente, possibilitando que em períodos de cheia o rio Doce extravase a sua calha, influenciando no aporte sedimentar dessas áreas adjacentes (**Figura 63-C e D**). Nesse processo de influência “extra-canal”, são formadas as ilhas de avulsão, influenciadas pela alteração do curso do canal principal e formação de um canal secundário que entalha a planície de inundação, e se une novamente ao canal principal dando origem à ilha. A energia necessária para provocar a avulsão do canal não provém propriamente do aumento da potência de canal, mas da diferença hidrostática entre a água do canal e a superfície da planície de inundação (Assine, 2005).

Figura 63 – Contexto fluvial e geológico dos segmentos cujo padrão fluvial é unicanal



A presença de feições deposicionais no contexto intracalha se torna mais recorrente à medida que o rio Doce aumenta sua área de contribuição e a largura do canal. A redução da declividade do canal nesses trechos contribui para a redução da velocidade do fluxo provocando o surgimento de barras arenosas centrais e posteriormente o surgimento de ilhas a partir da estabilização pelo desenvolvimento de vegetação e acréscimo vertical por material fino decantado durante os eventos de cheia.

Segundo Leli (2015) o processo de formação deste tipo de ilha depende das condições hidrossedimentológicas que permitem a geração de barras centrais. O leito do canal é composto por diversas formas, dependendo das condições do fluxo e do sedimento presente. Essas formas de leito atuam como obstáculos dentro do canal, afetando o fluxo de água. Há uma interação entre as formas de leito e o fluxo, em um processo de retroalimentação negativa, em que as formas de leito condicionam a atuação e velocidade do fluxo.

De acordo com Suguio e Bigarella (1979), as barras arenosas podem se estabilizar e ser cobertas por sedimentos mais finos após um período de enchentes. Essa cobertura vegetal é iniciada por gramíneas e herbáceas, o que aumenta a rugosidade da superfície da barra e induz à sedimentação de sedimentos mais finos, levando ao aumento da altura da barra. Se o regime hidrológico permanecer relativamente estável por alguns anos, o processo de sedimentação e crescimento da vegetação continua, até que a superfície da barra alcance uma altura semelhante à dos diques marginais. Nesse ponto, a barra desenvolve vegetação de maior porte, como arbustos e árvores. A partir desse estágio, a ilha permanece acima da água, mesmo durante cheias intensas, e é capaz de dividir o fluxo em dois canais secundários. Nesse estudo esse comportamento pode ser identificado a partir do segmento 15 até o segmento 31, cujo padrão fluvial é considerado multicanal, sendo evidenciado a partir dos registros na **Figura 64**.

Figura 64 – Registro de campo da presença de ilhas e barras arenosas determinando o padrão fluvial multicanal



8 RESPOSTAS AOS QUESTIONAMENTOS DA NOTA TÉCNICA CT-GRSA nº 05/2023

Visando esclarecer os questionamentos apresentados na Nota Técnica CT-GRSA nº 05/2023 e complementar as informações já adicionadas no texto, os principais itens solicitados estão dispostos a seguir com as informações requeridas.

i) Qual a relação do aporte sedimentar de rejeitos oriundos da barragem de Fundão com a geomorfologia fluvial?

A partir dos resultados obtidos neste estudo não foi possível identificar alterações da geomorfologia fluvial que possam ter sido causadas pelo aporte de rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão. Conforme discutido ao longo deste documento, a geomorfologia fluvial é naturalmente dinâmica, e por isso buscou-se avaliar eventuais alterações de tendências dessa dinâmica que pudessem estar associadas ao aporte sedimentar de rejeitos. Os dados avaliados não indicaram alterações dessas tendências que pudessem estar associadas ao rompimento da barragem de Fundão. Ressalta-se que alterações pontuais podem ter ocorrido imediatamente após o rompimento, como formação de bancos emersos e submersos com rejeitos ao longo dos trechos fluviais, entretanto, tais alterações não se manifestaram de forma clara no mapeamento realizado para este estudo.

