

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

ÉRICA PATRICIA PRUDENTE

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO
HIDRO-ENERGÉTICO MÁXIMO DE UMA BACIA
HIDROGRÁFICA

ITAJUBÁ – MG

2017

ÉRICA PATRÍCIA PRUDENTE

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO
HIDRO-ENERGÉTICO MÁXIMO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

ITAJUBÁ – MG

2017

ÉRICA PATRICIA PRUDENTE

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO
HIDRO-ENERGÉTICO MÁXIMO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 22 de
Setembro de 2017, conferindo ao autor o título de Mestre em
Ciências em Engenharia de Energia

Itajubá, 22 de Setembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Orientador)
UNIFEI

Prof. Dra. Regina Mambeli Barros
UNIFEI

Prof. Dr. Benedito Claudio da Silva
UNIFEI

Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
EESC - USP

Dedico esse trabalho de dissertação ao Deus Uno e Trino, a Nossa Senhora, aos Santos e Anjos de Deus, aos meus familiares, meu marido e amigos.

AGRADECIMENTOS

Inicio meus agradecimentos a Deus, Uno e Trino, pela força, coragem, amor, compreensão, auxílio e o sustento para terminar esse trabalho. Em especial ao Espírito Santo pela luz nas horas difíceis e a Nossa Senhora pela intercessão. Agradeço também, aos anjos e santos de Deus.

A minha família, em especial aos meus pais, João e Judite, aos meus irmãos, Débora e Carlos, e meu sobrinho Davi, meu grande agradecimento, pela paciência, incentivo, ensinamentos, pelo amor, e pelas renúncias de cada dia.

Ao meu querido marido, Renan, pelo apoio, paciência, amor, incentivo, suporte e alegrias nesse tempo.

Ao professor e orientador, Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, a quem admiro, pelo aprendizado, a perseverança e o apoio depositados em mim.

Ao professor Zulcy pela sugestão do conceito de aproveitamento máximo, do qual se pode desenvolver o trabalho.

Aos amigos da APROER e do CERPCH, que tanto me ajudaram no transcorrer do trabalho.

A Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, por contribuir para minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

O uso de recursos hídricos para a geração de energia hidrelétrica é privilégio de poucos países. O Brasil se encaixa nesse contexto e assim, visando a um maior aproveitamento desses recursos, esta dissertação apresenta um procedimento para a avaliação do potencial máximo que, tecnicamente, é possível de ser explorado em bacias hidrográficas. Para tanto, realizou-se pesquisas e o estudo de caso de prospecção de potenciais hidrelétricos. Assim, foram identificados pontos de possíveis barramentos que serviram de base para a comparação entre os limites teóricos e práticos possíveis de serem instalados em um determinado curso d'água. A partir dos 18 rios estudados e dos eixos identificados, foram obtidos os respectivos coeficientes máximos de aproveitamento de cada bacia hidrográfica, que, posteriormente, foram associados às características físicas das mesmas. Utilizou-se as sub-bacias hidrográficas de códigos 61, 60 e 56 localizadas no Estado de Minas Gerais. Como resultado, foi obtida uma equação que traduz o potencial máximo de exploração de um curso d'água quanto a sua utilização para geração de energia através de usinas hidrelétricas. O procedimento sugerido apresenta a possibilidade de se fornecer mais subsídios para o planejamento da exploração de energia hidrelétrica em bacias hidrográficas de interesse, bem como pode ser utilizado para a otimização de partições de queda e para a identificação de potencial remanescente em bacias hidrográficas que já se encontram em processo de exploração. O trabalho apresenta conclusões e recomendações para trabalhos futuros e complementares.

Palavras-chave: Centrais Hidrelétricas, Exploração de Potenciais, Partição de Quedas.

ABSTRACT

The use of water resources for hydroelectric power is the privilege of few countries. Brazil fits in this context and thus, aiming at a greater use of these resources, this dissertation presents a procedure for the evaluation of the maximum power that, technically, it is possible to be explored in hydrographic basins. For that, research was carried out and the case study of prospecting of hydroelectric potential. Thus, points of possible buses were identified that served as a basis for the comparison between the theoretical and practical limits possible to be installed in a given watercourse. From the 18 rivers studied and the axes identified, the respective maximum coefficients of each river basin were obtained, which were later associated with the physical characteristics of the river basins. The subbasins of codes 61, 60 and 56 located in the State of Minas Gerais were used. As a result, an equation was obtained that reflects the maximum potential of exploration of a watercourse as to its use for generating power through hydroelectric plants. The suggested procedure presents the possibility of providing more subsidies for the planning of hydroelectric energy exploration in a watershed of interest, as well as it can be used for the optimization of fall partitions and for the identification of the remaining potential in hydrographic basins that already in the process of exploitation. The paper presents conclusions and recommendations for future and complementary work.

Key-words: Hydroelectric, Potential Exploration, Fall Partitions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2013.	25
Figura 2: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2014.	25
Figura 3: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2015.	26
Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2016.	26
Figura 5: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2012 e 2013.	29
Figura 6: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2014 e 2015.	29
Figura 7: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2015 e 2016.	30
Figura 8: Etapas de implantação de aproveitamentos hidrelétricos.	36
Figura 9: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Desvio com seus principais componentes.	43
Figura 10: Corte longitudinal, do arranjo com os principais componentes da Central Hidrelétrica de Represamento.	43
Figura 11: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação por Represamento e seus principais componentes.	44
Figura 12: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação em Desvio e seus principais componentes.	44
Figura 13: Arranjo típico para pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda.	45
Figura 14: Esquema geral da metodologia de Prospecção de Potenciais Hidrelétricos.	51
Figura 15: Delimitação da área de drenagem da bacia hidrográfica de um curso d'água.	55
Figura 16: Procura de eixo de barramento com queda concentrada.	61
Figura 17: Localização e estudo da área do eixo da barragem.	62
Figura 18: Estudo da área alagada de um aproveitamento.	63
Figura 19: Estudo da área para alocação da casa de força.	64
Figura 20: Estudo da área para alocação da casa de força utilizando curto-circuito para adução.	65
Figura 21: Esquema para modelagem de geração hidrelétrica.	70
Figura 22: Barramento equivalente modelando uma bacia hidrográfica. Onde: (a) indica a vista do nível do curso d'água. (b) indica a vista da bacia hidrográfica e (c) indica uma única barragem no curso total do rio.	72
Figura 23: Chuva anual características do Estado de Minas Gerais.	83
Figura 24: Clima característico do Estado de Minas Gerais.	84
Figura 25: Geologia do Estado de Minas Gerais.	86
Figura 26: Relevo do Estado de Minas Gerais.	87
Figura 27: Declividade do Estado de Minas Gerais.	89
Figura 28: Solo do Estado de Minas Gerais.	90
Figura 29: Biomas do Estado de Minas Gerais.	91
Figura 30: Fauna no Estado de Minas Gerais.	92
Figura 31: Vegetação do Estado de Minas Gerais.	93
Figura 32: Unidades de Conservação – UCs - do Estado de Minas Gerais.	94
Figura 33: Sub-bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais.	96
Figura 34: Hidrografia do Estado de Minas Gerais.	97
Figura 35: Usinas Hidrelétricas do Estado de Minas Gerais.	98
Figura 36: Locais propícios para a Prospecção de Potenciais Hidrelétricos no Estado de Minas Gerais.	100
Figura 37: Representação do Curso d'água I com base de imagem de satélite.	102
Figura 38: Bacia Hidrográfica do Curso d'água I e seus aproveitamentos.	103

Figura 39: Comportamento dos valores dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} .	108
Figura 40: Comportamento das características das bacias hidrográficas e dos valores dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} .	109
Figura 41: Relação entre a Potência Específica e a Declividade dos cursos d'água.	111
Figura 42: Relação entre o Tempo de Concentração e a Declividade dos cursos d'água.	111
Figura 43: Relação entre as Vazões específicas e as Potências específicas dos cursos d'água.	112
Figura 44: Relação entre os indicadores, as declividades, as áreas de drenagem, os desníveis e os comprimentos dos cursos d'água.	119
Figura 45: Relação entre os indicadores, as declividades, os fatores de forma, as áreas de drenagem, os desníveis e as vazões médias na foz dos cursos d'água.	119
Figura 46: Relação entre os indicadores, K_{zbt} e KR_{zbt} .	121
Figura 47: Relação entre os indicadores, K_{zbp} e KR_{zbp} .	122
Figura 48: Representação do Curso d'água XIX com base de imagem de satélite.	126
Figura 49: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIX e seus aproveitamentos.	126
Figura 50: Relação entre P_{Tinst} e P_{HTDisp} .	131
Figura 51: Relação entre P_{Tproj} e P_{HTDisp} .	132
Figura 52: Representação do Curso d'água II com base de imagem de satélite.	144
Figura 53: Bacia Hidrográfica do Curso d'água II e seus aproveitamentos.	145
Figura 54: Representação do Curso d'água III com base de imagem de satélite.	147
Figura 55: Bacia Hidrográfica do Curso d'água III e seus aproveitamentos.	148
Figura 56: Representação do Curso d'água IV com base de imagem de satélite.	150
Figura 57: Bacia Hidrográfica do Curso d'água IV e seus aproveitamentos.	151
Figura 58: Representação do Curso d'água V com base de imagem de satélite.	153
Figura 59: Bacia Hidrográfica do Curso d'água V e seus aproveitamentos.	154
Figura 60: Representação do Curso d'água VI com base de imagem de satélite.	156
Figura 61: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VI e seus aproveitamentos.	157
Figura 62: Representação do Curso d'água VII com base de imagem de satélite.	159
Figura 63: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VII e seus aproveitamentos.	160
Figura 64: Representação do Curso d'água VIII com base de imagem de satélite.	162
Figura 65: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VIII e seus aproveitamentos.	163
Figura 66: Representação do Curso d'água IX com base de imagem de satélite.	165
Figura 67: Bacia Hidrográfica do Curso d'água IX e seus aproveitamentos.	166
Figura 68: Representação do Curso d'água X com base de imagem de satélite.	168
Figura 69: Bacia Hidrográfica do Curso d'água X e seus aproveitamentos.	169
Figura 70: Representação do Curso d'água XI com base de imagem de satélite.	171
Figura 71: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XI e seus aproveitamentos.	172
Figura 72: Representação do Curso d'água XII com base de imagem de satélite.	174
Figura 73: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XII e seus aproveitamentos.	175
Figura 74: Representação do Curso d'água XIII com base de imagem de satélite.	177
Figura 75: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIII e seus aproveitamentos.	178
Figura 76: Representação do Curso d'água XIV com base de imagem de satélite.	180
Figura 77: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIV e seus aproveitamentos.	181
Figura 78: Representação do Curso d'água XV com base de imagem de satélite.	183
Figura 79: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XV e seus aproveitamentos.	184
Figura 80: Representação do Curso d'água XVI com base de imagem de satélite.	186
Figura 81: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVI e seus aproveitamentos.	187
Figura 82: Representação do Curso d'água XVII com base de imagem de satélite.	189
Figura 83: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVII e seus aproveitamentos.	190

Figura 84: Representação do Curso d'água XVIII com base de imagem de satélite.	193
Figura 85: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVIII e seus aproveitamentos.	194
Figura 86: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as declividades dos cursos d'água.	198
Figura 87: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as potências específicas dos cursos d'água.	199
Figura 88: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os fatores de forma dos cursos d'água.	199
Figura 89: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os tempos de concentração dos cursos d'água.	200
Figura 90: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as áreas de drenagem dos cursos d'água. ..	200
Figura 91: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os comprimentos dos cursos d'água.	201
Figura 92: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os desníveis dos cursos d'água.	201
Figura 93: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as vazões médias dos cursos d'água.	202
Figura 94: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as vazões específicas dos cursos d'água. ..	202
Figura 95: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as áreas de drenagem e as declividades dos cursos d'água.	203
Figura 96: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) , as vazões médias, as áreas de drenagem e os comprimentos dos cursos d'água.	203
Figura 97: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as áreas de drenagem, os tempos de concentração e as declividades dos cursos d'água.	204
Figura 98: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) , as áreas de drenagem, as declividades e os comprimentos dos cursos d'água.	204
Figura 99: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, as áreas de drenagem e os desníveis dos cursos d'água.	205
Figura 100: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, as áreas de drenagem, os desníveis e os comprimentos dos cursos d'água.	205
Figura 101: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as potências específicas, os fatores de forma e os tempos de concentração dos cursos d'água.	206
Figura 102: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as potências específicas, os fatores de forma e as vazões médias dos cursos d'água.	206
Figura 103: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, os fatores de forma, as vazões médias, as áreas de drenagem e os desníveis dos cursos d'água.	207
Figura 104: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) em função das declividades dos cursos d'água.	207
Figura 105: Representação do Curso d'água XX com base de imagem de satélite.	210
Figura 106: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XX e seus aproveitamentos.	211
Figura 107: Representação do Curso d'água XXI com base de imagem de satélite.	212
Figura 108: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXI e seus aproveitamentos.	213
Figura 109: Representação do Curso d'água XXII com base de imagem de satélite.	214
Figura 110: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXII e seus aproveitamentos.	215
Figura 111: Representação do Curso d'água XXIII com base de imagem de satélite.	216
Figura 112: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXIII e seus aproveitamentos.	217
Figura 109: Representação do Curso d'água XXIV com base de imagem de satélite.	218
Figura 114: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXIV e seus aproveitamentos.	219
Figura 115: Representação do Curso d'água XXV com base de imagem de satélite.	220
Figura 116: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXV e seus aproveitamentos.	221
Figura 117: Representação do Curso d'água XXVI com base de imagem de satélite.	222
Figura 118: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVI e seus aproveitamentos.	223
Figura 119: Representação do Curso d'água XXVII com base de imagem de satélite.	224

Figura 120: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVII e seus aproveitamentos.	226
Figura 121: Representação do Curso d'água XXVIII com base de imagem de satélite.	227
Figura 122: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVIII e seus aproveitamentos.....	228

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Oferta interna de energia para os anos de 2012 a 2016.	27
Tabela 2: Consumo final por fonte no Brasil para os anos base de 2012 a 2016.	28
Tabela 3: Oferta e consumo de energia no Brasil para os anos base de 2014, 2015 e 2016.	30
Tabela 4: Listagem e informações da População vetorial do sistema.	56
Tabela 5: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água I.	104
Tabela 6: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água I.	105
Tabela 7: Resultado final das análises dos potenciais hidráulicos – Cursos d'água de I a IX.	106
Tabela 8: Resultado final das análises dos potenciais hidráulicos – Cursos d'água de X a XVIII.	107
Tabela 9: Correlações entre as características das bacias hidrográficas.	110
Tabela 10: Correlações dos parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} e as características das bacias hidrográficas, com seus coeficientes de correlação.	113
Tabela 11: Dados do desvio padrão para os 18 cursos d'água analisados, com relação aos valores recalculados - KR_{zbt} e KR_{zbp}	117
Tabela 12: Dados da relação dos indicadores e a declividade, o fator de forma, a área de drenagem, o desnível e a vazão média na foz dos cursos d'água.	118
Tabela 13: Dados da relação dos indicadores e as declividades, os fatores de forma, as áreas de drenagem, os desníveis e as vazões médias na foz dos cursos d'água.	120
Tabela 14: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIX.	127
Tabela 15: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIX.	127
Tabela 16: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de I a IX.	128
Tabela 17: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de X a XVIII.	129
Tabela 18: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de XIX a XXVIII.	130
Tabela 19: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água II.	146
Tabela 20: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água II.	147
Tabela 21: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água III.	149
Tabela 22: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água III.	150
Tabela 23: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água IV.	152
Tabela 24: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água IV.	153
Tabela 25: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água V.	155
Tabela 26: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água V.	156
Tabela 27: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VI.	158
Tabela 28: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VI.	159
Tabela 29: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VII.	161
Tabela 30: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VII.	162
Tabela 31: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VIII.	164
Tabela 32: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VIII.	165
Tabela 33: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água IX.	167
Tabela 34: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água IX.	168
Tabela 35: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água X.	170
Tabela 36: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água X.	171
Tabela 37: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XI.	173
Tabela 38: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XI.	174

Tabela 39: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XII.....	176
Tabela 40: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XII.....	177
Tabela 41: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIII.....	179
Tabela 42: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIII.....	180
Tabela 43: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIV.....	182
Tabela 44: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIV.....	183
Tabela 45: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XV.....	185
Tabela 46: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XV.....	186
Tabela 47: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVI.....	188
Tabela 48: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVI.....	189
Tabela 49: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVII.....	191
Tabela 50: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVII.....	193
Tabela 51: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVIII.....	195
Tabela 52: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVIII.....	197
Tabela 14: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XX.....	210
Tabela 53: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XX.....	211
Tabela 55: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXI.....	212
Tabela 56: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXI.....	213
Tabela 57: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXII.....	214
Tabela 58: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXII.....	215
Tabela 59: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXIII.....	216
Tabela 60: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXIII.....	217
Tabela 61: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXIV.....	219
Tabela 62: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXIV.....	220
Tabela 63: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXV.....	221
Tabela 64: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXV.....	222
Tabela 65: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVI.....	223
Tabela 66: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVI.....	224
Tabela 67: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVII.....	225
Tabela 68: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVII.....	225
Tabela 69: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVIII.....	227
Tabela 70: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVIII.....	228

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AP – Alternativas de Projeto

BEN – Balanço Energético Nacional

BIG – Banco de Informações da Geração

CDE – Conta de Desenvolvimento Energético

CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas

CGH - Central Geradora Hidrelétrica

CHBQ – Central Hidrelétrica de Baixa Queda

CHD – Central Hidrelétrica de Desvio

CHR – Central Hidrelétrica de Represamento

CHV – Central Hidrelétrica de Derivação

CHVD – Central Hidrelétrica de Derivação de Desvio

CHVR – Central Hidrelétrica de Derivação de Represamento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GPS – Sistema de Posicionamento Global

HIDROWEB – Sistema de Informações Hidrológicas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – Agência Internacional de Energia

IEDE – Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais

IEF – Instituto Estadual de Florestas

IGA - Instituto de Geociências Aplicadas

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

LI – Licença de Instalação

LO – Licença de Operação

LP – Licença Ambiental Prévia

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

MMA – Ministério de Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia

NA – Nível d'água

OIE - Oferta Interna de Energia

PCH- Pequena Central Hidrelétrica

PIB – Produto Interno Bruto

PGR – Programa de Gerenciamento de Riscos

PPH – Prospecção de Potenciais Hidrelétricos

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SIGEL – Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico

UC – Unidades de Conservação

UHE- Usina Hidrelétrica de Energia

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área do reservatório

AD_{aprov} – área de drenagem do aproveitamento

AD_{est} – área de drenagem da estação fluviométrica

AD_i – área de drenagem da bacia hidrográfica de um curso d'água

F_i – foz de um determinado curso d'água

FT - Fator de transposição

g – aceleração da gravidade

H_B - altura bruta

h_{F_i} – altura da foz de um curso d'água

h_i - altura em uma dada seção

H_{NF} - altura bruta entre a média ponderada das cotas das nascentes e a foz de um rio

h_{N_i} – altura da nascente de um curso d'água

I_{BH} – declividade média

K_{UC} – fator de uso corrigido

K_{ES} – coeficiente de correlação dos parâmetros da bacia hidrográfica e o K_{zbt}

K_F – fator de forma

km – quilômetro

K_{R_{zbp}} – coeficiente que relaciona a potência total de projeto e a potência total teórica – recalculado

K_{R_{zbt}} – coeficiente que relaciona a potência teórica instalada e a potência total teórica - recalculado

kW - quilowatt

K_{ZB} – fator de uso

K_{zbt} – coeficiente que relaciona a potência teórica instalada e a potência total teórica

K_{zbp} – coeficiente que relaciona a potência total de projeto e a potência total teórica

L – comprimento do curso d'água

m – metros

m̄ – vazão mássica

Mtep – mega tonelada equivalente de petróleo

MW – megawatt

n – número de mols

$\overline{N\bar{A}_N}$ – nível máximo

$\overline{N\bar{A}_{Ni}}$ – média ponderada das cotas das nascentes

Ni – nascente de um determinado curso d'água

P – potência elétrica instalada

P_B – potência bruta

P_{esp} – potência específica

P_{HDisp} - potência hídrica disponível em um curso d'água

P_{HTB} - potência hidráulica teórica bruta

P_{HTDisp} - potência hidráulica teórica disponível em um curso d'água

P_{T inst} – potência teórica instalada

P_{TMAX} - potência hidráulica média teórica máxima

\overline{P}_{TMAX} – potência média máxima

P_{T proj} – potência total de projeto

\overline{Q} - vazão media

Q_c – energia em forma de calor

q_{esp} - vazão específica

Q_{est} – vazão da estação fluviométrica

\overline{Q}_F é a vazão média na foz do curso d'água

Q_{Fi} – vazão média da foz de um curso d'água em uma seção aleatória

Q_{mlt} – vazão média de longo termo

Q_{mlt aprov}– vazão média de longo termo para um determinado aproveitamento hidrelétrico

Q_{mlt est}– vazão média de longo termo da estação fluviométrica

Q_{proj} – vazão de projeto

R – curso d'água

R_g – constante do gás

s – segundos

S – área de drenagem

S_l - seção limitante do trecho de um rio em declive

T_c - tempo de concentração

tep – tonelada equivalente de petróleo

T_f – temperatura final

T_i – temperatura inicial

TWh – terawatt por hora

U – energia interna

W - trabalho

z_B - número de barramentos existentes ao longo de um curso d'água

η - rendimento do conjunto turbina e gerador

η_c – rendimento térmico de Carnot

η_T – rendimento térmico teórico

ρ - massa específica da água

ΔU – variação de energia interna

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	21
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	23
2.2. CONTEXTO REGULATÓRIO E INSTITUCIONAL	31
2.3. IMPLANTAÇÃO DE USINA HIDRELÉTRICA	34
2.4. ENQUADRAMENTO DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	36
2.5. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS	39
2.6. ALGUNS ASPECTOS BÁSICOS DE PROJETOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS ..	41
2.7. PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS	45
2.7.1. Análise hidrológica	47
3. MÉTODO DE PESQUISA	49
3.1. METODOLOGIA APLICADA À PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS	49
3.1.1. Análise hidrológica	49
3.1.2. Estrutura geral	50
3.1.3. Ferramenta SIG – Sistema de Informações Geográficas – <i>software Global Mapper</i> ®	51
3.1.4. Caracterização topológica da bacia	53
3.1.5. População do sistema	55
3.1.6. Análise hidrológica	57
3.1.7. Identificação e caracterização dos Aproveitamentos Hidrelétricos.....	60
3.1.8. Avaliação do Potencial Energético	66
3.1.9. Avaliação de condicionantes e restrições à implantação de centrais hidrelétricas.....	67
3.2. O LIMITE APROVEITÁVEL DO POTENCIAL HIDRÁULICO PARA A EXPLORAÇÃO SEQUENCIAL DE UM CURSO D'ÁGUA	67
3.2.1. Potência hidráulica média máxima de um trecho de curso d'água	71
3.2.2. Potência hidráulica teórica disponível em função do número de aproveitamentos de um curso d'água	73
3.3. INDICADORES PARA A ANÁLISE DOS POTENCIAIS HIDRÁULICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA.....	74
3.3.1. Forma da Bacia.....	75
3.3.2. Comprimento do Curso d'água Estudado.	76
3.3.3. Potência total de projeto.....	77
3.3.4. Potência hídrica disponível	77

	19
3.3.5. Potência teórica instalada	77
3.3.6. Vazão específica da bacia	78
3.3.7. Declividade da Bacia.....	78
3.3.8. Potência específica	79
3.3.9. Tempo de Concentração.....	79
3.3.10. Indicadores de Potencial da Bacia Hidrográfica	80
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	82
4.1. ASPECTOS FÍSICOS	82
4.2. ASPECTOS BIOLÓGICOS.....	91
4.3. RECURSOS HÍDRICOS	95
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE USO CORRIGIDO DE UM POTENCIAL HÍDRICO DE ACORDO COM AS CARACTERÍSTICAS DE CURSOS D'ÁGUA – ESTUDOS DE CASO. 101	105
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO.....	105
5.3. APLICAÇÃO DO EQUACIONAMENTO.	125
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	133
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICE A – DADOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS CUJOS POTENCIAIS HIDROENERGÉTICOS FORAM PROSPECTADOS	144
APÊNDICE B – CORRELAÇÕES DOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA K_{ZBT} E K_{ZBP} COM CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	198
APÊNDICE C – VALIDAÇÃO DA FÓRMULA PARA O CALCULO DA POTÊNCIA MÁXIMA APROVEITÁVEL EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.....	209

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade, em termos de suprimento energético, é tida como a forma mais conveniente e versátil da energia. O Brasil dispõe de uma das maiores redes hidrográficas do mundo e apresenta como sua principal fonte de energia as usinas hidrelétricas, salientado pelos dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para o ano base de 2016, em que se apresenta que o país superou a marca de 150 GW em capacidade instalada, sendo 61,32% oriundo de fonte hídrica e 16,7% de fonte fóssil (ANEEL, 2017).

As crescentes necessidades de energia elétrica para o consumo humano e a disponibilidade da rede hidrográfica brasileira norteiam e motivam a realização desta dissertação, que visa ao aproveitamento hidráulico máximo do potencial energético disponível em bacias hidrográficas.

Outras razões igualmente importantes, que justificam a preocupação em se aproveitar ao máximo um curso d'água para a geração de energia elétrica são: o conhecimento tecnológico já existente e em desenvolvimento no país; o baixo impacto ambiental; as razões econômicas, a manutenção da matriz energética limpa e a proximidade da energia gerada com o meio consumidor. Além disso, a vantagem de se utilizar a metodologia é o baixo custo do estudo, devido à utilização de software (*Global Mapper*©) para a detecção dos potenciais hidrelétricos à distância e a avaliação da viabilidade do possível local de implantação da usina, além da disponibilidade de dados de sensoriamento.

Com o objetivo de definir uma metodologia para a avaliação do aproveitamento hidroenergético máximo de uma bacia hidrográfica, foram realizados estudos em três diferentes sub-bacias do estado de Minas Gerais. A aplicabilidade do procedimento é verificada em rios com aproveitamentos em cascata previamente estudados por Prospecção de Potenciais Hidrelétricos (PPH). A PPH consiste na identificação dos locais para possíveis usinas hidráulicas, na estimativa do potencial de geração por unidade de discretização em que se considera as restrições de desenvolvimento e na identificação dos locais viáveis com base em critérios de viabilidade econômica e ambiental. A partir dos rios estudados, foram obtidos os coeficientes máximos de aproveitamento de cada bacia hidrográfica que foram associados às respectivas características físicas das mesmas. Por fim, obteve-se um conjunto de equações que traduz o potencial máximo de exploração de energia hidrelétrica de um curso d'água.

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

- Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho consiste na análise de um procedimento que visa à avaliação dos limites teórico e prático da potência máxima que, tecnicamente, é possível de explorar em uma determinada bacia hidrográfica. Também objetiva estabelecer critérios para identificar o aproveitamento ótimo em análises de múltiplos critérios, contemplando fatores topográficos, geológicos, hidrológicos, ambientais e de infraestrutura.

- Objetivos Específicos

Para a realização do trabalho apresenta-se os objetivos específicos listados a seguir:

a) A formação de uma base de dados georreferenciados. O levantamento de variáveis espaciais geradas por instituições públicas, com abrangência da área de interesse do estudo, que possam identificar as informações fisiográficas do relevo, as hidrológicas e as de caráter ambientais como as Unidades de Conservação – UC. Esses vetores formaram uma base de dados georreferenciados aplicáveis que auxiliaram na PPH.

b) A realização dos estudos de PPH a fim de se identificar sítios favoráveis ao potencial bruto de hidroenergia e assim, obter-se pontos possíveis de implantação de aproveitamentos hidrelétricos.

c) A obtenção dos valores de limites teóricos e práticos possíveis de serem instalados em um determinado curso d'água.

d) A análise de componentes físicos das bacias hidrográficas e suas possíveis interferências no valor dos limites teóricos.

e) A realização de estudos de caso nas sub-bacias hidrográficas de códigos 61,60 e 56, localizadas no Estado de Minas Gerais.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está estruturada em 7 capítulos e 2 apêndices.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da bibliografia estudada, em que se apresenta a composição da matriz energética brasileira, a contextualização regulatória e institucional, a forma de implantação de uma usina hidrelétrica, bem como as vantagens de construção desse tipo de empreendimento, a prospecção, os tipos de projetos e os componentes básicos de centrais hidrelétricas.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia para avaliação do potencial energético em bacias hidrográficas. Também, é descrita a forma de aplicação dos métodos para o estudo do limite aproveitável do potencial hidráulico para a exploração sequencial de um rio.

No Capítulo 4 são apresentadas as características do Estado de Minas Gerais. A região analisada no trabalho abrange as sub-bacias hidrográficas de códigos 61, 60 e 56.

No Capítulo 5, apresenta-se os resultados e as análises obtidas para os estudos de caso, mostrando as particularidades de cada um dos sistemas.

No Capítulo 6 são feitas as considerações e recomendações finais sobre os dados do estudo.

No Capítulo 7, apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas.

No Apêndice A, encontram-se os dados da Prospecção de Potenciais Hidrelétricos.

No Apêndice B, são apresentadas as equações e gráficos das relações entre os coeficientes de potência analisados e dos parâmetros das bacias hidrográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fácil acesso de uma população à serviços de infraestrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia é, segundo a ANEEL (2008), uma das variáveis utilizadas para definir um país como desenvolvido. Logo, a energia, apresentada por Marques (2001), como sendo a capacidade de promover mudanças de estado, é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e social, pois fornece o apoio mecânico, térmico e elétrico necessários às ações humanas (ANEEL, 2008).

Segundo informações de Tiago Filho et. al (2011) o Brasil se encontra em um cenário com abundantes fontes de energias renováveis, e apresenta sua matriz de energia elétrica oriunda, predominantemente, da geração hidrelétrica.

Há milhares de anos, o homem já vem aproveitando a energia hidráulica e convertendo-a em outras formas de energia (TIAGO FILHO et al., 2007). Entre o final do século XIX e início do século XX, predominavam no Brasil as frações térmicas, principalmente nas grandes metrópoles e capitais. A partir de meados do século XX muitos Estados passaram a adotar a matriz hidrelétrica como fonte predominante, especialmente Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina. (CARNEIRO, 2010).

Na crescente necessidade da sociedade pelo suprimento de energia elétrica para o consumo humano, registra-se, que as Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs, que foram as precursoras da matriz hidroenergética brasileira (CARNEIRO, 2010).

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica para uma melhor compreensão desse estudo.

2.1. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica em que se destaca a geração hidráulica. Essa sofreu redução nos últimos quatro anos consecutivos, devido às condições hidrológicas desfavoráveis observadas ao longo desse período. Um estudo apresentado por Tiago Filho et al. (2007), já mencionava que o país poderia estar em risco de suprimentos como água e luz, por um período de tempo maior do que estávamos acostumados a suportar.

O decréscimo da oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) foi da ordem de 5,4% em 2013, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014) e, a redução foi de 2,1% em relação ao ano de 2014, segundo dados da EPE para o ano base de 2015 (EPE, 2016) e da ordem de 3,8% para o ano base de 2016 (EPE, 2017). Parte dessa queda sofreu influência do comportamento da oferta interna de petróleo e derivados que retraiu 7,2% para o ano base de 2014, em consequência do superávit nos fluxos de exportação e importação dessas fontes energéticas. Esse fator contribuiu para a queda da oferta interna bruta e está relacionado com o enfraquecimento da atividade econômica nos anos de 2015 e 2016, anos em que o Brasil sofreu uma contração de 3,8% e 3,6%, respectivamente, em seu Produto Interno Bruto – PIB, segundo informações do IBGE (EPE, 2016 e EPE, 2017).

Houve o recuo da participação de renováveis na matriz elétrica brasileira, de 84,5% em 2012 para 79,3% em 2013, apesar do incremento de 1, 724 MW na potência instalada do parque hidrelétrico (EPE, 2014). Ainda para o ano de 2013, a EPE (2014) preconiza que a energia de fonte hidráulica respondeu por 70,6% da matriz energética brasileira. Na oferta de energia elétrica, que totalizou 609,9 TWh (aumento de 2,9% em relação a 2012), a hidroeletricidade produzida foi de 430,9 TWh, constituindo-se, de longe, na maior produtora de eletricidade do país. As importações líquidas foram de 39,9 TWh.

Por sua vez, a oferta interna da energia elétrica sofreu um recuo no valor de 8,4 TWh (1,3%) e a energia hidráulica apresentou um decréscimo de 3,2% comparado ao ano de 2014. Apesar da menor oferta hídrica, em 2015, ocorreu um avanço na participação de renováveis na matriz elétrica brasileira da ordem de 74,6% para 75,5%, que pode ser explicado pela queda da geração térmica a base de derivados de petróleo e pelo incremento da geração a base de biomassa e eólica (EPE, 2016).

A participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira, em 2015 e 2016, manteve-se entre as mais elevadas do mundo, apresentando um pequeno crescimento devido à queda da oferta interna de petróleo e derivados, isto segundo informações apresentadas pela EPE (2016; 2017). O Brasil apresentou 43,5%, 41,2%, 39,4% e 40,4% de renováveis em sua matriz energética, para os anos de 2016, 2015, 2014 e 2013, respectivamente, ao passo que o mundo apresentou, em 2013, o valor percentual de 13,5% e em 2014 o valor de 13,5% (EPE, 2016; 2017).

As Figuras 1, 2, 3 e 4, mostram a evolução da participação das diferentes fontes de energia que compõem a Matriz Elétrica Brasileira, referentes aos anos de 2013, 2014, 2015 e

2016, respectivamente. Nestes gráficos considerou-se que os dados do carvão e derivados incluem o gás de coqueria; os dados hidráulicos agregam importações e os dados de biomassa incluem lenha, bagaço de cana, lixívia e outras primárias.

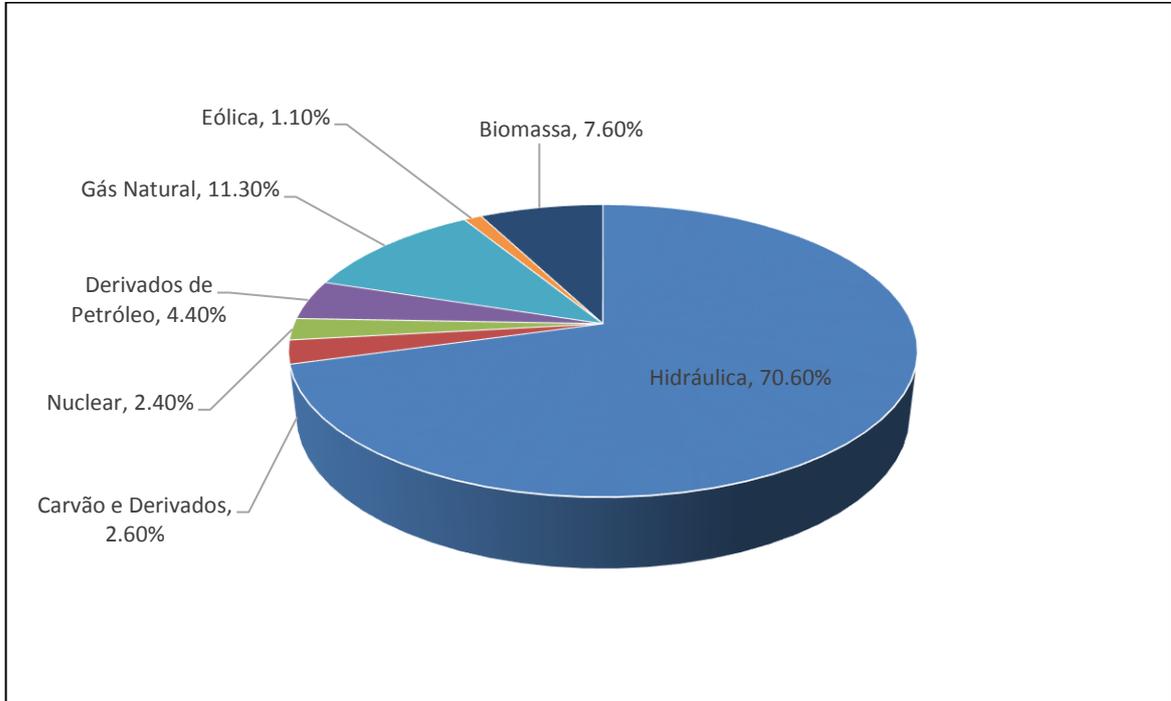


Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2013.
 Fonte: Modificado de EPE, 2014.

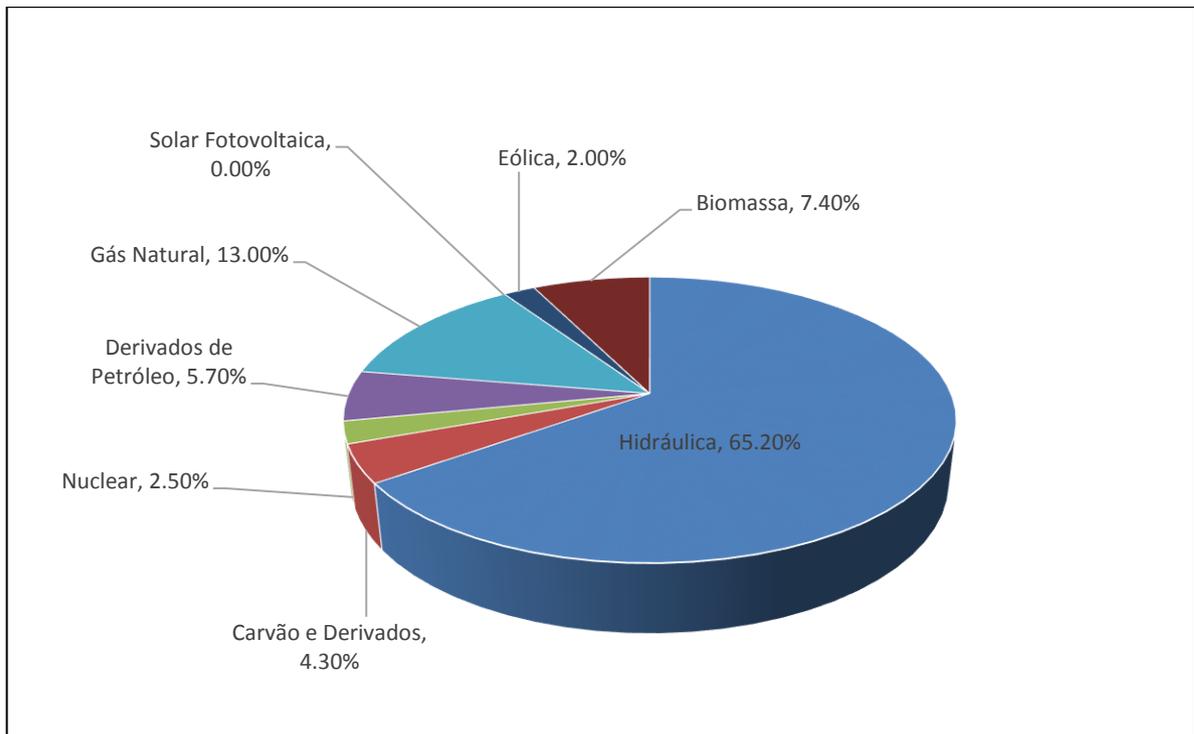


Figura 2: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2014.
 Fonte: Modificado de EPE, 2016.

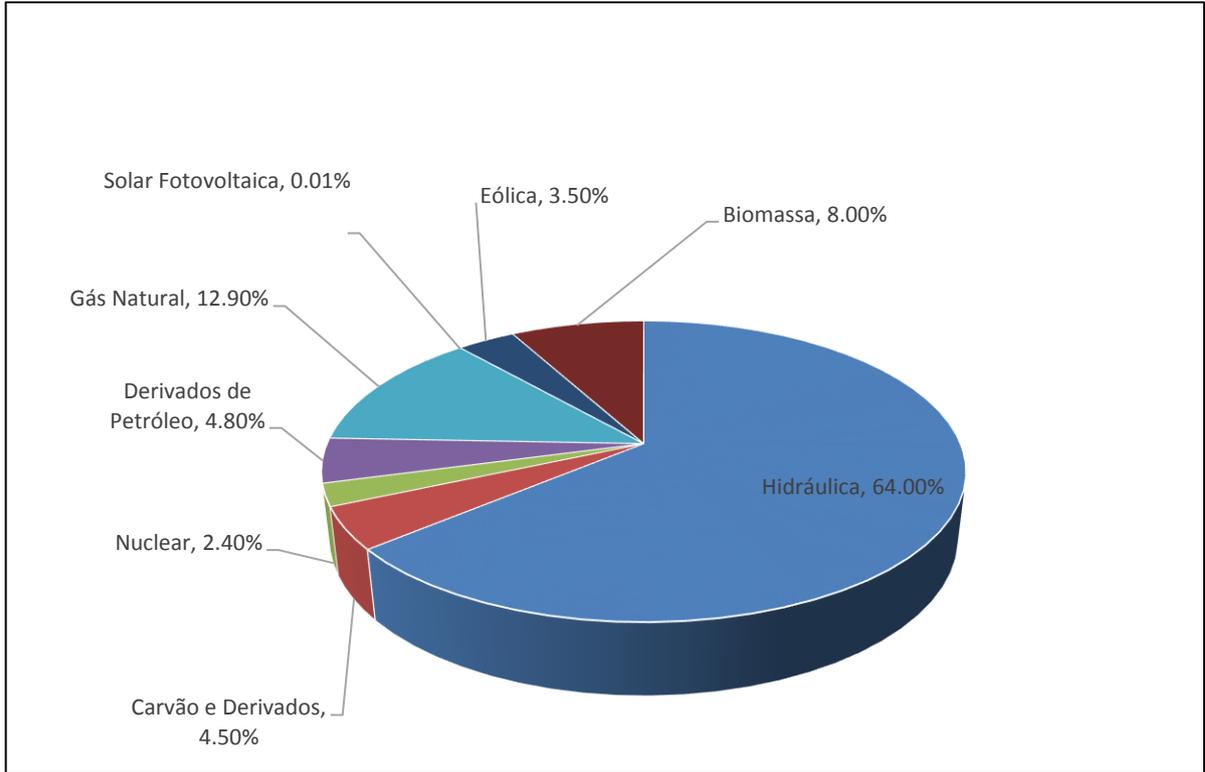


Figura 3: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2015.
Fonte: Modificado de EPE, 2016.

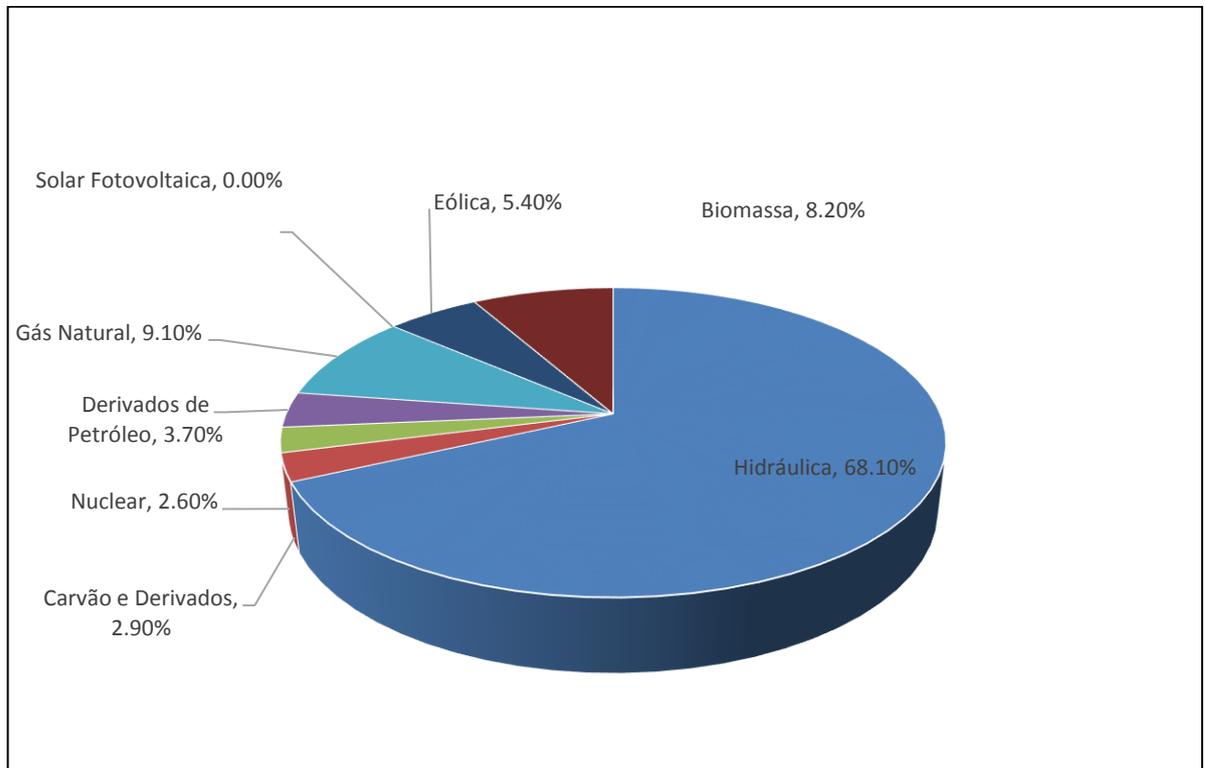


Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira para o ano base de 2016.
Fonte: Modificado de EPE, 2017.

Com os dados apresentados pelas Figuras 1, 2, 3 e 4, observa-se que apesar da redução da oferta hidráulica, houve um avanço da participação de renováveis na matriz elétrica. Esse avanço é devido à queda da geração térmica, à derivados de petróleo e ao incremento das gerações a biomassa e eólica. Na Figura 4 é possível notar um aumento da energia hidráulica disponibilizada, devido as condições hidrológicas favoráveis após quatro anos de estresse hídrico (EPE, 2017). O Brasil contou com 81,7% de renováveis em sua Matriz Elétrica em 2016, 75,5% no ano de 2015 e 74,6% em 2014. Quanto à Capacidade Instalada o país, em 2016 e 2015, possuía valores totais disponíveis de 150.338 MW e 140.858 MW, respectivamente. Desse modo garantiu um aumento de sua disponibilidade elétrica em 6,7% de 2016/2015 e em 5,2% de 2015, com relação ao ano anterior (EPE, 2016 e EPE, 2017).

A oferta interna de energia total demandada no país atingiu 296,2 Mtep, sendo registrado um crescimento na taxa de 4,5% para o ano base de 2013 (EPE, 2014). Os responsáveis por 80% desse aumento incremental foram o gás natural, o petróleo e seus derivados devido basicamente à redução na oferta interna de hidroeletricidade e no consequente aumento na geração térmica (gás natural, carvão mineral ou óleo). Para o ano de 2015, a oferta interna de energia atingiu 299,2 Mtep, registrando uma redução de 2,1% em relação ao ano de 2014 (EPE, 2016). Já para 2016, verificou-se um avanço de 0,7% na oferta interna em relação ao ano anterior, isso, em consequência do aumento da importação de Itaipu que cresceu 18,7% e da maior oferta hídrica, aliada à expansão da geração eólica (EPE, 2017).

A Tabela 1 apresenta a estrutura da oferta interna de energia no Brasil para os últimos cinco anos. As fontes renováveis são resultantes da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável.

Tabela 1: Oferta interna de energia para os anos de 2012 a 2016.

Fonte [10³ tep]	2012	2013	2014	2015	2016
Renováveis	119,8	121,5	120,5	123,7	125,3
Energia hidráulica	39,2	37,1	35,0	33,9	36,3
Biomassa da cana	43,6	47,6	48,2	50,6	50,3
Lenha e carvão vegetal	25,7	24,6	24,9	24,9	23,1
Eólica	-	-	-	1,9	2,9
Solar	-	-	-	0,005	0,007
Lixívia e outras renováveis	11,4	12,3	12,4	12,4	12,8
Não Renováveis	163,6	174,7	185,1	175,9	163,0
Petróleo e derivados	111,4	116,5	120,3	111,6	105,4
Gás natural	32,6	37,8	41,4	41,0	35,6
Carvão mineral	15,3	16,5	17,5	17,6	15,9
Urânio (U ₃ O ₈)	4,3	3,9	4,0	3,9	4,2
Outras não renováveis	-	-	1,8	1,8	1,9

Fonte: modificado de EPE 2014, 2016 e 2017.

Com relação ao consumo, de acordo com a EPE (2014), no ano base de 2013, o país apresentou, como consumo final energético o valor de 243.911 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). O aumento do consumo final de eletricidade no país foi de 3,6%, destacando os setores residencial e comercial.

Para o ano base de 2015, a EPE (2016) verificou que, no consumo final energético e não energético, ocorreu um recuo de 1,9% em relação ao ano anterior. Pode-se destacar a queda significativa de -3,1% e -2,6%, respectivamente, nos consumos dos setores industrial e de transporte. Por sua vez, o consumo final de eletricidade no país em 2015 registrou uma queda de 1,8%, sendo os setores residencial (-0,7%) e o industrial (-5,0%) os que mais contribuíram para esta redução (EPE, 2016).

Considerando o ano base de 2016, o consumo final caiu em 2,2% em relação ao ano anterior. Os setores industriais e de transportes, setores que mais consomem energia apresentaram recuos de 1,1% e 1,6%, respectivamente. Já o consumo final de eletricidade também registrou uma queda de 0,9%, sendo os setores que mais contribuíram: o industrial (-1,3%) seguido pelo energético (-7,7%) e o comercial (-2,4%) (EPE, 2017).

Apresenta-se a seguir na Tabela 2 os dados sobre o consumo da energia no país para os anos de 2012 a 2016, com relação a disposição do consumo final por fonte. As Figuras 5, 6 e 7, mostram, respectivamente, as variações do consumo de energia setorial para os anos de 2012 e 2013, para os anos de 2014 e 2015 e, para os anos de 2015 e 2016.

Tabela 2: Consumo final por fonte no Brasil para os anos base de 2012 a 2016.

Fonte¹ [10³ tep]	2013	2012	2014	2015	2016
Óleo Diesel ²	48.797	46.191	49.935	48.033	46.247
Eletricidade	44.404	42.861	45.782	44.946	44.705
Bagaço de Cana	29.479	28.376	28.612	28.667	29.791
Gasolina ³	24.393	24.454	25.740	23.306	24.225
Gás Natural	17.756	17.349	18.138	18.080	18.191
Lenha	16.182	16.470	16.672	16.670	15.997
Etanol	11.900	9.916	13.019	15.437	13.889
GLP	8.314	8.023	8.363	8.258	8.267
Lixívia	4.983	4.640	5.432	5.837	6.246
Óleo Combustível	4.043	3.970	4.115	3.256	3.100
Querosene	3.614	3.769	3.655	3.613	3.307
Outras Fontes ⁴	30.045	30.146	30.294	29.712	26.716
Total	243.911	236.165	249.756	245.966	240.680

Fonte: modificado de EPE 2014, 2016 e 2017.

Notas: 1: Exclusive consumo final não energético

2: Inclui biodiesel

3: Inclui apenas gasolina A (automotiva) e gasolina de aviação

4: Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral e carvão vegetal, dentre outros.

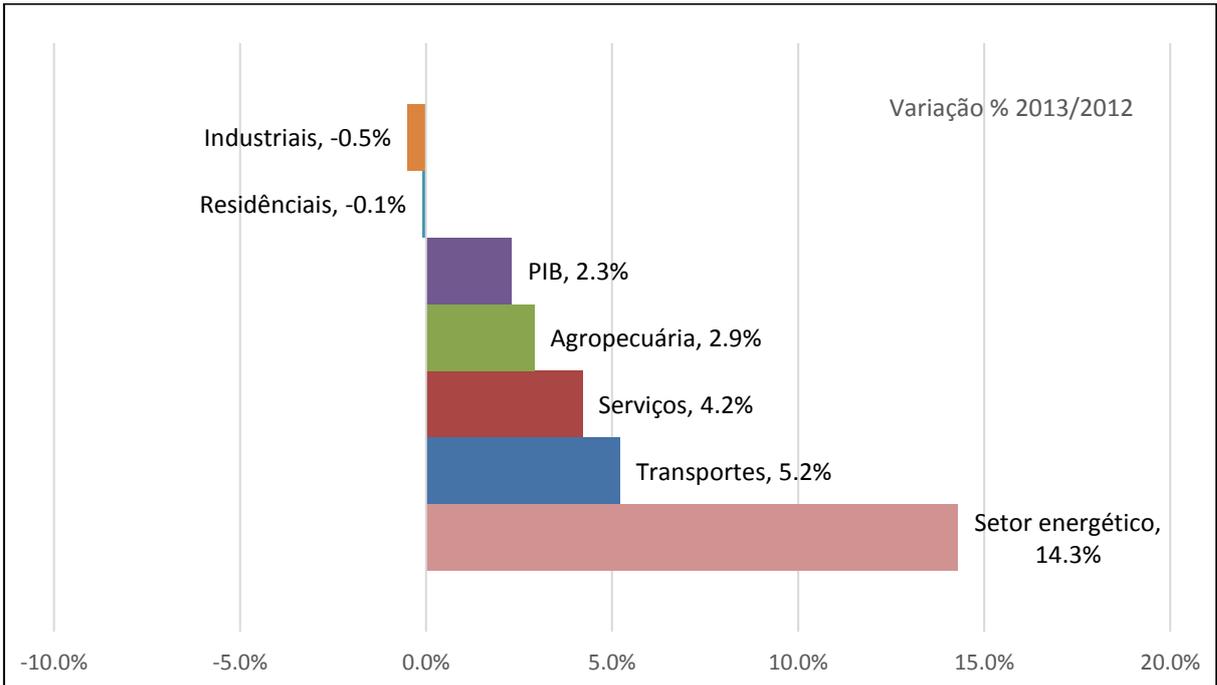


Figura 5: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2012 e 2013.
Fonte: modificado de EPE, 2014.

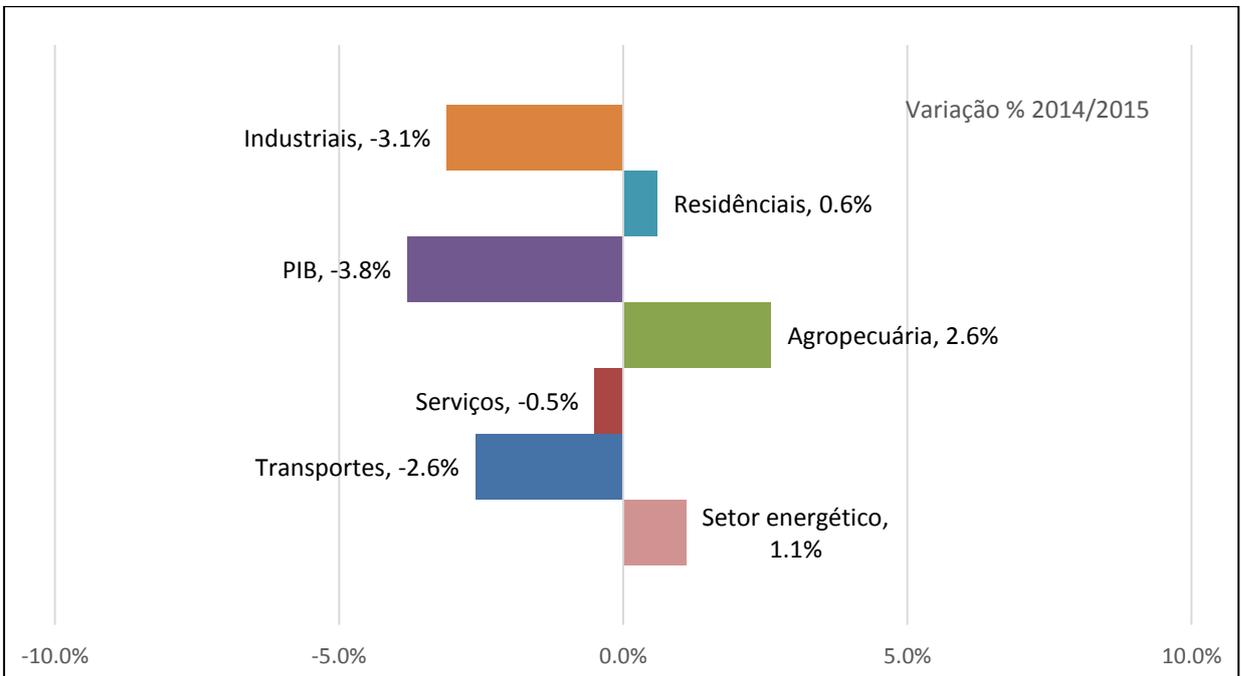


Figura 6: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2014 e 2015.
Fonte: modificado de EPE, 2014.

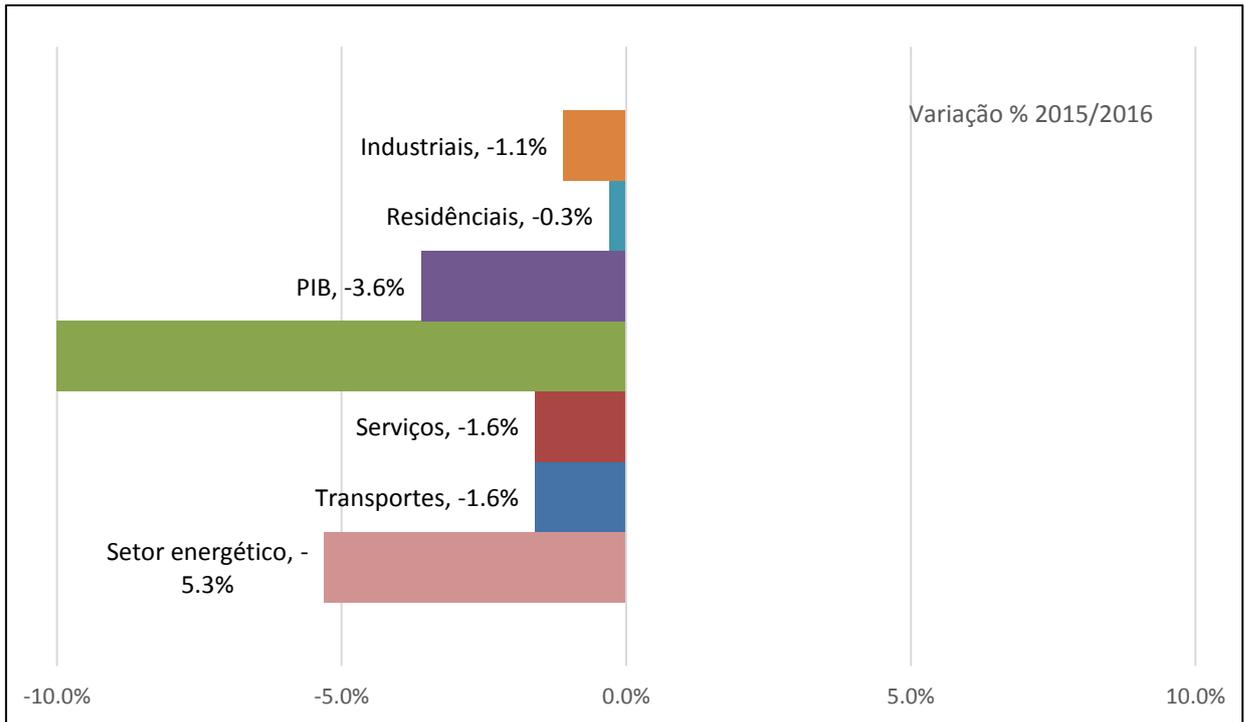


Figura 7: Variação do consumo de energia por setores no Brasil para os anos de 2015 e 2016.
Fonte: modificado de EPE, 2017.

Com relação à oferta e consumo de energia no Brasil para os anos de 2014, 2015 e 2016, apresenta-se que a oferta interna de energia caiu mais que o consumo final. Houve, também, uma redução das perdas na transformação decorrentes, principalmente, da queda da geração térmica a óleo diesel e óleo combustível e do incremento da geração eólica para o ano base de 2015 (EPE, 2016). A redução nas perdas de transformação, em 2016, deu-se principalmente, pela queda da geração térmica a derivados de petróleo e incremento da geração eólica e hidráulica. Os dados são mostrados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3: Oferta e consumo de energia no Brasil para os anos base de 2014, 2015 e 2016.

Característica	2014 [Mtep]	2015 [Mtep]	2016 [Mtep]
Oferta interna de energia ¹	305,5	299,6	288,3
Consumo final	265,8	261,2	255,4
Perdas ²	39,8	38,4	32,9

Fonte: modificado de EPE 2016 e 2017.

Notas: 1: OIE – Oferta Interna de Energia

2: Inclui perdas na transformação

2.2. CONTEXTO REGULATÓRIO E INSTITUCIONAL

A ANEEL é uma autarquia em regime especial que, estando vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), possui atribuições de fiscalização e regulação da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. A ANEEL foi instituída pela Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, que também disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica. Uma das funções dessa agência é a promoção de licitações destinadas à contratação de concessionárias de serviço público para a geração de energia e outorgar a concessão para os potenciais hidrelétricos (BRASIL, 1996).

De acordo com a Constituição Federal, a água como recurso natural é considerada um bem da união (BRASIL, 1988). Logo, a exploração dos potenciais hidráulicos é regida de acordo com uma série de regulamentos de ordem institucional, ambiental e comercial estabelecidos pela ANEEL (ELETROBRÁS, 2000), além de outras instituições governamentais.

Como todo e qualquer empreendimento no Brasil, tanto quanto à construção como a operação, as usinas hidrelétricas são passíveis de Licenciamento Ambiental. Os aspectos legais e institucionais ligados à estruturação dessas usinas devem ser analisados, desde o seu registro até a obtenção da Licença de Operação (LO). Durante a apresentação dos projetos na ANEEL são realizados diversos estudos até se obter a Licença Ambiental Prévia (LP) e, posteriormente, a Licença de Instalação (LI) (CARNEIRO, 2010). Um desses estudos é o Plano Básico Ambiental que possui como parte integrante o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR). O PGR deve considerar as condições de segurança do empreendimento durante toda sua vida útil identificando possíveis cenários acidentais e estabelecendo estratégias de atuação.

Pode-se destacar, dentre as regulamentações, as seguintes:

- Leis

Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, que dispõe acerca do regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos, previsto no art. 175 da Constituição Federal e dá outras providências (BRASIL, 1995a).

Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, que estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências (BRASIL, 1995b).

Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, que institui a Agência Nacional de energia Elétrica (ANEEL), disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências (BRASIL, 1996).

Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 (BRASIL, 1997).

Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, que dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências (BRASIL, 2000a).

Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, que dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências (BRASIL, 2002).

Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, que autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências (BRASIL, 2004a).

Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nº 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências (BRASIL, 2004b).

Lei 13.097, de 19 de janeiro de 2015, que trata de diversos assuntos correlacionados ao país, estando dentro desses as alterações quanto a energias renováveis, especialmente a eólica e as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) (BRASIL, 2015).

- Decretos

Decreto n° 4.932, de 23 de dezembro de 2003, que delegou à ANEEL competências previstas na Medida Provisória n° 144, de 10 de dezembro de 2003, e dá outras providências (BRASIL, 2003).

Decreto n° 4.970, de 30 de janeiro de 2004, que dá nova redação ao art. 1° do Decreto n° 4.932, de 23 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a delegação de competências à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL previstas na Medida Provisória n° 144, de 11 de dezembro de 2003, e define o índice de atualização monetária das quotas de que trata o § 1° do art. 13 da Lei n°10.438, de 26 de abril de 2002 (BRASIL, 2004c).

Decreto n° 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências (BRASIL, 2004d).

Decreto n°5.184, de 16 de agosto de 2004, que cria a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, aprova seu Estatuto Social e dá outras providências (BRASIL, 2004e).

- Resoluções

Resolução Normativa ANEEL n° 395, de 4 de dezembro de 1998 (ANEEL, 1998), que estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências (foram revogadas as disposições constantes desta Resolução no que concerne às Pequenas Centrais Hidrelétricas, pela Resolução ANEEL n° 343, de 09.12. 2008 e, também foram revogadas as disposições constantes nesta resolução no que concerne à potência do regime de produção independente ou autoprodução, pela REN ANEEL 412 de 05.10.2010, D.O. de 08.10.2010) (ANEEL, 2010).

Resolução Normativa ANEEL n° 116, de 29 de novembro de 2004, que altera o regimento interno aprovado pela Portaria MME n° 349, de 28 de novembro de 1997, para modificar a estrutura administrativa da ANEEL (ANEEL, 2004).

Resolução Normativa ANEEL n° 343, de 9 de dezembro de 2008, que estabelece procedimentos para registro, elaboração, aceite, análise, seleção e aprovação de projeto básico e para autorização de aproveitamento de potencial de energia hidráulica com características de

PCH, bem como revoga as disposições em contrário, das Resoluções Normativas ANEEL n° 393 e 395 de 4 de dezembro de 1998 e do Despacho ANEEL n° 173, de 7 de maio de 1999, no que concerne à PCHs (ANEEL, 2008).

Resolução Normativa ANEEL n° 672, de 4 de agosto de 2015, na qual se estabelece os procedimentos para a realização de estudos de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas, bem como revoga a Resolução Normativa ANEEL n° 398, de 21 de setembro de 2001 (ANEEL, 2015a).

Resolução Normativa ANEEL n° 673, de 4 de agosto de 2015, que estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH, bem como revoga a Resolução Normativa ANEEL n° 652, de 9 de dezembro de 2003 (ANEEL, 2015b).

Resolução Normativa CONAMA n° 1, de 23 de janeiro de 1986, que dispõe sobre os critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA (CONAMA, 1986).

Resolução Normativa CONAMA n° 6, de 16 de setembro de 1987, que dispõe sobre o licenciamento ambiental de obras do setor de geração de energia elétrica (CONAMA, 1987).

2.3. IMPLANTAÇÃO DE USINA HIDRELÉTRICA

O Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas (BRASIL-MME, 2007) fornece um conjunto de critérios, procedimentos e instruções para o ciclo de implantação de uma usina hidroelétrica. As etapas apresentadas no referido manual são cinco: Estimativa do Potencial Hidrelétrico; Inventário Hidroelétrico; Viabilidade; Projeto Básico e, por fim, o Projeto Executivo.

A fase de Estimativa do Potencial Hidrelétrico consiste na análise preliminar das características de uma bacia hidrográfica, especialmente quanto aos aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais, a fim de se verificar a possibilidade de geração de energia elétrica. Esse estudo permite a primeira avaliação do curso d'água quanto ao seu potencial energético e estimativa de custo, sendo a análise pautada em dados disponíveis. (BRASIL-MME, 2007).

A próxima fase, o Inventário Hidroelétrico, é caracterizada pelo estudo de alternativas de divisão de queda para uma bacia hidrográfica, em sua concepção e análise. Ao buscar um melhor equilíbrio entre os custos de implantação, benefícios energéticos e impactos socioambientais, um conjunto de projetos identificados é comparado entre si. Essa análise se dá com base em dados secundários, complementados com informações de campo, e pautada em estudos básicos cartográficos, hidrometeorológicos, energéticos, geológicos e geotécnicos, socioambientais e de usos múltiplos de água. A Avaliação Ambiental Integrada para os aproveitamentos da alternativa selecionada faz parte dos Estudos de Inventário, visando a subsidiar os processos de licenciamento. Estes aproveitamentos, então serão incluídos no elenco dos inventariados do País, podendo compor os planos de expansão (BRASIL-MME, 2007).

A etapa de Viabilidade ocorre em seguida. Compõe estudos mais detalhados, para uma análise de viabilidade técnica, energética, econômica e socioambiental a fim de se encontrar o aproveitamento ótimo que irá ao leilão de energia. Esses estudos servem de base para que sejam preparados os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) de um empreendimento específico, tendo em vista a obtenção da LP, junto aos órgãos ambientais. Fazem parte dos estudos de Viabilidade, as investigações de campo no local estudado, o dimensionamento do aproveitamento, do reservatório e da sua área de influência e das obras de infraestrutura locais e regionais que subsidiarão a implantação da usina (BRASIL-MME, 2007).

A próxima etapa é a elaboração do Projeto Básico, na qual é detalhado o aproveitamento concebido nos estudos de viabilidade com maior precisão. São trabalhadas no desenvolvimento do projeto, as características e as especificações técnicas das obras civis e equipamentos eletromecânicos, bem como os programas socioambientais. Com a finalidade de detalhar as recomendações incluídas no EIA, o Projeto Básico Ambiental é elaborado, visando à obtenção da LI, para prosseguir com a contratação das obras (BRASIL-MME, 2007).

O Projeto Executivo é desenvolvido na etapa seguinte. Nele, há a elaboração dos desenhos dos detalhamentos das obras civis e dos equipamentos eletromecânicos, itens necessários à execução da obra e à montagem dos equipamentos. Nesta etapa, são tomadas todas as medidas necessárias à implantação do reservatório, como a implementação dos programas socioambientais, para prevenir, minorar ou compensar os danos socioambientais envolvidos na construção da usina. Deve-se requerer a LO (BRASIL-MME, 2007).

Findada a construção da usina, há a fase de enchimentos do reservatório e o início da operação. Acompanha-se a geração de energia por meio de ações que visam ao monitoramento e, eventualmente, à correção das medidas anteriormente estabelecidas (BRASIL-MME, 2007).

A Figura 8, a seguir apresenta um quadro resumo das etapas necessárias à implantação dos aproveitamentos hidrelétricos, segundo o Manual de Inventário Hidrelétrico descrito anteriormente. A primeira etapa do processo dessa dissertação apresenta a da fase de Estimativa do Potencial Hidrelétrico, agora denominada de PPH.

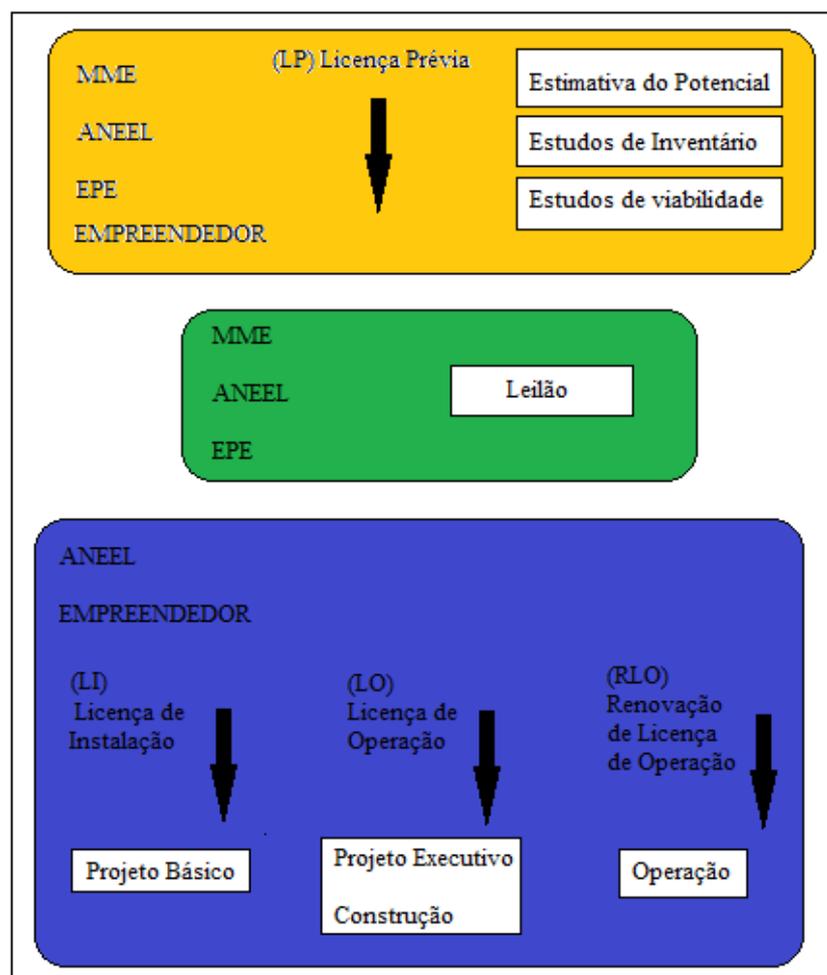


Figura 8: Etapas de implantação de aproveitamentos hidrelétricos.
Fonte: modificado de BRASIL-MME, 2007.

2.4. ENQUADRAMENTO DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

O uso dos recursos hídricos para a geração de energia elétrica é um privilégio que poucos países possuem. O Brasil, como visto anteriormente, destaca-se nesse cenário devido a

fatores determinantes como a disponibilidade de mananciais, a extensão de territórios e as condições geográficas e climáticas. Contudo, o aspecto que torna único e peculiar o sistema brasileiro é o fato de todas as usinas, que fazem parte do sistema interligado, compartilharem da mesma garantia através da capacidade de reserva recorde entre os sistemas de base hídrica mundiais.

O sistema hidráulico é responsável pela conversão e transformações energéticas. (VIANA, 2009). Ou seja, a energia hidráulica que também pode ser conhecida como hídrica ou hidrelétrica, é oriunda da modelagem da natureza no que se refere à transformação da energia hidráulica em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica (SOUZA et al., 2009). Essa transformação é decorrente do aproveitamento de cursos d'água e seus desníveis, utilizando a força da água para movimentar turbinas e formar a energia elétrica.

Na classificação de uma usina hidrelétrica observa-se como principais variáveis a altura da queda d'água, a vazão, a capacidade ou potência instalada, a localização, o tipo de turbina empregada, o tipo de barragem e o tipo de reservatório. Todos fatores citados são interdependentes. Assim, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e são responsáveis por determinar qual será a capacidade instalada que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório. Os reservatórios podem ser de acumulação e a fio d'água. A queda d'água, geralmente é definida como de alta, baixa ou média altura, em que a baixa queda se dá em altura até 15 metros e, a alta queda, em altura superior a 150 metros, segundo o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH). Contudo, não há um consenso com relação a essas medidas. As usinas hidrelétricas no Brasil podem ser classificadas quanto à sua potência para geração de energia em: Usina hidrelétrica (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Central Geradora Hidrelétrica (CGH).

De acordo com a Resolução da ANEEL nº 652, de 09 de dezembro de 2003 (ANEEL, 2003), que estabelece critérios para o enquadramento de um aproveitamento hidrelétrico na condição de PCH, será considerado uma PCH, o aproveitamento com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a autoprodução ou produção independente autônoma e, a produção independente, cuja área do reservatório seja inferior a 3,0 km².

Em casos em que não se atende ao critério para a área do reservatório mencionados anteriormente, respeitando os limites de potência e modalidade de exploração, a Resolução

ANEEL (2003) preconiza que será considerado com características de PCH, o aproveitamento que verificar pelo menos uma das características listadas abaixo:

I. Atender a Inequação 1, sendo considerado adicionalmente que a área em questão não pode ser superior a 13,0 km².

$$A \leq \frac{14,3 * P}{H_b} \leq 13 \text{ (km}^2\text{)} \quad \text{(Inequação 1)}$$

Onde:

P é a potência elétrica instalada dada em MW;

A é a área do reservatório dada em km²;

H_b é a queda bruta dada em m, definida como sendo a diferença dos níveis d'água máximo normal de montante e normal de jusante.

II. O dimensionamento do reservatório deve ser, comprovadamente, baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica (uso múltiplo).

Todavia, a Lei 13.097, de 20 de janeiro de 2015 (BRASIL, 2015), trouxe alterações quanto a energias renováveis, especialmente a eólica e as pequenas centrais hidrelétricas, em que a ampliação da potência das CGHs para 3 MW. Assim, a nova classificação coloca as CGHs com potência instalada de até 3MW, as PCHs com potência de 3 MW a 30 MW e, as UHEs, com mais de 30 MW de potência.

Encontra-se na Resolução Normativa n° 687, de 24 de novembro de 2015, a alteração que passa a vigorar com relação a microgeração distribuída, que preconiza que uma central geradora de energia elétrica é agora tratada como tendo potência instalada superior a 75 kW e com valor menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou então, com números menores ou iguais a 5 MW para cogeração qualificada, conforme a regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015 c).

Segundo o Banco de Informações da Geração (BIG) (ANEEL, 2015), em abril de 2015, existiam em operação 494 CGHs, com potência instalada de 321,4 MW; 475 PCHs (4,8 mil MW de potência instalada) e 201 UHE com uma capacidade total instalada de 84,5 mil MW. Esse número passou em agosto de 2016 para 557 CGHs com potência fiscalizada de 437,1 MW; 448 PCHs (4,84 mil MW de potência fiscalizada) e 220 UHEs com 90,24 mil

MW. Desse modo, totalizando 4.564 empreendimentos em operação no Brasil, com 147.493,34 MW de potência instalada, segundo as informações que constavam no BIG para o referido período.

Ainda de acordo com o BIG (ANEEL, 2017), em janeiro de 2017, os valores encontrados em operação para CGHs foi de 582 unidades, com potência outorgada de 479,99 MW; 442 para PCHs (4,95 mil MW de potência outorgada e 4,93 mil MW de potência fiscalizada) e 219 para UHEs com uma capacidade total outorgada de 91,96 mil MW. Já para o período de julho de 2017, o BIG aponta para 614 CGHs, 433 PCHs e 217 UHEs, com potências fiscalizadas de, respectivamente, 546,9 MW, 4,97 mil MW e 93,22 mil MW. O total de empreendimentos para o Brasil na referida data foi de 4.682 em operação, totalizando 152,68 mil MW de potência instalada.

O BIG (ANEEL, 2017) prevê para os próximos anos uma adição de 24,13 mil MW na capacidade de geração do País, proveniente dos 258 empreendimentos em construção atualmente e mais os 544 empreendimentos com construção ainda não iniciada.

2.5. VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2000), já havia uma indicação da preocupação da sociedade em relação à expansão das energias térmicas a gás e nucleares, principalmente em relação às incertezas sobre os impactos destas tecnologias. Em comparação com alternativas economicamente viáveis, as centrais hidrelétricas são consideradas formas mais eficientes e limpas, embora suas atividades provoquem emissões de gases causadores do efeito estufa, essas emissões são menores comparadas as das termelétricas, movidas a combustíveis fósseis, além de não envolverem riscos como os da operação de usinas nucleares como vazamentos, contaminações e descarte de rejeito nuclear.

Ozturk et al. (2009), apresentou uma série de vantagens da energia hidrelétrica:

- Recursos amplamente distribuídos pelo mundo;
- É um recurso renovável;
- Apresenta baixos custos de operação;
- Plantas de longa vida útil;
- É uma tecnologia já estabelecida e avançada;
- Apresenta alta taxa de eficiência de conversão;

Além das vantagens apresentadas no texto supracitado, vale ressaltar a geração de empregos em sua construção, a regulação do curso d'água em que está alocada a usina e o controle de enchentes e secas na região, como vantagens dos aproveitamentos hidroelétricos.

Carneiro (2010) ainda ressalta como vantagens de PCHs em seu desenvolvimento e implementação as seguintes premissas:

- Obras civis de pequeno porte;
- Localização mais próxima da demanda consumidora e menores custos de conexão e transmissão de energia elétrica;
- Menor tempo de desenvolvimento e construção, que geralmente se encontra entre 18 a 24 meses, considerando-se o tempo para a outorga das respectivas licenças de instalação e supressão vegetal para mobilização, montagem do acampamento e início efetivo da construção;
- Incentivo por meio de isenção de encargos setoriais e desconto no pagamento das tarifas de uso dos sistemas de distribuição e transmissão;
- Baixo impacto ambiental, em função das dimensões e impacto referente a reservatório, quando utilizado, de pequena extensão;
- Equipamentos padrão e crescente oferta nacional e internacional de itens eletromecânicos;
- Custo compatível de energia com as grandes hidrelétricas, em função, principalmente, do uso de novas tecnologias e metodologias de construção;
- Baixo investimento inicial, quando comparado a investimentos em outros empreendimentos de geração de energia elétrica, como os de grande porte ou aqueles que necessitem de fontes combustíveis muito mais onerosas que a fonte hidráulica; e
- Possibilidade de maximização da Taxa Interna de Retorno (TIR).

Segundo informações de Larentis (2009), é discutível que hidrelétricas sejam classificadas como fontes de energia limpa, isso frente aos visíveis impactos oriundos da construção do barramento, com efeitos de inundação e segmentação do curso d'água. No entanto, as pequenas centrais têm recebido maior atenção como alternativas, motivando algumas iniciativas do governo em seu desenvolvimento.

Por outro lado, a utilização e a construção, de usinas podem apresentar uma série de impactos negativos, que abrangem:

- Alterações nas características dos locais como mudanças hidrológicas e geomorfológicas;
- Impactos ambientais (fauna e flora) principalmente em espécies que vivem nas áreas de inundação e nas proximidades, como a interferência na migração dos peixes;
- Perda vegetal;
- Desapropriação de terras produtivas pela inundação;
- Impactos sociais na mudança do modo de vida das populações ribeirinhas;
- Perdas de heranças históricas e culturais; e,
- Impactos socioeconômicos em atividades econômicas tradicionais da terra.

Segundo Larentis (2009), na viabilização de grandes projetos hidrelétricos que estão, usualmente, associados a impactos significativos ao redor do empreendimento, ainda há outros fatores fortemente relacionados e de considerável importância que são obstáculos para usinas hidrelétricas:

- O alto investimento inicial exigido;
- As questões ambientais e de desaprovação social, e;
- O custo e/ou as dificuldades com o deslocamento de populações das áreas alagadas.

Tendo em vista os aspectos levantados sobre os obstáculos econômicos, financeiros, institucionais, sociais e ambientais no desenvolvimento de potenciais hidrelétricos, Larentis (2009), preconiza que há uma tendência mais forte no crescimento da exploração de pequenos potenciais, isto, considerando também, que os grandes potenciais mundiais já tenham sido desenvolvidos ou, pelo menos, identificados e estudados.

2.6. ALGUNS ASPECTOS BÁSICOS DE PROJETOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A estrutura de uma central hidrelétrica consiste na modelagem da natureza do sistema que objetiva levar a água de um curso d'água até uma casa de força na qual haverá a transformação da energia hidráulica em energia mecânica e posteriormente, em energia elétrica (GUITARRARA, 2012 e SOUZA et al., 2009).

Segundo Larentis (2009), existem diferentes tipos de usinas hidrelétricas, cada qual com características específicas que permitem atender à diferentes tipos de demanda. Obviamente, cada projeto apresenta diferentes tipos e magnitudes de impactos sociais e ambientais. Pode-se listar como algumas importantes características de projeto (IEA, 2000):

- Queda d'água: alta ou baixa;
- Modo de operação: com reservatório ou à fio d'água;
- Propósito de uso: múltiplo ou simples;
- Porte: grande, pequena, mini, micro ou pico;
- Esquema: curto-circuito (túnel cortando meandro), derivação pela margem, geração ao pé da barragem.

Sendo assim, de acordo com Souza et al. (2009), as centrais hidrelétricas podem ter, basicamente três tipos de arranjos para seus componentes associados às seguintes denominações:

- Centrais Hidrelétricas de Desvio - CHD;
- Centrais Hidrelétricas de Represamento - CHR;
- Centrais Hidrelétricas de Derivação – CHV, podendo ser de represamento – CHVR - ou de desvio - CHVD.

Esquemas de desvio ou a fio d'água – CHD - são aqueles que utilizam a vazão natural do rio, ou seja, não existe regularização de vazão. Há apenas um mínimo de reservação necessário para permitir a adução da água. Para esse tipo de projeto têm-se quedas d'água de alto ou baixo desnível. Em rios com baixas vazões, encontra-se, normalmente, uma usina à fio d'água com grande queda, o que é comum em esquemas do tipo curto-circuito, nos quais um meandro do rio apresenta sua vazão, total ou parcialmente, desviada por um túnel até a casa de força (IEA, 2000).

O arranjo de uma CHD apresenta um desvio de parte da vazão do seu curso natural, gerando um trecho de vazão reduzida. A Figura 9, a seguir, mostra um corte longitudinal esquemático de um arranjo de uma CHD e a nomeação de seus principais componentes (SOUZA et al., 2009).

No intuito de se prover uma reserva de energia para a demanda em períodos secos ou de pico de consumo, ou simplesmente, para se criar uma maior queda d'água, têm-se os

sistemas de represamento ou regularização – CHR - que implicam na construção de barragem. Esquemas com reservação são frequentemente utilizados em trechos médios de rios com grande variabilidade em seu regime fluvial, ou em trechos mais altos de bacias hidrográficas como reservatórios de regularização para empreendimentos a jusante (IEA, 2000). A Figura 10, a seguir, apresenta um arranjo característico de implantação de uma CHR em um trecho de rio no qual se liga diretamente a barragem e a casa de máquinas mediante um conduto de alta pressão. Este tipo de arranjo é o mais utilizado nas Grandes Centrais Hidrelétricas e também nas Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda, no qual a altura bruta é praticamente o resultado da altura da água na barragem.

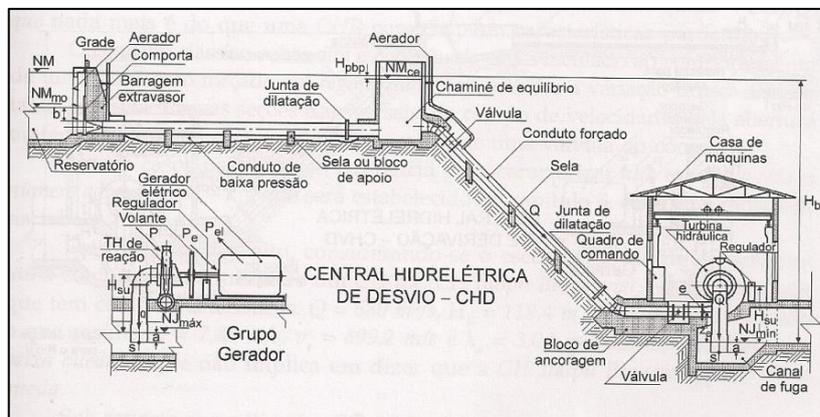


Figura 9: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Desvio com seus principais componentes.

Fonte: Souza et al. (2009).

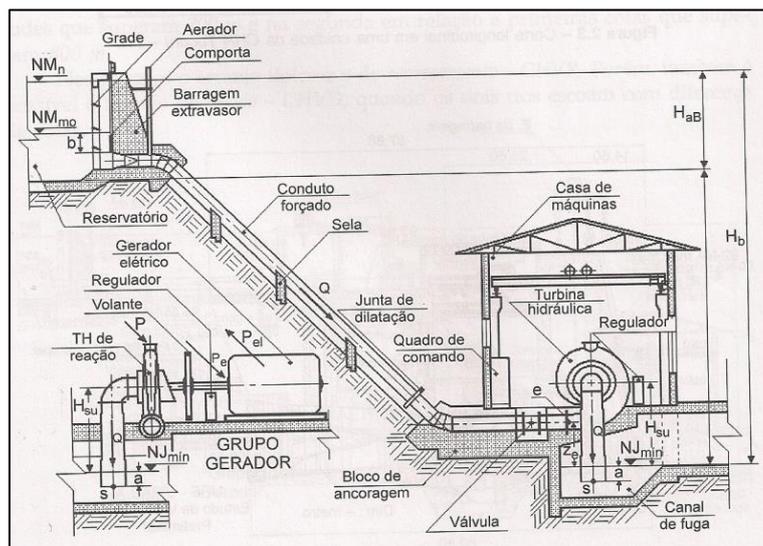


Figura 10: Corte longitudinal, do arranjo com os principais componentes da Central Hidrelétrica de Represamento.

Fonte: Souza et al. (2009).

As **centrais hidrelétricas de derivação - CHV-** apresentam um arranjo característico em que o barramento é feito em um curso d'água e a descarga em outro. O arranjo típico contempla represamento – CHVR - mostrado na Figura 11, contudo, também é possível uma alternativa apenas com desvio – CHVD – quando os dois rios escoam com diferentes cotas como mostrado na Figura 12.

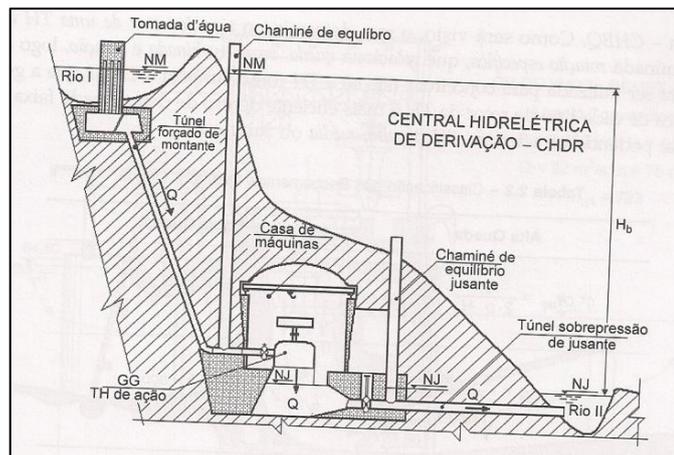


Figura 11: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação por Represamento e seus principais componentes.
Fonte: Souza et al. (2009).