Além disso, nos reservatórios das UHEs de Baguari, Aimorés e Mascarenhas verificou-se um aporte de rejeitos significativo, que resultou em uma taxa de assoreamento mais alta durante a passagem da onda de lama, causando uma alteração da morfologia do fundo desses reservatórios mais rápida do que ocorreria naturalmente (Golder, 2021).

ii) Qual a relação do aporte sedimentar vs disponibilidade hídrica (vazão) do rio Doce?

Não foi verificada qualquer relação entre o aporte sedimentar resultante do rompimento da barragem de Fundão e a vazão do rio Doce. A vazão do rio Doce, e de rios em geral, é controlada pelo fluxo de base e por drenagens superficiais das suas bacias de contribuição, que por sua vez tem relação com fatores que incluem o clima e cobertura do solo nas bacias de contribuição. Não há evidências de que o rompimento da barragem de Fundão tenha afetado algum desses fatores que contribuem para vazão do rio Doce.

iii) Qual a relação entre o aumento de sedimentos finos com as alterações das feições geomorfológicas percebidas em cada segmento?

Conforme apresentado na resposta a questão i) acima, não foram identificadas evidências de que o aumento da concentração de sedimentos em suspensão na água resultante do rompimento da barragem de Fundão tenha resultado em alterações das feições geomorfológicas identificadas em cada segmento através do mapeamento realizado neste estudo.

iv) Qual o motivo para a redução da quantidade de bancos submersos nos segmentos analisados?

Conforme a avaliação dos dados, apresentada de forma detalhada na Seção 6.5.1, as reduções nas áreas de bancos submersos em um mesmo segmento ao longo dos períodos avaliados podem estar associadas tanto a remobilização de material nos bancos, devido ao aumento da vazão do rio, quanto à elevação da cota do rio, fazendo com que a água oculte bancos arenosos nas imagens de satélite.

v) Qual o motivo do aumento de bancos emersos em alguns segmentos analisados?

Conforme apresentado na Seção 6.5.3, em geral não se observou tendência de alteração ou tendência de redução das áreas de bancos emersos ao longo do período avaliado.

O caso mais evidente de aumento da área de bancos emersos foi verificado no Segmento 14, onde a área dessa feição apresentou um pico em 2016, mas que retornou aos patamares de 2013, 2014 e 2015 a partir de 2019. Esse pico em 2016 coincide com uma redução da área de bancos submersos, resultando que a soma das áreas de bancos, ilhas e rochas não apresentou variação relevante nesse ano. Esse comportamento de aumento de bancos emersos coincidente com redução de bancos submersos pode estar relacionado a incerteza na classificação de bancos submersos em 2016.

vi) Qual a associação do aparecimento de rochas à jusante da UHE Risoleta Neves?

Conforme apresentado de forma detalhada na Seção 6.5.1, o aumento da área de rochas na comparação entre períodos avaliados está diretamente correlacionado à variação natural da cota do rio.

vii) Qual o motivo percebido pela redução da quantidade de margens?

Conforme apresentado na Seção 6.5.1, as pequenas variações observadas nas áreas de margens em alguns segmentos estão associadas às flutuações do nível da água. A presença de nuvens e erros de posicionamento das imagens também podem afetar esses resultados especialmente considerando que essa categoria está localizada nas bordas da área de trabalho definida nas imagens utilizadas para o mapeamento das feições geomorfológicas.

viii) Existe relação da redução de margens e aumento do aparecimento de rochas, nos segmentos analisados, pela deposição de sedimentos ou por lixiviação devido à passagem de maior quantidade de sedimentos finos?

Os resultados avaliados não indicam relação entre a variação das áreas de margens e de rochas com a deposição de rejeitos liberados com o rompimento da barragem de Fundão ou com erosão associada a esse evento. Conforme apresentado nas respostas às questões vi) e vii) acima, as variações observadas nas áreas de margens e rochas estão associadas a variações da cota do rio Doce. No caso de margens, também pode haver influência de erros de posicionamento das imagens.