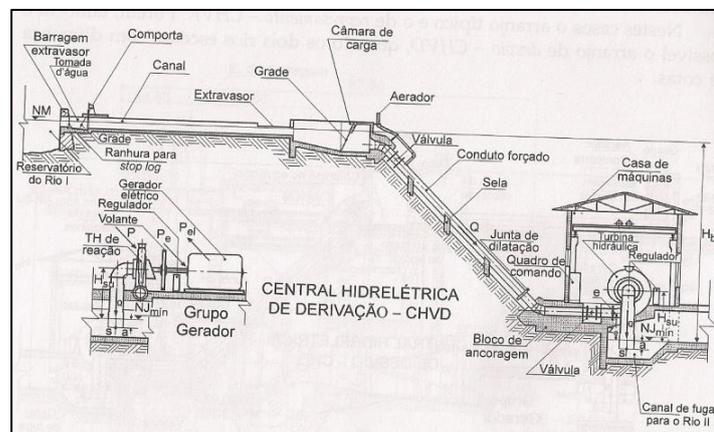


Figura 12: Corte longitudinal, esquemático de uma Central Hidrelétrica de Derivação em Desvio e seus principais componentes.
Fonte: Souza et al. (2009).

Os maiores problemas relacionados às CHV encontram-se em pontos de não compatibilidade dos ecossistemas de montante e jusante, que precisam ser mitigados com a compatibilidade do custo-benefício para que a central hidráulica seja implementada.

Souza et al., (2009) ainda apresentam as **Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda - CHBQ**. Que são uma CHR com grupos geradores com características particulares. A Figura

13, abaixo remete a um arranjo de pequena central de baixa queda, com desnível de até 3 metros (GUITARRARA, 2012).

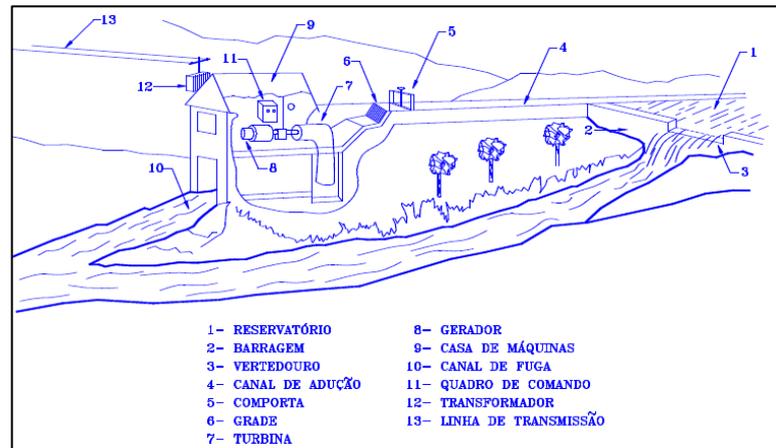


Figura 13: Arranjo típico para pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda.
Fonte: MAUAD (2002) ¹ apud GUITARRARA (2012).

No contexto de uma bacia hidrográfica, a energia hidráulica em certo trecho de rio depende dos usos de água de toda a bacia e não somente em seu reservatório. O nível de interferência de um empreendimento sobre outro varia com relação ao regime hidrológico, localização e tipo de projeto. Uma planta com reservatório pode conjuntamente gerar energia e regularizar o fluxo de vazão do rio para outras, por exemplo, à fio d'água, que estejam situadas mais a jusante (IEA, 2000).

2.7. PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS

Como apresentado anteriormente, a PPH é a etapa na qual se estuda preliminarmente as características da bacia hidrográfica, a fim de se identificar sítios adequados à implantação de uma central hidrelétrica e verificar o seu potencial para fins de geração de energia hidrelétrica (MME, 2007).

O conhecimento do desnível da queda d'água e da vazão garantida em uma seção de interesse são os pontos de partida para a estimativa de um potencial hidrelétrico. Conseqüentemente, esses parâmetros são fundamentais na escolha do sítio em que se tem interesse de implantar uma central hidrelétrica.

¹ MAUAD, F.F. Aproveitamentos Hidrelétricos. Escola de Engenharia de São Carlos: Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo. SHS – 115, 2002, p. 15.

Entretanto, de acordo com HYDE et al. (2005) um grande número de alternativas, incertezas, interações complexas e participação de múltiplos fatores de interesses conflitantes, frequentemente caracterizam a tomada de decisão em problemas de recursos hídricos. Segundo Larentis (2009), a prospecção de potenciais hidrelétricos de uma bacia hidrográfica é um problema desse tipo com características intrínsecas envolvendo: múltiplos atributos; múltiplas alternativas; múltiplos interesses; e variabilidade espacial.

Alguns aspectos técnicos que devem ser considerados na avaliação da viabilidade e adequação de um sítio a ser explorado são descritos a seguir (Monition et al., 1984; CEE, 1993; ESHA, 2004):

- As características geológicas do local;
- A possibilidade de utilização do esquema com curto - circuito;
- A ocorrência de espécies endêmicas;
- Se os locais são adequados ou utilizados para o lazer, turismo e contemplação;
- Se há interferência com a infraestrutura existente (pontes, estradas, edificações, etc);
- Se há acesso ao sítio de construção ou, caso não exista, se a topografia do local é adequada para construí-lo;
- A distância das linhas de transmissão e centros consumidores de energia;
- Se já há estudos das áreas de proteção ambientais e das de interesse social;
- Se a distância das jazidas aos centros de distribuição de material para a construção são adequados;
- Se há ou não interferência em centros urbanos e realocação de populações;
- Se há possibilidade de usos múltiplos do reservatório;
- As características topológicas e geotécnicas da seção;
- A existência de áreas de interesse faunístico e corredores biológicos; e
- Se o uso do solo na área cria interferência do reservatório.

No início da prospecção de potenciais hidrelétricos os sítios não estão identificados e nem são conhecidas as características dos aproveitamentos, desta forma, há necessidade de se considerar a variabilidade espacial do sistema que será estudado. Na localização do potencial hidráulico, as análises do sítio com relação à seção transversal e o perfil longitudinal são distintas. A última deve indicar os locais de maior queda, influenciando o potencial e a seção transversal, deve indicar a extensão do barramento, refletindo nos custos do projeto. A

dependência entre os possíveis sítios pode ser representada através da energia marginal gerada a jusante, isto devido aos volumes regularizados a montante (LARENTIS, 2009).

Considerando os aspectos técnicos listados acima que devem ser observados na avaliação de um local para a implementação de usina hidrelétrica e os riscos embutidos no projeto de uma central, vê-se a importância da fase de prospecção de potenciais.

No trabalho a PPH foi implementada com o apoio da ferramenta SIG (Sistema de Informação Geográfica) que propiciou as análises dos dados das áreas selecionadas. O *software* utilizado foi o *Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017) nas versões de 9, 12 e 16. As funcionalidades do aplicativo fizeram com que este fosse escolhido para o trabalho. Dentre elas, pode-se destacar: a facilidade de obtenção de um banco de dados geoespaciais; a capacidade para importar e exportar dados de diferentes formatos; ferramentas para processar ou gerar grades altimétricas a partir de dados vetoriais, bem como gerar curvas de nível a partir de modelos numéricos de altimetria raster ou vetoriais; medição de áreas e distância; um fácil processamento de dados; funcionalidades para a realização de operações lógicas típicas de aplicativos SIG; dentre outras. Contudo, esse *software* apresenta limitações quanto a alguns sistemas operacionais e exige uma configuração mínima pré determinada de espaço livre em disco para sua instalação.

2.7.1. Análise hidrológica

Os estudos hidrometeorológicos abrangem a disposição de informações consistidas e homogêneas de uma bacia hidrográfica para a formulação e seleção preliminar de alternativas de divisão de queda (BRASIL-MME, 2007).

De acordo com o Manual de Inventário (BRASIL-MME, 2007), os estudos hidrológicos de projetos de usinas hidroelétricas consistem na caracterização dos elementos necessários à estimativa do potencial energético e do dimensionamento das estruturas por meio da definição do regime fluviométrico do curso d'água nos locais de barramento, com a determinação das séries de vazões naturais.

Oliveira (2012) salienta que um Estudo Hidrológico completo compreende fases como o levantamento da base de informações hidrológicas e meteorológicas, a determinação de características físicas e climáticas, o cálculo das precipitações e vazões características

(máximas, médias, mínimas e extremas), as lâminas de evaporação e evapotranspiração e o cálculo do balanço hídrico após a individualização dos componentes do ciclo hidrológico.

Alguns aspectos fisiográficos da bacia auxiliam na interpretação dos estudos e permitem estabelecer relações e comparações com outras bacias conhecidas. Esses aspectos possuem influência direta no comportamento e no regime fluvial e sedimentológico do curso d'água principal. Eles podem ser listados como sendo a área, perímetro, forma, densidade de drenagem, declividade do rio, tempo de concentração, cobertura vegetal, uso do solo, relevo e ocupação da bacia em análise (ELETROBRAS, 2000). Contudo, a informação hidrológica utilizada na metodologia da PPH é bastante simplificada com relação à preconizada pelo MME para os Estudos de Inventário.

Durante uma análise hidrológica deve-se determinar os valores de vazão que se relacionam com a quantidade de energia gerada; com a segurança; com o meio ambiente e com a operação da unidade. O estudo da vazão pode ser feito com a utilização de técnicas estatísticas, tendo em vista que, a vazão é considerada um fenômeno aleatório e que ela passa por grandes variações sazonais (ELETROBRAS, 1985).

Estudos apresentados por Silva et al. (2007) utilizaram vazão obtida por regionalização das curvas de permanência conhecidas de usinas em operação em função de suas áreas de drenagem. Já em outros estudos, como Ávila et al. (2003) e Antonello et al. (2006² apud LARENTIS, 2009) foram utilizados valores médios de vazão mensal ou anual na estimativa preliminar de potencial hidrelétrico em seus modelos.

O estudo de PPH utilizou como base as séries históricas diárias das vazões existentes para o curso d'água em interesse ou para outro com características similares situado próximo do local. Os registros das medidas de vazão foram obtidos por meio de dados de postos fluviométricos e utilizados para a caracterização hidrológica das áreas, com a utilização da vazão média de longo termo. Vale salientar que, embora o Brasil possua uma grande quantidade de postos fluviométricos em operação, muitos rios de porte médio e pequenos não apresentam registros, uma vez que o território brasileiro possui uma grande quantidade de cursos d'água (GUITARRARA, 2012).

² ANTONELLO, A.; FRANCESCHI, S. J. Grass 2.0: *Manuale Utente*. Trento: *Universita degli Studi di Trento. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale*. 2006, p. 40.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Nesse capítulo será apresentada a metodologia que serviu de base para o desenvolvimento do trabalho e para a análise do procedimento proposto. Tendo em vista, a avaliação dos limites teóricos e práticos da potência máxima que, tecnicamente, se é possível de explorar em uma determinada bacia hidrográfica, essa dissertação se baseou na metodologia desenvolvida por Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et al.(2017).

Primeiramente, é apresentada a estruturação proposta para a prospecção de novos potenciais hidrelétricos baseada em uma série de aspectos técnicos que afetam o custo – benefício dos projetos. Logo após, apresenta-se a metodologia para a determinação da avaliação do limite máximo teórico possível de se conseguir em uma bacia hidrográfica.

3.1. METODOLOGIA APLICADA À PROSPECÇÃO DE POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS

No emprego de tecnologias de tratamento de informação digital em estudos de PPH, apresenta-se, como principais características a serem pesquisadas, a queda e a vazão, segundo os trabalhos de Vallejos, J; Bortoni, E. (2015); de Corrêa (2008); e de Larentis (2009).

A metodologia para a PPH desenvolvida nesse estudo foi implementada em função da ferramenta SIG denominada *Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017). Por intermédio do processamento automatizado do Modelo Digital de Elevação (MDE) e de vazões regionais estatísticas, foi possível a localização de diversas alternativas de projeto nas bacias hidrográficas analisadas, em que se caracterizou o tipo de operação, *layout* e altura do barramento no sítio proposto. As alternativas de projeto foram selecionadas e as análises energética e de fragilidade da área permitem a estimativa do potencial global viável e a obtenção da divisão de quedas final.

A seguir é apresentada a metodologia aplicada no trabalho.

3.1.1. Análise hidrológica

O estudo de PPH utilizou como base as séries históricas diárias das vazões existentes para o curso d'água em interesse ou para outro com características similares situado próximo

do local. Os registros das medidas de vazão foram obtidos de postos fluviométricos e utilizados para a caracterização hidrológica das áreas, com a utilização da vazão média de longo termo (GUITARRARA, 2012).

3.1.2. Estrutura geral

Diversos estudos envolvendo a PPH podem ser encontrados. A metodologia do trabalho baseou-se em informações apresentadas e desenvolvidas pelo CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – (NUNES; ALVES, 2008).

Assim, apresenta-se para a PPH, uma metodologia composta por 3 etapas principais, segundo o esquema apresentado na Figura 14, a seguir.

Na primeira etapa, é utilizada a ferramenta SIG para tratar as informações necessárias para as análises de prospecção. São utilizados dados altimétricos da região de interesse, na forma de MDE, mapas temáticos e estatísticas regionais de vazões, obtidas de séries históricas de estações fluviométricas.

A segunda etapa contempla a identificação e caracterização de potenciais com a localização de suas barragens e casas de força, utilizando como base o MDE e as vazões regionalizadas para a região. O produto é uma quantidade grande de Alternativas de Projeto – AP - ainda em estado bruto de análise de viabilidade, que passam por uma avaliação e posterior divisão das quedas propostas. Dependendo do nível de automatização envolvido na etapa, é possível levantar um número de AP superior a de análises tradicionais de potencial hidrelétrico.

A terceira etapa consiste na avaliação dos dados geológicos, socioambientais e de infraestrutura da região para a construção de um panorama geral de análise e identificação de possíveis restrições ou inviabilidades aos locais de implantação dos novos potenciais. Logo, faz-se necessário o estudo dos atributos do sistema e a composição de indicadores de fragilidade, como por exemplo, a localização de aglomerados urbanos nos locais do novo reservatório, que acarretará em mudanças nos arranjos propostos, ou até mesmo de áreas de Unidades de Conservação – UC – que possam inviabilizar a construção de um potencial hidrelétrico no local de interesse.

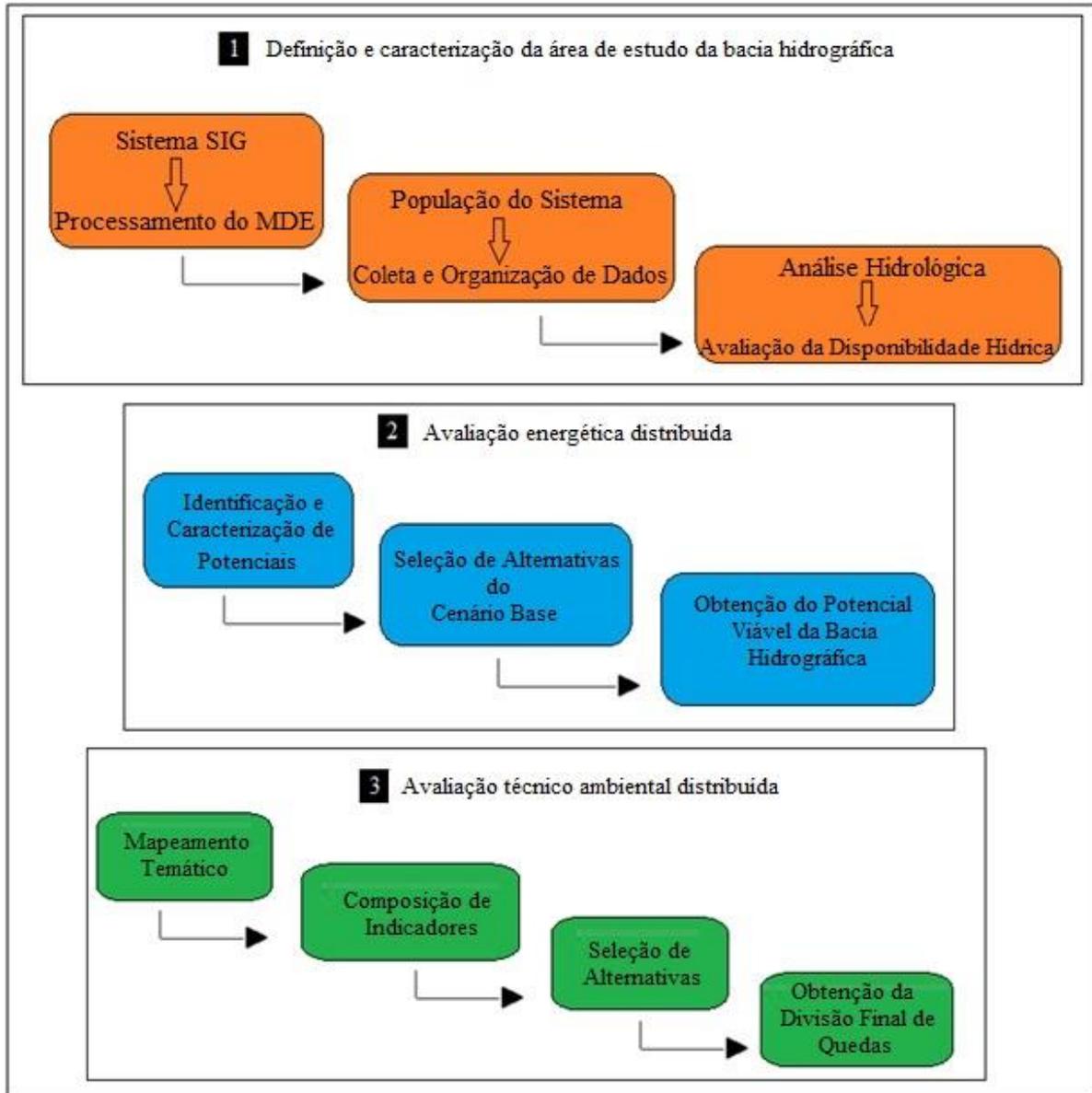


Figura 14: Esquema geral da metodologia de Prospecção de Potenciais Hidrelétricos.
 Fonte: Adaptado de Faria (2011) e Larentis (2009).

Os itens a seguir apresentarão mais detalhadamente as características de cada uma das etapas da metodologia de PPHs proposta.

3.1.3. Ferramenta SIG – Sistema de Informações Geográficas – *software Global Mapper*©

O termo geoprocessamento, segundo o apresentado por Ferreira et al. (2014), denota a disciplina do conhecimento que faz uso de técnicas matemáticas e computacionais a fim de se

trabalhar informações geográficas. Essa disciplina, segundo os mesmos autores, segue influenciando áreas como a de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Rural.

O geoprocessamento utiliza ferramentas computacionais denominadas SIG para o tratamento de informações geográficas. O SIG, por sua vez, tem a capacidade para aquisição, modelagem, armazenamento, tratamento, atualização, integração, processamento, recuperação, transformação, manipulação, análise e exibição de informações digitais georreferenciadas (FERREIRA et al., 2014).

Um extenso banco de dados online, com informações georreferenciadas de topologia, meio ambiente, infraestrutura de saneamento, rodovias, linhas de transmissão, ocupação do solo, vegetação, clima, dentre outros é fornecido nos dias atuais, por agências e instituições nacionais, tais como a ANEEL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), dentre outras. Esses dados são de grande importância para a caracterização e verificação de informações na etapa de estudos de PPH, pois a partir desta análise, é possível eliminar regiões com grande potencial de impacto negativo e baixo potencial hidroenergético.

Dentro dessa perspectiva, o *software Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017) que é um programa que trabalha com geoprocessamento e que permite diversas funcionalidades, como a conversão e manuseio de dados, foi o escolhido no estudo para organizar as informações técnicas e ambientais.

Segundo a EngeSat (2017), recomenda-se a utilização do programa em áreas de geotecnologias, como no Processamento de Imagens e em SIG. O programa apresenta várias configurações, seja para um sistema único de computador, também chamado de *stand alone*, ou seja, com licença de rede acessível por vários usuários em uma Instituição. O *software* é capaz de trabalhar vários formatos de raster, vetores e dados de elevação. Ele também, converte, edita, imprime, registra trilhas de Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*) e permite a visualização de dados de elevação em 3D, além de ser capaz de extrair curvas de nível a partir de Modelo Digital de Elevação – MDE (do inglês, *DEM, Digital Elevation Model*) de Superfície - MDS (do inglês, *DEM, Digital Surface Model*) ou de Terreno – MDT (em inglês, *DTM, Digital Terrain Model*) (ENGESAT, 2017).

O MDE foi utilizado para a realização do trabalho, devido a sua disponibilidade de dados para a região analisada. Embora ambos os modelos digitais se referirem a dados

altimétricos, eles se diferem com relação a sua obtenção. O MDS apresenta dados que traduzem a superfície do terreno considerando o solo e as edificações, como pontes, árvores e prédios. O MDE apresenta os resultados direcionados do solo, contudo apresenta interferência altimétrica, ou seja, quando em uma área de vegetação, seus dados altimétricos sofrem interferência do topo das árvores. As imagens de satélite são exemplos de MDE. Já o MDT é obtido considerando os desníveis do solo.

Adaptado como uma ferramenta de gerenciamento de dados espaciais independente e como um componente integral de um SIG, o *software* apresenta como características interessantes para o trabalho, o fato de trabalhar dados de terreno, e de possibilitar o uso de estudos automatizados de hidrologia. Nesse último, é possível realizar a delimitação de bacias hidrográficas a partir de MDE; simular inundação e estudar a rota de percolação de água.

As informações foram organizadas em arquivos de vários formatos como o vetor em *Shapefile* (.shp) pela facilidade de manipulação e pela disponibilidade nas instituições nacionais.

3.1.4. Caracterização topológica da bacia

De acordo com informações de Lima et al. (2012), o reconhecimento das propriedades fisiográficas do espaço global é de suma importância frente a ocorrência de uma série de atividades atreladas ao desenvolvimento humano. Destacando-se o planejamento e a execução de obras para aproveitamento dos recursos hídricos, pode-se ressaltar que as associações entre as propriedades físicas e as características hidrológicas de uma bacia hidrográfica, estão inseridas na manutenção e melhoria da qualidade de vida (MENDES e CIRILO, 2001 ³ *apud* LIMA, 2012).

Assim sendo, inicia-se a PPH com a obtenção dos dados físicos a serem trabalhados para a localização dos sítios, como os MDEs e as representações dos cursos d'água (LIMA, 2012). Essas informações devem estar sistematizadas, organizadas e georreferenciadas. Nesse sentido, segundo Lima (2012) e MME (2007), a utilização de SIG proporciona uma maior agilidade e flexibilidade nas análises, e auxiliam na formação de banco de dados digitais.

³ MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos, Integração e Aplicação. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Prosseguiu-se com o processamento das informações de altimetria na forma de um MDE com a finalidade de se conhecer a topologia da área da bacia hidrográfica. São utilizadas imagens de satélite e cartas topográficas em várias escalas. Com a utilização de ferramentas automatizadas, pode-se, então, estimar as áreas que apresentam os maiores desníveis, concentrando aí o início das pesquisas de prospecção.

A partir da identificação das áreas com maior concentração de quedas e do processamento do MDE, segue-se para o estudo de um curso d'água. São inseridos, então, os *layers* que permitiram a estruturação envolvida na pesquisa de novos potenciais. Esses arquivos compõem a população do sistema que consiste na entrada de informações vetoriais no banco de dados georreferenciado cujo MDE é a base inicial. Tais informações são os vetores com dados de unidades federativas e municipais; dados de postos fluviométricos e pluviométricos; dados de hidrografia; dados de localização de centrais hidrelétricas; dentre outras, que serão detalhadas posteriormente.

Na sequência de passos da metodologia estuda-se o curso d'água, a partir da delimitação da bacia hidrográfica de interesse. Para tanto, inicia-se com a formação das curvas de níveis na área. Essas são oriundas do processamento, realizado no *software Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017), das imagens de satélite fornecidas pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) com resolução de 90 metros e utilizadas no trabalho devido à sua disponibilidade de dados no período de PPH. Utiliza-se as curvas de 5 em 5 metros, para demarcar, inicialmente, os limites da bacia a partir de seus divisores de água.

O MDE é submetido às operações tradicionais de processamento para fins de delimitação de bacia e da rede de drenagem. Essas operações envolvem o preenchimento das possíveis falhas nas depressões naturais do terreno; envolvem também, a obtenção do mapa de direções do escoamento e da geração do mapa de áreas acumuladas. Como resultado, apresenta-se um conjunto de vetores como a drenagem do rio principal e de seus principais afluentes, bem como a bacia hidrográfica principal delimitada e subdividida em unidades menores.

A área de drenagem da bacia é definida a partir da foz do curso d'água principal até a sua nascente mais distante. Para o procedimento considera-se a contribuição dos afluentes e subafluentes pelos divisores de águas, como mostrado na Figura 15.

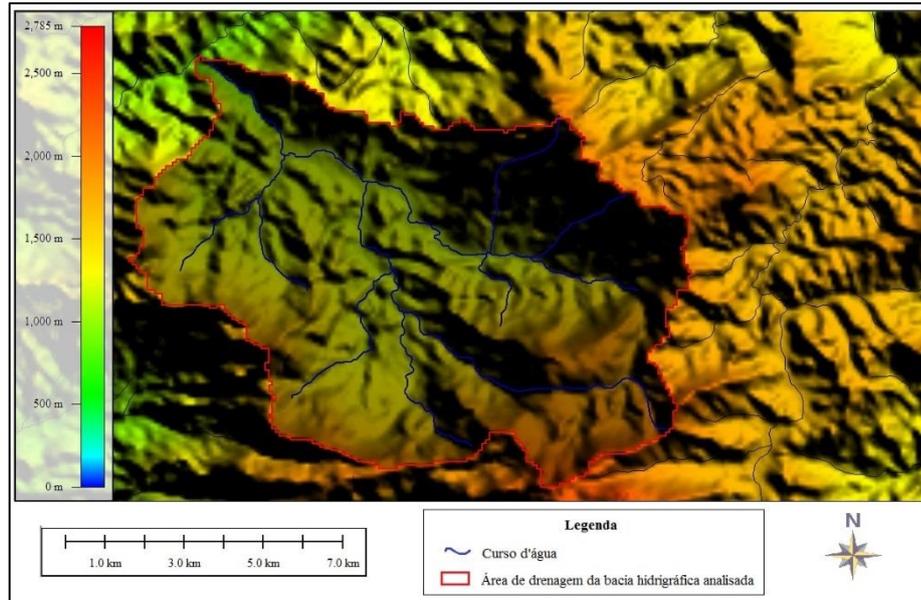


Figura 15: Delimitação da área de drenagem da bacia hidrográfica de um curso d'água.
Fonte: Autor.

3.1.5. População do sistema

A população do sistema, como mencionado anteriormente, consiste na entrada de informações vetoriais no banco de dados georreferenciados cujo MDE é a base inicial. Tais informações foram adquiridas junto a órgãos públicos, empresas estatais, agências governamentais especializadas, universidade e institutos de pesquisa. Os sites utilizados foram: IBGE, SIGEL (Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico) pertencente à ANEEL; MMA (Ministério de Meio Ambiente); HIDROWEB (Sistema de Informações Hidrológicas) pertencente à ANA; IEDE (Infraestrutura de Dados Espaciais de Minas Gerais) e INSTITUTO PRISTINO.

No estudo de prospecção privilegiou-se a homogeneidade das informações principalmente em regiões nas quais a topografia favorecia a formação de pequenos lagos e quando o estudo objetivava a localização de pequenas e minicentrals. Nesses casos, os pequenos detalhes nas singularidades ambientais ou técnico econômicas do sistema podem influenciar na opção por um ou outro projeto, fazendo com que alguns potenciais sejam negligenciados pela incerteza das informações. Um levantamento em escala menor pode, por exemplo, acarretar no aumento de sítios de singularidade histórica, ambiental ou cultural em determinada área, bem como pode confirmar a inexistência desses (LARENTIS, 2009).

As informações utilizadas no estudo de MDE e da População do Sistema são listadas na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4: Listagem e informações da População vetorial do sistema.

Tipo de Informação	Descrição	Fonte de Referência	Ano de Referência dos dados
MDE – dados de satélite	Imagens do Brasil visto do espaço com detalhes do relevo e da topografia. Dados do relevo obtidos pela missão SRTM (<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>). Os produtos foram gerados a partir de dados de radar, obtidos de sensores a bordo do ônibus espacial <i>Endeavour</i> , no projeto SRTM.	EMBRAPA	2009
Unidades de Federação	Descrição dos limites federais.	SIGEL	2009
		IBGE	2015
		IEDE	2016
		MMA	2007
Sub-Bacias Hidrográficas	Dados vetoriais representativos das sub-bacias hidrográficas do Brasil.	HIDROWEB	2010
		SIGEL	2009, 2014
Bacias Hidrográficas	Delimitação das bacias hidrográficas existentes no território brasileiro.	SIGEL	2009, 2014
		HIDROWEB	2010
		IEDE	2011
		Instituto Pristino	2015
Municípios	Malha vetorial das delimitações municipais.	SIGEL	2009, 2010
		HIDROWEB	2010
		IBGE	2014, 2015
		MMA	2007
		IEDE	2011
		Instituto Pristino	2016
Hidrografia	Base cartográfica de hidrologia. Descrição dos dados dos cursos d'água existentes no Brasil em escalas de 1: 250.000 e 1:1.000.000.	SIGEL	2009, 2010
		HIDROWEB	2010
		IBGE	2014, 2015
		IEDE	2015
		Instituto Pristino	2015
Estações Fluviométricas e Pluviométricas	Dados de localização e informações referentes aos postos fluviométricos e pluviométricos.	SIGEL	2007, 2014
		HIDROWEB	2010
		Instituto Pristino	2015
Outorga de Usos de água	Malha vetorial com dados de localização e informações das outorgas de usos de água do território brasileiro.	Instituto Pristino	2016
		ANA	2016
Barragem	Localização das barragens existentes nos cursos d'água brasileiros.	IBGE	2015
		Instituto Pristino	2016
Mesorregião e Microrregião	Dados vetoriais das divisões de mesorregiões e microrregiões relativas aos municípios brasileiros.	IBGE	2015
Ilha dentro do rio	Localização das ilhas existentes dentro dos cursos d'água brasileiros.	IBGE	2015
Centrais Hidrelétricas	Descrição das localizações e informações relativas as Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) existentes no Brasil.	SIGEL	2009, 2014
		Instituto Pristino	2016

Continua.

Tabela 4 (cont.): Listagem e informações da População vetorial do sistema.

Tipo de Informação	Descrição	Fonte de Referência	Ano de Referência dos dados
Reservatórios	Malha vetorial das delimitações das massas d'água dos reservatórios de centrais hidrelétricas em funcionamento.	SIGEL	2009
		IBGE	2014, 2015
		IEDE	2011
Vegetação	Malha digital das categorias de vegetação representadas no Brasil, com dados do Projeto Radam do IBGE.	IEDE	2012
		Instituto Pristino	2015
		IBGE	2015
Aglomerados Urbanos	Vetor com dados descritivos e localidade de áreas de aglomerados urbanos, de regiões rurais, de transportes, de linhas de transmissão, de rodovias e de povoados.	IBGE	2005, 2014, 2015, 2016
		IEDE	2016
		Instituto Pristino	2015
		SIGEL	2009, 2014
Aglomerados Urbanos	Vetor com dados descritivos e localidade de áreas de aglomerados urbanos, de regiões rurais, de transportes, de linhas de transmissão, de rodovias e de povoados.	IBGE	2005, 2014, 2015, 2016
		IEDE	2016
		Instituto Pristino	2015
		SIGEL	2009, 2014
Unidades de Conservação e Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade	Limites vetoriais e informações referentes as Unidades de Conservação brasileiras federais, estaduais e municipais. Sendo elas separadas em Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso Sustentável. Bem como, apresenta vetores de Áreas de importância para a Conservação da Biodiversidade do país, da utilização sustentável e da repartição de benefícios. Apresenta também informações dos Corredores Ecológicos.	IEDE	2011
		IBGE	2015
		Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO)	2015
		PROBIO	2003
		Instituto Pristino	2015, 2016
Uso do solo	Dados vetoriais da utilização do solo.	IBGE	2015
		IEDE	2012
Clima	Dados vetoriais do clima e de isoietas.	MMA	2016
		IBGE	2011
Relevo	Vetor com dados descritivos do relevo.	IBGE	2011
Solo	Malha digital das categorias de solo.	IBGE	2011
Declividade	Dados vetoriais da declividade.	Instituto Pristino	2015
Bioma	Vetor com dados do Bioma.	IBGE	2011

Fonte: Autor.

3.1.6. Análise hidrológica

Logo, para seguir com a caracterização da bacia hidrográfica e a PPH, faz-se necessário a definição da vazão do curso d'água analisado no sítio. Contudo, a informação hidrológica utilizada na metodologia da PPH é bastante simplificada com relação à preconizada pelo MME para os Estudos de Inventário.

A princípio procurou-se por postos instalados na mesma bacia hidrográfica a ser analisada, a fim de se conseguir dados mais consistentes e consistidos para a área de interesse, respeitando a máxima semelhança entre as áreas da estação e do aproveitamento. Procurou-se por postos com no mínimo 30 anos de dados, verificando se o período é representativo do regime do rio, principalmente para períodos de estiagem.

Quando se é possível encontrar um posto fluviométrico no mesmo curso d'água analisado, trabalha-se as vazões estocasticamente. Inicia-se com o cálculo da vazão média de longo termo (Q_{mlt}), que é utilizada para expressar a média do conjunto de dados diários das vazões oriundas da estação fluviométrica.

Pode-se, então, extrapolar os valores de vazão para os demais pontos da bacia, passou-se, então, para a transposição de dados da estação para o local do aproveitamento. Utilizou-se a medida de área para se obter o Fator de Transposição (FT), como o listado na Equação 1, a seguir. O FT irá multiplicar os dados de vazão da estação fluviométrica (Q_{est}) base e assim, é possível ser gerada a série hidrológica para o local do aproveitamento.

$$FT = \frac{AD_{aprov}}{AD_{est}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

FT é o Fator de transposição;

AD_{aprov} é a área de drenagem do aproveitamento (km²);

AD_{est} é a área de drenagem da estação fluviométrica (km²) e;

Regionalização de Vazões

Segundo Tucci (2012), mesmo com uma rede de postos fluviométricos densa, dificilmente se é possível atender a todos os locais de interesse. A dificuldade de obtenção de dados para os estudos hidrológicos e recursos hídricos, fizeram com que o hidrólogo buscasse formas de transferências de informações de um local para outro na bacia. Logo, nestes casos, utilizou-se da regionalização para preencher as lacunas espaciais e temporais existentes e para uma maior otimização das informações disponíveis.

A regionalização pode ser usada para melhor explorar as amostras pontuais e, conseqüentemente, melhorar as estimativas das variáveis; bem como para verificar a

consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observação. A técnica da regionalização pode ser utilizada, desde que, sejam verificadas características de homogeneidade da bacia do aproveitamento e da bacia da estação fluviométrica, tais como: as características físicas (relevo, solo e geologia); as bióticas (coberturas florísticas) e as características antrópicas (uso e ocupação do solo) (TUCCI, 2012).

Quando da inexistência de estação fluviométrica instalada no curso d'água analisado, escolheu-se, então, um grupo de postos com características homogêneas a da área que se queria estudar. Buscou-se uma correlação de áreas de drenagem do aproveitamento ou da bacia hidrográfica com os postos, a fim de que não fossem nem muito maiores nem muito menores e que possuam vazões específicas compatíveis.

O próximo passo consistiu em calcular a Vazão Específica (q_{esp}) das estações fluviométricas conforme a Equação 2.

$$q_{esp} = \frac{Q_{mlt\ est}}{AD_{est}} \left(\frac{m^3}{s.km^2} \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

q_{esp} é a vazão específica [$m^3/(s.km^2)$];

$Q_{mlt\ est}$ é a vazão média de longo termo da estação fluviométrica (m^3/s) e;

AD_{est} é a área de drenagem da estação fluviométrica (km^2).

Seguindo recomendações das diretrizes da ELETROBRÁS, traça-se a curva de regionalização ($Q_{mlt\ est} * AD_{est}$) para cada região estudada, obtida por meio da linha de tendência exponencial e buscou-se um maior coeficiente de correlação. A equação representativa é apresentada sob a forma da Equação 3.

$$Q_i = a * (AD_i)^b \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

Q_i é a vazão (m^3/s);

AD_i é a área de drenagem (km^2).

a, b são os valores obtidos com o método dos mínimos quadrados.

Logo, para se obter o valor da vazão média de longo termo em um ponto qualquer para o qual seja conhecida a área de drenagem, basta substituir essa na equação anterior.

Dentre as estações utilizadas na regionalização é escolhida uma para desempenhar a função de estação base, sendo essa, a responsável por gerar a série de vazões nos locais dos aproveitamentos de interesse. Os critérios de escolha incluem a extensão da área de drenagem e a q_{esp} , que devem se aproximar com os valores encontrados para a usina; a extensão da série e a boa correlação com as demais estações.

De posse da Q_{mlt} do posto escolhido como base, os valores de vazão são transpostos para a área do aproveitamento utilizando o fator de transposição, como o listado na Equação 4, a seguir.

$$FT = \frac{Q_{aprov}}{Q_{mltest}} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

FT – Fator de transposição;

Q_{aprov} – vazão do aproveitamento (km^2) e;

Q_{mltest} – vazão média de longo termo da estação fluviométrica (m^3/s).

O FT irá multiplicar os dados de vazão da estação fluviométrica base e assim, é possível ser gerada a série hidrológica para o local do aproveitamento.

3.1.7. Identificação e caracterização dos Aproveitamentos Hidrelétricos

Este módulo de identificação e caracterização dos aproveitamentos hidrelétricos é composto por uma série de procedimentos de análise de topologia e hidrologia, conjuntamente com os vetores mencionados anteriormente, visando a uma prospecção com o maior número de sítios e assim, o aproveitamento máximo da bacia hidrográfica analisada (Souza et al., 2017).

As etapas de identificação e caracterização dos aproveitamentos consistem:

- Na identificação do eixo do barramento.
- Definição do perfil do terreno no eixo do barramento.

- Definição da altura da barragem.
- Verificação da área a ser inundada pelo reservatório.
- Definição da queda disponível no local, devido à topografia.
- Definição do local da casa de força.
- Definição da queda total disponível no local (obtida pela soma da queda natural com a barragem).

A seguir são descritos os procedimentos das etapas para identificação e caracterização do sítio, conforme citado anteriormente.

Identificação do eixo do barramento

No curso d'água a ser analisado é feita uma busca com a utilização do *software Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017) e os vetores alocados nele, por locais em que possam ser inseridas usinas hidrelétricas. A partir das imagens de satélite são geradas as curvas de nível e de posse dos dados altimétricos continua-se com os estudos.

Inicialmente, o rio é percorrido em cada trecho desde a nascente até a foz a procura por locais com desníveis topográficos concentrados que remetem a existência de cachoeiras nas quais, possivelmente, se poderia localizar um eixo de barramento, como indica o ponto vermelho da Figura 16, a seguir.

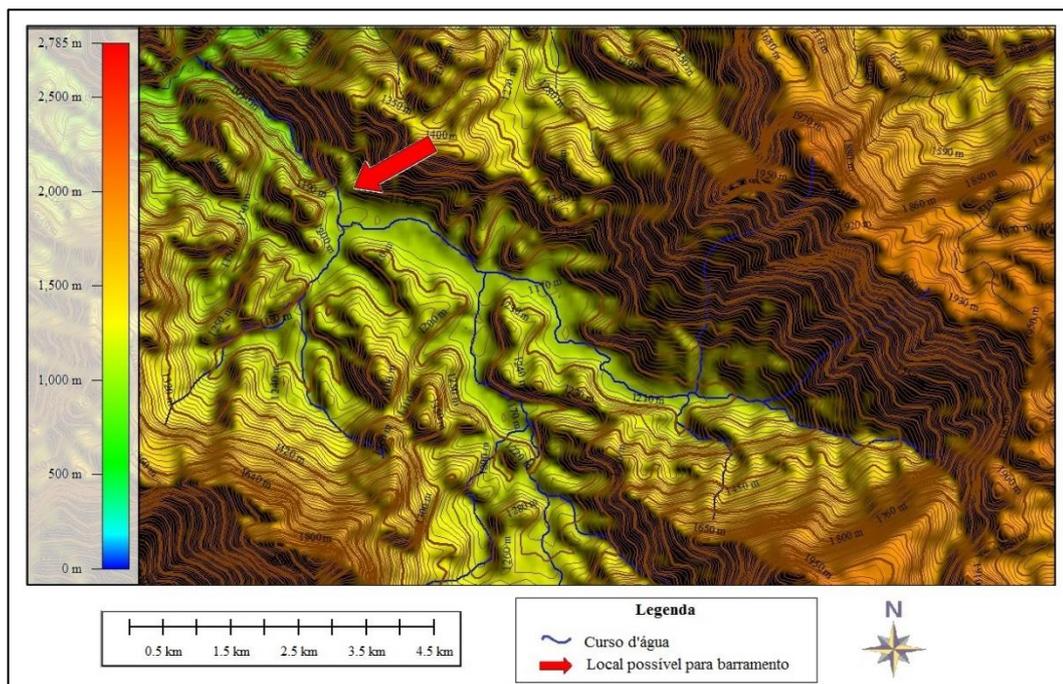


Figura 16: Procura de eixo de barramento com queda concentrada.

Fonte: Autor.

Definição do perfil do terreno no eixo do barramento e da Definição da altura da barragem

De posse de locais propícios para a alocação de aproveitamentos hidrelétricos é realizado, então, um estudo da área a fim de se posicionar a barragem. São levados em consideração fatores que interferem no barramento, como a altura e o comprimento das barragens e sua interferência econômica na decisão de construção do empreendimento através da geração do perfil transversal da área em questão (Figura 17).

A análise de um curso d'água é realizada em cada trecho ou com um espaçamento definido por parâmetros de distância. Usinas de baixa queda também são buscadas, tomando o cuidado de verificar a possibilidade de aproveitar as maiores vazões.

Os cursos d'água são ordenados de acordo com a hierarquia definida na discretização do sistema de sub-bacias e consecutivos trechos de rio.

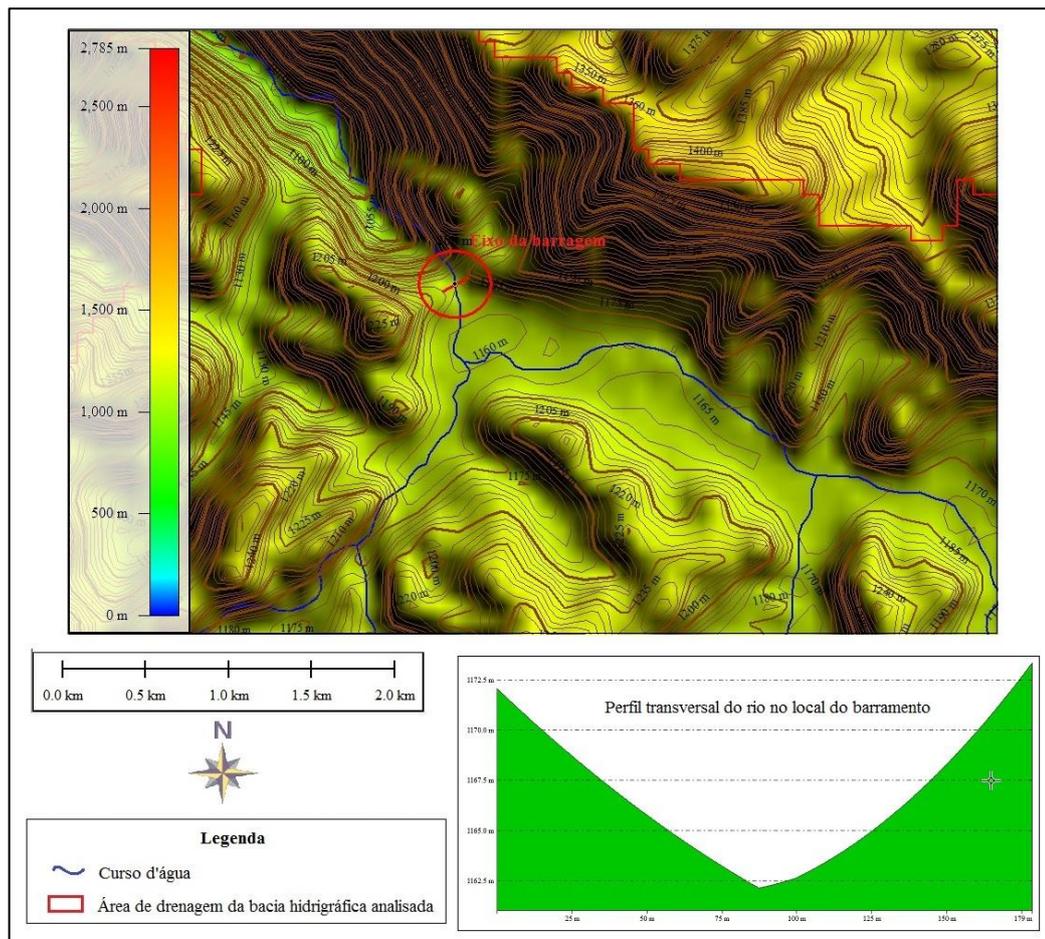


Figura 17: Localização e estudo da área do eixo da barragem.
Fonte: Autor.

Verificação da área a ser inundada pelo reservatório

De posse da localização de um possível eixo da barragem, identifica-se a cota do nível normal do reservatório, através das análises da topografia do local com a utilização das curvas de nível da região.

O processo de elevação e desenvolvimento da barragem é interativo com as mudanças de inundação do reservatório. A cada elevação do nível da área alagada e da altura da barragem é gerado um vetor de inundação (Figura 18) que é analisado.

Considerando o aproveitamento máximo do curso d'água, estudou-se parâmetros em que a declividade do talude da seção deixou de ser favorável para a construção de um barramento. Esta favorabilidade dependia de várias variáveis como geologia e topologia da região, que pode se modificar dentro de uma mesma bacia; dependendo também, do porte e da finalidade do projeto; de aspectos econômicos, dentre outros.

No estudo procurou-se respeitar as cotas de aproveitamentos já implementados.

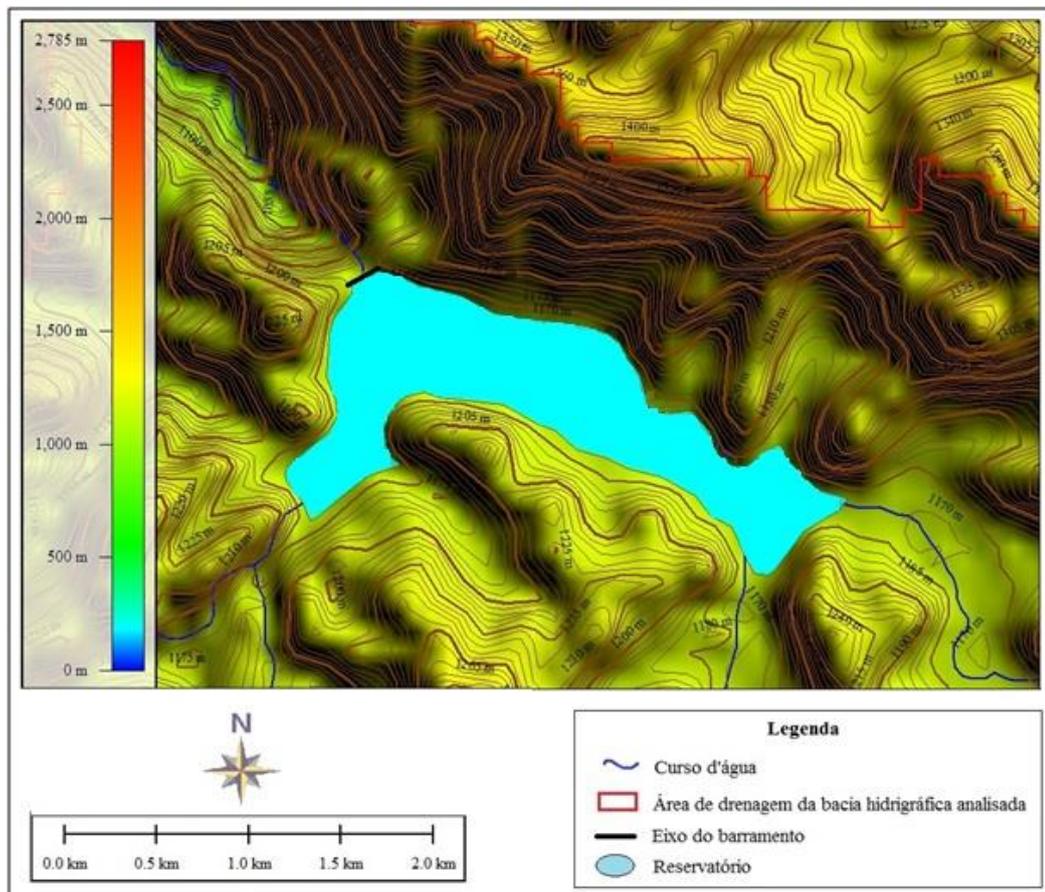


Figura 18: Estudo da área alagada de um aproveitamento.

Fonte: Autor.

Definição da queda disponível no local, devido à topografia e Definição do local da casa de força

Para cada eixo de barramento definido na rede de drenagem, analisou-se a topografia da região em busca da maior queda aproveitável. Logo, os entornos dos locais foram estudados a fim de se encontrar uma área que apresentasse a maior diferença de cotas e, conseqüentemente, a maior declividade. Preferencialmente, buscaram-se locais mais planos próximos ao rio, para alocar as casas de força e para diminuir os custos.

Estudou-se também, de maneira dinâmica, para a definição da queda disponível no local e para a localização das casas de força, as trajetórias do canal de adução e o conduto forçado, caso esses fossem estipulados para um determinado aproveitamento (Figura 19). O valor do comprimento dos condutos de baixa e alta pressão é variável em função da área estudada e depende das características topológicas, hidrográficas, geológicas, aspectos de engenharia e ambientais.

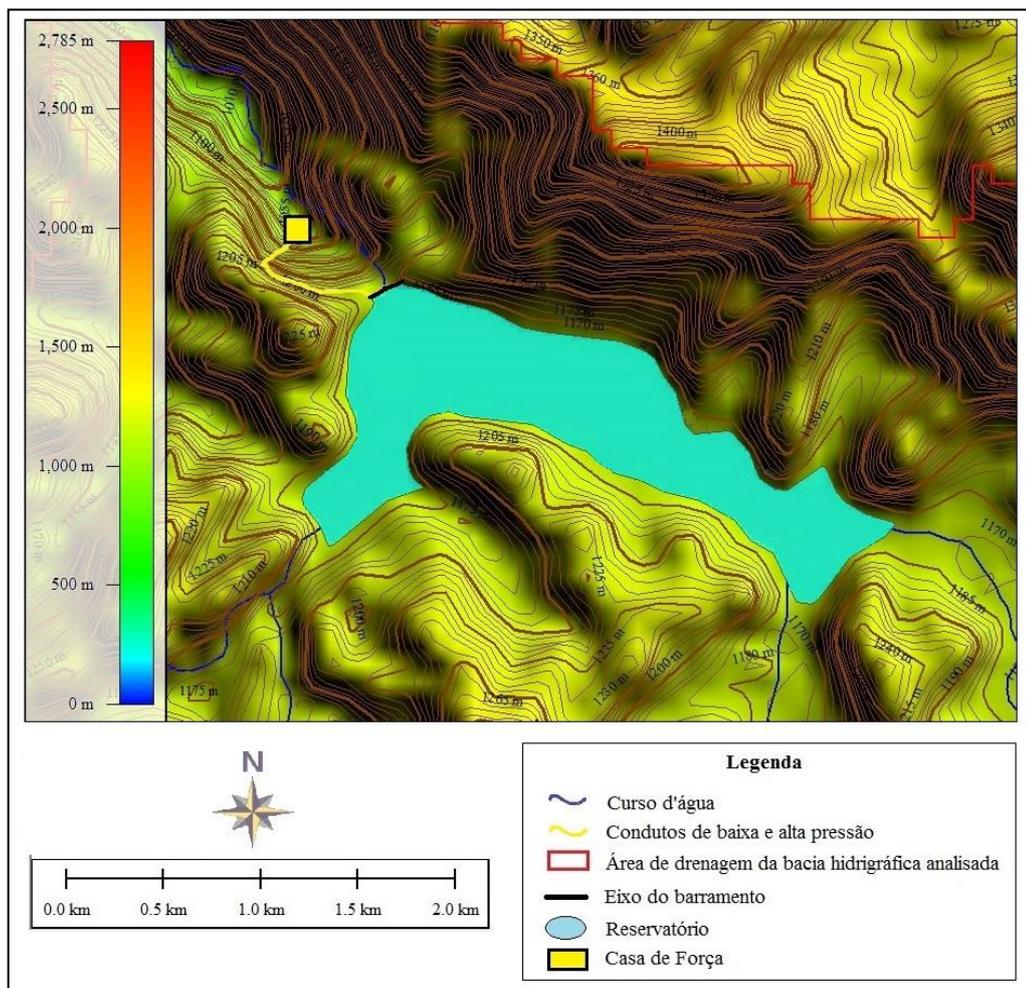


Figura 19: Estudo da área para alocação da casa de força.
Fonte: Autor.

A identificação do local de implementação da casa de força determina os trechos de vazão reduzida no curso d'água entre essa e o eixo do barramento.

A solução mais simplificada para a busca do local da casa de força poderia ser o simples fato de percorrer a rede de drenagem a jusante do eixo do barramento. Contudo, analisando-se a área de vizinhança é possível identificar esquemas tipo curto circuito como se pode observar na Figura 20 com o traçado amarelo. Essa solução permite a obtenção o local da casa de força que combine os parâmetros de maior declividade e menor distância a jusante do ponto do barramento.

A combinação dos parâmetros de maior declividade e menor distância a jusante do ponto do barramento é determinante para a utilização do esquema tipo curto circuito. Se a distância do curto circuito é maior do que o comprimento dos meandros do rio ou se o valor do desnível a jusante é muito baixo para as dimensões da rede de drenagem, as possibilidades de se instalar um sistema de curto circuito podem não ser identificadas.

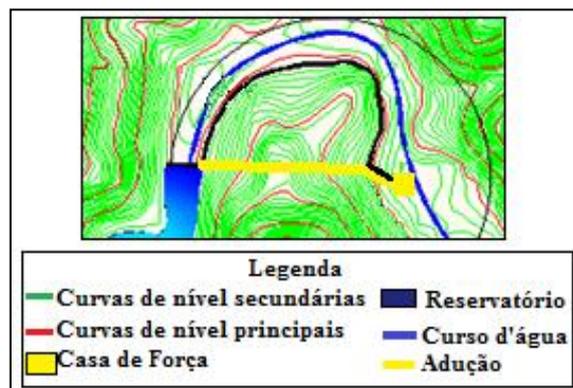


Figura 20: Estudo da área para alocação da casa de força utilizando curto-circuito para adução.
Fonte: Autor.

Definição da queda total disponível no local

Para cada eixo de aproveitamento hidrelétrico identificado, definiu-se a altura da barragem com a utilização do perfil do terreno e obteve-se a queda natural do terreno que se é possível aproveitar de acordo com a topografia da região.

Assim, para o cálculo da queda total disponível, simplesmente se é somada ao valor da queda natural do terreno o valor da altura da barragem.

3.1.8. Avaliação do Potencial Energético

Previamente à execução da localização do eixo do barramento e da casa de força é realizada a avaliação do potencial bruto com o cálculo da potência bruta (P_B), transcrita na Equação 5.

$$P_B = g * Q_{mlt} * H_B * \eta \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

P_B é a potência bruta (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

Q_{mlt} é a vazão média de longo termo (m³/s);

H_B é a altura bruta dada entre duas seções, h_1 e h_2 de um rio e;

η é o rendimento do conjunto turbina e gerador.

Como pode ser constatado com a Equação 5, observa-se que o potencial hidroenergético de um local é função da queda bruta e da disponibilidade hídrica.

Atualmente, principalmente nas PCHs, as centrais hidrelétricas são projetadas para operarem na condição “a fio d’água”, ou seja, utilizam do reservatório para desviar o fluxo de água para a casa de máquinas, sem que haja acumulação de água no reservatório. Por vezes, admite-se regularizações diárias ou semanais da vazão. Entretanto, esse tipo de procedimento tem tido muita resistência no processo de licenciamento ambiental e, por essa razão, não tem sido utilizado.

Em centrais de porte, do tipo de regularização, a queda também pode ser variável no tempo e se dá em função das variações do nível d’água do reservatório (nível montante) e do nível do canal de fuga (nível de jusante) que é função das vazões turbinadas e vertidas e o nível da água do reservatório de jusante, se houver.

Todavia, na fase de PPH, adota-se algumas hipóteses simplificadoras com o objetivo de possibilitar a estimativa hidroenergética do potencial estudado de forma preliminar e compatível com o nível e objetivo da metodologia. Portanto, neste estudo, considerou-se o valor de 9,81 m/s² para a gravidade e o valor de 0,82 (para pequenas centrais) para o rendimento do conjunto turbina e gerador a fim de se obter um parâmetro de análise entre os potenciais a serem descobertos.

3.1.9. Avaliação de condicionantes e restrições à implantação de centrais hidrelétricas

O estudo de PPH deve considerar, avaliar e identificar problemas que possam ser críticos à implementação das usinas hidrelétricas. A análise das condicionantes e/ou restrições consiste em restrições socioambientais e de infraestrutura que são fundamentais para reduzir chances de investimentos em estudos com características pouco promissoras.

Esta análise pode interferir tanto nas características do arranjo da usina pesquisada, como levar a inviabilidade do potencial, portanto, os vetores devem ser interpretados de forma a tratar apropriadamente os dados secundários e informações complementares obtidas.

As características de entrada para a análise são compostas por dados de Uso e Ocupação do Solo e por UC. Esses vetores devem conter informações das classes significativas para o projeto como, por exemplo, a alocação das zonas urbanas e estradas, tipos de vegetação do local e distância das linhas de transmissão, bem como a alocação das UC de Uso Sustentável e de Proteção Integral, demarcações indígenas e quilombolas e áreas prioritárias para a preservação da biodiversidade. Esses dados conjuntamente com os de interferências causados pelas áreas inundadas pelos reservatórios e outros problemas à montante e à jusante do barramento, como a manutenção da vazão sanitária mínima são os principais critérios ambientais analisados.

Em função dos resultados dessa etapa, pode se fazer necessário, a reavaliação do arranjo e, conseqüentemente, a estimativa do potencial energético, assim como, a desistência dos estudos em determinado local devido às características que conduzam à inviabilidade.

3.2. O LIMITE APROVEITÁVEL DO POTENCIAL HIDRÁULICO PARA A EXPLORAÇÃO SEQUENCIAL DE UM CURSO D'ÁGUA

A metodologia desenvolvida por Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et al. (2017), servirá de base para a estruturação do trabalho.

No desenvolvimento teórico da referida metodologia (SOUZA e TIAGO FILHO, 2008), apresenta-se um procedimento para a determinação do limite teórico da potência máxima, tecnicamente possível de ser explorado em um curso d'água. Foi utilizada uma análise comparativa, sob o aspecto energético, entre as transformações térmicas e hidráulicas.

De acordo com os princípios da Física, todos os processos de conversão energética são regidos por duas leis físicas fundamentais, sendo a primeira delas a Lei da Conservação da Energia, também conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica, e sendo a segunda a Lei da Dissipação da Energia (SOUZA et al., 2017).

A Lei da Conservação da Energia apresenta o conceito de que a energia não se cria nem se destrói e, também, baseia o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema. A outra relação física básica é a Lei da Dissipação da Energia, segundo a qual, todos os processos reais de conversão energética deve ter como produto uma parcela de energia térmica (MARQUE, HADDAD e MARTINS, 2001).

Os conceitos descritos acima são aplicados na metodologia de Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et al. (2017), na qual é feita uma analogia do ciclo térmico ideal reversível, ou de Carnot, e de um sistema hidráulico composto por um trecho de curso d'água.

De acordo com Souza e Tiago Filho (2008) o estudo tem como base o 1º Princípio da Termodinâmica, ou Lei da Conservação da Energia, no qual: a energia trocada com o meio externo na forma de calor (Q_c) corresponde à energia trocada com o meio externo na forma de trabalho (W), somada a variação da sua energia interna (ΔU), conforme a Equação 6.

$$Q_c = W * \Delta U \quad \text{(Equação 6)}$$

Para a variação da energia interna, considera-se a Equação 7, a seguir.

$$U = 1,5 * n * R_g * (T_f - T_i) \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

U é a energia interna;

R_g é a constante do gás;

n é o número de mols;

T_f é a temperatura final do gás, e;

T_i é a temperatura inicial do gás.

Considerando n e R_g constantes, na equação anterior, apresenta-se que a energia interna do sistema depende unicamente das temperaturas inicial e final. Assim, a medida que

elas variam a energia interna do sistema também irá variar. Logo, a temperatura do sistema corresponde ao potencial energético do mesmo.

O rendimento térmico de um sistema é representado pela quantidade de energia térmica que é convertida em trabalho. Ou seja, o rendimento térmico teórico (η_T) é dado pela relação existente entre a quantidade de calor, ou energia, que é perdida para o ambiente (Q_{c2}), e a quantidade de calor extraída da fonte quente (Q_{c1}), conforme a Equação 8.

$$\eta_T = \frac{W}{Q_{c1}} = 1 - \frac{Q_{c2}}{Q_{c1}} \quad \text{(Equação 8)}$$

Considerando um Ciclo de Carnot, que é um ciclo térmico ideal composto por processos adiabáticos e isotérmicos reversíveis, apresenta-se que o limite máximo do rendimento de um sistema térmico que foi submetido a dois níveis energéticos:

- Independe da natureza e dos estados percorridos pelo ciclo.
- Dá-se quando o número de estados intermediários tende ao infinito.
- Está limitado, superiormente, pelo rendimento de Carnot (η_c), que é dado em função das temperaturas final e inicial, conforme mostrada na Equação 9.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_i} \quad \text{(Equação 9)}$$

Por analogia em um sistema hidráulico, composto por um trecho de curso d'água em declividade em que são limitadas as sessões s_1 e s_2 cujas altitudes são, respectivamente, h_1 e h_2 e a vazão média no trecho é dada por \bar{Q} (m^3/s), conforme a Figura 21 (SOUZA et al., 2017).

Conforme a Figura 21, o potencial energético superior e inferior é então representado pela energia potencial disponível nas seções montante ($\dot{m}_1 * g * h_1$) e jusante ($\dot{m}_2 * g * h_2$), em que \dot{m} é a vazão mássica na seção dada em (kg/s). Assim, concluiu-se que o potencial hidráulico disponível no trecho do rio é o gradiente do potencial existente no mesmo, conforme a Equação 10, a seguir (SOUZA et al., 2017).

$$W_{12} = g * (h_1 * \dot{m}_1 - h_2 * \dot{m}_2) \quad \text{(Equação 10)}$$

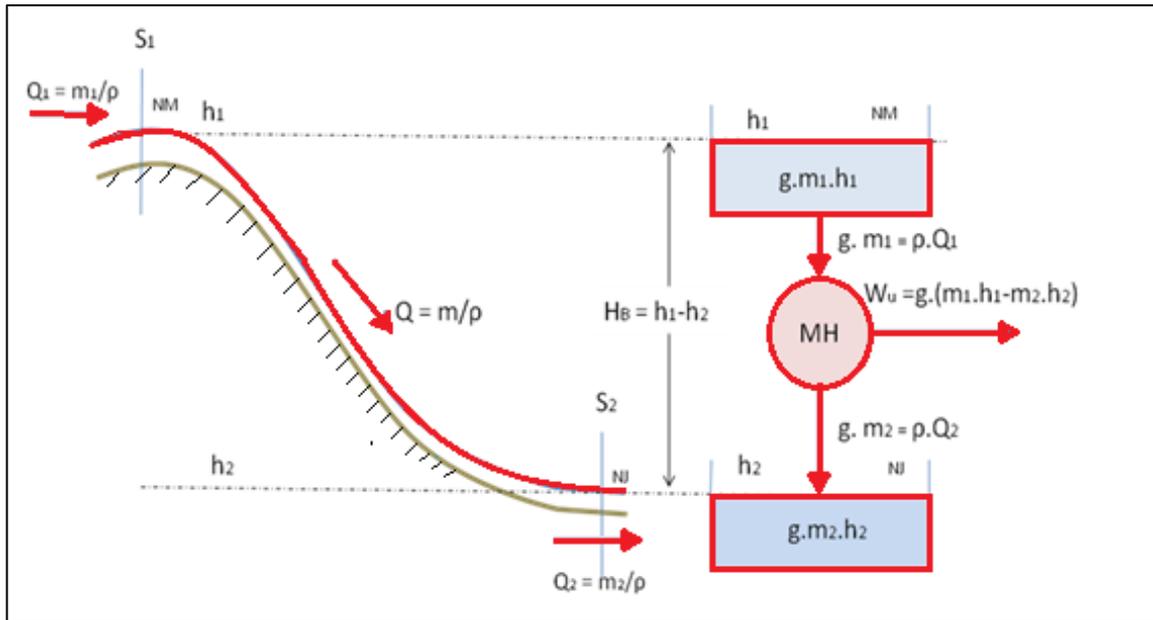


Figura 21: Esquema para modelagem de geração hidrelétrica.
Fonte: Adaptado de Souza; Tiago Filho (2008).

O potencial energético hidráulico disponível em um trecho de curso d'água é dado em função do gradiente de potencial existente ao longo de todo o seu percurso de jusante e montante. Analogamente, a energia disponível de um rio será o gradiente de energia entre a seção de nascente até a sua foz (W_{NF}), segundo a Equação 11. Onde, \dot{m}_N e \dot{m}_F , e h_N e h_F representam, respectivamente, as vazões mássicas e as alturas de cotas da nascente e da foz do trecho estudado (SOUZA et al., 2017).

$$W_{NF} = g * (\dot{m}_N * h_N - \dot{m}_F * h_F) \quad \text{(Equação 11)}$$

No estudo considera-se que para a determinação da máxima energia hidráulica que pode ser aproveitada em uma bacia, que, as transformações energéticas ao longo do percurso se dêem sem perdas.

Aplicou-se então, os princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento, modelando por meio de um sistema equivalente que compreende colocar seções de montante e jusante do trecho delimitado, reservatórios com níveis de água nas mesmas altitudes e substituir o trecho do rio por um conduto que escoar a mesma vazão média de maneira contínua e constante (SOUZA et al., 2017).

Considerou-se que a vazão mássica em uma seção qualquer do rio é dada pela Equação 12, a seguir (SOUZA et al., 2017).

$$\dot{m}_i = \rho * \bar{Q}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde:

\dot{m}_i é a vazão mássica em uma seção genérica;

ρ é a massa específica da água (kg/m^3) e;

\bar{Q}_i é a vazão média de longo termo (m^3/s) em uma dada seção.

Desta forma, pelo princípio da conservação da quantidade de movimento, e tendo a vazão constante no trecho analisado e considerando que, a massa específica da água à temperatura média é aproximadamente $1.000 \text{ (kg}/\text{m}^3)$, apresenta-se que a potência hidráulica teórica bruta (P_{HTB}) de cada seção seria dada pela Equação 13:

$$P_{\text{HTB}} = g * \bar{Q} * H_B \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde:

P_{HTB} é a potência hidráulica teórica bruta (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

\bar{Q} é a vazão média (m^3/s) e;

H_B é a altura bruta dada entre duas seções, h_1 e h_2 de um rio.

3.2.1. Potência hidráulica média máxima de um trecho de curso d'água

Souza e Tiago Filho (2008) apresentaram em seu trabalho uma formulação para o cálculo da potência hidráulica média máxima existente em um trecho de curso d'água. Para tanto, foi considerada uma barragem fictícia na foz do rio, cuja altura abrange o desnível entre a nascente e a foz e cujo reservatório alagaria toda a bacia hidrográfica (Figura 22), sendo possível assim, o aproveitamento total do curso d'água.

Na Figura 22 a seguir, apresenta-se o curso d'água, R, apresentado em sua totalidade, com as nascentes (Ni) e foz (Fi) do rio principal e de seus afluentes com suas respectivas alturas h_{Ni} e h_{Fi} . A vazão média no tempo da foz em uma seção aleatória é representada por \bar{Q}_{Fi} , considera-se que ela seja garantida em todo tempo considerado. As áreas de drenagem das bacias hidrográficas, que representam os limites dos divisores de água de todas as nascentes do rio e de seus afluentes, são representadas pela linha de contorno AD_i (SOUZA e TIAGO FILHO, 2008).

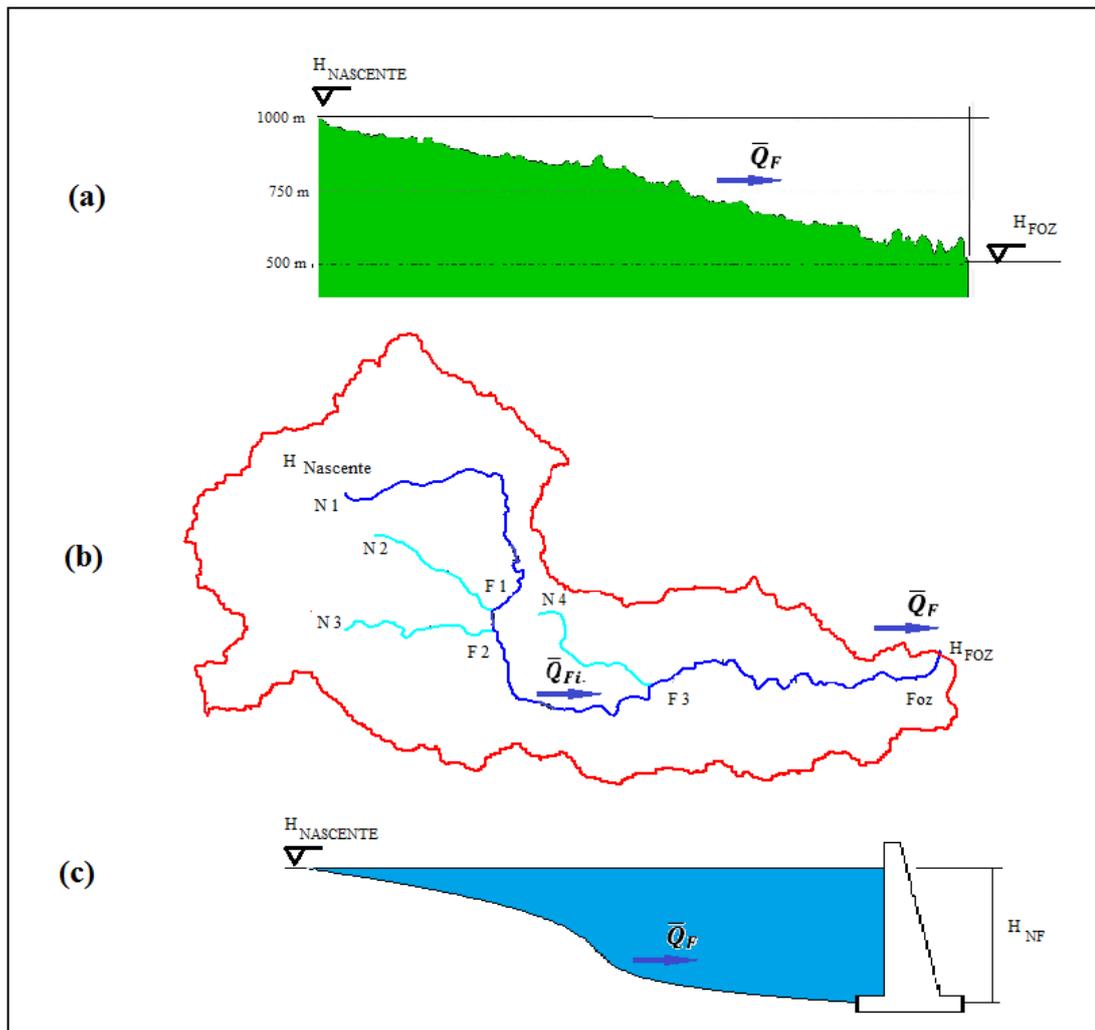


Figura 22: Barramento equivalente modelando uma bacia hidrográfica. Onde: (a) indica a vista do nível do curso d'água. (b) indica a vista da bacia hidrográfica e (c) indica uma única barragem no curso total do rio. Fonte: Adaptado de Souza e Tiago Filho (2008).

Admitiu-se ainda, em função da barragem fictícia da Figura 22, que, o nível máximo (\bar{N}_N) é igual a média ponderada das cotas das nascentes (\bar{N}_{Ni}), cujos pesos são as vazões nas respectivas confluências com o rio principal (\bar{Q}_{Fi}), como mostrado na Equação 14, em que “z” é o número de nascentes consideradas no estudo (SOUZA e TIAGO FILHO, 2008).

$$\overline{NA}_N = \frac{\overline{NA}_{N1} + \overline{NA}_{N2} + \dots + \overline{NA}_{NZ}}{\sum_{i=1}^Z Q_i} = \frac{h_{N1} \cdot \overline{Q}_{F1} + h_{N2} \cdot \overline{Q}_{F2} + \dots + h_{NZ} \cdot \overline{Q}_{FZ}}{\sum_{i=1}^Z Q_i} \quad (\text{Equação 14})$$

Segundo Souza e Tiago Filho (2008) apresenta-se então, a definição da potência hidráulica média teórica máxima (P_{TMAX}) de um dado curso d'água em (kW), conforme a Equação 15 (SOUZA et al., 2017).

$$P_{TMAX} = g \cdot \overline{Q}_F \cdot H_{NF} \quad (\text{kW}) \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

P_{TMAX} é a potência média teórica máxima (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

\overline{Q}_F é a vazão média na foz do curso d'água (m³/s) e;

H_{NF} é a altura bruta dada entre a média ponderada das cotas das nascentes e a foz de um rio.

3.2.2. Potência hidráulica teórica disponível em função do número de aproveitamentos de um curso d'água

Considerando que não é possível a construção de uma única barragem que aproveite todo o desnível de uma bacia hidrográfica, Souza e Tiago Filho (2008) admitiram a construção de barragens sequenciais, também chamadas de aproveitamentos em cascata (SOUZA et al., 2017).

Os autores admitiram que a instalação das barragens e seus reservatórios se dariam de forma contínua, sem a existência de trechos secos, e que, as vazões médias de longo termo referente à área da bacia hidrográfica e as quedas dos respectivos barramentos, seriam constantes (SOUZA et al., 2017). Assim, eles preconizaram que:

A potência média máxima (\overline{P}_{TMAX}), que teoricamente está disponível no rio é dada pelo somatório das potências de todos os aproveitamentos existentes na cascata e será inferior à potência hidráulica média teórica máxima (P_{TMAX}), determinada tomando a queda bruta total, calculada como sendo a diferença entre a altitude média ponderada das altitudes das nascentes e a altitude da foz do rio, e a vazão média na foz do rio (SOUZA et al., 2017, p. 277).

No estudo de inventário hidrelétrico de um curso d'água, considera-se o procedimento de “partição de quedas” que tem o objetivo de distribuir os barramentos a fim de se conseguir a maximização do aproveitamento energético de um curso d'água e dos potenciais existentes.

Logo, para o cálculo da potência hidráulica teórica disponível (P_{HTDisp}) em um curso d'água, Souza e Tiago Filho (2008) consideraram ser possível a instalação do número Z_B de barramentos e listaram a Equação 16, a seguir (SOUZA et al., 2017).

$$P_{HTDisp} = g * k_{ZB} * \bar{Q}_F * H_{NF} = k_{ZB} * P_{TMAX} \quad \text{(Equação 16)}$$

Sendo, k_{ZB} definido como “Fator de Uso” do potencial hidráulico teórico da bacia hidrográfica estudada (SOUZA e TIAGO FILHO, 2008).

Esse fator citado acima corresponde à parcela do potencial teórico que é possível de ser explorado em um determinado curso d'água. Logo, segundo Souza e Tiago Filho (2008), quando o número de barramentos em um rio cresce, o Fator de Uso do potencial hidráulico teórico decresce. Portanto, para o limite, quando o número de aproveitamentos hidrelétricos tende ao infinito, $Z_B \rightarrow \infty$, apresenta-se que o potencial hidráulico que teoricamente poderia ser utilizado de um curso d'água tende para a metade do potencial médio teórico total disponível, calculado em função do desnível entre as nascentes e foz do rio principal e de sua vazão média de longo termo (Q_{mlt}) na foz (SOUZA et al., 2017).

Segundo o trabalho apresentado por Souza e Tiago Filho (2008), admitiu-se a princípio aspectos topográficos e hidrológicos da bacia hidrográfica estudada. Em etapas posteriores, foram analisados os aproveitamentos hidroenergéticos quanto às limitações legais, ambientais, sociais, econômicas e interferências estruturais.

3.3. INDICADORES PARA A ANÁLISE DOS POTENCIAIS HIDRÁULICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA

Considerando alguns parâmetros para a análise dos potenciais hidráulicos foram propostos e utilizados os descritos a seguir. Vale salientar que a metodologia que serviu de base para o estudo foi desenvolvida por Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et al. (2017).

Conforme se pode notar, o K_{zb} é um fator teórico que tende para um limite de 0,5, e, isso somente poderia ocorrer com a utilização inteira do rio com um número infinito de explorações sequenciais, o que não é possível na prática. A quantidade de aproveitamentos que provam ser economicamente viáveis em um curso d'água é bem menor e é limitada por aspectos hidrológicos, topográficos, geológicos, ambientais, econômicos e regulatórios.

Assim, para corrigir o Fator de Uso Teórico (K_{zb}), um segundo fator foi criado e definido como Fator de Uso Corrigido (K_{UC}). Assim, a Equação 16 torna-se a Equação 17, a seguir:

$$P_{HTDisp} = g * K_{UC} * \bar{Q}_F * H_{NF} \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 17)}$$

Onde:

P_{HTDisp} é a potência hidráulica teórica disponível (kW);

K_{CU} é o fator de uso corrigido;

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

\bar{Q}_F é a vazão média na foz do curso d'água (m³/s) e;

H_{NF} é a altura bruta dada entre a média ponderada das cotas das nascentes e a foz de um rio.

O fator K_{UC} deve ser estimado considerando as condições naturais da bacia, tais como seu tamanho, vazão específica, comprimento e inclinação média do rio. Uma maneira de verificar seu comportamento é usar os dados existentes e tentar correlacionar com alguns desses parâmetros.

A seguir encontra-se a listagem dos coeficientes analisados no estudo, que foram aplicados aos cursos d'água estudados.

3.3.1. Forma da Bacia

O fator de forma de uma bacia hidrográfica, K_F , é definido pela relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial (ELETROBRAS, 2000).

A forma é uma das características físicas mais difíceis de serem expressas em termos quantitativos. A partir de mapas topográficos, imagens de satélite e planimetria com o

computador é possível identificar o formato da bacia hidrográfica dos cursos d'água estudados. Algumas outras características da bacia, principalmente a geologia podem influenciar a forma da bacia, bem como a forma do sistema de drenagem. A forma pode, também, atuar sobre alguns dos processos hidrológicos, ou sobre o comportamento hidrológico da bacia.

Calcula-se para as bacias analisadas, segundo HORTON, o fator de forma K_F (Equação 18).

$$K_F = \frac{AD}{L^2} \quad \text{(Equação 18)}$$

Onde:

K_F é o fator de forma

AD é a área da bacia hidrográfica

L é o comprimento do eixo da bacia (da foz ao ponto extremo mais longínquo no espigão).

Bacias alongadas apresentam pequenos valores de Fator de forma e são menos susceptíveis às inundações. O índice de conformação relaciona a forma da bacia com um retângulo. Assim, para uma bacia estreita e alongada, a possibilidade de ocorrência de chuvas mais intensas cobrindo toda sua extensão é menor que em bacias que sejam largas e curtas. Logo, para bacias de mesmo tamanho, aquela que possuir o menor Fator de forma é menos sujeita a enchentes (ELETROBRAS, 2000).

3.3.2. Comprimento do Curso d'água Estudado.

O comprimento do rio principal das bacias hidrográficas estudadas, foi obtido a partir de mapas topográficos, levantamentos altimétricos oriundas de imagens de satélite e vetores aplicados ao *software Global Mapper*© (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017), considerando desde a nascente mais distante até a sua foz. Foi possível encontrar o comprimento (L) para os principais afluentes analisados.

3.3.3. Potência total de projeto

Para o cálculo da Potência total de projeto ($P_{T\text{proj}}$) é considerada as potências de projeto de cada usina localizada. Essa potência de projeto é obtida de uma análise hidrológica mais aprofundada para cada local de empreendimento da qual se é obtida uma vazão de projeto (Q_{proj}) para cada aproveitamento estudado.

3.3.4. Potência hídrica disponível

No cálculo da Potência hídrica disponível, foram considerados para o trabalho, os valores obtidos para os cursos d'água. A potência para cada rio se dá segundo a Equação 19, a seguir.

$$P_{H\text{Disp}} = g * Q_{\text{mlt}} * H_{\text{NF}} \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 19)}$$

Onde:

$P_{T\text{inst}}$ é a potência hídrica disponível (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

Q_{mlt} é a vazão média de longo termo (m^3/s);

H_{NF} é a altura bruta dada entre a média ponderada das cotas das nascentes e a foz de um rio (m).

3.3.5. Potência teórica instalada

No cálculo da Potência teórica instalada, considerou-se o somatório das potências instaladas nos aproveitamentos localizados por meio da PPH. A potência para cada usina é considerada segundo a Equação 20, a seguir.

$$P_{T\text{inst}} = g * Q_{\text{mlt}} * H_{\text{B}} \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 20)}$$

Onde:

$P_{T\text{inst}}$ é a potência teórica instalada (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

Q_{mlt} é a vazão média de longo termo para cada aproveitamento (m^3/s) e;

H_B é a altura bruta dada para cada usina estudada.

3.3.6. Vazão específica da bacia

Sendo a vazão específica da bacia, a vazão por unidade de área, ela foi obtida a partir da Equação 21.

$$q_{esp} = \frac{Q_{mlt\ aprov}}{AD_{est}} \left(\frac{m^3}{(s.km^2)} \right) \quad \text{(Equação 21)}$$

Onde:

q_{esp} é a vazão específica [$m^3/(s.km^2)$];

Q_{mlt} é a vazão média de longo para cada aproveitamento (m^3/s) e;

AD_{aprov} é a área de drenagem para cada usina estudada (km^2).

3.3.7. Declividade da Bacia

A velocidade de escoamento de um rio depende da declividade dos canais fluviais. Assim, quanto maior a declividade maior será a velocidade de escoamento e mais pronunciados e estreitos serão os hidrogramas de enchentes (ELETROBRÁS, 2000).

A declividade da bacia para o estudo foi obtida pela diferença entre a média ponderada das elevações das nascentes dos principais afluentes do rio principal e a elevação mínima (foz) pela extensão total do curso d'água estudado, conforme mostra a Equação 22.

$$I_{BH} = \frac{(\overline{NA_N} - h_{Fi})}{L} = \frac{H_{NF}}{L} \left(\frac{m}{km} \right) \quad \text{(Equação 22)}$$

Onde:

I_{BH} é a declividade média (m/km);

$\overline{NA_N}$ é a média ponderada das cotas das nascentes de um rio (m);

h_{fi} é a altura da foz de um curso d'água (m);

H_{NF} é a altura bruta dada entre a média ponderada das cotas das nascentes e a foz de um rio (m).

L é o comprimento total do curso d'água principal (m), e;

3.3.8. Potência específica

Levando-se em conta a declividade média do rio, observa-se que quanto mais inclinado for o curso d'água, maior será a concentração do potencial e mais próximo se pode chegar do limite do Fator de uso determinado pelos critérios econômicos. O potencial possível de ser explorado também pode ser relacionado com a vazão específica da bacia hidrográfica. Para tanto, quanto maior ela for, maior será a possibilidade de aproximar do limite teórico do potencial do rio.

Buscando-se uma correlação entre os limites de exploração do potencial hidráulico foi sugerido por Souza e Tiago Filho (2008), a correção do fator de uso com o potencial hidráulico específico da bacia hidrográfica. Logo, para o cálculo da Potência específica, consideram-se os valores de declividade e vazão específica da bacia, aplicados na Equação 23.

$$P_{esp} = g * q_{esp} * I_{BH} \text{ (kW)} \quad \text{(Equação 23)}$$

Onde:

P_{esp} é a potência específica (kW/km²);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

q_{esp} é a vazão específica (m³/s) e;

I_{BH} é a declividade média para o curso d'água estudado (m/km).

3.3.9. Tempo de Concentração.

O tempo de concentração mede o tempo que se faz necessário para que toda a bacia contribua com o escoamento superficial em uma determinada seção. Logo, é o tempo

estimado em que a água superficial leva para escoar do ponto mais distante até a foz (ELETROBRAS, 2000).

Adota-se a fórmula do *Soil Conservation Service* (Equação 24) para o cálculo do tempo de concentração da bacia envoltória ao empreendimento (ELETROBRAS, 2000).

$$T_C = 0,95 * \left[\frac{L^3}{H_{NF}} \right]^{0,385} = 0,95 * \left[\frac{L^2}{I_{BH}} \right]^{0,385} \quad (\text{h}) \quad (\text{Equação 24})$$

Onde:

T_C é o tempo de concentração (horas);

L é o comprimento do rio principal (km);

H_{NF} é a diferença de cotas entre a nascente e a foz do curso d'água principal (m);

I_{BH} é a declividade do curso d'água (m/km).

3.3.10. Indicadores de Potencial da Bacia Hidrográfica

O trabalho fez uso de alguns indicadores para relacionar os parâmetros analisados a fim de aproximar o cálculo do potencial máximo disponível da bacia hidrográfica, calculado pelo procedimento proposto, e do potencial passível de ser aproveitado, quer seja pelo critério econômico, quer seja pelo critério ambiental, ou outros critérios ou restrições que possam existir e que não sejam possíveis detectar pelo procedimento ora proposto.

Para tanto, levou-se em consideração algumas características naturais da bacia hidrográfica que poderiam influenciar no aproveitamento dessa totalmente, tais como o tempo de concentração da água; o comprimento e a inclinação média do rio; e o fator de forma da bacia. Esses parâmetros foram utilizados para verificar o fator de uso corrigido.

A seguir encontra-se a listagem dos coeficientes analisados no estudo.

- K_{ZB} : Coeficiente de Fator de Uso. Estimado no valor de 0,50 por Souza e Tiago Filho (2008). Ele é representado na Equação 25.

$$\lim_{z_B \rightarrow \infty} (K_{z_B}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1+z_B}{2.z_B} \right) = 0,50 \quad (\text{Equação 25})$$

- **Kzbt**: Coeficiente que relaciona a Potência Teórica Instalada, calculada como sendo o somatório das potências dos sítios identificados pela prospecção, utilizando a metodologia apresentada, com a Potência Total Teórica (Equação 26) (SOUZA et al., 2017).

$$\mathbf{K_{zbt}} = \frac{P_{Tinst}}{P_{TMAX}} \quad \text{(Equação 26)}$$

- **Kzbp**: Coeficiente que relaciona a Potência Total de Projeto dos aproveitamentos factíveis identificados ou que já estejam em operação na bacia hidrográfica, com a Potência Total Teórica (Equação 27) (SOUZA et al., 2017).

$$\mathbf{K_{zbp}} = \frac{P_{Tproj}}{P_{TMAX}} \quad \text{(Equação 27)}$$

- **KRzbt**: Coeficiente que relaciona a potência teórica instalada e a potência total teórica. Valor obtido recalculando os valores do fator de correção, **Kzbt**, por meio das equações oriundas dos gráficos que relacionam os parâmetros da bacia hidrográfica e o coeficiente **Kzbt**.
- **KRzbp**: Coeficiente que relaciona a potência total de projeto e a potência total teórica. Valor obtido recalculando os valores do fator de correção, **Kzbp**, por meio das equações oriundas dos gráficos que relacionam os parâmetros da bacia hidrográfica e o coeficiente **Kzbp**.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

Na dissertação, para a realização do trabalho de prospecção e de análise do potencial máximo que pode ser aproveitado em uma bacia hidrográfica, foi escolhido o Estado de Minas Gerais, mais precisamente, alguns cursos d'água alocados nas sub-bacias hidrográficas de códigos 56, 60 e 61.

Segundo o Instituto de Geociências Aplicadas (IGA), Minas Gerais é o quinto maior estado brasileiro em extensão. Sua origem está ligada a busca de metais preciosos, na qual vilas surgiram pela corrida migratória em busca de ouro. (IGA, 2016).

De acordo com informações do IBGE (2016), o Estado apresenta 853 municípios em seu território, que compreendia uma área de 586.521,235 km² no ano de 2015. A taxa de urbanização para o estado foi de 84% em 2016. A economia tem destaque no comércio e na indústria de transformação (IBGE, 2016). Com relação aos aspectos naturais e culturais, poucas regiões são detentoras de potencialidades turísticas tão diversificadas como Minas Gerais. Suas cidades históricas do século XVIII, estâncias hidrominerais, grandes lagos represados para hidrelétricas, parques florestais, cachoeiras, grutas com inscrições pré-históricas, dentre outros pontos que conferem ao estado um posicionamento privilegiado no acervo de opções turísticas no Brasil.