9 CONCLUSÕES

Este estudo visou apresentar a caracterização geomorfológica fluvial do trecho do rio Doce localizado a jusante da barragem da UHE Risoleta Neves até sua foz, no Oceano Atlântico a fim de identificar se há ocorrências de alterações da dinâmica geomorfológica fluvial e aumento de feições deposicionais nos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves (Trechos 13 a 16) que pudessem ser associadas ao rompimento da barragem de Fundão. Nesta seção, são apresentadas conclusões em relação aos objetivos específicos que embasaram o desenvolvimento desse estudo e que constam na Seção 2 deste relatório.

Caracterização geomorfológica dos trechos do rio Doce a jusante da UHE Risoleta Neves

A partir da análise das variáveis geomorfológicas avaliadas neste trabalho, a área de estudo foi dividida em 31 segmentos fluviais. A análise dos diferentes segmentos do rio Doce permitiu a identificação de quatro classes principais de canais fluviais, definidas como B, C, D e F segundo a classificação de Rosgen.

A região localizada mais a montante da área de estudo é caracterizada por apresentar uma drenagem de padrão unicanal, com canal apresentando menor largura, maior grau de entrincheiramento, maior sinuosidade e maior declividade, contribuindo para a produção de sedimentos para os segmentos posteriores. O padrão F foi constatado apenas no segmento 01, sendo o padrão B e C alternando até próximo ao término da região do Parque Estadual do Rio Doce (segmento 14). A partir do segmento 15, ocorre uma alteração da morfologia fluvial para um padrão multicanal (classe D), com presença de barras longitudinais e transversais, além da presença de margens compostas por material arenoso, caracterizando ambientes com maior expressão de características deposicionais. Dentre os parâmetros avaliados, destacam-se o aumento expressivo da relação largura/profundidade do rio Doce no trecho final, indicando que o aumento da área de drenagem contribui significativamente para o alargamento do canal fluvial, porém não é acompanhada no aumento da profundidade média do rio. Fatores como o baixo índice de sinuosidade e valores mais baixos de declividade, além do aumento expressivo da largura do canal, indicam que nesses setores o rio apresenta uma redução na sua capacidade de transporte de sedimentos.

Mapeamento geomorfológico das principais feições fluviais

O mapeamento das feições geomorfológicas foi feito a partir de um processo de classificação supervisionada usando como base imagens de sensoriamento remoto disponíveis para períodos secos dos anos de 2013 a 2022, que cobriram toda a área de estudo. Os resultados do ajuste do modelo de classificação, representados pelo índice Kappa, indicaram uma concordância considerada muito boa (de Ullibbarri & Pita Fernandez, 1999) entre a classificação realizada e o conjunto de validação externa, demonstrando a eficácia do processo de classificação utilizado.

Considerando toda a área de estudo e a média das áreas de todo o período avaliado, a feição geomorfológica mais abundante observada, em termos percentuais de área total incluída no mapeamento, foi ilha fluvial (cerca de 11,61% da área total mapeada), seguida de banco submerso (cerca de 8,15% da área total mapeada) e banco emerso (cerca de 6,08% da área total mapeada). Áreas de afloramento rochosos corresponderam a cerca de 2,41% da área total mapeada.

Os segmentos que apresentaram os maiores percentuais de área de cada feição em relação à área total do segmento, considerando a média dos resultados entre 2013 e 2022, foram:

- Bancos submersos: Segmentos 31 (cerca de 25,02% da área do segmento), 30 (cerca de 20,72% da área do segmento), 28 (cerca de 19,93% da área do segmento) e 29 (cerca de 19,52% da área do segmento).
- Bancos emersos: Segmentos 03 (18,31% da área do segmento), 28 (17,86% da área do segmento), 04 (14,03% da área do segmento), 02 (13,97% da área do segmento) e
- Ilhas fluviais: Segmentos 29 (33,18% da área do segmento), 19 (31,70% da área do segmento), 21 (30,91% da área do segmento) e 25 (30,86% da área do segmento)
- Rochas: Segmentos 23 (32,65% da área do segmento), 25 (11,63% da área do segmento), 21 (7,67% da área do segmento) e 19 (4,35% da área do segmento).