Atualmente, Minas Gerais é o estado de maior extensão territorial da Região Sudeste, e aliando seu grande território à diversidade geográfica e ambiental, bem como a sua produção econômica variada, apresenta-se uma região propícia para a aplicação do estudo. Para tanto, segue uma breve caracterização da região do Estado, dados esses, que interferem na implantação de usinas hidrelétricas nas questões de impactos positivos e negativos sobre a população e o ambiente.

4.1. ASPECTOS FÍSICOS

Apresenta-se a seguir uma descrição dos aspectos físicos para uma melhor caracterização da área de interesse do estudo.

- **Clima**

O clima de uma região é representado por um conjunto de condições atmosféricas que ocorrem em um local determinado, durante um período longo de tempo. Os principais

elementos que caracterizam o clima são: temperatura, precipitação, pressão atmosférica, ventos e umidade do ar, sendo os dois primeiros os mais importantes (IGA, 2016).

O Estado de Minas Gerais é afetado por vários sistemas climáticos. O conhecimento das diferentes zonas climáticas no território mineiro é uma informação importante para a tomada de decisões no desenvolvimento ambiental e socioeconômico da região. Portanto, o Estado é caracterizado por apresentar duas estações bem definidas, sendo elas: um verão quente e chuvoso de outubro a março, que concentra cerca de 85% do total das chuvas anuais; e um inverno seco com temperaturas mais amenas no restante do período. A média de temperatura máxima no estado é de 27,9°C, que varia de acordo com a posição geográfica, alocando assim, as temperaturas mais quentes nas porções nordeste e norte de Minas Gerais. A média de temperatura mínima é de 16°C, apresentando os menores valores no sul do estado, nas regiões de altitudes mais elevadas (IGA, 2016).

Sabendo que as isoietas são curvas que delimitam regiões de mesma pluviosidade, apresenta-se, a seguir, na Figura 23 os dados referentes a essa temática para Minas Gerais segundo informações do MMA (2016). Verifica-se que a pluviosidade nas regiões norte e nordeste do Estado possui um menor índice enquanto que nas regiões sul e sudeste apresenta valores maiores.

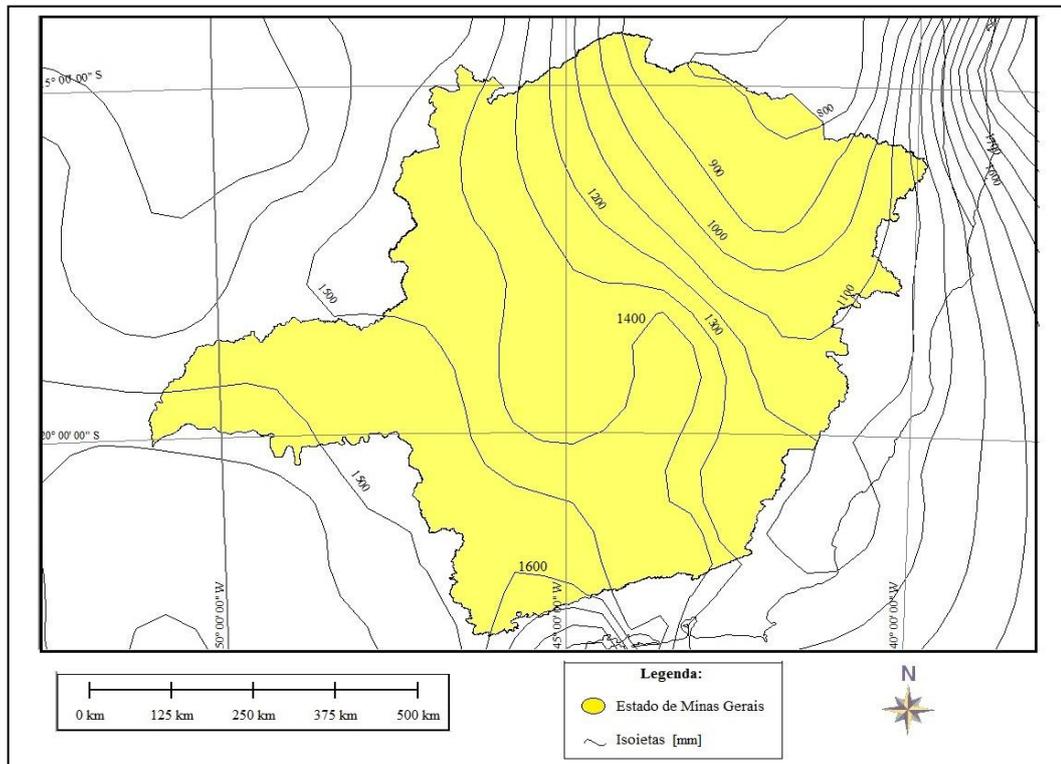


Figura 23: Chuva anual características do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de MMA, 2016.

A seguir, a Figura 24 apresenta a classificação climática para Minas Gerais segundo informações do IBGE (2016) com dados referentes ao ano base de 2011.

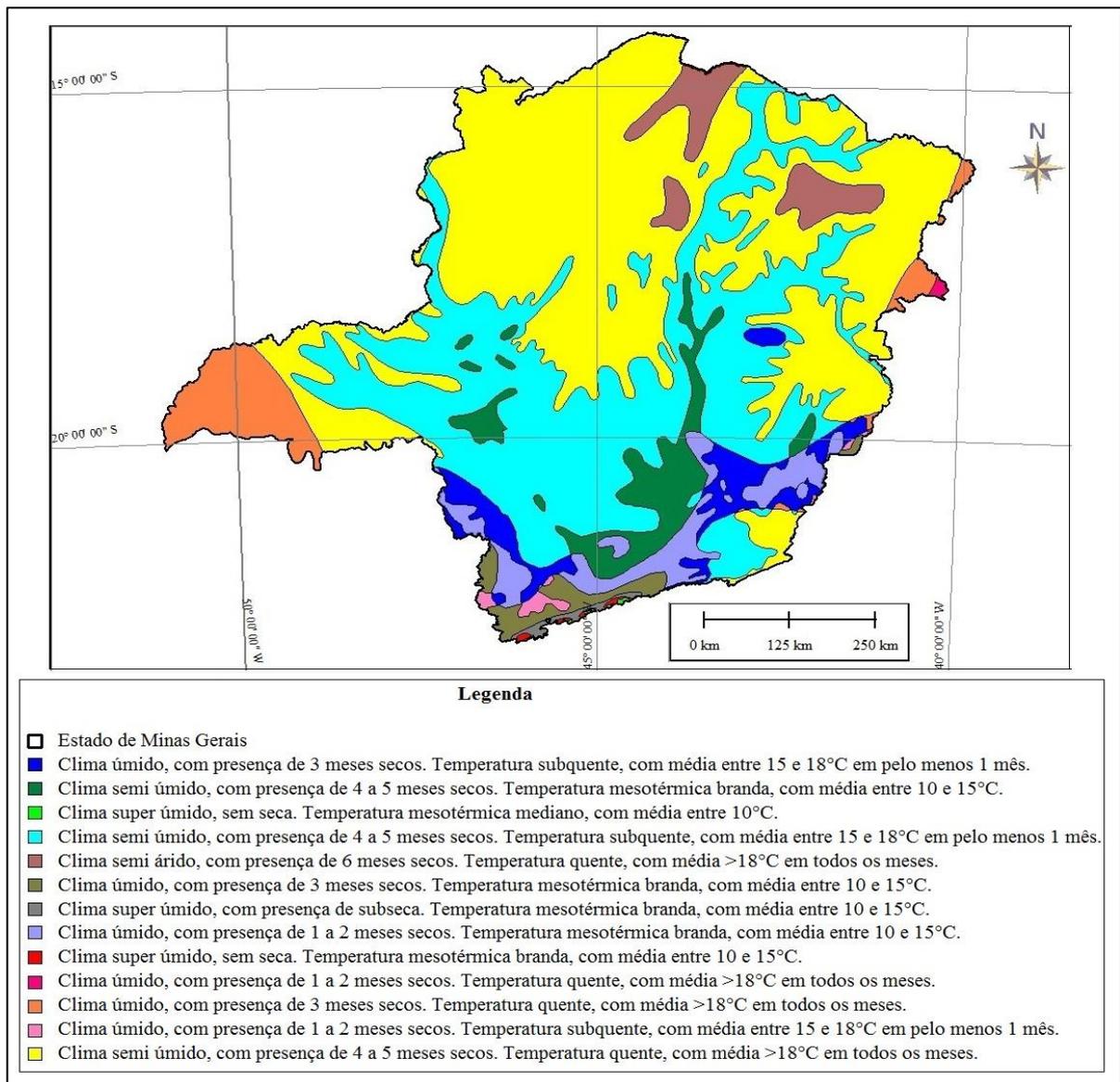


Figura 24: Clima característico do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Autor. Modificado de IBGE, 2011.

De acordo com o mapeamento climático e o índice de umidade, pode-se perceber que existe uma variação gradual da região sul para a região norte. A umidade apresenta baixo índice com clima semiárido a sub úmido nas regiões norte e nordeste e vai aumentando até alcançar o estado de clima úmido a super úmido nas regiões sul e sudeste.

Assim, o Estado de Minas Gerais apresenta Clima Tropical e é caracterizado como uma área de transição entre os sistemas atmosféricos. Os extremos norte e sul são distintos, um é seco e o outro é super úmido (IGA, 2016).

- **Geologia**

O estudo das disposições das rochas e das terras na geologia possibilita a realização de pesquisas sobre água, carvão e petróleo, mineração, proteção e melhoramento dos solos de cultura, além da escolha de locais para a construção de barragens hidrelétricas (IGA, 2016).

O Estado de Minas Gerais contem, além de uma grande dimensão territorial, uma formação complexa em suas unidades geológicas. Na Figura 25, a seguir, pode-se observar a geologia do Estado de Minas Gerais segundo as informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) com dados referentes ao ano base de 2011.

Devido à complexidade das unidades geológicas de Minas Gerais, o IGA (2016) apresentou um estudo contendo uma descrição geral dessas unidades, dividindo o estado em quatro grandes conjuntos, que serão descritos a seguir, em que se observa a predominância de determinados tipos de rochas responsáveis por formar as diferentes estruturas de relevo na paisagem.

No primeiro conjunto, ocorre o predomínio das rochas magmáticas e metamórficas responsáveis pela formação de um relevo de planaltos e serras, como a Serra da Mantiqueira, e depressões e vales com rios, como o Rio Doce. Este agrupamento rochoso é o que apresenta o maior grau de complexidade, em que as rochas são muito resistentes e mais antigas, datando do tempo geológico Arqueano. Nesta área, também existem rochas oriundas do processo de vulcanismo, como a base rochosa na qual está localizado o município de Poços de Caldas. O primeiro conjunto também apresenta uma região denominada de Quadrilátero Ferrífero que contem rochas metamórficas onde estão localizadas as principais reservas de minerais do Sudeste (IGA, 2016).

O segundo conjunto contém duas regiões de planaltos e serras com predomínio de rochas metamórficas e sedimentares datadas do Proterozóico. A primeira região é a faixa de dobramento do cinturão orogênico de Brasília que se estende desde a região da serra da Canastra até o limite de Minas com Goiás, próximo ao Distrito Federal. A segunda região é a faixa de dobramento do cinturão de Araçuaí, que abrange terrenos desde as proximidades de Belo Horizonte até o norte do Estado no limite com a Bahia (IGA, 2016).

No terceiro conjunto, há a predominância de rochas sedimentares, formando extensas planícies e uma grande depressão limitada pelos planaltos e serras do Espinhaço na borda leste e pelos planaltos e serras da faixa de dobramento do cinturão de Brasília na borda oeste. Estas rochas são datadas desde o Proterozóico Superior até o período Terciário (IGA, 2016).

Na região do Triângulo Mineiro está localizado o quarto conjunto, composto predominantemente por rochas sedimentares sobre rochas magmáticas oriundas de derramamento vulcânico da bacia do rio Paraná na era Mesozóica (IGA, 2016).

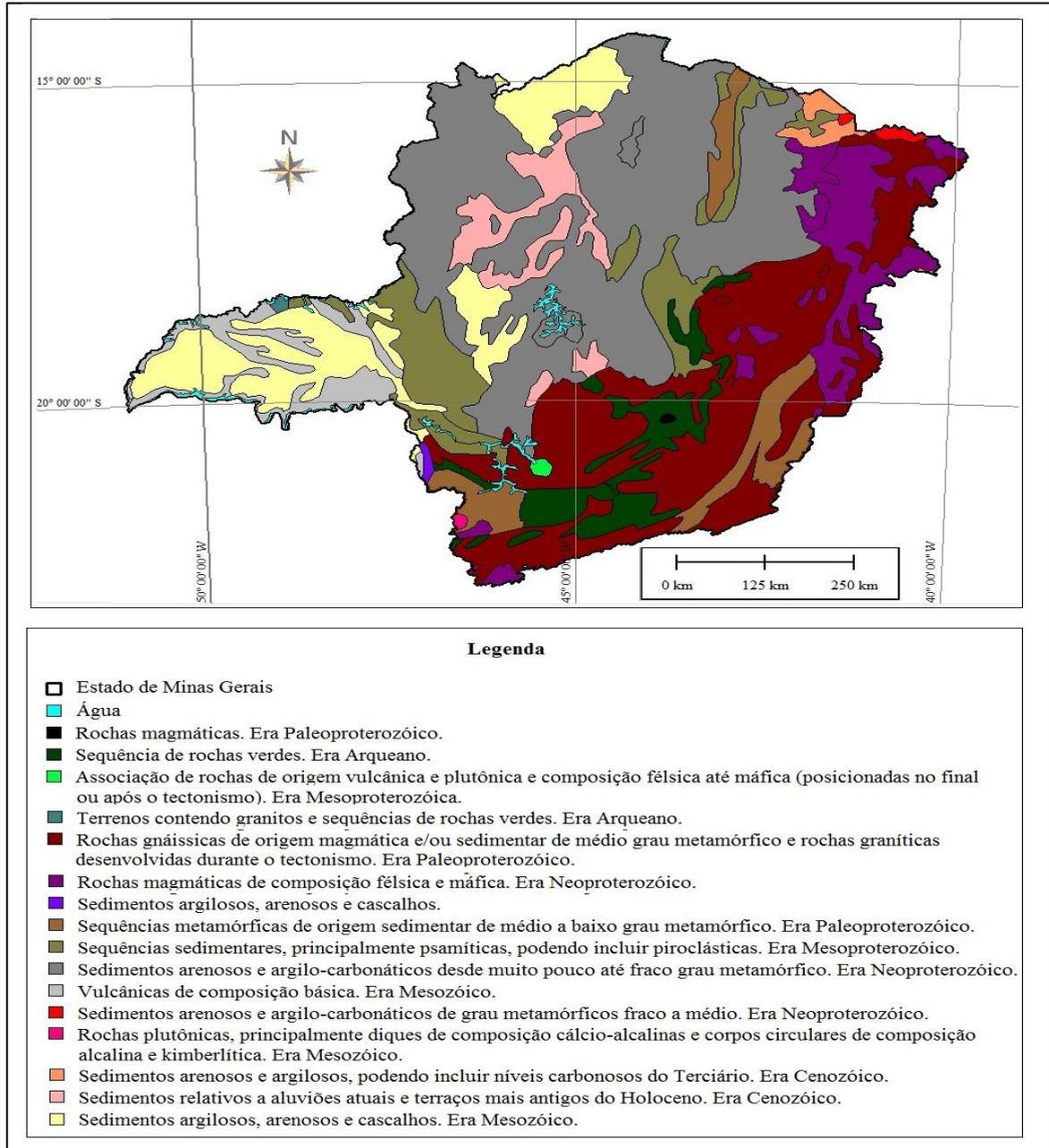


Figura 25: Geologia do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Autor. Modificado de IBGE, 2011.

• Geomorfologia

A ciência que estuda as formas da superfície da terra e sua evolução é denominada de geomorfologia. As diversas formas em que são apresentadas as paisagens que compõem essa superfície são chamadas de relevo (IGA, 2016).

No Estado de Minas Gerais o relevo é caracterizado por depressões, planaltos e áreas dissecadas. A Figura 26, a seguir, apresenta a classificação do relevo de uma forma mais detalhada para o Estado estudado, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), com dados referentes ao ano base de 2011.

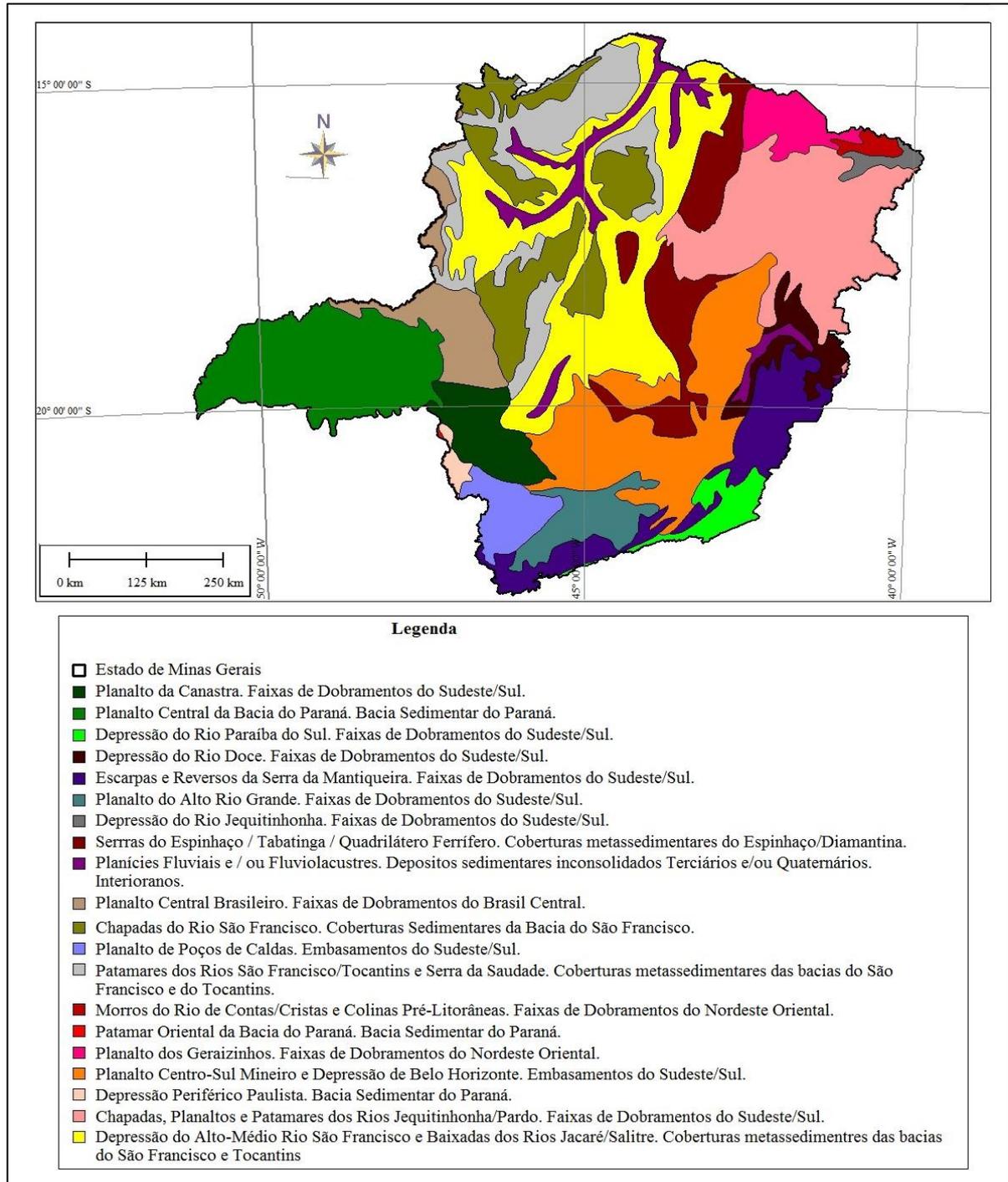


Figura 26: Relevo do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Autor. Modificado de IBGE 2011.

Segundo IGA (2016), as características mais significativas do relevo mineiro conservam um mesmo padrão que seguem as características mais marcantes identificadas em quatro macros compartimentos, sendo eles os descritos a seguir.

1. Os planaltos e elevações mais expressivas modelados no complexo cristalino que domina parte oriental e meridional do Estado;
2. A depressão do rio São Francisco que apresenta um relevo levemente ondulado;
3. As altas superfícies do Espinhaço e do Quadrilátero Ferrífero e as grandes unidades morfológicas esculpidas no complexo cristalino da bacia sedimentar do rio São Francisco, e;
4. Os extensos chapadões do Triângulo Mineiro, que foram modelados nas espessas camadas de sedimentos que recobrem o basalto e o embasamento cristalino.

- **Declividade**

As condições de declividade podem ser qualificadas pelas fases do relevo, contribuem com a configuração superficial dos terrenos e afetam as formas topográficas de áreas de ocorrência das unidades de solo (EMBRAPA, 2006).

Segundo as informações da EMBRAPA (2006) pode-se reconhecer algumas classes de relevo com suas declividades, sendo elas:

1. Declividades variáveis de 0 a 3%, indicando a presença de relevo plano, com superfície de topografia esbatida ou horizontal, com desnivelamentos muito pequenos.
2. Declividades suaves, predominantemente variáveis de 3 a 8%, que indica relevo suave ondulado. Sua superfície topográfica é pouco movimentada e constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m a 100 m, respectivamente).
3. Declividade moderada, predominantemente variável de 8 a 20%, o relevo é ondulado, com superfície, pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros.
4. Declividades fortes, predominante variáveis de 20 a 45%, indicando a presença de relevo forte ondulado com superfície topográfica movimentada, formada por outeiros e/ou morros com elevações de 50 a 100 metros e de 100 a 200 metros de altitudes relativas, respectivamente.
5. Declividades fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75% e desnivelamentos relativamente grandes. O relevo encontrado é o montanhoso que

apresenta superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, maciços montanhosos, montanhas e alinhamentos montanhosos.

6. Vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75%. O relevo é o escarpado no qual as áreas apresentam predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos.

A Figura 27, a seguir, apresenta a declividade do Estado de Minas Gerais, segundo informações do Instituto Pristino (2016) com dados referentes ao ano base de 2015.

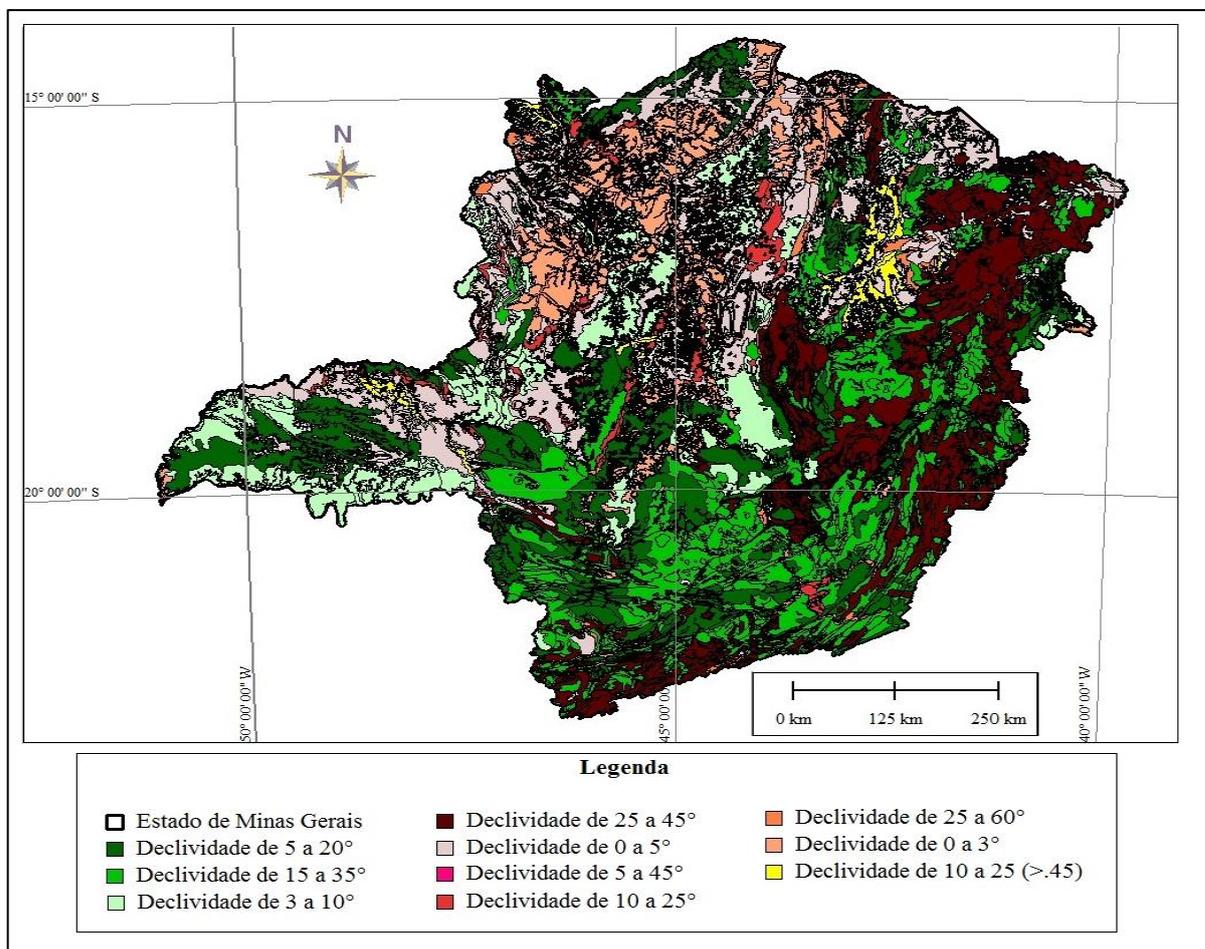


Figura 27: Declividade do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de Instituto Pristino 2015.

- **Pedologia**

A formação dos solos depende da interação entre fatores na escala global, como o clima, que são denominados zonais, com fatores na escala zonal, também chamados de

azonais e intrazonais, como por exemplo, as condições de relevo, tipo de rocha matriz e atividades biológicas, bem como da própria evolução do sistema pedológico no tempo.

Como citado anteriormente, as características de geológicas e de relevo são muito diversificadas para o Estado de Minas Gerais e a interação desses fatores, combinada com as características do clima, é responsável pela grande variedade de tipos de solos presentes na região.

A Figura 28, a seguir, mostra a classificação do solo de uma forma mais detalhada para o Estado estudado, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) com dados referentes ao ano base de 2011.

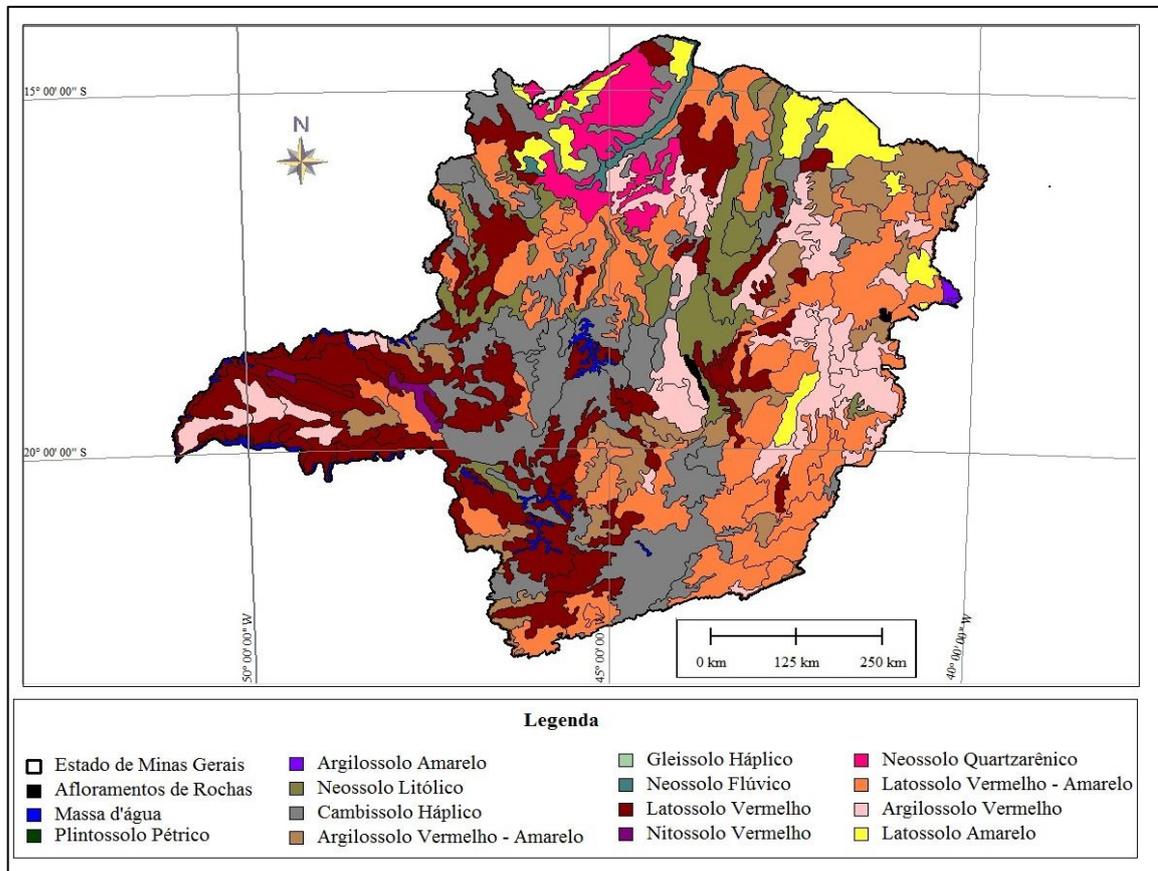


Figura 28: Solo do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Autor. Modificado de IBGE 2011.

Conforme se pode observar pela Figura 26 anterior, e por meio de informações do Atlas do IBGE (2000) há um quadro geral da pedologia de Minas Gerais. Assim, na parte Leste do Estado, desde o norte (Vale do Jequitinhonha) até o sul (Serra da Mantiqueira), nota-se o predomínio de latossolos e argissolos. A parte oeste do Estado apresenta distribuição mais complexa de solos. No noroeste encontram-se zonas de neossolos quartzarênicos,

intercaladas aos latossolos e argissolos, devido aos menores índices pluviométricos e, principalmente, da rocha-matriz (arenito). Na parte centro-oeste, correspondentes à região das Serras da Canastra e da Saudade, aparece uma grande área de cambissolos. Os latossolos e argissolos predominam novamente em partes do sudoeste e no Triângulo Mineiro. De norte a sul, na parte Central do Estado, observa-se uma faixa de solos neossoloslíticos e cambissolos, estes com perfil menos profundo.

4.2. ASPECTOS BIOLÓGICOS

Minas Gerais é um estado biologicamente rico, devido a sua vasta superfície, ao seu relevo, ao seu clima, e de seus recursos hídricos, que propiciam o aparecimento de uma cobertura vegetal extremamente diversificada, agrupada em três grandes biomas: a Mata Atlântica, o Cerrado e a Caatinga (Figura 29). Essa variedade resulta em uma riqueza extraordinária de flora e fauna.

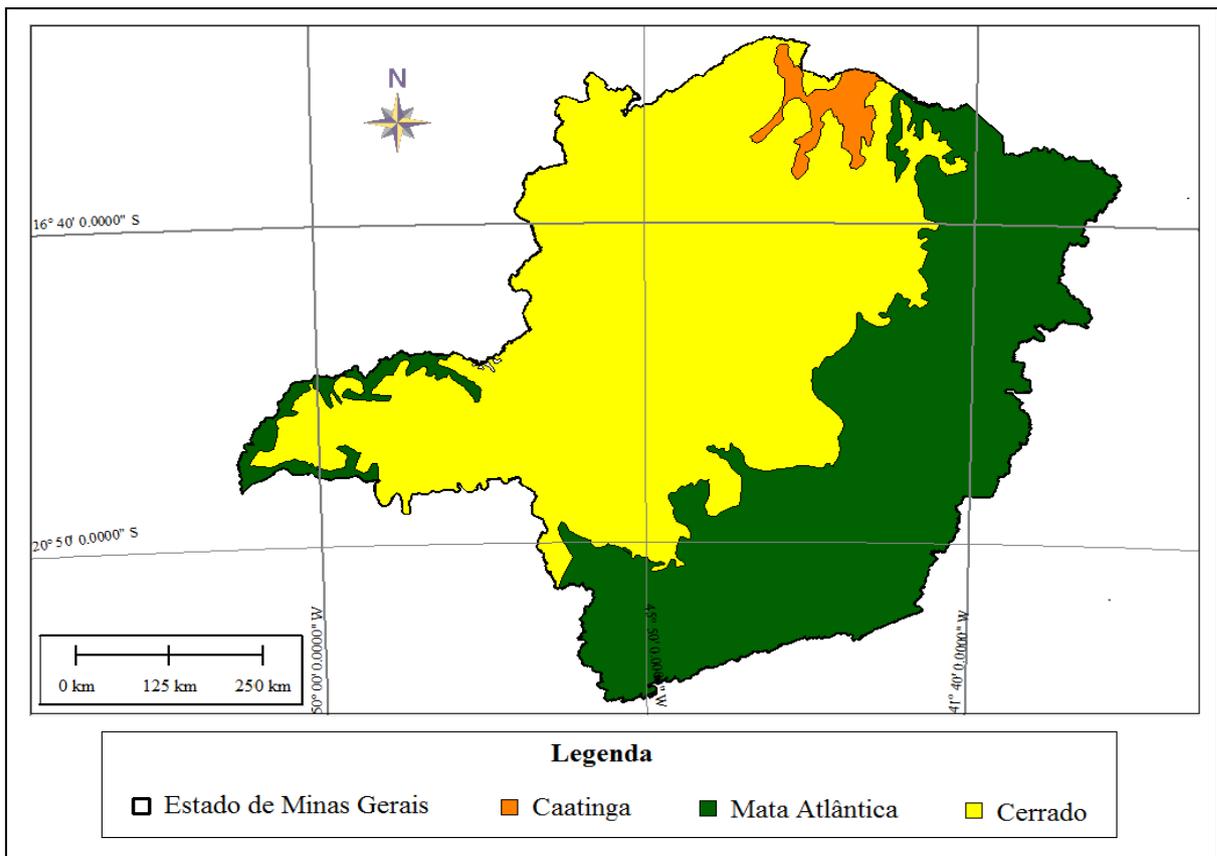


Figura 29: Biomas do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de IBGE 2011.

Apresenta-se a seguir uma descrição dos aspectos biológicos para uma melhor caracterização da área de interesse do estudo.

- **Fauna**

A partir de informações da Organização Biodiversitas (2015), verifica-se que o Estado de Minas Gerais se encontra em uma região de grande biodiversidade, estando inserido em áreas prioritárias de especial importância biológica para a conservação de mamíferos, aves, répteis e anfíbios, peixes e invertebrados.

A Figura 30, a seguir, apresenta o mapa de Minas Gerais como a localização das áreas de importância biológica para a fauna do Estado estudado, segundo informações obtidas no Instituto Pristino (2016), tendo como fonte a Biodiversitas com dados referentes ao ano base de 2015.

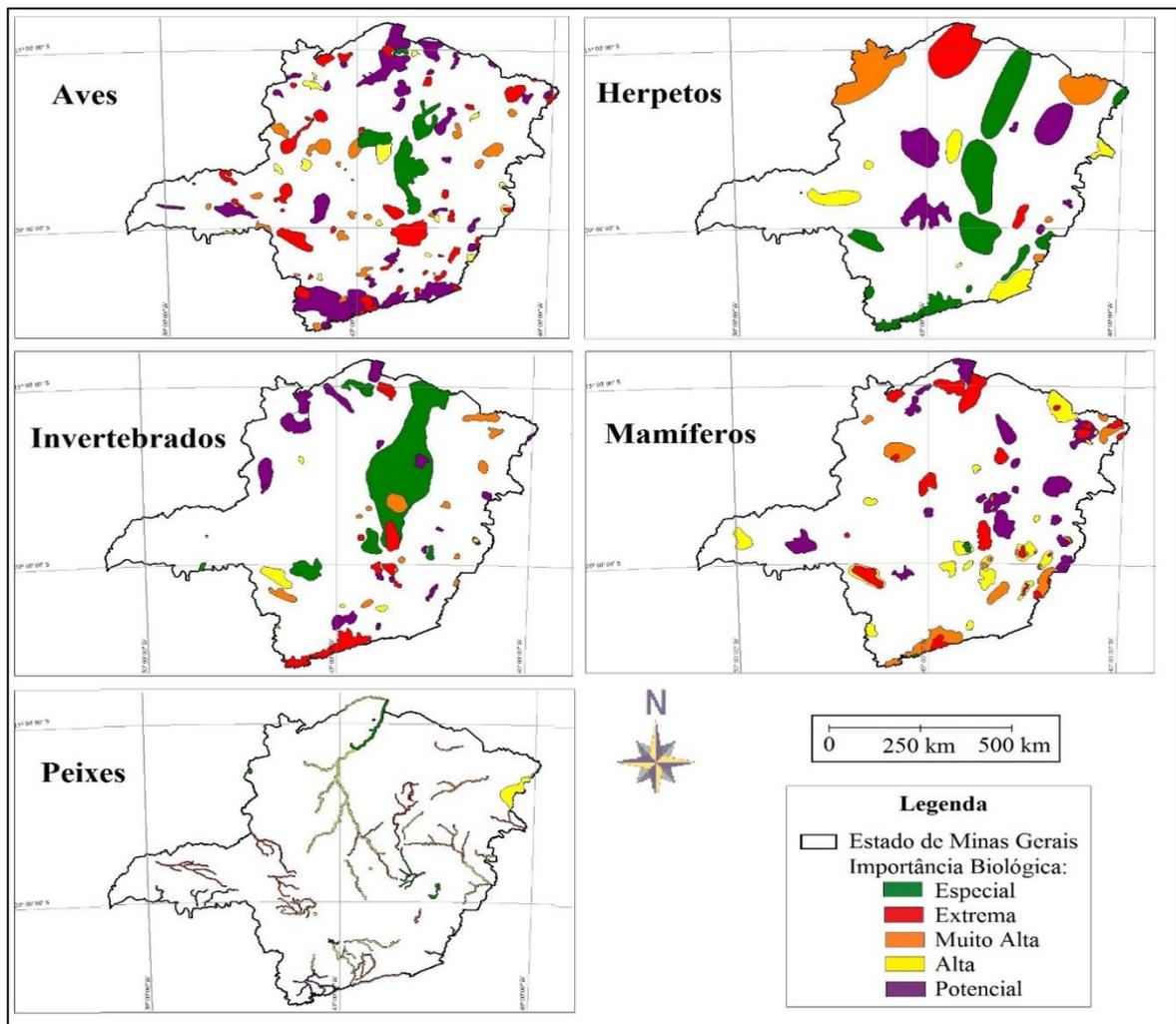


Figura 30: Fauna no Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de Biodiversitas 2015.

- **Vegetação**

Minas Gerais está localizado em uma região geográfica que engloba parte dos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga. Expressa-se essa heterogeneidade em uma grande variedade de ambientes com diferentes formações vegetais, rochosas e sistemas hídricos que fazem com que o Estado abrigue uma fauna e flora bastante ricas e diversificadas (BIODIVERSITAS 2016).

A Figura 31, a seguir, mostra o mapa de Minas Gerais com a vegetação mais detalhada do Estado estudado, segundo informações obtidas no Instituto Pristino (2016), com dados referentes ao ano base de 2015.

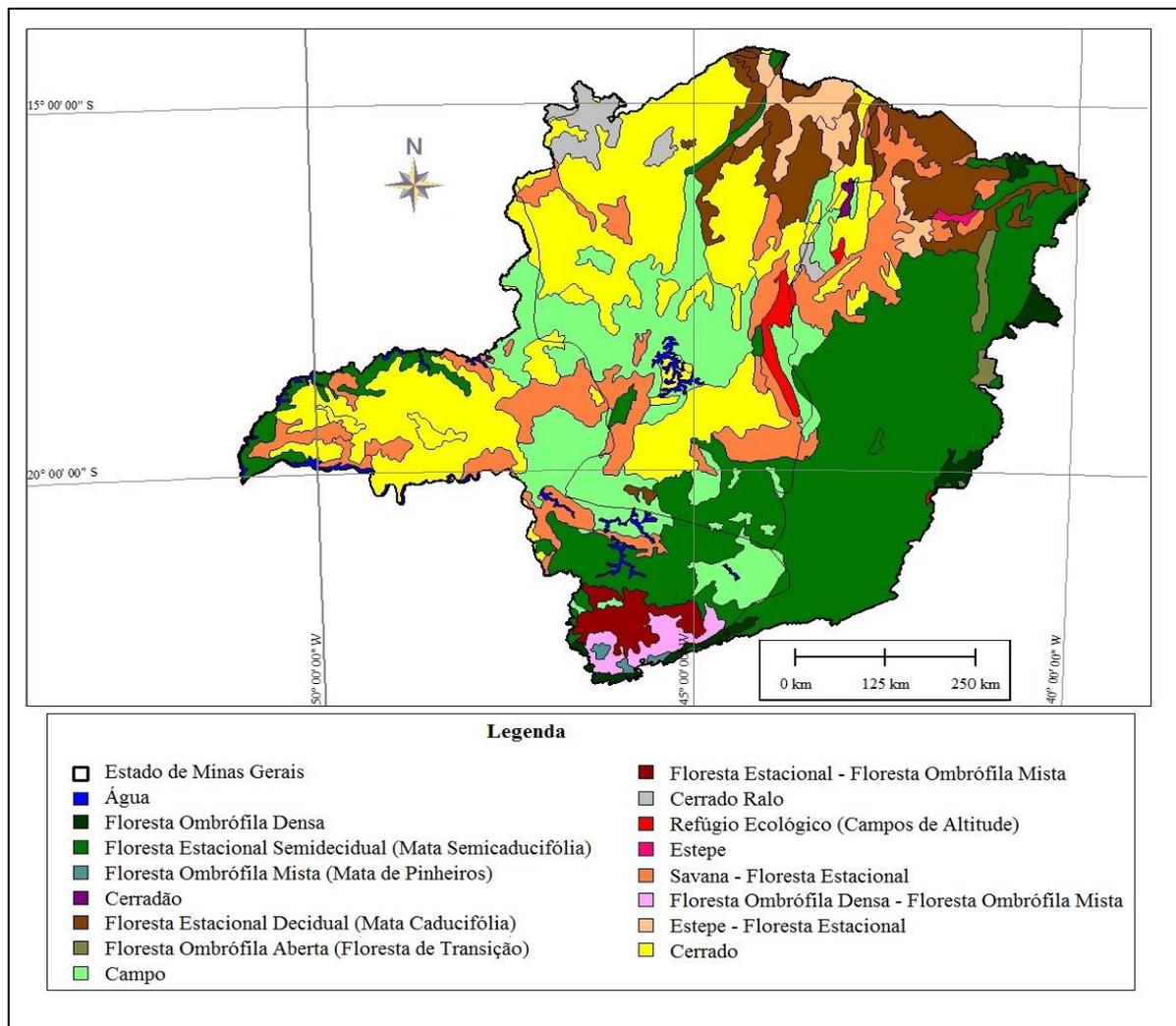


Figura 31: Vegetação do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de Instituto Pristino 2015.

- **Unidades de Conservação**

Segundo informações da BIODIVERSITAS (2016), a definição de UC pela lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (BRASIL, 2000b), diz que, esse abrange o espaço territorial e também seus recursos ambientais, inclusive as águas jurisdicionais, que apresentem características naturais relevantes, e que são legalmente instituído pelo poder público, com objetivos de conservação e com limites definidos, regidos sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção.

A Figura 32, a seguir, apresenta as UCs presentes no Estado estudado, segundo informações do Instituto Pristino (2016) com dados referentes ao ano base de 2016.

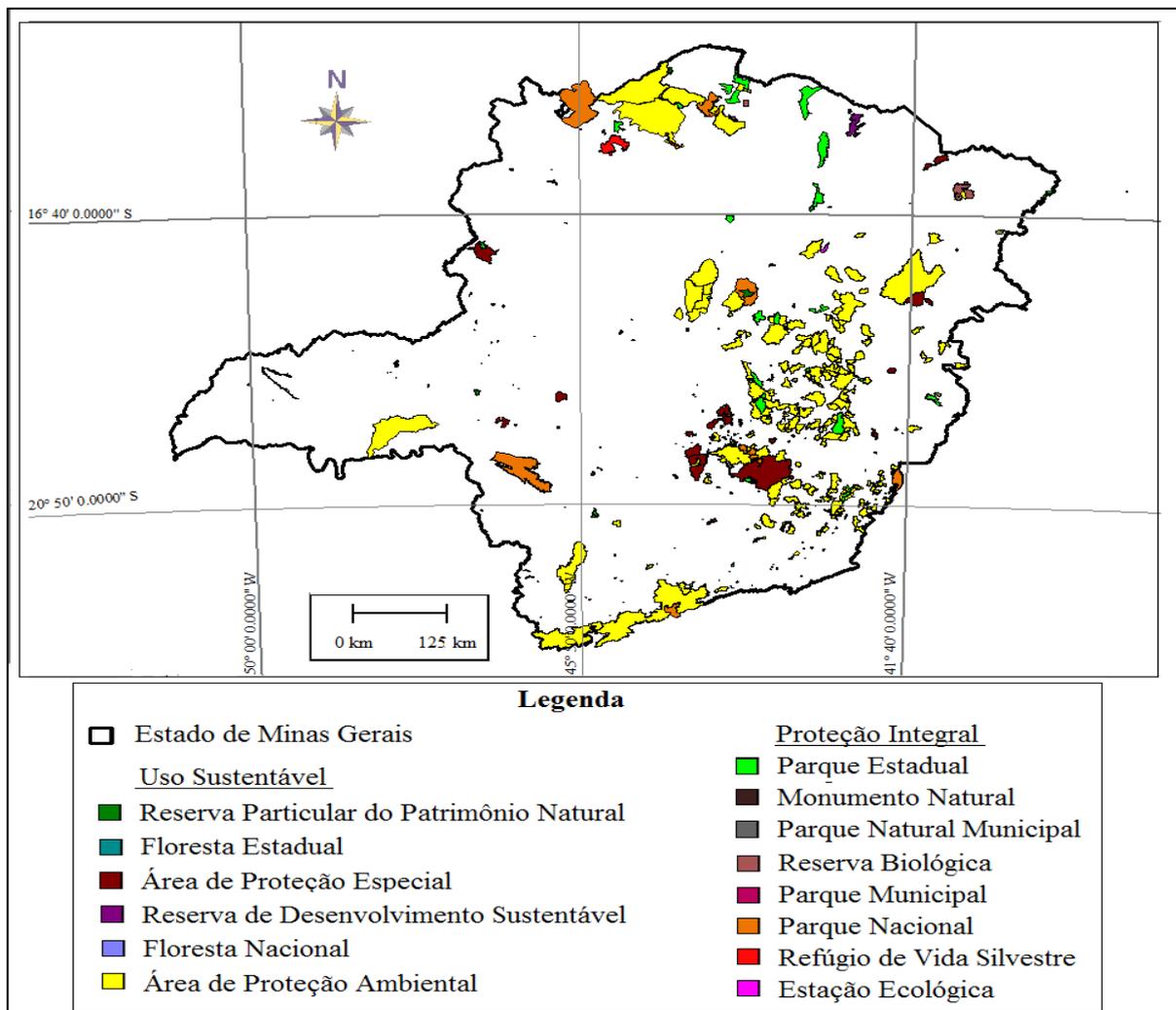


Figura 32: Unidades de Conservação – UCs - do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de Instituto Pristino 2016.

O SNUC (BRASIL, 2000b), define duas categorias de UCs, a de Proteção Integral e a de Uso Sustentável. O objetivo básico da primeira é a preservação da natureza, e essa, permite

apenas o uso indireto dos recursos naturais. Já a segunda, apresenta como objetivo a compatibilização da conservação da natureza com o uso sustentável da parcela de seus recursos naturais (IEF, 2016).

De acordo com o Instituto Estadual de Florestas – IEF (2016) em Minas Gerais podem ser encontradas as seguintes categorias de UCs de Proteção Integral: Estação Ecológica, Reserva Biológica, Parque Estadual, Monumento Natural e Refúgio de Vida Silvestre. Por sua vez, encontram-se no referido Estado as seguintes UCs de Uso Sustentável: Área de Proteção Ambiental, Florestas Estaduais, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Reservas Particulares do Patrimônio Natural.

O IEF realizou um cadastro das UCs e concluiu que atualmente, o Estado de Minas Gerais mantém 397 unidades e que a proporção de área protegida passou de 3,35 para 7,34% em um período de cinco anos (BIODIVERSITAS, 2016).

4.3. RECURSOS HÍDRICOS

Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta acerca dos recursos hídricos do Estado de Minas Gerais, mais precisamente sobre os cursos d'água superficiais, para uma melhor caracterização da área de interesse do estudo.

- **Bacias Hidrográficas**

A ANA (2016) apresenta o país com oito bacias hidrográficas, sendo elas: a do Rio Amazonas; a do Rio Tocantins; a do Atlântico, Trecho Norte/Nordeste; a do Rio São Francisco; a do Atlântico, Trecho Leste, a do Rio Paraná, a do Rio Uruguai e a do Atlântico, Trecho Sudeste. Por sua vez, cada grande bacia é dividida em menores denominadas de sub-bacias hidrográficas. A Figura 33, a seguir, apresenta essas subdivisões para o Estado estudado, segundo informações da ANA (2016).

Minas Gerais, devido a sua posição geográfica, apresenta um sistema hidrográfico que abrange a maior parte das bacias brasileiras, com exceção da Amazônica. Ao todo são quinze bacias, das quais apenas duas (Paraíba do Sul e Tietê) não possuem nascentes dentro dos limites do Estado (BIODIVERSITAS, 2016).

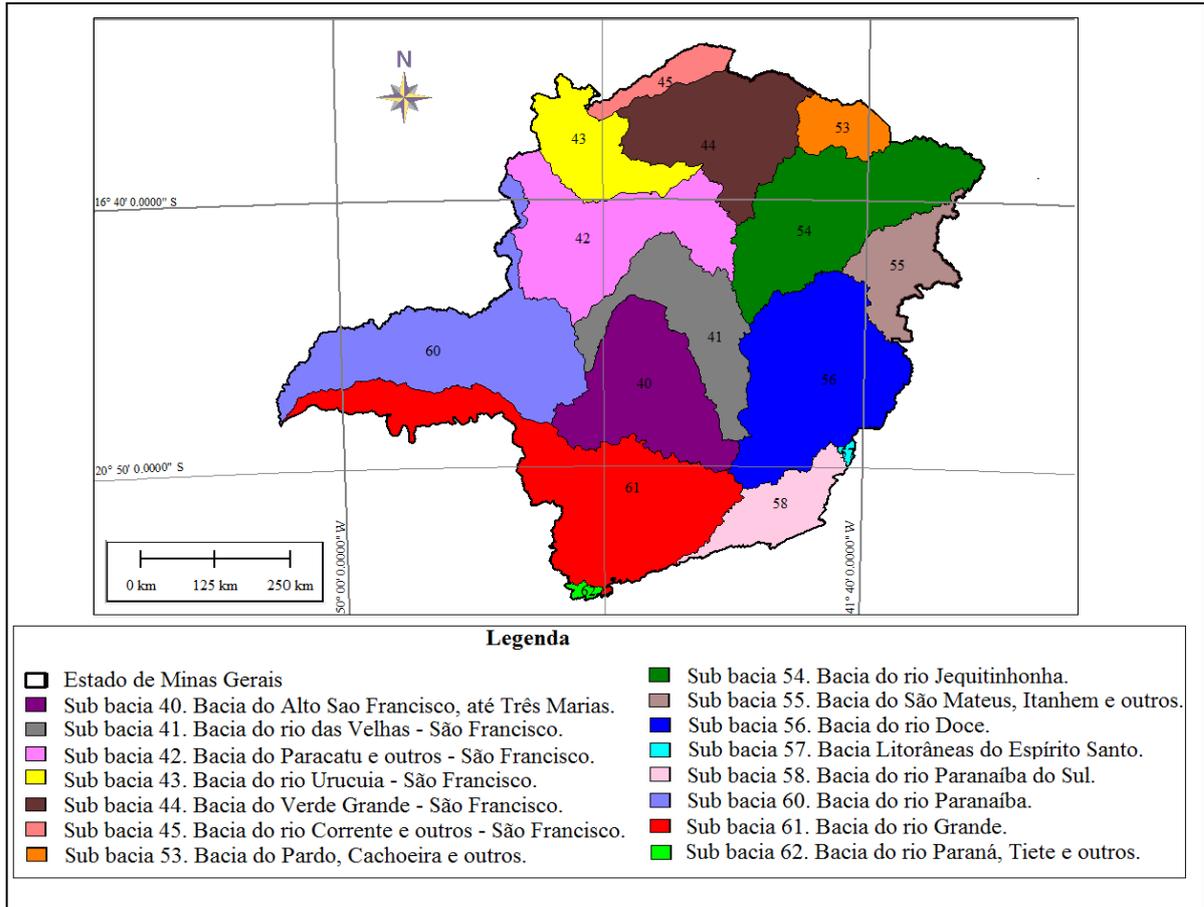


Figura 33: Sub-bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais.

Fonte: Autor. Modificado de ANA (2016).

• Cursos d'água

O Estado de Minas Gerais é famoso por suas águas, dentre outros fatores. Nele é encontrado grandes rios, que servem para abastecimento, transporte, turismo e geração de eletricidade. Apesar dessa imensa riqueza, diversos trechos d'água estão poluídos, fazendo com que, algumas das principais bacias hidrográficas do Estado não apresentem um nível de qualidade aceitável de suas águas (IGA, 2016).

A Figura 34, a seguir, apresenta os principais rios do Estado estudado, segundo informações do SIGEL (2009).

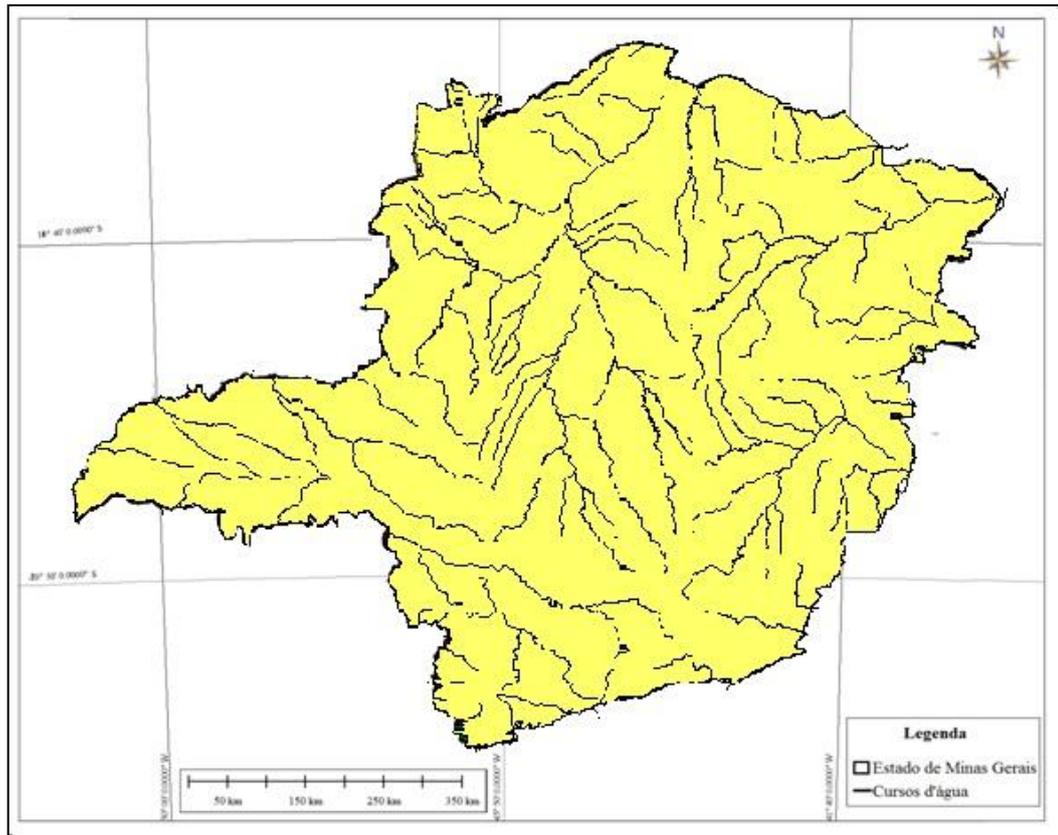


Figura 34: Hidrografia do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado de SIGEL 2009.

- **Usinas Hidrelétricas existentes**

Devido a sua riqueza hidrográfica e às suas características físicas Minas Gerais é detentor de uma quantidade significativa de usinas hidrelétricas. Isso faz com que o Estado possua 10,53% da capacidade instalada no Brasil, estando em terceiro lugar na produção energética do país, atrás somente de São Paulo com 15,37% e do Paraná com 11,09% da capacidade instalada (ANEEL, 2016).

De acordo com o BIG da ANEEL (2016), o Estado de Minas Gerais possui um total de 697 empreendimentos em operação, gerando 15.797.899 kW de potência. Estão previstos para os próximos anos uma adição de 1.178.077 kW na capacidade de geração do Estado, provenientes dos 8 empreendimentos atualmente em processo de construção e de mais 68 ainda não iniciados.

A Figura 35, a seguir, apresenta a representação da localização das Usinas Hidrelétricas do Estado estudado, segundo informações apresentadas por do Instituto Pristino (2016) com dados referentes ao ano base de 2015.

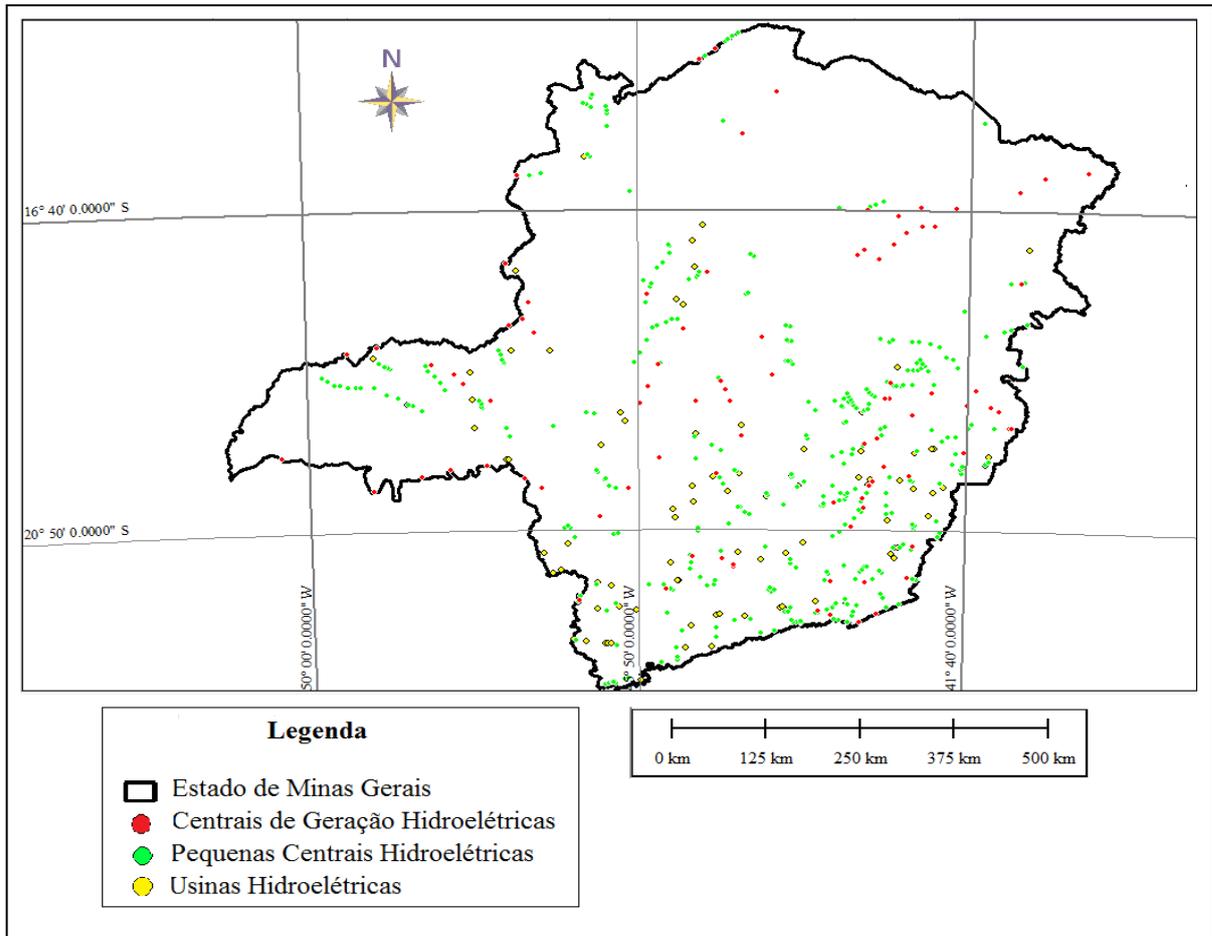


Figura 35: Usinas Hidrelétricas do Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor. Modificado Instituto Pristino, 2015.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, para a realização da dissertação, foram escolhidos rios pertencentes ao estado de Minas Gerais, mais precisamente alocados nas sub-bacias hidrográficas 61, 60 e 56. Serão apresentados os estudos de 18 cursos d'água, que foram prospectados e confirmados com a presença de aproveitamentos hidrelétricos em cascata, cada qual, respeitando as características das áreas analisadas.

Para a localização dos locais de estudo para a implantação das usinas, primeiramente foram identificadas as melhores regiões para a PPH, por meio das características físicas, biológicas e hidrográficas do Estado de Minas Gerais, apresentados anteriormente. Os critérios utilizados se baseiam, dentre outras informações, no relevo e suas diferenças altimétricas identificadas por meio do MDE, no tipo de clima e consequente influência das chuvas, na localização de regiões urbanas e regiões que não estivessem em áreas com restrições ambientais.

A Figura 36, a seguir apresenta a localização das áreas, inicialmente, escolhidas para PPH com imagens de satélite ao fundo, obtidos da EMBRAPA (2016).

A PPH foi realizada com o auxílio de ferramentas SIG, o *software Global Mapper*® (Bluz Marble Geographics, 2009, 2010, 2016 e 2017) que foi alimentado com vetores e *rasters* de imagens, sendo possível assim, a determinação dos dados necessários para prosseguir com os estudos. Como, por exemplo, a obtenção dos valores dos traçados das áreas de drenagem dos cursos d'água principais e de seus afluentes mais significativos, que foram obtidos com a utilização de imagens de satélite.

De posse dos dados da PPH para as referidas sub-bacias hidrográficas, realizou-se uma análise dos cursos d'água que apresentaram aproveitamentos em cascata e foram então, escolhidos os 18 rios que seguiram para a fase dos Estudos para a Determinação do Aproveitamento Energético Máximo de suas Bacias Hidrográficas, que é o objetivo do trabalho.

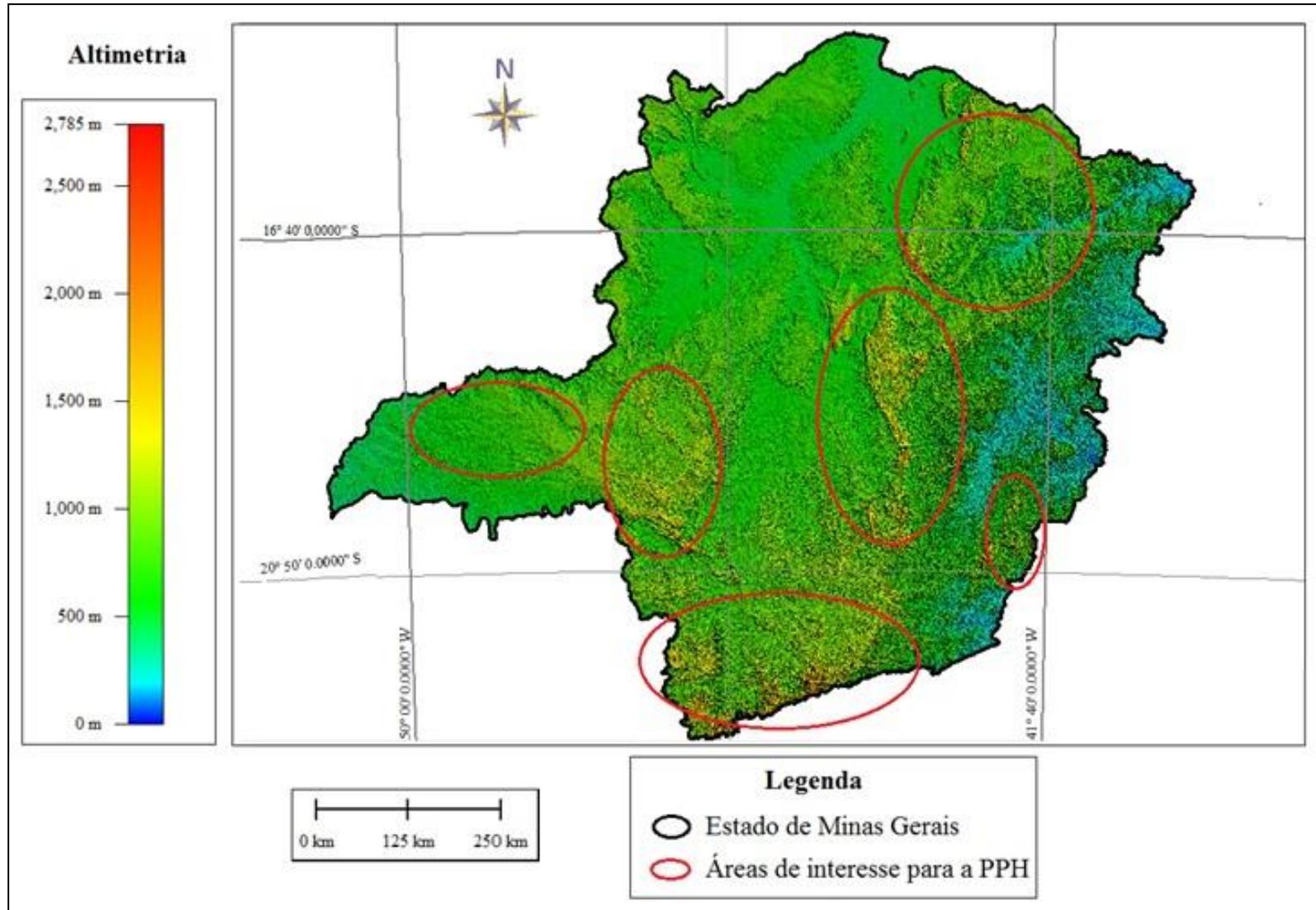


Figura 36: Locais propícios para a Prospecção de Potenciais Hidrelétricos no Estado de Minas Gerais.
Fonte: Autor.

5.1. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE USO CORRIGIDO DE UM POTENCIAL HÍDRICO DE ACORDO COM AS CARACTERÍSTICAS DE CURSOS D'ÁGUA – ESTUDOS DE CASO.

No trabalho a prospecção e a análise do potencial máximo que pode ser aproveitado em uma bacia hidrográfica foi aplicado no Estado de Minas Gerais, em algumas sub-bacias hidrográficas alocadas no referido estado.

Para tanto, foram feitas algumas considerações que serão descritas a seguir.

Os nomes dos rios foram modificados para uma numeração ordinal a fim de se preservar as informações de prospecção dos potenciais identificados. Logo, para os rios houve a denominação crescente de Curso d'água I, Curso d'água II, Curso d'água III ... até o Curso d'água XVIII.

As nascentes dos principais afluentes de cada rio foram nomeadas com numeração ordinal (Nascente 1, Nascente 2...). A foz de cada principal afluente do rio estudado foi representada com uma letra minúscula (a, b, c...), assim, a confluência recebe a denominação da nascente a que se refere e a foz. Por exemplo, na junção de dois afluentes formando um outro rio, ambos, os afluentes, terão a mesma foz (a), contudo, apresentam nascentes distintas (Nascente 1 e Nascente 2); assim, a confluência será tratada de Confluência 1-a e Confluência 2-a.

Os aproveitamentos identificados nos estudos de casos são apresentados da nascente para a foz do rio principal com a numeração ordinal correspondente ao nome do curso d'água e seguidos de uma letra do alfabeto que é responsável pela identificação da quantidade de centrais em cascata presentes no rio. Logo, para o Curso d'água I, os aproveitamentos receberam a denominação de 1.a, 1.b, 1.c, para o Curso d'água II, as centrais foram chamadas de 2.a, 2.b, e assim por diante.

Para um melhor entendimento da área analisada na PPH, apresenta-se uma imagem de satélite com dados de altimetria do rio, com a finalidade de propiciar a visualização dos desníveis encontrados na região. Nessas figuras os pontos em vermelho são os aproveitamentos hidrelétricos identificados. E as áreas de drenagem dos cursos d'água principais estão também em vermelho.

Em seguida, para cada rio, foi elaborada uma segunda figura que aloca de maneira mais visível as nomenclaturas apresentadas nas tabelas de dados dos rios. E por fim, são apresentados os resultados da análise do potencial hidráulico.

De acordo com a descrição da metodologia prosseguiu-se com a coleta das informações necessárias e, assim, foi possível a obtenção dos resultados apresentados nas tabelas e figuras para os 18 cursos d'águas analisados, que contém os dados completos da pesquisa, com a listagem dos rios e dos aproveitamentos alocados em cada um deles, bem como as informações de cotas, áreas de drenagem e demais cálculos necessários para a realização do trabalho.

Apresenta-se a seguir, a análise realizada para o curso d'água I, com base nas considerações e critérios mencionados para o estudo.

Curso d'água I

O rio apresenta 2 afluentes principais analisados, 1 confluência e 4 aproveitamentos em cascata apresentados nas Figuras 37 e 38, e nas Tabelas 5 e 6.

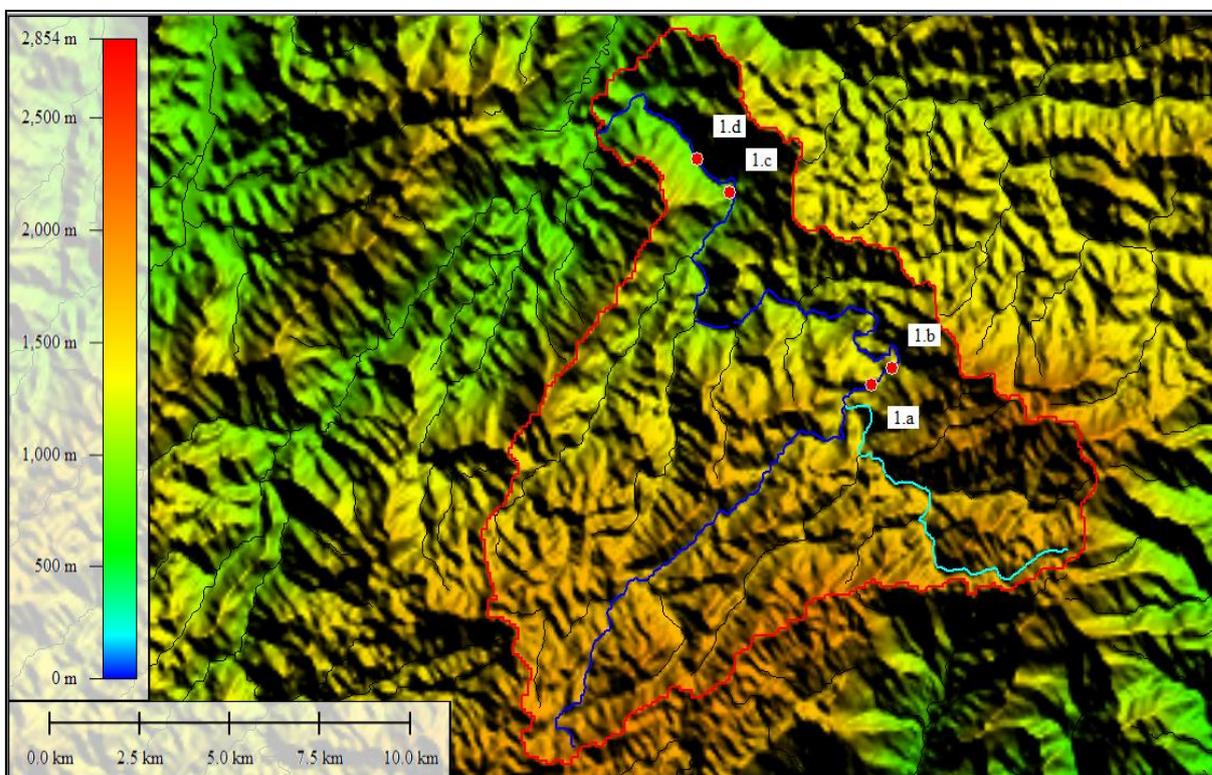


Figura 37: Representação do Curso d'água I com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

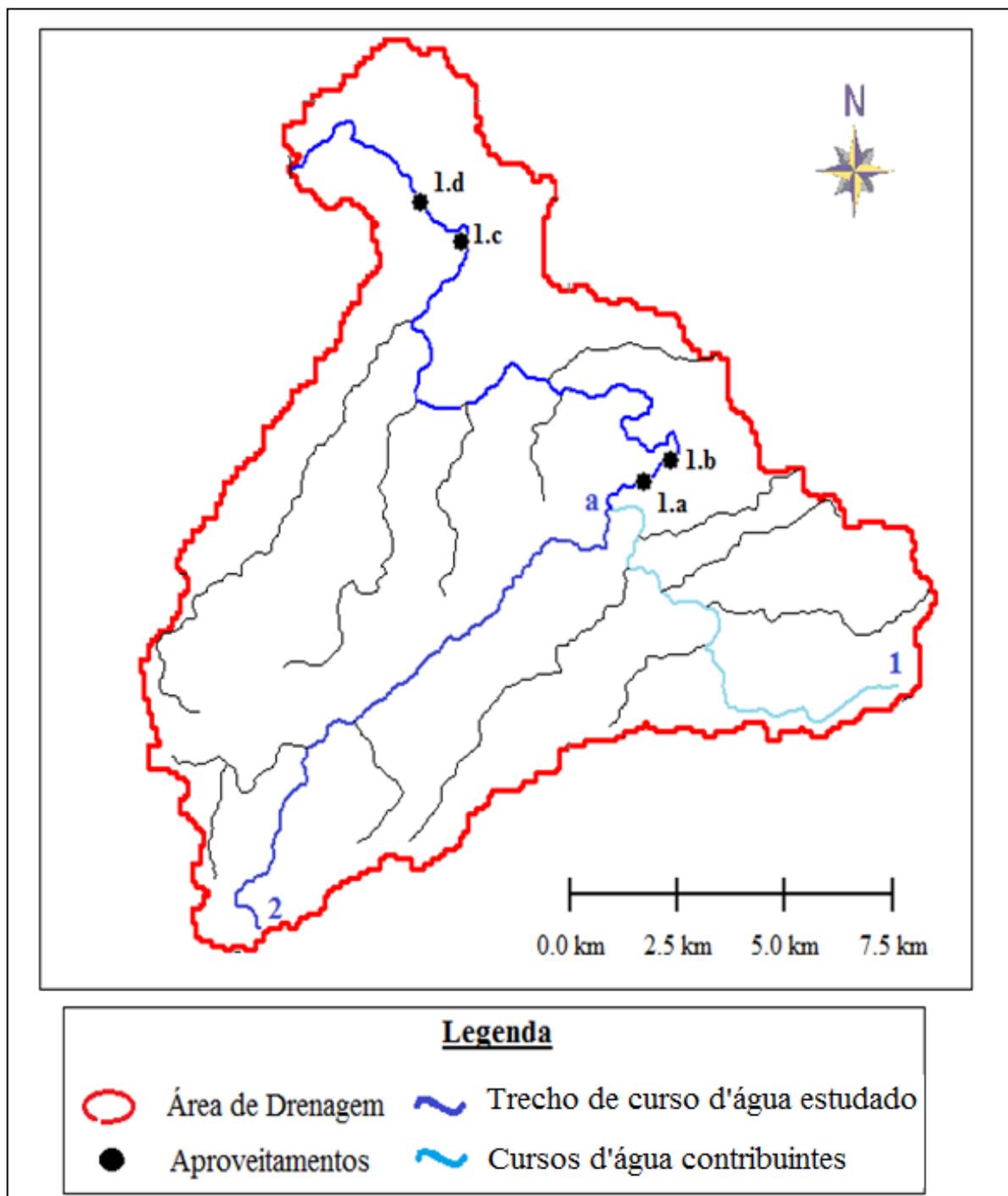


Figura 38: Bacia Hidrográfica do Curso d'água I e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor.

Tabela 5: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água I.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.745,00										
Confluência 1-a		1.385,00	40,4	10,9	1,18	2.050,38	360	4.149,63			
Nascente 2	1.773,00										
Confluência 2-a		1.385,00	32,0	14,6	0,95	1.675,49	388	3.596,93			
Σ					2,12	3.725,86					
\bar{NA}_{nasce}	1.757,48										
(1.a)	1.385,00	1.355,00	72,4		2,12		30		623,92	3	882,9
(1.b)	1.355,00	1.253,00	73,0		2,13		102		2.131,32	4,5	4.502,79
(1.c)	964,39	908,64	142,0		4,89		55,75		2.674,38	6,6	3.609,60
(1.d)	908,64	876,27	144,3		4,97		32,37		1.578,22	6,8	2.159,34
Foz		873,03	154,5	25,0	5,32		884,45	46.158,80			
Σ								46.158,80	7.007,84		11.154,63

Fonte: Autor. Modificado de Souza et al (2017).

Tabela 6: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água I.

Parâmetros	Curso d'água I
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	46.158,8
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	23.079,4
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	7.007,84
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	11.154,63
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ³)	0,0344
Declividade – I_{BH} (m/km)	35,378
Potência específica - P_{esp} (kW/km ² /km)	11,95
Fator de forma - K_F	0,247
Tempo de Concentração - T_C (h)	2,87
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,152
K_{zbp}	0,242

Fonte: Autor. Modificado de Souza et al (2017).

Os estudos referentes aos demais 17 cursos d'água analisados, encontram-se alocados no APÊNDICE A, de forma a apresentar detalhadamente as características abrangidas.

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO.

Considerando os resultados das análises dos 18 rios apresentados no APÊNDICE A, determina-se os indicadores apresentados mais sucintamente nas Tabelas 7 (rios de I a IX) e Tabela 8 (rios de X a XVIII).

Depois de analisar os resultados dos 18 estudos de caso e conforme se observa nas Tabelas 7 e 8, a seguir, foi considerado o valor de K_{zb} sugerido por Souza et al. (2017) no valor de 0,5 que se mostrou otimista e não foi atingido pelos cursos d'água analisados. Assim, como mencionado anteriormente, sugere-se a correção do mesmo com os fatores K_{zbt} e K_{zbp} .

Por sua vez, os fatores de correção para K_{zb} , também de acordo com as informações das Tabelas 7 e 8, mostraram-se variáveis para cada situação de curso d'água selecionado. Estando seus números absolutos entre 0,04 (Curso d'água XVIII) e 0,32 (Curso d'água VI) para o K_{zbt} e entre 0,04 (Curso d'água XVIII) e 0,33 (Cursos d'água VI e X) para o K_{zbp} . Logo, verifica-se que existem discrepâncias significativas observadas entre os valores dos fatores calculados. Essa variação pode ser devida as condições dos terrenos de alocação das usinas (interferência de aglomerados urbanos), bem como a fatores de impeditivos ambientais (UCs) e a restrições econômicas.

Tabela 7: Resultado final das análises dos potenciais hidráulicos – Cursos d'água de I a IX.

Parâmetros	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	46.158,80	157.600,92	203.444,84	35.477,39	35.242,80	36.911,46	24.211,91	9.372,14	37.242,36
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	23.079,40	78.800,46	101.722,42	17.738,70	17.621,40	18.455,73	12.105,96	4.686,07	18.621,18
Potência teórica instalada – P_{Tinst} (kW)	7.007,84	16.003,76	12.743,78	7.833,68	8.007,90	11.919,74	2.672,83	2.078,48	5.636,43
Potência total de projeto – P_{Tproj} (kW)	11.154,63	20.443,41	14.545,76	10.060,32	9.021,90	12.216,19	2.710,10	2.501,66	5.879,11
Área de drenagem da bacia hidrográfica – AD (km ²)	154,50	655,26	1.142,20	256,38	427,40	344,52	851,61	295,45	940,70
Desnível total do rio – H_{NF} (m)	884,45	945,02	643,65	642,35	479,01	392,35	202,80	205,83	256,89
Comprimento do rio – L (km)	25,00	89,00	112,07	46,89	49,11	33,02	90,43	46,25	92,66
Vazão específica da bacia – q_{esp} (m ³ /s.km ³)	0,034	0,026	0,028	0,022	0,018	0,028	0,014	0,016	0,016
Declividade - I_{BH} [m/km]	35,38	10,62	5,74	13,70	9,75	11,88	2,24	4,45	2,77
Potência específica – P_{esp} (kW/km ² /km)	11,95	2,70	1,59	2,95	1,68	3,25	0,31	0,69	0,43
Tempo de Concentração – T_c (h)	2,87	12,13	18,35	6,71	7,93	5,41	22,34	10,24	20,98
Fator de Forma - K_F	0,25	0,08	0,09	0,12	0,18	0,32	0,10	0,14	0,11
K_{zb}	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
K_{zbt}	0,152	0,10	0,06	0,22	0,23	0,32	0,11	0,22	0,15
K_{zbp}	0,242	0,13	0,07	0,28	0,26	0,33	0,11	0,27	0,16

Fonte: Autor.

Tabela 8: Resultado final das análises dos potenciais hidráulicos – Cursos d'água de X a XVIII.

Parâmetros	X	XI	XII	XII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	64.720,09	46.717,25	22.629,63	31.792,86	41.175,79	50.019,18	72.983,67	41.150,10	160.828,60
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	32.360,05	23.358,62	11.314,81	15.896,43	20.587,89	25.009,59	36.491,84	20.575,05	80.414,30
Potência teórica instalada – P_{Tinst} (kW)	19.171,29	2.998,33	2.917,69	2.510,58	5.277,58	11.610,14	7.153,06	6.070,43	5.954,28
Potência total de projeto – P_{Tproj} (kW)	21.647,27	3.164,43	3.024,14	3.087,29	5.142,09	11.046,46	6.830,73	6.903,05	5.642,36
Área de drenagem da bacia hidrográfica – AD (km ²)	932,84	1.322,30	433,29	647,79	453,28	410,13	564,31	864,57	3.263,01
Desnível total do rio – H_{NF} (m)	434,74	241,41	306,22	277,26	315,07	423,01	709,58	492,92	611,82
Comprimento do rio – L (km)	93,65	96,65	71,17	77,57	43,10	50,65	80,85	77,44	144,61
Vazão específica da bacia – q_{esp} (m ³ /s.km ³)	0,016	0,015	0,017	0,018	0,029	0,029	0,019	0,010	0,008
Declividade - I_{BH} [m/km]	4,64	2,50	4,30	3,57	7,31	8,35	8,78	6,37	4,23
Potência específica – P_{esp} (kW/km ² /km)	0,74	0,37	0,73	0,63	2,11	2,41	1,60	0,61	0,34
Tempo de Concentração – T_c (h)	17,34	22,56	14,46	16,59	8,01	8,62	12,12	13,27	25,11
Fator de Forma - K_F	0,11	0,14	0,09	0,11	0,24	0,16	0,09	0,14	0,16
K_{zb}	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
K_{zbt}	0,30	0,06	0,13	0,08	0,13	0,23	0,10	0,15	0,04
K_{zbp}	0,33	0,07	0,13	0,10	0,12	0,22	0,09	0,17	0,04

Fonte: Autor.

Contudo, observa-se pela Figura 39, que os dados calculados para os fatores K_{zbt} e K_{zbp} se mostraram com curvas parecidas, estando o K_{zbp} acima do K_{zbt} , o que é compreensível, uma vez que os estudos foram mais detalhados, para a obtenção da, denominada no trabalho, potência de projeto.

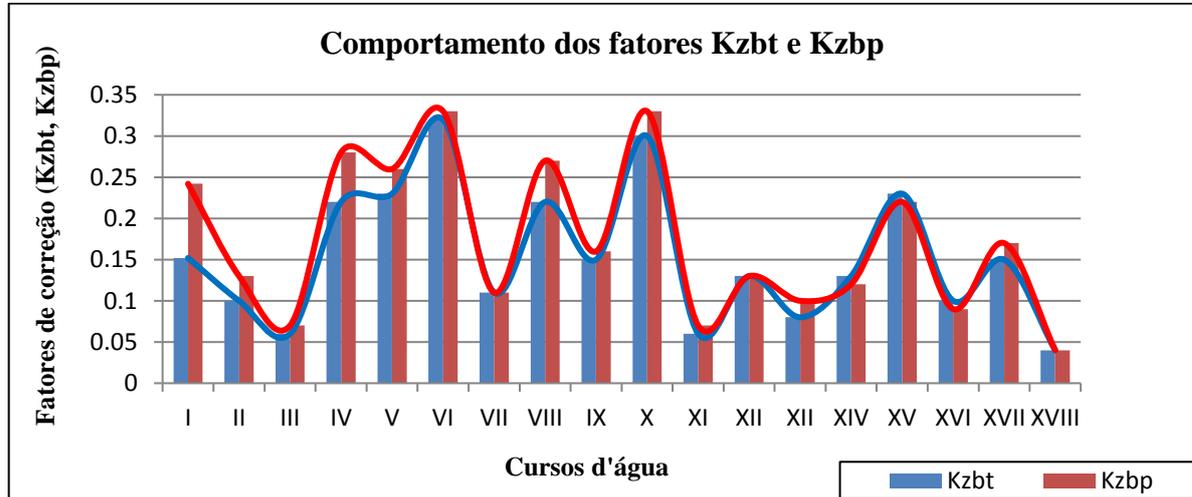


Figura 39: Comportamento dos valores dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} .
Fonte: Autor.

Afim de se encontrar uma correlação dos parâmetros de potência que, teoricamente, se é possível gerar (K_{zbt}) e dos parâmetros de potência com cálculos mais detalhados dos projetos (K_{zbp}) para cada curso d'água estudado, sugere-se aplicar esses fatores a gráficos correlacionando-os com algumas características das bacias hidrográficas, tais como a declividade e a vazão específica do rio, bem como encontrar as equações correspondentes aos estudos. Os resultados dessas análises, bem como os gráficos e as equações, são mostrados no APÊNDICE B, tendo em vista que foram realizados diversos estudos entre as características físicas das bacias de contribuição e os fatores de correção de K_{zb} .

Com relação aos parâmetros analisados das bacias hidrográficas, alguns apresentaram correlação visível com os fatores de uso indicados para corrigir K_{zb} , como ocorre, por exemplo, com o comprimento e a área de drenagem dos cursos d'água. Contudo, como se é esperado em trabalhos estatísticos e que trazem novos conceitos, alguns fatores se apresentaram mais dispersos, ou seja, mostraram um fator de correlação menor.

A Figura 40, a seguir, apresenta o comportamento das características analisadas para as 18 bacias hidrográficas de interesse, partindo dos dados crescentes de K_{zbt} e seus correspondes para cada curso d'água apresentado nas Tabelas 7 e 8. Vale ressaltar que o comportamento de K_{zbt} e K_{zbp} se fazem parecidos.