Considerando a soma das áreas das feições indicadas acima, os segmentos que apresentaram os maiores percentuais dessa soma em relação à área total do segmento (média dos resultados entre 2013 e 2022), foram: segmentos 29 (cerca de 60,34% da área do segmento), 23 (cerca de 56,88%

da área do segmento), 28 (cerca de 53,64% da área do segmento) e 30 (cerca de 51,71% da área do segmento).

Os dados apontaram que a maior presença de bancos submersos nos segmentos próximos à foz do rio Doce tem relação com a redução da competência de transporte decorrente do aumento da largura do canal e da redução da profundidade média.

Análise integrada comparativa de feições fluviais de antes e depois do rompimento da barragem de Fundão.

Uma análise integrada dos resultados com avaliação das variações temporais e espaciais foi apresentada neste documento, sendo primeiramente apresentados os resultados gerais da área de estudo, com uma média dos resultados obtidos ao longo do período avaliado (2013 a 2022). Posteriormente, foi apresentada uma comparação das áreas médias pré e pós rompimento, sendo utilizada como uma etapa de *screening* para avaliação de eventuais impactos do rompimento da barragem de Fundão na dinâmica geomorfológica da área de estudo. Em seguida, os resultados foram discutidos considerando cada um dos segmentos apresentados.

Na avaliação geral, observou-se as características de feições geomorfológicas encontradas se relacionam com a classificação de Rosgen (1994) apresentada anteriormente, corroborando com os resultados obtidos. Considerando-se a média de todos os segmentos avaliados, em geral, não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas entre o período de 2013 a 2015 (pré) e o período de 2016 a 2022 (pós-rompimento).

Analisando os segmentos de forma mais detalhada, foi possível avaliar a evolução das feições distribuídas em cada segmento ao longo dos anos analisados. De maneira geral, na avaliação por segmento ao longo dos anos:

- Não se observou uma tendência de variação nas áreas das feições que possa estar relacionada ao rompimento da barragem de Fundão.
- Entre 2019 e 2022 se observou uma redução da área de bancos submersos e bancos emersos, que pode estar relacionada a uma maior cota média do rio Doce nesses períodos secos.

- Se observou uma diminuição significativa nas áreas de banco submersos no ano de 2016. Essa redução está associada à coloração alaranjada da água, que interferiu na classificação dessa feição nas imagens.

Considerando-se todos os segmentos avaliados, em geral não foram verificadas diferenças relevantes nas áreas das feições geomorfológicas quando observados os períodos pré (2013 a 2015) e pós-rompimento (2016 a 2022). Considerando cada segmento individualmente, as maiores diferenças de áreas entre os períodos avaliados foram verificadas em:

- Segmentos 5, 6, 8, 10 e 12: redução de bancos submersos e da soma de bancos emersos, bancos submersos, ilhas e rochas.
- Segmentos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 e 16: redução de bancos submersos.