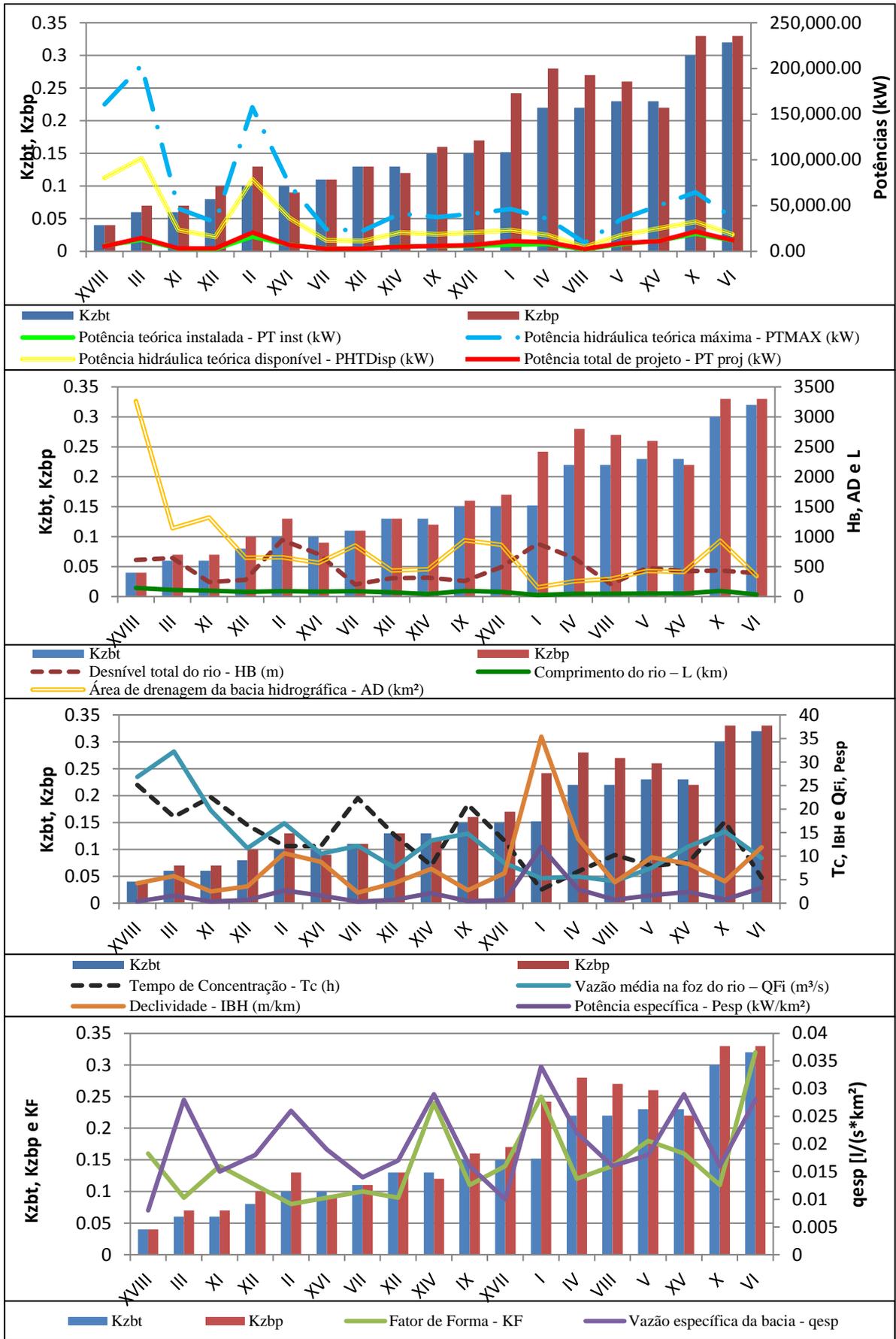


Figura 40: Comportamento das características das bacias hidrográficas e dos valores dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} .
Fonte: Autor.

Da Figura 40 e dos demais gráficos apresentados no APÊNDICE B apresenta-se que, as variáveis referentes aos parâmetros de área de drenagem, vazão média na foz do rio, comprimento do curso d'água e tempo de concentração, apresentaram uma correlação decrescente com K_{zbt} e K_{zbp} , ou seja, à medida que os fatores de uso corrigidos cresciam os parâmetros decaíam em seus valores. Já a declividade se mostrou com uma correlação crescente com os indicadores. As demais características analisadas obtiveram resultados mais concentrados de seus dados em uma faixa maior de valores de K_{zbt} e K_{zbp} variando de 0,04 a 0,35.

Sendo assim, optou-se por desenvolver melhor as relações entre os parâmetros da bacia hidrográfica, bem como a relação deles com os indicadores de correção do fator de uso, respeitando as indicações de variação crescente e decrescente que foram obtidas dos gráficos anteriores. Foram testadas várias relações existentes entre os parâmetros analisados. Algumas delas são também apresentadas no APÊNDICE B.

Na Tabela 9 e nas Figuras 41 a 43, demonstra-se os gráficos referentes aos coeficientes de correlações de alguns parâmetros entre si, das bacias hidrográficas analisadas.

Tabela 9: Correlações entre as características das bacias hidrográficas.

Parâmetros analisados	Equação	R ²
I_{BH} ($\frac{m}{km}$) e P_{esp} (kW)	$P_{esp} = -0,0013 * (I_{BH})^2 + 0,2876 * (I_{BH}) - 0,4474$	0,86
T_C (h) e I_{BH} ($\frac{m}{km}$)	$T_C = 27,094 * (e)^{-0,113 * I_{BH}}$	0,71
q_{esp} ($\frac{m}{s * km^2}$) e P_{esp} ($\frac{kW}{km^2}$)	$q_{esp} = -0,00086 * (P_{esp})^3 + 0,0021 * (P_{esp})^2 + 0,00648 * P_{esp} + 0,0105$	0,72

Fonte: Autor.

Dos gráficos oriundos das relações dos parâmetros das bacias hidrográficas, apresenta-se que, o condizente a relação do tempo de concentração e a declividade mostra-se decrescente, ou seja, à medida que o valor da I_{BH} aumenta, o T_C diminui. O que não ocorre a partir das relações da potência específica com a declividade e com a vazão específica, que se fazem de forma crescente. Os coeficientes de correlação dos gráficos se mostraram com valores altos e foram superiores a 0,7.

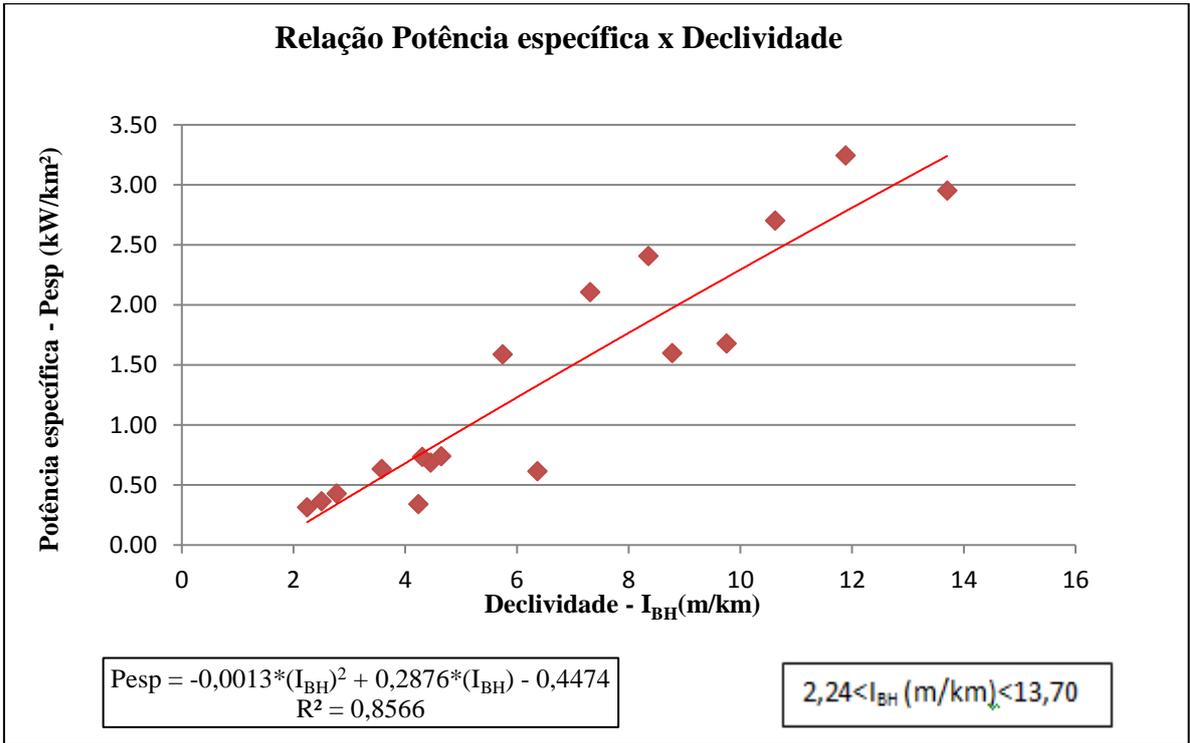


Figura 41: Relação entre a Potência Específica e a Declividade dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

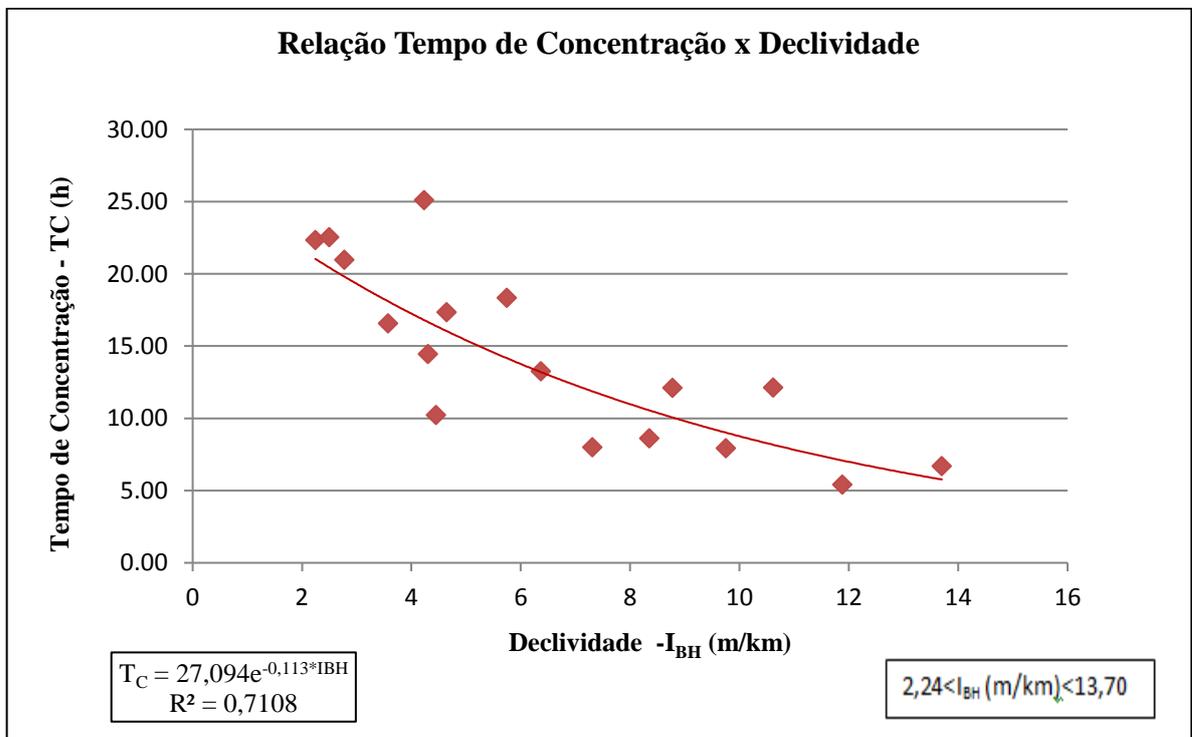


Figura 42: Relação entre o Tempo de Concentração e a Declividade dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

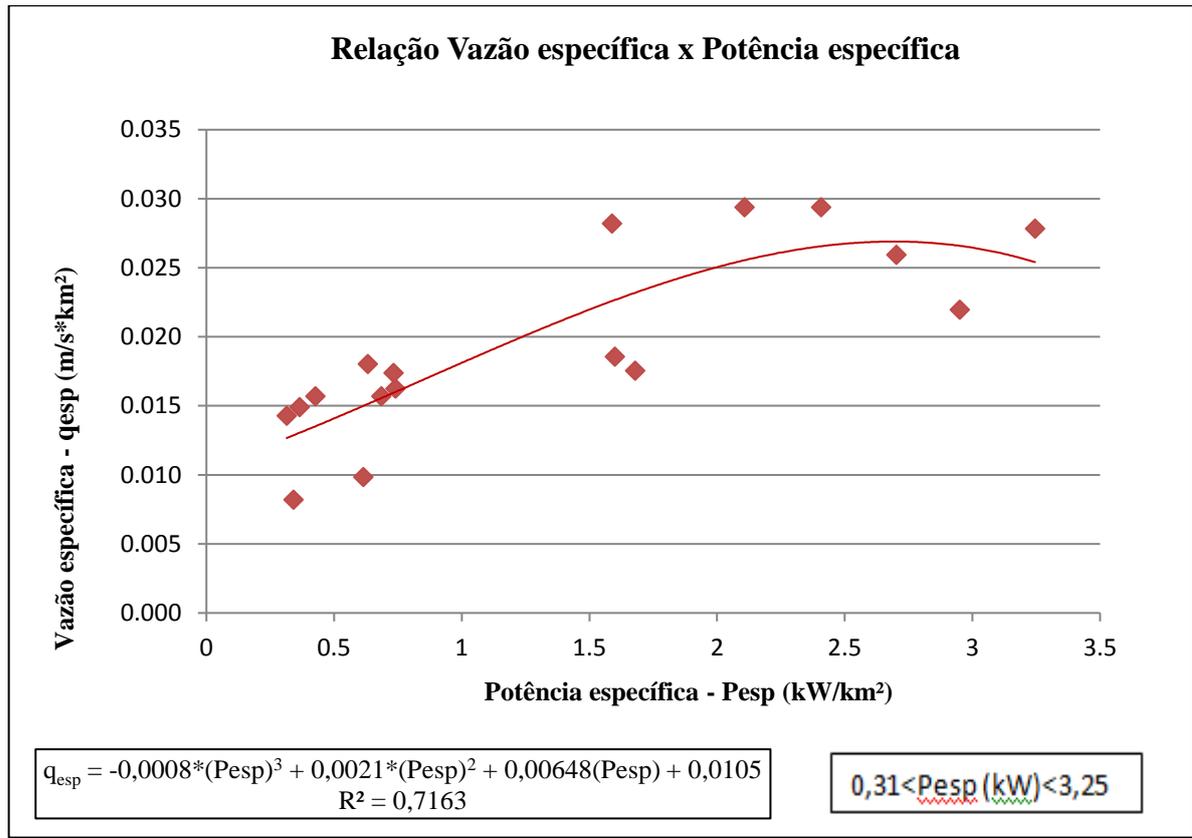


Figura 43: Relação entre as Vazões específicas e as Potências específicas dos cursos d'água.
Fonte: Autor.

Posteriormente, foram estudadas algumas das correlações existentes entre os indicadores de correção do fator de uso (K_{zbt} e K_{zbp}) e as equações que envolviam dois ou mais parâmetros das bacias hidrográficas, respeitando as indicações de variação crescente e decrescente obtidas dos gráficos anteriores.

A Tabela 10, a seguir, apresenta a relação das equações e dos coeficientes de correlação encontrados, em que se pode observar a diversidade de parâmetros analisados e seus fatores de correlação com K_{zbt} e K_{zbp} .

Tabela 10: Correlações dos parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} e as características das bacias hidrográficas, com seus coeficientes de correlação.

	Parâmetros analisados	Unidades	Correlação com K_{zbt}		Correlação com K_{zbp}	
			Equação	R ²	Equação	R ²
1	I_{BH} $13,7 < I_{BH} < 2,24$	$\left(\frac{m}{km}\right)$	$K_{zbt} = 0,0004 * (I_{BH})^2 + 0,0052 * I_{BH} + 0,0988$	0,22	$K_{zbp} = 0,001 * (I_{BH})^2 - 0,0024 * I_{BH} + 0,1287$	0,25
2	P_{esp} $0,31 < P_{esp} < 3,25$	$\left(\frac{kW}{km^2}\right)$	$K_{zbt} = 0,1316 * (P_{esp})^{-0,3359}$	0,21	$K_{zbp} = 0,1427 * (P_{esp})^{-0,3579}$	0,22
3	K_F $0,08 < K_F < 0,32$	-	$K_{zbt} = 102,8 * (K_F)^3 - 56,57 * (K_F)^2 + 9,843 * K_F - 0,384$	0,33	$K_{zbp} = 86,39 * (K_F)^3 - 47,90 * (K_F)^2 + 8,554 * K_F - 0,310$	0,25
4	T_C $12,87 < T_C < 25,11$	(h)	$K_{zbt} = -0,0082 * T_C + 0,2559$	0,51	$K_{zbp} = -0,0103 * T_C + 0,3024$	0,63
5	AD $154,5 < AD < 3263$	(km ²)	$K_{zbt} = 6,7122 * (AD)^{-0,622}$	0,62	$K_{zbp} = 14,128 * (AD)^{-0,723}$	0,73
6	L $25,0 < L < 144,61$	(km)	$K_{zbt} = 6,9805 * (L)^{-0,957}$	0,62	$K_{zbp} = 13,07 * (L)^{-1,083}$	0,69

Continua.

Tabela 10. Cont.: Correlações dos parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} e as características das bacias hidrográficas, com seus coeficientes de correlação.

	Parâmetros analisados	Unidades	Correlação com K_{zbt}		Correlação com K_{zbp}	
			Equação	R ²	Equação	R ²
7	H_{NF} $202,8 < H_{NF} < 945,02$	(m)	$K_{zbt} = -4E^{-7} * (H_{NF})^2 + 0,0004 * H_{NF} + 0,0717$	0,09	$K_{zbp} = -3E^{-7} * (H_{NF})^2 + 0,0003 * H_{NF} + 0,098$	0,03
8	Q_{Fi} $4,64 < Q_{Fi} < 32,22$	$\left(\frac{m^3}{s}\right)$	$K_{zbt} = 0,8239 * (Q_{Fi})^{-0,774}$	0,55	$K_{zbp} = 1,996 * (Q_{Fi})^{-0,888}$	0,64
9	q_{esp} $0,008 < q_{esp} < 0,034$	$\left(\frac{m^3}{s * km^2}\right)$	$K_{zbt} = 1,043 * (q_{esp})^{0,518}$	0,12	$K_{zbp} = 1,809 * (q_{esp})^{0,631}$	0,15
10	$\frac{I_{BH}}{AD}$ $0,0013 < \frac{I_{BH}}{AD} < 0,0534$	$\left(\frac{m}{km^3}\right)$	$K_{zbt} = 0,8328 * \left(\frac{I_{BH}}{AD}\right)^{0,388}$	0,46	$K_{zbp} = 1,0254 * \left(\frac{I_{BH}}{AD}\right)^{0,4147}$	0,48
11	$\frac{\left(\frac{Q_{mlt}}{AD}\right)}{L}$ $5,7 * 10^{-5} < \frac{\left(\frac{Q_{mlt}}{AD}\right)}{L} < 0,0014$	$\left(\frac{m^3}{s * km}\right)$	$K_{zbt} = 7,054 * \left[\frac{\left(\frac{Q_{mlt}}{AD}\right)}{L}\right]^{0,493}$	0,46	$K_{zbp} = 14,39 * \left[\frac{\left(\frac{Q_{mlt}}{AD}\right)}{L}\right]^{0,568}$	0,53

Continua.

Tabela 10. Cont.: Correlações dos parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} e as características das bacias hidrográficas, com seus coeficientes de correlação.

	Parâmetros analisados e intervalos de validade	Unidades	Correlação com K_{zbt}		Correlação com K_{zbp}	
			Equação	R ²	Equação	R ²
12	$\frac{I_{BH}}{AD * T_C}$ $0,0001 < \frac{I_{BH}}{AD * T_C} < 0,0080$	$\left(\frac{m}{km^3 * h}\right)$	$K_{zbt} = 0,0356 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * T_C}\right) + 0,4148$	0,40	$K_{zbp} = 1,2158 * \left(\frac{I_{BH}}{AD * T_C}\right)^{0,2926}$	0,49
13	$\frac{I_{BH}}{AD * L}$ $9 * 10^{-6} < \frac{I_{BH}}{AD * L} < 0,001$	$\left(\frac{m}{km^4}\right)$	$K_{zbt} = 0,0394 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * L}\right) + 0,5097$	0,43	$K_{zbp} = 0,0446 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * L}\right) + 0,5711$	0,44
14	$\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF}}$ $2,12 * 10^{-6} < \frac{I_{BH}}{AD * H_{NF}} < 8,79 * 10^{-5}$	$\left(\frac{1}{km^3}\right)$	$K_{zbt} = 0,0637 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF}}\right) + 0,8277$	0,69	$K_{zbp} = 0,0717 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF}}\right) + 0,927$	0,71
15	$\frac{I_{BH}}{AD * H_B * L}$ $1,47 * 10^{-8} < \frac{I_{BH}}{AD * H_{NF} * L} < 1,04 * 10^{-5}$	$\left(\frac{1}{km^4}\right)$	$K_{zbt} = 0,0415 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF} * L}\right) + 0,7767$	0,47	$K_{zbp} = 0,046 * \ln\left(\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF} * L}\right) + 0,860$	0,46
16	$\frac{P_{esp} * K_F}{T_C}$ $0,064 < \frac{P_{esp} * K_F}{T_C} < 0,0015$	$\left(\frac{kW}{km^2 * h}\right)$	$K_{zbt} = 0,0264 * \ln\left(\frac{P_{esp} * K_F}{T_C}\right) + 0,2702$	0,19	$K_{zbp} = 0,0306 * \ln\left(\frac{P_{esp} * K_F}{T_C}\right) + 0,3054$	0,19

Continua.

Tabela 10. Cont.: Correlações dos parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} e as características das bacias hidrográficas, com seus coeficientes de correlação.

	Parâmetros analisados e intervalos de validade	Unidades	Correlação com K_{zbt}		Correlação com K_{zbp}	
			Equação	R ²	Equação	R ²
17	$\frac{P_{esp} * K_F}{Q_{Fi}}$ $0,002 < \frac{P_{esp} * K_F}{Q_{Fi}} < 0,11$	$\left(\frac{kW * s}{km^2 * m^3}\right)$	$K_{zbt} = 0,0468 * \ln\left(\frac{P_{esp} * K_F}{Q_{Fi}}\right) + 0,3653$	0,45	$K_{zbp} = 0,0517 * \ln\left(\frac{P_{esp} * K_F}{Q_{Fi}}\right) + 0,4022$	0,43
18	$\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}}$ $1,23 * 10^{-8} < \frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_B} < 2,18 * 10^{-6}$	$\left(\frac{s}{km^3 * m^3}\right)$	$K_{zbt} = 0,0309 * \ln\left(\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}}\right) + 0,6213$	0,39	$K_{zbp} = 0,0366 * \ln\left(\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}}\right) + 0,7237$	0,40
19	$(K_{zbt} * I_{BH})^{0,25}$	-	$(K_{zbt} * I_{BH})^{0,25} = 0,522 * (I_{BH})^{0,328}$ $0,63 < (K_{zbt} * I_{BH})^{0,25} < 1,52$	0,74	$(K_{zbp} * I_{BH})^{0,25} = 0,5114 * (I_{BH})^{0,3547}$ $0,62 < (K_{zbt} * I_{BH})^{0,25} < 1,71$	0,76

Fonte: Autor.

À partir das equações apresentadas na Tabela 9 anterior, obtidas pelos gráficos que relacionam os parâmetros da bacia hidrográfica e os fatores de correção de K_{zb} , foram calculados os novos valores de K_{zbt} e K_{zbp} , denominados de KR_{zbt} e KR_{zbp} , respectivamente. E, considerando os 18 cursos d'água analisados, obteve-se o desvio padrão da diferença encontrada entre o valor real e o recalculado para cada situação (Tabela 11).

Tabela 11: Dados do desvio padrão para os 18 cursos d'água analisados, com relação aos valores recalculados - KR_{zbt} e KR_{zbp} .

	Parâmetros analisados	Unidades	Desvio Padrão - K_{zbt}	Desvio Padrão - K_{zbp}
1	I_{BH}	$\left(\frac{m}{km}\right)$	0,165	0,260
2	P_{esp}	$\left(\frac{kW}{km^2}\right)$	0,082	0,088
3	K_F	-	0,0653	0,079
4	T_C	(h)	0,066	0,071
5	AD	(km^2)	0,076	0,079
6	L	(km)	0,075	0,081
7	H_{NF}	(m)	0,076	0,091
8	Q_{Fi}	$\left(\frac{m^3}{s}\right)$	0,075	0,078
9	q_{esp}	$\left(\frac{m^3}{s * km^2}\right)$	0,080	0,090
10	$\frac{I_{BH}}{AD}$	$\left(\frac{m}{km^3}\right)$	0,099	0,102
11	$\frac{\left(\frac{Q_{mlt}}{AD}\right)}{L}$	$\left(\frac{m^3}{s * km}\right)$	0,076	0,084
12	$\frac{I_{BH}}{AD * T_C}$	$\left(\frac{m}{km^3 * h}\right)$	0,074	0,105
13	$\frac{I_{BH}}{AD * L}$	$\left(\frac{m}{km^4}\right)$	0,073	0,073
14	$\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF}}$	$\left(\frac{1}{km^3}\right)$	0,079	0,072
15	$\frac{I_{BH}}{AD * H_{NF} * L}$	$\left(\frac{1}{km^4}\right)$	0,068	0,069
16	$\frac{P_{esp} * K_F}{T_C}$	$\left(\frac{kW}{km^2 * h}\right)$	0,071	0,076
17	$\frac{P_{esp} * K_F}{Q_{Fi}}$	$\left(\frac{kW * s}{km^2 * m^3}\right)$	0,074	0,074
18	$\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}}$	$\left(\frac{s}{km^3 * m^3}\right)$	0,0643	0,0665
19	$(K_{zbt} * I_{BH})^{0,25}$	-	0,079	0,085

Fonte: Autor.

Logo, o melhor resultado obtido entre K_{zbt} e K_{zbp} e os parâmetros da bacia hidrográfica que foram analisados no trabalho se deu com a utilização da declividade, do fator de forma, da vazão média na foz do rio, da área de drenagem e do desnível do curso d'água, segundo a Equação 28, a seguir, na qual se determinou o coeficiente K_{ES} em função dos parâmetros.

$$K_{ES} = \left(\frac{I_{BH} * K_F}{AD * H_{NF} * Q_{Fi}} \right) \left(\frac{s}{\text{km}^3 * \text{m}^3} \right) \quad (\text{Equação 28})$$

Sendo assim, os indicadores de correção do fator de uso que foram plotados em função de K_{ES} são apresentados na Tabela 12 e nas Figuras 44 e 45, a seguir. Nesses, alguns dados foram suprimidos, a fim de se conseguir uma lei mais expressiva, a saber, os rios I e VI foram suprimidos para a obtenção da equação; contudo, foram considerados para a obtenção do valor final do desvio padrão.

Tabela 12: Dados da relação dos indicadores e a declividade, o fator de forma, a área de drenagem, o desnível e a vazão média na foz dos cursos d'água.

Cursos d'água	K_{zbt}	K_{zbp}	I_{BH} (m/km)	K_F	AD (km ²)	H_{NF} (h)	Q_{Fi} (m ³ /s)	K_{ES} $\left(\frac{s}{\text{km}^3 * \text{m}^3} \right)$
I	0,152	0,242	35,38	0,25	154,50	884,45	5,32	$1,2 * 10^{-5}$
II	0,10	0,13	10,62	0,08	655,26	945,02	17,00	$8,3 * 10^{-8}$
III	0,06	0,07	5,74	0,09	1.142,20	643,65	32,22	$2,2 * 10^{-8}$
IV	0,22	0,28	13,70	0,12	256,38	642,35	5,63	$1,7 * 10^{-6}$
V	0,23	0,26	9,75	0,18	427,40	479,01	7,50	$1,1 * 10^{-6}$
VI	0,32	0,33	11,88	0,32	344,52	392,35	9,59	$2,9 * 10^{-6}$
VII	0,11	0,11	2,24	0,10	851,61	202,80	12,17	$1,1 * 10^{-7}$
VIII	0,22	0,27	4,45	0,14	295,45	205,83	4,64	$2,2 * 10^{-6}$
IX	0,15	0,16	2,77	0,11	940,70	256,89	14,78	$8,5 * 10^{-8}$
X	0,30	0,33	4,64	0,11	932,84	434,74	15,18	$8,0 * 10^{-8}$
XI	0,06	0,07	2,50	0,14	1.322,30	241,41	19,73	$5,6 * 10^{-8}$
XII	0,13	0,13	4,30	0,09	433,29	306,22	7,53	$3,7 * 10^{-7}$
XIII	0,08	0,10	3,57	0,11	647,79	277,26	11,69	$1,8 * 10^{-7}$
XIV	0,13	0,12	7,31	0,24	453,28	315,07	13,32	$9,4 * 10^{-7}$
XV	0,23	0,22	8,35	0,16	410,13	423,01	12,05	$6,4 * 10^{-7}$
XVI	0,10	0,09	8,78	0,09	564,31	709,58	10,48	$1,8 * 10^{-7}$
XVII	0,15	0,17	6,37	0,14	864,57	492,92	8,51	$2,5 * 10^{-7}$
XVIII	0,04	0,04	4,23	0,16	3.263,01	611,82	26,80	$1,2 * 10^{-8}$

Fonte: Autor.

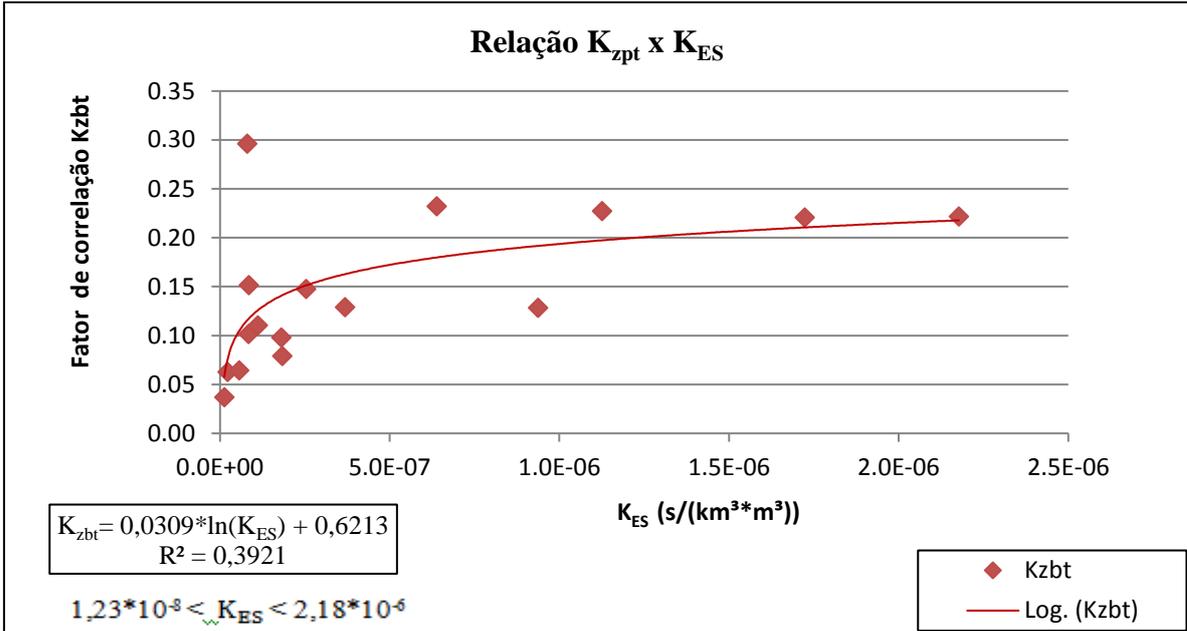


Figura 44: Relação entre os indicadores, as declividades, as áreas de drenagem, os desníveis e os comprimentos dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

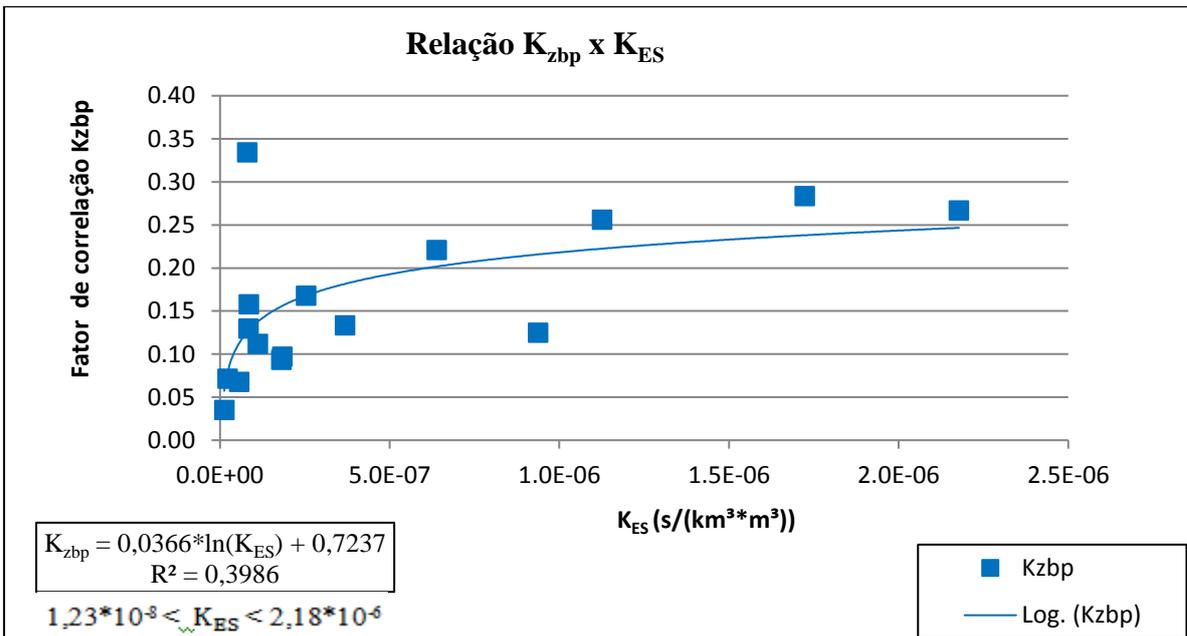


Figura 45: Relação entre os indicadores, as declividades, os fatores de forma, as áreas de drenagem, os desníveis e as vazões médias na foz dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

De posse dos gráficos anteriores foi possível obter as equações de correlação (Equações 29 e 30) e assim recalculá-las, à partir delas, os valores dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} . Os dados obtidos por meio do uso das equações foram denominados de KR_{zbt} e KR_{zbp} , como mencionado anteriormente.

$$KR_{zbt} = 0,0309 * \ln \left(\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}} \right) + 0,6213 \quad (\text{Equação 29})$$

$$KR_{zbp} = 0,0366 * \ln \left(\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}} \right) + 0,7237 \quad (\text{Equação 30})$$

Para ambas as equações o intervalo de validade é dado pela Inequação 2, a seguir:

$$1,23 * 10^{-8} < \frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}} < 2,18 * 10^{-6} \quad (\text{Inequação 2})$$

Com a finalidade de verificar a aplicabilidade das fórmulas obtidas, apresenta-se a Tabela 13.

Tabela 13: Dados da relação dos indicadores e as declividades, os fatores de forma, as áreas de drenagem, os desníveis e as vazões médias na foz dos cursos d'água.

Cursos d'água	K_{zbt} - Original	KR_{zbt} - Recalculado	(K_{zbt} - KR_{zbt})²	K_{zbp} - Original	KR_{zbp} - Recalculado	(K_{zbp} - KR_{zbp})²
I	0,15	0,27	0,014	0,24	0,31	0,005
II	0,10	0,12	0,000	0,13	0,13	0,000
III	0,06	0,08	0,000	0,07	0,08	0,000
IV	0,22	0,21	0,000	0,28	0,24	0,002
V	0,23	0,20	0,001	0,26	0,22	0,001
VI	0,32	0,23	0,009	0,33	0,26	0,005
VII	0,11	0,13	0,000	0,11	0,14	0,001
VIII	0,22	0,22	0,000	0,27	0,25	0,000
IX	0,15	0,12	0,001	0,16	0,13	0,001
X	0,30	0,12	0,032	0,33	0,13	0,044
XI	0,06	0,11	0,002	0,07	0,11	0,002
XII	0,13	0,16	0,001	0,13	0,18	0,002
XIII	0,08	0,14	0,004	0,10	0,16	0,003
XIV	0,13	0,19	0,004	0,12	0,22	0,008
XV	0,23	0,18	0,003	0,22	0,20	0,000
XVI	0,10	0,14	0,002	0,09	0,16	0,004
XVII	0,15	0,15	0,000	0,17	0,17	0,000
XVIII	0,04	0,06	0,000	0,04	0,06	0,000
Σ	-	-	0,075	-	-	0,080
Média	0,15	0,16		0,17	0,17	
Desvio Padrão	-	-	0,064	-	-	0,067

Fonte: Autor.

De acordo com os dados da tabela 13, pode-se concluir que os valores recalculados a partir das Equações 30 e 31 se mostram coerentes com os dados originais já obtidos para K_{zbt} e K_{zbp} , principalmente com relação aos dados inferiores. Já os valores superiores se apresentam mais dispersos quando recalculados pelas fórmulas. Contudo, nota-se, ao observar os dados como um todo e não mais individualmente, que a média obtida para os valores originais dos fatores de uso corrigidos e dos valores recalculados pelas fórmulas se mostraram bem próximo para K_{zbt} e iguais para K_{zbp} .

Para confirmar os valores adotados para os fatores de uso corrigidos, optou-se por plotar, os dados dos coeficientes K_{zbt} , e K_{zbp} , originais, versus o KR_{zbt} e KR_{zbp} , recalculados, respectivamente, em gráficos (Figuras 46 e 47). Para estes se considera-se que as linhas de tendência traçadas em azul são lineares e foram forçadas a ter sua interseção fixada em zero. Posteriormente, foi traçada uma segunda linha, em vermelho, a 45° , para fins comparativos.

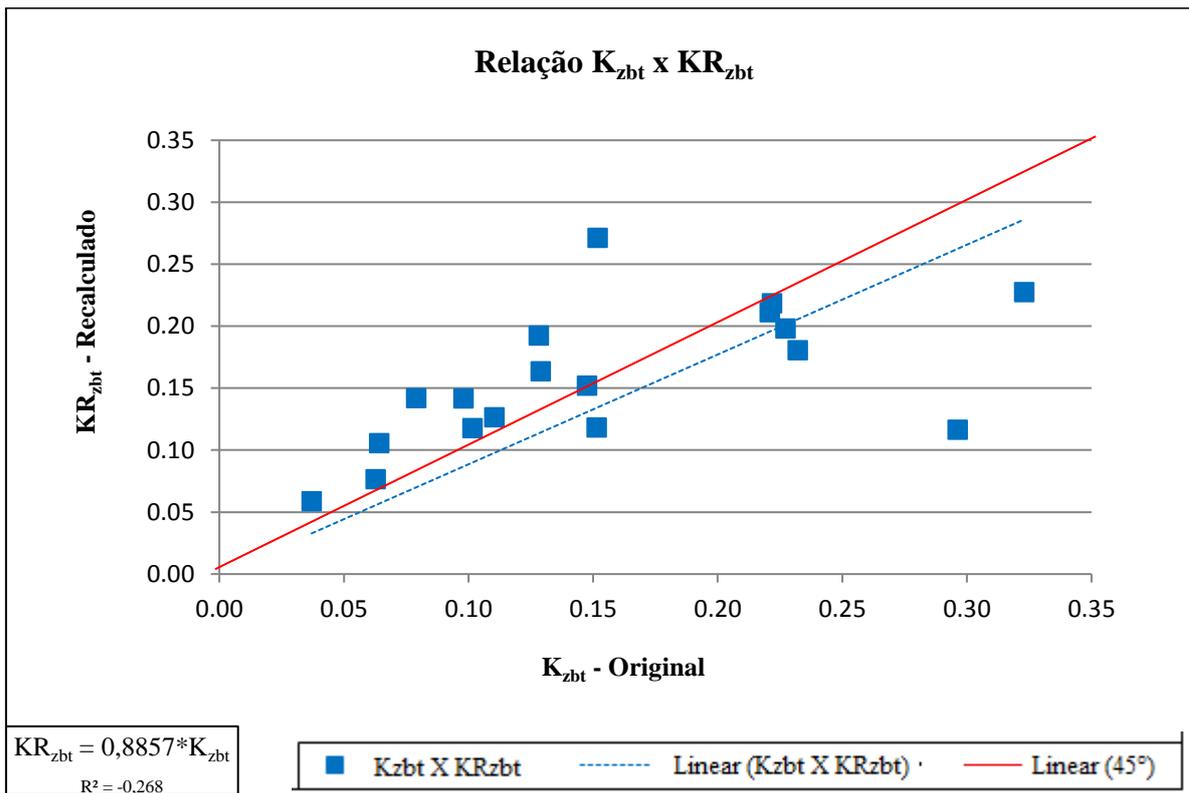


Figura 46: Relação entre os indicadores, K_{zbt} e KR_{zbt} .
 Fonte: Autor.

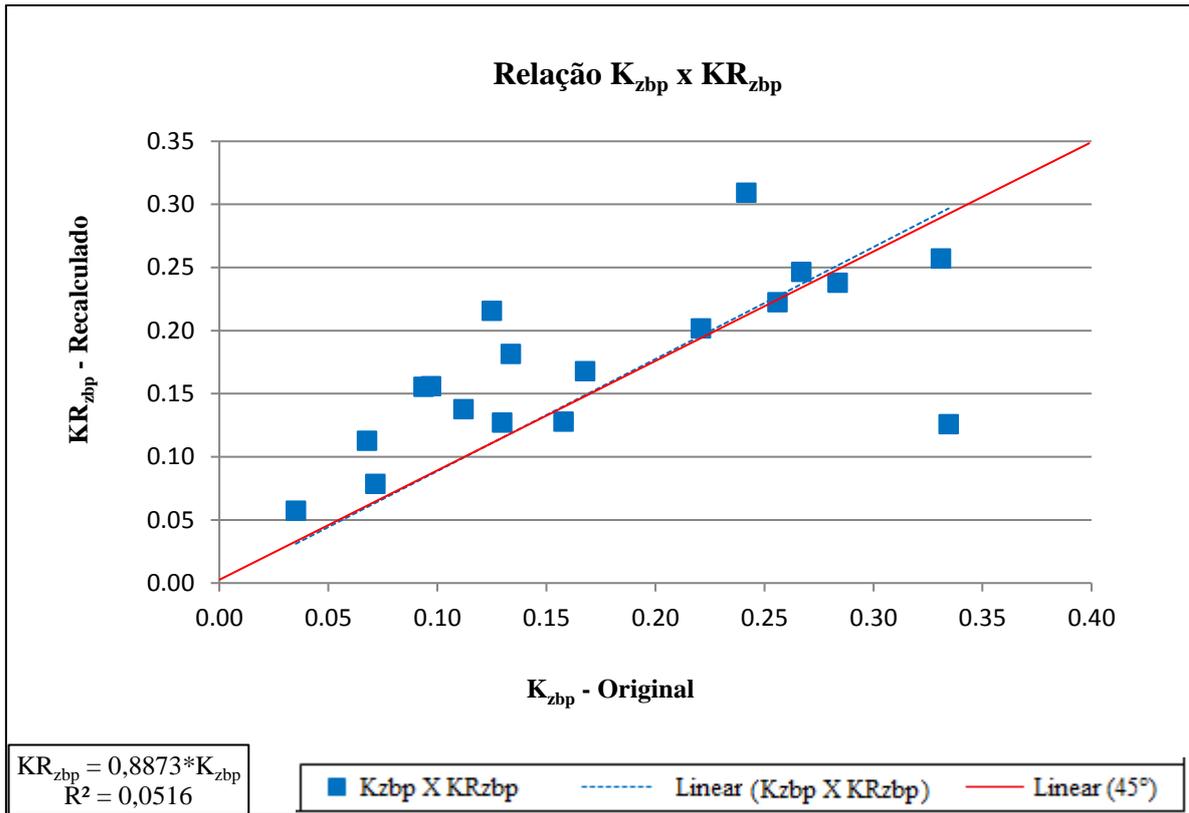


Figura 47: Relação entre os indicadores, K_{zbp} e KR_{zbp} .
 Fonte: Autor.

Observando os gráficos anteriores, pode-se calcular os valores do coeficiente angular da equação da equação de 1º grau. Os resultados encontrados para o coeficientes angulares foram de 0,8857 e 0,8873, respectivamente, para as relações de K_{zbt} versus KR_{zbt} , e K_{zbp} versus KR_{zbp} . Ou seja, a dispersão dos pontos calculados com as curvas de regressão têm valores de 11,4% para o primeiro gráfico e 11,3% para o segundo. Isso pode levar a reafirmar que os valores recalculados, KR_{zbt} e KR_{zbp} , se fazem-se coerentes com os valores de K_{zbt} e K_{zbp} .

Embora os dois fatores KR_{zbt} e KR_{zbp} se mostrem satisfatórios, a fim de se determinar um único equacionamento, retoma-se as características adquiridas para ambos os parâmetros de correção de K_{zb} .