Com base nos resultados obtidos, entende-se que essas variações são devido à dinâmica natural do rio Doce e podem ter relação ainda com valores mais elevados de nível d'água nos períodos secos mais recentes avaliados (i.e., 2019 a 2022), conforme mencionado acima. Valores mais elevados de picos de descarga líquida nesses períodos mais recentes também podem ter contribuído para uma maior remobilização de bancos submersos comparado ao período inicial avaliado, o que seria um fator adicional para justificar as reduções de áreas indicadas acima.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUGNA, Tesfaye; XU, Wenbo; FAN, Jinlong. Comparison of random forest and support vector machine classifiers for regional land cover mapping using coarse resolution FY-3C images. *Remote Sensing*, v. 14, n. 3, p. 574, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb). 2023.
- AMINI, Saeid et al. Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series. *Remote Sensing*, v. 14, n. 11, p. 2654, 2022.
- ANA, Agência Nacional de Águas. Encarte Especial Sobre a Bacia do Rio Doce-Rompimento da Barragem em MarianaMG. (Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos - SPR/Ministério de Meio Ambiente, Brasília DF, 2016)
- ASSINE, M. L. et al. Compartimentação geomorfológica, processos de avulsão fluvial e mudanças de curso do Rio Taquari, Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 1, 2005.
- BENDA, Lee. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 15, n. 5, p. 457-466, 1990.
- CALEGÁRIO, Artur Telles et al. Adequação do uso da terra na bacia do rio Doce: potencialidades e limitações. *Cadernos de Agroecologia*, v. 15, n. 1, 2020.
- CHRISTOFOLETTI, A. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. 1981.
- CHRISTOFOLETTI, A. Considerações sobre o nível de base, rupturas de declive, capturas fluviais e morfogênese do perfil longitudinal. *Geografia*, v. 2, n.4, p. 81-102, 1977
- COELHO, André Luiz Nascentes. Bacia hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada. Geografares, 2009CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce-Relatório 04: Hidrometria, Sedimentometria e Qualidade da Água nas Estações Fluviométricas da RHN após a Ruptura da Barragem de Rejeito, 2016.

- COSTA, Patrícia Garcia; JUNIOR, Antônio Pereira Magalhães. Estilos Fluviais de Fundos de Vale no Quadrilátero Ferrífero: o caso do Ribeirão do Gaia. Revista Espinhaço, 2015.
- COTA, Guilherme Eduardo Macêdo et al. Discussão dos processos de encouraçamento de leitos fluviais (bed armouring) na perspectiva geomorfológica: o caso do rio Conceição–Quadrilátero Ferrífero/MG. 2019.
- CPRM. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folhas Vitória, SE, 23 Belo Horizonte, SE. 24 Rio Doce, SF 23 Rio de Janeiro e SF 24 Vitória, escala 1:1.000.000,. 2004.
- CPRM. Monitoramento especial da bacia do Rio Doce. Relatório 04: Hidrometria, Sedimentometria e qualidade da água nas estações fluviométricas da RHN após a ruptura da barragem de rejeito. 2016.
- CUPOLILLO, Fulvio; DE ABREU, Magda Luzimar; VIANELLO, Rubens Leite. Climatologia da bacia do rio Doce e sua relação com a topografia local. Revista Geografias, p. 45-60, 2008.
- DAVIS, William M. O ciclo geográfico. São Paulo: Seleção de Textos: Davis & Martone. AGB, v. 19, p. 9-27, 1899.
- DOMINGUEZ, J. M. L., BITTENCOURT, A. C. D. S. P. (1981). Esquema evolutivo da sedimentação quaternária nas feições. Revista Brasileira de Geociências, 11, 4. 1981.
- ECOPLAN-LUME. Plano integrado de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio doce. Relatório Executivo. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.
- FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. A classificação fluvial de rosgen aplicada em córregos da região Oeste do Estado do Paraná, Brasil. Revista do Departamento de Geografia, v. 31, p. 1-13, 2016.
- FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. Determinação do nível e da descarga de margem plena em cursos fluviais. Boletim de Geografia, v. 21, n. 1, p. 97-110, 2003.

- FISRWG - Federal Interagency Stream Restoration Working Group Stream Corridor Restoration: Principals, Processes and Practices US Government Printing Office, Washington, DC, 1998.
- GALAY, V.J., Kellerhats, R. and Bray, D.I, 1973. Diversity of river types in Canada. In: Fluvial Process and Sedimentation. Proceedings of Hydrology Symposium. National Research Council of Canada, pp. 217- 250.
- GOLDER. Atendimento à Clausula 168 do Termo de Ajustamento de Conduta TTAC. Avaliação de impacto sobre as espécies terrestres ameaçadas de extinção. RT-031_159-515-2282_02J. 2016.
- GOLDER. Atualização do Volume 10: Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14. São Paulo/SP. Novembro/2021
- GOLDER. Volume 11 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 15 – Revisão 02. São Paulo/SP. Fevereiro/2022a.
- GOLDER. Volume 12 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 16 – Revisão 02. São Paulo/SP. Fevereiro/2022b.
- GOMES, Lucas Carvalho et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. Geoderma, v. 340, p. 337-350, 2019.
- GRANT, Gordon E.; SWANSON, Frederick J.; WOLMAN, M. Gordon. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. Geological Society of America Bulletin, v. 102, n. 3, p. 340-352, 1990
- GRIZIO, E. V.; SOUZA FILHO, E. E. . As modificações do regime de descarga do rio Paraguai Superior. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 11, p. 25-33, 2010.
- GRIZIO, E. V; DE SOUZA FILHO, E. E. . Avaliação da dinâmica fluvial do Alto Rio Paraguai no período 2004-2006 por meio do uso de imagens Cbers2b/CCD. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, p.2576, 2011.

GRUPO EPA. Relatório de Avaliação da Qualidade do Rejeito Presente na Barragem do Fundão, em Mariana - MG, e na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Aterro de Candonga), em Rio Doce – MG. Fundação Renova. Maio/2019.

HOFFMANN, G. P. et al. A modificação dos usos da terra e seus efeitos no escoamento das águas: uma revisão. 2016.

HORACIO, J. River sinuosity index: geomorphological characterisation. CIREF and Wetlands International European Association, 8p, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Mapa de Unidades de Solos do Brasil. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2001.

KELLERHALS, R., Church, M. and Bray, D.I., 1976. Classification and analysis of river processes. J. Hydraul. Div., ASCE, 102(HY7): 813-829.

KELLERHALS, R., Neill, C.R. and Bray, D.I., 1972. Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta. Research Council of Alberta, River Engineering and Surface Hydrology Report 72-1, p. 52.

LACTEC. Área de Passagem e deposição da Lama de rejeitos no vale do rio Doce. 2020.

LELI, I. T. Gênese, evolução e geomorfologia das ilhas e planície de inundação do Alto Rio Paraná, Brasil. 2015.

LEOPOLD, L.B. and Wolman, M.G., 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. U.S. Geological Survey Prof. Paper 282-B.

LOBATO, Lydia Maria; COSTA, MA da. Recursos minerais no cenário geológico de Minas Gerais. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 1750-1808, 2018.

LOBATO, Lydia Maria; COSTA, MA da. Recursos minerais no cenário geológico de Minas Gerais. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 1750-1808, 2018.

- MATTHES, G., 1956. River engineering. In: P.O. Abbott (Editor), American Civil Engineering Practice. Wiley, New York, Vol. II, pp. 15-56.
- MELTON, F.A., 1936. An empirical classification of flood-plain streams. Geogr. Rev., 26.
- MOLLARD, J.D., 1973. Air photo interpretation of fluvial features. In: Fluvial Processes and Sedimentation. Research Council of Canada, pp. 341-380.
- MONIZ, A.C., NASCIMENTO, A.C.; PAIVA NETTO, J.E. Mobilidade dos constituintes de rochas básicas de São Paulo durante o intemperismo. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.3, n.3, p.201-213, 1973.
- MONTGOMERY, D.R. & BUFFINGTON, J.M. Channel processes, classification, and response. in River Ecology and Management. edited by R. Naiman and R. Bilby. New York, Springer-Verlag: 13-42,1998.
- NIMER, Edmon. Climatologia do brasil. IBGE, 1989.
- PEKEL, J. F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature. 2016.
- PEREIRA, L. E., Amorim, G., Grigio, A. M., & Paranhos Filho, A. C. (2018). Análise comparativa entre métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em área úmida continental. Anuário do Instituto de Geociências, 41(2), 654-662.
- RAMOS, V. M., Guimarães, R. F., Redivo, A. L., Carvalho Júnior, O. A. D., Fernandese, N. F., & Gomes, R. A. T. (2003). Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição
- RHAMA. Análise Integrada sobre o Transporte de Sedimentos e Alterações Geomorfológicas a Jusante da UHE Risoleta Neves. Revisão nº 02. Setembro 2020.
- ROSGEN, David L. A classification of natural rivers. Catena, v. 22, n. 3, p. 169-199, 1994.
- SAADI, Allaoua; CAMPOS, Jackson Cleiton Ferreira. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–

- MG). Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, v. 24, n. 1-2, 2015.
- SHIBA, M. H. et al. Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela aprendizagem por árvore de decisão: uma avaliação de desempenho. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 12, p. 4319-4326, 2005.
- SCHUMM, Stanley A. Patterns of alluvial rivers. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 13, n. 1, p. 5-27, 1985.
- SILVA, Aguinaldo; SOUZA FILHO, EE de; CUNHA, SB da. Padrões de canal do rio Paraguai na região de Cáceres (MT). Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 1, p. 167-177, 2008.
- SOARES, P. C. et al. Associações litológicas do Subgrupo Itararé e sua interpretação ambiental. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 2, p. 131-149, 1977.
- STRAUCH, N. (Org.) A bacia do rio Doce: Estudo Geográfico. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, 1955, 199 p.
- SUGUIO, Kenitiro; BIGARELLA, Joao Jose. Ambiente fluvial. 1979.
- VALENTE, E. L. Caracterização da intensidade de degradação do solo e da cobertura vegetal de uma área no Médio Rio Doce, utilizando imagem IKONOS II. 2005.
- VASCONCELOS, S.G. 2002. Geomorfologia e urbanização no Vale do Aço: as planícies e a cidade de Ipatinga-MG. Belo Horizonte-MG, IGC/UFMG (Dissertação de mestrado), 112p.
- VASCONCELOS, Sueli Gentil; SAADI, Allaoua. O Quaternário do médio rio Doce: aporte da morfodinâmica e do aluvionamento na confluência dos rios Piracicaba e Doce. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Recife, ABEQUA. 2003.
- ZANZARINI, Fabricio V. et al. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, p. 608-614, 2013.

11 EQUIPE TÉCNICA

PROFISSIONAL	FORMAÇÃO	FUNÇÃO
Andreia Garcia	Ecóloga, MSc	Diretora do Projeto
Matheus Ramin	Engenheiro Ambiental e Urbano, MSc	Gerente do Projeto
Antônio Freitas	Engenheiro Químico, PhD	Revisor Sênior
Rowland Atkins	Geomorfólogo Fluvial, MSc	Especialista Sênior em Geomorfologia
Eric Cao	Geomorfólogo Fluvial, MSc	Geomorfólogo
Pedro Almeida	Engenheiro Agrônomo, MSc	Geoprocessamento e Relatório
Leticia Priolli	Engenheira Ambiental e Urbana em formação	Geoprocessamento e Relatório
Rodrigo Utima	Pós-graduação em geoprocessamento	Geoprocessamento
Maurício Aguiar	Geógrafo, Especialista em Tecnologia da Informação Geográfica/Espacial	Trabalhos de Campo
Rodrigo Silva	Gestor Ambiental	Trabalhos de Campo

Ramin,
Matheus
(gld_mramin)

Digitally signed by
Ramin, Matheus
(gld_mramin)
Date: 2024.06.17
09:31:43 -03'00'

Matheus Ramin
Gerente do Projeto

Assinado digitalmente por
andreia.garcia@wsp.com
DN: cn=andreia.garcia@wsp.com
Data: 2024.06.17 10:01:21 -
03'00'

Andreia Garcia
Diretora do Projeto