Sendo assim, apresenta-se para os valores absolutos máximos encontrados para os parâmetros K_{zbt} e K_{zbp} , respectivamente, 0,32 e 0,33 e o mínimo, para ambos os coeficientes, foi de 0,04. Considerando as Equações 29 e 30, encontradas para se calcular os novos valores dos coeficientes (KR_{zbt} e KR_{zbp}), observa-se que os dados recalculados para o KR_{zbp} se

mostram maiores do que os recalculados para o KR_{zpt} , ou seja, são mais otimistas para o primeiro fator citado.

Já para o estudo de correlação entre o K_{zbt} , original, e KR_{zbt} , recalculado, apresenta-se como resultado um desvio de tendência de 0,0643. Ou seja, o KR_{zbt} tem uma imprecisão de cerca de 6,43% de seu valor médio e uma dispersão de 11,4%. E comparando os valores de K_{zbp} , original e o recalculado, KR_{zbp} , apresenta-se uma imprecisão em torno de 6,65% e uma dispersão dos dados de 11,3%.

Assim, visando a uma maior segurança, adota-se a equação encontrada para K_{zbt} , uma vez que seu equacionamento se mostra mais pessimista, que os seus valores recalculados, KR_{zbt} , se aproximaram mais dos valores originais, K_{zbt} , e que, seus dados resultaram em um menor desvio de tendência, isso comparado-os ao outro fator analisado, K_{zbp} .

Logo, de acordo com os resultados obtidos por esse trabalho, oriundos de um estudo de PPH, e aliados à análise dos dados, pode-se concluir que o valor de 0,5 para o Coeficiente do Fator de Uso (K_{zb}), apresentado nos estudos de Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et al. (2017) mostrou-se otimista. Sugerindo-se, então, a correção dele para um valor inferior, através da análise dos fatores K_{zbt} e K_{zbp} .

Pode-se então constatar que os valores de K_{zbt} e K_{zbp} são variáveis, e que a equação dos parâmetros das bacias hidrográficas, K_{ES} , foi a que melhor representou os valores dos coeficientes corrigidos. K_{ES} é calculado em função da declividade, do fator de forma, da área de drenagem, do desnível e do comprimento do curso d'água, conforme a Equação 28, apresentada anteriormente e a seguir.

$$K_{ES} = \left(\frac{I_{BH} * K_F}{AD * H_{NF} * Q_{Fi}} \right) \left(\frac{s}{\text{km}^3 * \text{m}^3} \right) \quad \text{(Equação 28)}$$

A partir do parâmetro K_{ES} obteve-se as Equações 29 e 30, encontradas para calcular os novos valores dos coeficientes (KR_{zbt} e KR_{zbp}). Contudo, adota-se, por segurança, a equação referente ao fator de correção K_{zbt} , apresentada anteriormente e a seguir.

$$KR_{zbt} = 0,0309 * \ln \left(\frac{I_{BH} * K_F}{Q_{Fi} * AD * H_{NF}} \right) + 0,6213 \quad \text{(Equação 29)}$$

Substituindo a Equação 28 na Equação 29, apresenta-se a Equação 31, a seguir.

$$KR_{zbt} = 0,0309 * \ln(K_{ES}) + 0,6213 \quad (\text{Equação 31})$$

Para as Equação 28, 29 e 31, o intervalo de validade é dado pela Inequação 2, apresentada anteriormente e a seguir:

$$1,23*10^{-8} < \frac{I_{BH}*K_F}{Q_{Fi}*AD*H_{NF}} < 2,18*10^{-6} \quad (\text{Inequação 2})$$

Por fim, retoma-se a formulação para a obtenção da relação final da potência hidráulica teórica disponível em um curso d'água, Equação 17, conforme mostrado anteriormente e a seguir.

$$P_{HTDisp} = g * K_{UC} * \bar{Q}_F * H_{NF} \quad (\text{Equação 17})$$

Logo, apresenta-se que o valor do fator de uso corrigido, K_{UC} , será obtido através da Equação 31. Onde K_{UC} corresponde a KR_{zbt} , conforme demonstrado na Equação 32. Assim, o equacionamento final para a obtenção da potência teórica disponível em um dado curso d'água é dado pela Equação 32, a seguir. Considera-se para a equação que o H_{NF} é igual ao H_B , e \bar{Q}_F é igual ao Q_{Fi} , pois a referida seção analisada corresponde ao rio.

$$P_{HTDisp} = KR_{zbt} * g * \bar{Q}_F * H_{NF} \quad (\text{Equação 32})$$

Onde:

P_{HTDisp} é a potência hidráulica teórica disponível (kW);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

\bar{Q}_F é a vazão média na foz do curso d'água (m³/s);

H_{NF} é a altura bruta dada entre a nascente e a foz de um rio (m);

KR_{zbt} é o coeficiente que relaciona a potência teórica instalada e a potência total teórica – recalculado pela Equação 29.

5.3. APLICAÇÃO DO EQUACIONAMENTO.

Para a validação do equacionamento encontrado no estudo, a mesma foi aplicada nos cursos d'água utilizados anteriormente nas sub-bacias hidrográficas 61, 60 e 56, bem como em alguns outros rios também alocados no Estado de Minas Gerais, devido à facilidade de obtenção dos dados, e pertencentes a outras sub-bacias, estas de código 55, 42, 41 e 40. Serão apresentados os cálculos para os 18 rios anteriormente estudados e mais 10 novos cursos d'água, que foram prospectados e confirmados com a presença de aproveitamentos hidrelétricos em cascata, cada qual, respeitando as características das áreas analisadas. Ressalta-se o fato das usinas identificadas apresentarem potencial hidrelétrica igual ou superior a 1 MW, o que pode acarretar em um número menor de usinas identificadas.

Os nomes dos novos rios apresentados também foram modificados para uma numeração ordinal a fim de se preservar as informações de PPH. Contudo, essa numeração será consecutiva aos rios já estudados anteriormente. Logo, apresenta-se a denominação crescente de Curso d'água XIX, Curso d'água XX ... até o Curso d'água XXVIII. Mais uma vez, os aproveitamentos identificados nos estudos de casos são apresentados da nascente para a foz do rio principal com a numeração ordinal correspondente ao nome do curso d'água e seguidos de uma letra do alfabeto que é responsável pela identificação da quantidade de centrais em cascata presentes no rio.

Com a finalidade de se aplicar o equacionamento final para a obtenção da potência teórica disponível em um dado rio, que é dado pela Equação 34, foram obtidas, além das informações referentes aos aproveitamentos hidrelétricos existentes, algumas características dos rios analisados, como área de drenagem, comprimento do curso d'água e fator de forma.

Para uma melhor visualização da área analisada na PPH, apresenta-se uma imagem de satélite com dados de altimetria de cada novo rio estudado, com a finalidade de propiciar a visualização dos desníveis encontrados na região. Nessas figuras os pontos em preto são os aproveitamentos hidrelétricos identificados. E as áreas de drenagem dos cursos d'água principais estão em vermelho.

Tendo em vista que os dados dos 18 cursos d'água estudados anteriormente encontram-se apresentados no APÊNDICE A, segue-se a análise realizada para o rio XIX, com base nas considerações e critérios mencionados para a dissertação.

Curso d'água XIX

O rio apresenta 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 48 e 49 e nas Tabelas 14 e 15.

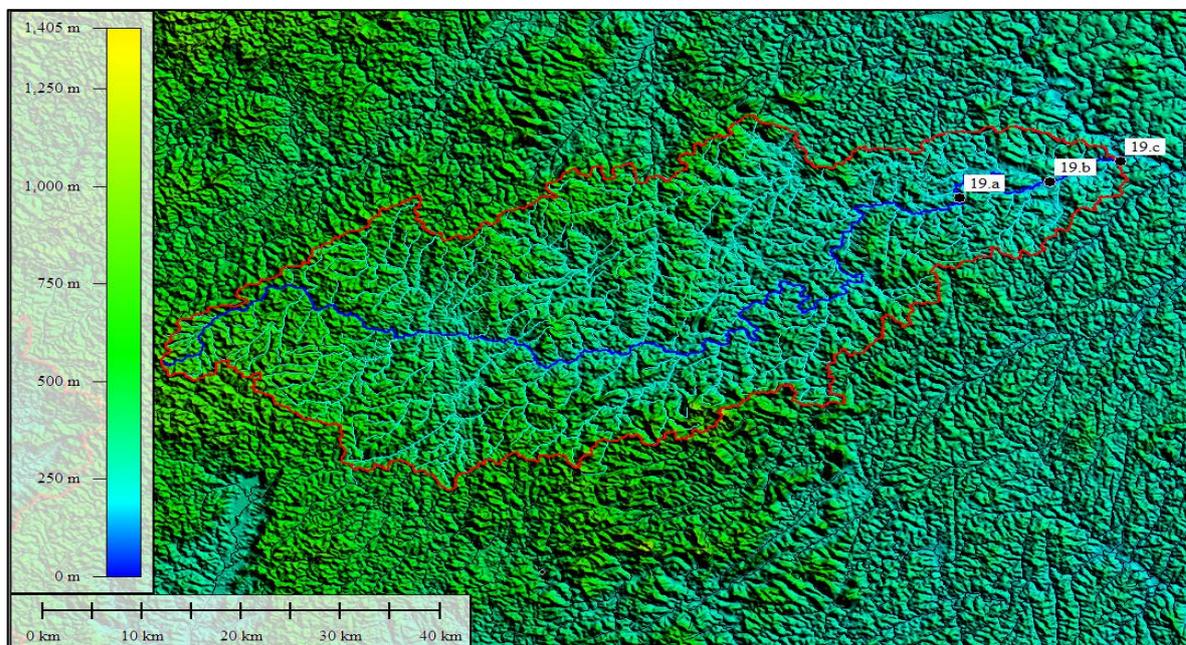


Figura 48: Representação do Curso d'água XIX com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

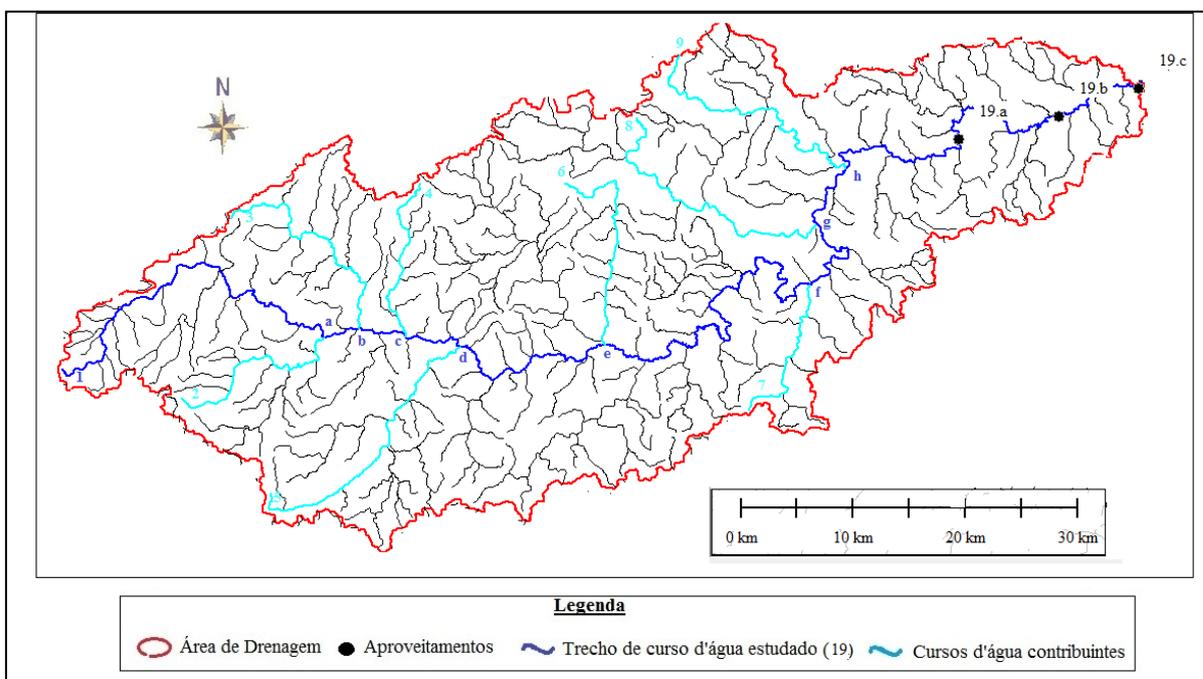


Figura 49: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIX e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor

Tabela 14: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIX.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	775,00				
Confluência 1-a		330,00	169,1	36,7	1,22
Nascente 2	685,00				
Confluência 2-a		330,00	104,4	20,4	0,76
Nascente 3	675,00				
Confluência 3-b		325,00	127,6	23,7	0,92
Nascente 4	625,00				
Confluência 4-b		315,00	47,0	16,9	0,34
Nascente 5	535,00				
Confluência 5-b		300,00	174,9	27,3	1,27
Nascente 6	550,00				
Confluência 6-b		270,00	242,5	21,7	1,75
Nascente 7	575,00				
Confluência 7-b		230,00	75,7	16,1	0,55
Nascente 8	525,00				
Confluência 8-b		215,00	160,0	28,9	1,16
Nascente 9	625,00				
Confluência 9-b		210,00	155,0	27,8	1,12
Σ					9,09
$\frac{\Sigma}{NA_{total}}$	612,50				

Fonte: Autor.

Tabela 15: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIX.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	612,5							
(19.a)		2031,5		14,70	14,0	2.018,68	20,73	2.286,64
(19.b)		2162,3		15,64	9,0	1.380,86	22,06	1.564,30
(19.c)		2215,7		17,59	10,0	1.725,58	25,58	2.015,45
Foz no rio principal	165,0	2216,0	173,3	16,03	585,0			
Σ						5.125,11		5.866,39

Fonte: Autor.

Os estudos referentes aos demais 9 cursos d'água analisados, encontram-se alocados no APÊNDICE C, de forma a apresentar detalhadamente as características abrangidas.

Considerando as análises e a aplicação da Equação 32 nos 28 rios apresentados nos APÊNDICE A e C, determinam-se os resultados destacados nas Tabelas 16 e 17 (rios de I à XVIII, referentes às sub-bacias 61, 60 e 56) e na Tabela 18 (rios de XIX à XXVIII, referentes às sub-bacias 55, 42, 41 e 40).

Tabela 16: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de I a IX.

Parâmetros	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	46.158,80	157.600,92	203.444,84	35.477,39	35.242,80	36.911,46	24.211,91	9.372,14	37.242,36
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	7.007,84	16.003,76	12.743,78	7.833,68	8.007,90	11.919,74	2.672,83	2.078,48	5.636,43
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	11.154,63	20.443,41	14.545,76	10.060,32	9.021,90	12.216,19	2.710,10	2.501,66	5.879,11
K_{zbt}	0,15	0,10	0,06	0,22	0,23	0,32	0,11	0,22	0,15
K_{zbp}	0,24	0,13	0,07	0,28	0,26	0,33	0,11	0,27	0,16
Declividade - I_{BH} (m/km)	35,38	10,62	5,74	13,70	9,75	11,88	2,24	4,45	2,77
Fator de Forma - K_F	0,25	0,08	0,09	0,12	0,18	0,32	0,10	0,14	0,11
Área de drenagem da bacia hidrográfica – AD (km ²)	154,50	655,26	1.142,20	256,38	427,40	344,52	851,61	295,45	940,70
Comprimento do rio – L (km)	25,00	89,00	112,07	46,89	49,11	33,02	90,43	46,25	92,66
Desnível total do rio – H_{NF} (m)	884,45	945,02	643,65	642,35	479,01	392,35	202,80	205,83	256,89
Vazão na foz do rio principal – Q_i (m ³ /s)	5,32	17,00	32,22	5,63	7,50	9,59	12,17	4,64	14,78
K_{ES}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KR_{zbt}	0,27	0,12	0,08	0,21	0,20	0,23	0,13	0,22	0,12
P_{HTDISP} (kW)	12.521,11	18.542,87	15.570,51	7.493,32	6.979,99	8.389,06	3.063,01	2.047,30	4.403,71

Fonte: Autor.

Tabela 17: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de X a XVIII.

Parâmetros	X	XI	XII	XII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	64.720,09	46.717,25	22.629,63	31.792,86	41.175,79	50.019,18	72.983,67	41.150,10	160.828,60
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	19.171,29	2.998,33	2.917,69	2.510,58	5.277,58	11.610,14	7.153,06	6.070,43	5.954,28
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	21.647,27	3.164,43	3.024,14	3.087,29	5.142,09	11.046,46	6.830,73	6.903,05	5.642,36
K_{zbt}	0,30	0,06	0,13	0,08	0,13	0,23	0,10	0,15	0,04
K_{zbp}	0,33	0,07	0,13	0,10	0,12	0,22	0,09	0,17	0,04
Declividade - I_{BH} (m/km)	4,64	2,50	4,30	3,57	7,31	8,35	8,78	6,37	4,23
Fator de Forma - K_F	0,11	0,14	0,09	0,11	0,24	0,16	0,09	0,14	0,16
Área de drenagem da bacia hidrográfica – AD (km ²)	932,84	1.322,30	433,29	647,79	453,28	410,13	564,31	864,57	3.263,01
Comprimento do rio – L (km)	93,65	96,65	71,17	77,57	43,10	50,65	80,85	77,44	144,61
Desnível total do rio – H_{NF} (m)	434,74	241,41	306,22	277,26	315,07	423,01	709,58	492,92	611,82
Vazão na foz do rio principal – Q_i (m ³ /s)	15,18	19,73	7,53	11,69	13,32	12,05	10,48	8,51	26,80
K_{ES}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KR_{zbt}	0,12	0,11	0,16	0,14	0,19	0,18	0,14	0,15	0,06
P_{HTDISP} (kW)	7.536,18	4.925,01	3.700,58	4.513,74	7.922,40	9.030,01	10.326,59	6.252,47	9.424,47

Fonte: Autor.

Tabela 18: Resultado final das análises dos cálculos da potência hidráulica teórica disponível - Cursos d'água de XIX a XXVIII.

Parâmetros	XIX	XX	XXI	XXII	XIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	70.385,54	12.254,25	29.114,21	23.997,60	23.893,99	37.482,29	34.127,74	82.668,79	65.831,46	39.481,82
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	5.125,11	2.653,18	5.817,13	7.800,13	9.410,65	6.056,30	6.150,08	7.508,38	3.767,82	3.030,92
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	5.866,39	3.099,11	6.734,70	3.701,06	4.680,50	5.203,29	6.725,83	7.398,73	2.765,27	2.438,36
K_{zbt}	0,07	0,22	0,20	0,33	0,39	0,16	0,18	0,09	0,06	0,08
K_{zbp}	0,08	0,25	0,23	0,15	0,20	0,14	0,20	0,09	0,04	0,06
Declividade - I_{BH} (m/km)	2,52	11,64	10,17	21,61	16,42	2,80	4,28	2,11	1,91	3,01
Fator de Forma - K_F	0,07	0,14	0,15	0,24	0,17	0,12	0,08	0,09	0,12	0,08
Área de drenagem da bacia hidrográfica - AD (km ²)	2.216,00	316,15	631,30	266,39	284,81	733,20	561,66	2.073,01	2.221,13	1.065,54
Comprimento do rio - L (km)	177,31	46,92	63,91	33,35	40,89	77,99	81,65	149,51	137,29	113,22
Desnível total do rio - H_{NF} (m)	447,50	546,11	649,76	720,81	671,30	218,52	349,70	315,76	262,00	340,93
Vazão na foz do rio principal - Q_i (m ³ /s)	16,03	2,29	4,57	3,39	3,63	17,49	9,95	26,69	25,61	11,81
K_{ES}	1,12E-08	4,23E-06	8,39E-07	7,94E-06	4,03E-06	1,21E-07	1,85E-07	1,12E-08	1,51E-08	5,84E-08
KR_{zbt}	0,06	0,24	0,19	0,26	0,24	0,13	0,14	0,06	0,06	0,11
P_{HTDISP} (kW)	3.911,45	2.928,67	5.501,58	6.201,96	5.674,35	4.836,13	4.853,08	4.599,29	4.266,50	4.209,29

Fonte: Autor.

Depois de analisar os resultados dos 28 estudos de caso e conforme pode ser visto nas Tabelas 16, 17 e 18, anteriores, apresenta-se a constatação da variação dos fatores de correção K_{zbt} e K_{zbp} para os novos cursos d'água analisados. Também de acordo com as informações das tabelas anteriores, pode-se concluir que os valores recalculados a partir da Equação 32 para a potência hídrica disponível em um curso d'água se mostram coerentes com os dados já obtidos para a P_{Tinst} e a P_{Tproj} .

Assim, para melhor analisar os valores encontrados para a P_{HTDisp} , optou-se por plotar os dados obtidos pela Equação 32 e as potências P_{Tinst} e a P_{Tproj} , respectivamente, para os 28 cursos d'água em gráficos (Figuras 50 e 51). Para estes, considera-se as equações traçadas em azul são lineares e foram forçadas a ter sua interseção fixada em zero. Posteriormente, foi traçada uma segunda linha, em vermelho, a 45° , para fins comparativos.

Observando os gráficos posteriores, pode-se calcular os valores da constante de declividade das equações. Os resultados encontrados para os coeficientes angulares, que determinam a inclinação da reta, foram de 0,884 e 0,8147, respectivamente, para as relações de P_{HTDisp} versus P_{Tinst} e versus P_{Tproj} , respectivamente. Ou seja, a dispersão dos pontos calculados com as curvas de regressão têm valores de 11,6% para o primeiro gráfico e 18,5% para o segundo. Isso leva a reafirmar que os valores obtidos para as potências hídricas teóricas disponíveis se fazem coerentes.

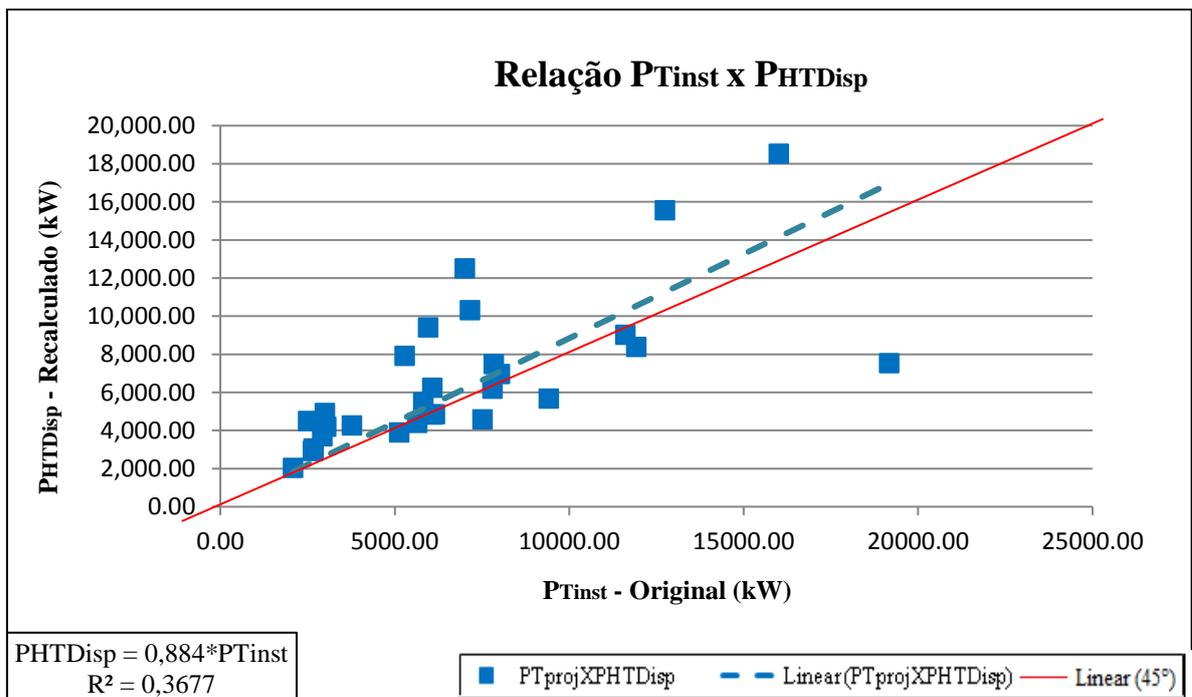


Figura 50: Relação entre P_{Tinst} e P_{HTDisp} .
 Fonte: Autor.

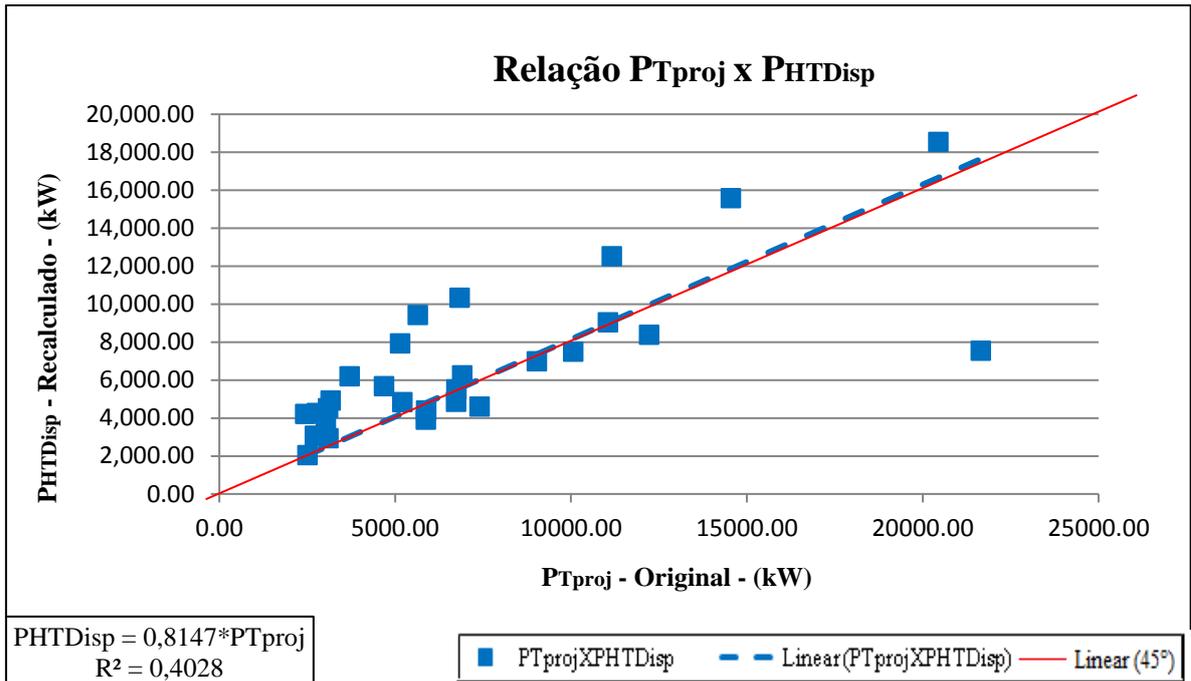


Figura 51: Relação entre P_{Tproj} e P_{HTDisp} .
 Fonte: Autor.

Logo, de acordo com os resultados obtidos por esse trabalho, reafirma-se a aplicabilidade da Equação 32 em estudos posteriores de viabilização e identificação preliminar de regiões propícias à implementação de novos potenciais hidrelétricos, bem como, em regiões nas quais se visa a um aproveitamento ótimo da bacia hidrográfica.

Contudo, os estudos foram aplicados para o Estado de Minas de Gerais, e para uma generalização da utilização da fórmula recomenda-se que essa seja utilizada em outras áreas e regiões e que sejam realizadas as análises estatísticas dos dados aqui apresentados.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica. O trabalho foi realizado com o objetivo de colaborar com o planejamento de exploração de energia hidrelétrica em uma bacia hidrográfica.

Foi fornecido um procedimento para a determinação do limite da potência teórica máxima que, tecnicamente, é possível alcançar a partir de uma bacia hidrográfica. O trabalho utilizou da prospecção de potenciais hidrelétricos para a localização e caracterização dos possíveis locais de implantação de barragens, sendo selecionados os cursos d'água que apresentaram alocados em sim, sucessivos aproveitamentos, denominados de aproveitamentos em cascata. Passou-se então, para o desenvolvimento das técnicas e dos cálculos para um fator de uso corrigido, a partir de correlações com as características da bacia hidrográfica e utilizando-se de uma modelagem com 18 rios do estado de Minas Gerais.

Vale salientar, que para a realização da prospecção dos novos potenciais foram utilizadas imagens SRTM, que por sua vez, apresentam imprecisão com respeito as altitudes apresentadas, visto que para a sua geração se observa os picos altimétricos, incluindo interferências de árvores, e não o terreno do local analisado. Sendo assim, um levantamento em escala menor pode, por exemplo, resultar no aumento de sítios de singularidades históricas, culturais ou ambientais em uma determinada área, bem como pode confirmar a inexistência destes, acarretando em diferenças nos aproveitamentos identificados na prospecção.

Os resultados mostram que é possível correlacionar os fatores de uso corrigidos para as potências teóricas instaladas - K_{zbt} - e as potências totais de projeto - K_{zbp} - com os parâmetros das bacias hidrográficas. Apesar da diversidade de parâmetros que afetam a decisão da potência final de uma usina hidrelétrica ser grande e agregar marcos regulatórios, fatores naturais, condições de mercado e o montante de taxas que interferem na sua determinação, o trabalho optou por estudar mais a fundo as características naturais das bacias hidrelétricas, deixando e sugerindo o estudo da interferência econômica para trabalhos posteriores.

Os valores do coeficiente da potência instalada, K_{zbt} , encontrados foram menores que os referentes à potência de projeto, K_{zbp} . Isso pode ser explicado devido, principalmente, ao fato da vazão assumida em estudos para o cálculo de projetos de centrais ser maior do que a

vazão média de longo termo, e, também, aos fatores limitantes de alocação de usina hidrelétrica, como fatores ambientais, interferências em aglomerados urbanos e fatores econômicos. Por conseguinte, devido a esse aumento das potências, ocorre uma diminuição no fator de capacidade da potência da central, o que acresce o risco da geração no núcleo em questão. Risco este, que é assumido pelo empreendedor e é devido, principalmente, às condições de capacidade do empresário em assumi-la no mercado.

Os gráficos apresentados nesse trabalho se mostraram coerentes quanto aos fatores de correção e as características da bacia hidrográfica. Assim, fazendo-se uso de todos os dados dos 18 rios estudados, a fim de se encontrar dados mais reais, constatou-se que o número anteriormente encontrado por Souza e Tiago Filho (2008) e Souza et. al. (2017) para o fator de uso K_{zb} de 0,50, era muito otimista, e fazia-se necessário uma redução, visto que os valores dos coeficientes para a potência instalada e a potência de projeto foram variáveis e os dados máximos absolutos encontrados para o K_{zbt} e K_{zbp} foram de, respectivamente, 0,32 e 0,33.

A relação dos parâmetros analisados que apresentou os melhores resultados de desvio padrão para ambos os coeficientes, se deu com o K_{ES} , obtido pela multiplicação da declividade e do fator de forma, dividida pela multiplicação da área de drenagem, do desnível e da vazão média na foz do curso d'água. O mencionado fator K_{ES} é aplicado às novas formulações para se encontrar os valores recalculados para a potência instalada, KR_{zbt} , e para a potência de projeto, KR_{zbp} .

Embora os dois fatores KR_{zbt} e KR_{zbp} se mostrem satisfatórios, visando a uma maior segurança, adota-se a equação encontrada para K_{zbt} , uma vez que seu equacionamento se mostra mais pessimista; que seus valores recalculados, KR_{zbt} , se aproximaram mais dos valores originais, K_{zbt} ; e que, seus dados resultaram em um menor desvio de tendência, comparado-os ao outro fator analisado, K_{zbp} .

Sendo assim, apresenta-se que o fator de uso corrigido, K_{CU} , objeto de pesquisa desse trabalho, será dado em função do K_{zbt} , e será aplicado para a obtenção da potência disponível na bacia hidrográfica.

Logo, constatou-se que o aproveitamento máximo de um curso d'água com alocação de usinas em cascata pode ser obtido por meio de equações para se determinar o potencial que, teoricamente, ele teria se fosse feito apenas um aproveitamento em sua foz e que abrangesse toda a bacia segundo a Equação 32, rerepresentada a seguir.

$$P_{HTDisp} = KR_{zbt} * g * \bar{Q}_F * H_{NF}$$

Para a validação do equacionamento encontrado, utilizou-se os dados dos 18 rios já utilizados anteriormente e de mais 10 cursos d'água alocados em outras sub-bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais de códigos 55, 42, 41 e 40. Como resultado, apresenta-se a coerência dos dados obtidos pela fórmula e pode-se reafirmar a aplicabilidade da Equação 32 em estudos posteriores de viabilização e identificação preliminar de regiões de interesse hidroenergético, bem como, em áreas que buscam um aproveitamento ótimo da bacia hidrográfica.

A redução do valor da potência total disponível em um curso d'água deve-se a impossibilidade de utilização de todos os espaços ao longo de um rio, seja por fatores naturais ou por fatores econômicos. Sendo que, normalmente os sítios que se mostram adequados a implantação de usinas hidrelétricas apresentam características específicas já conhecidas como áreas de encostas íngremes, vale encaixado e disponibilidade de vazão, além das interferências sofridas pelo mercado econômico.

Vale salientar que os aproveitamentos aqui obtidos se referem apenas a potenciais hidrelétricos obtidos de forma convencional, por barramentos. No entanto, vários autores investigam o potencial hidráulico de elevação de rios por meios alternativos, tais como turbinas hidrocínéticas, que operam livremente sem a necessidade da construção de barragens. O desenvolvimento de tais tecnologias pode contribuir para a elevação do potencial hidráulico de uma bacia, principalmente, em leitos de rios que apresentem baixas declividades e altos níveis de vazão.

O procedimento desenvolvido no trabalho pode fornecer mais apoio para a pesquisa de novos potenciais e pode ser considerado como ponto de partida para vários estudos analíticos, tais como: em estudos exploratórios preliminares para potenciais hidrelétricos; em estudos de pré viabilidade e de exploração da otimização de partições de queda em estudos de inventário de rios, com a finalidade de determinar a melhor distribuição de quedas; em estudos de identificação de potencial remanescente em rios que já apresentam usinas hidrelétricas instaladas; em trabalhos de repotencialização de usinas; e, em estudos de confronto entre o uso energético e outros usos da água, bem como em outras características inerentes à captação e uso do rio e seus afluentes.

O resultado de uma análise, como a aqui apresentada, deve ser utilizado para pré-avaliar o potencial de uma bacia hidrográfica, verificando a sua atratividade energética e econômica. Caso os resultados se mostrem factíveis, o empreendedor poderá analisar a atratividade de investimento nos estudos de viabilidade e de inventário do rio em questão.

Por fim, coloca-se como limitação para o estudo, o fato dos dados terem sido validados para parte do Estado de Minas Gerais. Sugere-se, então, para a consolidação do equacionamento encontrado para o fator de uso corrigido, a sua aplicação em outras regiões, bem como, sua aplicação em bacias hidrográficas com aproveitamentos em cascata já existentes e ou em estudo. Sugere-se, para futuros estudos, a avaliação estatística dos dados aqui apresentados e a possibilidade de confrontar resultados com levantamentos de dados em campo e avaliações in loco. Sugere-se também, a utilização de imagens de satélite para fazer a topobatimetria dos locais de implementação dos reservatórios das usinas hidrelétricas para sua verificação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas. Arquivos Digitais.** Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>>. Acessos diversos.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas. Séries Históricas.** Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>>. Acessos diversos.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Brasília. 3ª Edição. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **BIG – Banco de Informações de Geração.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Diversos acessos.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução n° 652, de 9 de dezembro de 2003.** ANEEL, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 395, de 4 de dezembro de 1998,** que estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 116, de 29 de novembro de 2004.** Altera o regimento interno aprovado pela Portaria MME n° 349, de 28 de novembro de 1997, para modificar a estrutura administrativa da ANEEL. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 343, de 9 de dezembro de 2008.** Estabelece procedimentos para registro, elaboração, aceite, análise, seleção e aprovação de projeto básico e para autorização de aproveitamento de potencial de energia hidráulica com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH, bem como revoga as disposições em contrário, das Resoluções Normativas ANEEL n° 393 e 395 de 4 de dezembro de 1998 e do Despacho ANEEL n° 173, de 7 de maio de 1999, no que concerne à PCHs. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 412, de 05 de outubro de 2010.** Estabelece procedimentos para registros, elaboração, aceite, análise, seleção e aprovação de projeto básico e para autorização de aproveitamento de potencial de energia hidráulica de 1.000 até 50.000 kW, sem características de PCH. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 672, de 4 de agosto de 2015.** Estabelece os procedimentos para a realização de estudos de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2015a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 673, de 4 de agosto de 2015.** Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2015b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL n° 687, de 24 de novembro de 2015.** Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial da União. Brasília, DF. ANEEL, 2015 c.

AGRA, S.G.; SOUZA, V.C.B.de; NEVES, M.G.F.P; CRUZ, M.A.S. **Metodologias de Regionalização de Vazões: Estudo Comparativo na Bacia do Rio Carreiro – RS.** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2003.

ÁVILA, C.J.C.P.; JÚNIOR, O.A. DE C.; GUIMARÃES, R.F.; BENTANCURT, J.J.V. **Uso de Ferramentas de SIG para Inventário Preliminar de Potenciais Remanescentes.** In: PCH Notícias – SHP News, v. 5, n. 17, p. 24-28, 2003. Disponível em <<http://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/revistas/revista-17.pdf>>. Acesso em 05 de agosto de 2016.

BIODIVERSITAS. **Biodiversidade em Minas Gerais. Um Atlas para sua Conservação. Shapesfiles.** Disponível em <<http://www.biodiversitas.org.br/atlas/>>. Diversos acessos.

BRASIL. Constituição (1998). **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF: Senado, 1988.

BRASIL. **Decreto n° 4.932, de 23 de dezembro de 2003.** Delega à ANEEL competências previstas na Medida Provisória n° 144, de 10 de dezembro de 2003, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2003.

BRASIL. **Decreto n° 4.970, de 30 de janeiro de 2004.** Dá nova redação ao art. 1° do Decreto n° 4.932, de 23 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a delegação de competências à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL previstas na Medida Provisória n° 144, de 11 de dezembro de 2003, e define o índice de atualização monetária das quotas de que trata o § 1° do art. 13 da Lei n° 10.438, de 26 de abril de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2004c.

BRASIL. **Decreto n° 5.163, de 30 de julho de 2004.** Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2004d.

BRASIL. **Decreto nº 5.184, de 16 de agosto de 2004.** Cria a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, aprova seu Estatuto Social e dá outras providências (2004e).

BRASIL. **Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995.** Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos, previsto no art. 175 da Constituição Federal e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1995a.

BRASIL. **Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995.** Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1995b.

BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996.** Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências (observar alterações estabelecidas pela edição da Leis nº 10.848, de 15 de março de 2004). Diário Oficial da União, Brasília, 1996.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, 1997.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2000a.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000.** Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2000b.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002.** Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2002.

BRASIL. **Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004.** Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2004a.

BRASIL. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004.** Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nº 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997,

9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2004b.

BRASIL. **Lei N° 13.097, de 19 de Janeiro de 2015.** Trata de diversos assuntos correlacionados ao país, estando dentro desses as alterações quanto a energias renováveis, especialmente a eólica e as pequenas centrais hidrelétricas. Diário Oficial da União, Brasília, 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas** / Ministério de Minas e Energia, CEPEL – Rio de Janeiro, 2007.

CARNEIRO, D.A. **PCHs: Pequenas Centrais Hidrelétricas: Aspectos Jurídicos e comerciais.** Rio de Janeiro. Synergia: Canal Energia. 2010.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – CERPCH. Disponível em <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/noticias/lei-13097-pros-e-contras.html>>. Diversos acessos.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Normativa CONAMA n° 1, de 23 de janeiro de 1986.** Dispõe sobre os critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Diário Oficial da União. Brasília, 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Normativa CONAMA n° 6, de 16 de setembro de 1987.** Dispõe sobre o licenciamento ambiental de obras do setor de geração de energia elétrica. Diário Oficial da União. Brasília, 1987.

CORRÊA, A.S.P. **Novas Tendências nos Estudos de Potenciais Hidrelétricos: Metodologia de Prospecção e Análise de Aproveitamentos com Base em Sistema de Informação Geográfica – SIG.** Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2008.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH.** 2000.

ELETROBRÁS; DNAEE. **Manual de microcentrais hidrelétricas.** Brasília, Ministério de Minas e Energia. 1985.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Brasil em relevo.** Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>>. Acessos diversos.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2ª Edição. Rio de Janeiro. 2006.

ENGESAT. **Soluções em imagens de satélite e geoprocessamento.** Disponível em <www.engesat.com.br/software/global-mapper/>. Diversos acessos.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro. EPE, 2014. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em 28-02-2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano 2020**. Rio de Janeiro. EPE, 2011. Disponível em <<http://www.epe.gov.br>>. Acessos diversos.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese do Balanco Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro. EPE, 2016. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em 22-08-2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório Síntese do Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro. EPE, 2017. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em 11-07-2017.

ENGESAT. **Soluções em imagens de satélite e geoprocessamento**. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/>>. Diversos acessos.

EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION - ESHA. Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. 2004. Disponível em: <<http://www.canyonhydro.com>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017 às 1:12 hr.

FARIA, F. A. M. de. **Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas**. Ed. Ver. – Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FERREIRA, J.H.I.; CAMACHO, J.R.; MALAGOLI, J.A. **Estudo da Estimativa do Potencial Hidrelétrico de uma Bacia Hidrográfica usando o Sistema de Informação Geográfica**. XII CEEL – Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia –MG. 2014.

GUITARRARA, G. B. **Estimativa de Vazão para a Implantação de Micro Centrais Hidrelétricas com Utilização do SIG**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Monografia. São Carlos, 2012.

HYDE, K. M.; MAIER, H. R.; COLBY, C. B. *A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making*. *Journal of Environmental Management*, n. 77, p. 278-290, 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Hydropower and the environment: present context and guidelines for future action. *Technical report of International Energy Agency*. 2000. Disponível em: <<http://ieahydro.org>>. Acesso em 21 de outubro de 2017 às 23:20 hr.

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DE MINAS GERAIS – IEDE. **Dados geográficos**. Disponível em: <<http://www.iga.mg.gov.br/IEDE/Downloads.html>>. Acesso em 09 de março de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estados**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=mg>>. Diversos acessos.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Geociências**. Disponível em <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Diversos acessos.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Projeto Radam**. Disponível em <http://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/vegetacao/folhas_radam/vegetacao_SC23_V36_shape/>. Acesso em 07 de março de 2016 às 13:20 hr.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBIO. **Serviços de geoprocessamento**. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/servicos/geoprocessamento.html>>. Acessos diversos.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF. **Áreas protegidas**. Disponível em: <<http://ief.mg.gov.br/areas-protetidas>>. Diversos acessos.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS – IGA. **Atlas digital de Minas Gerais**. Disponível em <http://www.iga.mg.gov.br/mapserv_iga/atlas/FONTES/WATutorial.php>. Diversos acessos.

INSTITUTO PRISTINO. **Geossistemas**. Disponível em: <<http://institutopristino.org.br/atlas/municipos/baixa/>>. Acesso em 09 de março de 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Hydropowerandtheenvironment: presente contexto andguidelines for future action*. Technical report of International Energy agency, 2000.

LARENTIS, D. G. **Prospecção de Potencial Hidrelétrico Remanescente**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. 2009.

LIMA, R.R.M; MELLO, M.T.C; CASTRO, A.C.R. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação na Prospecção de Potencial Hidroelétrico para PCHs**. Hydro&Hydro – PCH Notícias & SHP News. Ano 14, Revista n° 54; 1ª Edição, pag 32. 2012.

MARQUES, M.; HADDAD, J.; MARTINS, A.R. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. ELETROBRÁS / PROCEL. Itajubá – MG. EE Editora da EFEI. FUPAI. 2001.

MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE – MMA. **Dados geográficos - Geoprocessamento**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em 08 de março de 2016.

NUNES, C.F.; ALVES. **Uso de Ferramentas SIG em Estudos de Inventário para Aproveitamentos Hidroenergéticos de Pequeno Porte**. PCH Notícias, v. 9, p. 24-27, 2008.

OLIVEIRA, M. A. **Repotenciação de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Avaliação Técnica e Econômica**. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2012.

OZELKAN, E.C.; DUCKSTEIN, L. *Analysing Water Resources Alternatives and Handling Criteria by Multi Criterion Decision Techniques*. *Journal of Environmental Management*, v. 48, n 1. 1996.

OZTURK, M; BEZIR, N.C.; OZEK, N. *Hydropower-water and renewable energy in Turkei: Sources and policy*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n 3 p. 605-615, 2009.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEORREFRENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO – SIGEL. **Mapa Interativo**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Diversos acessos.

SILVA, D. S.; OTTONI, A. B.; da SILVA, F. G. B.; FERREIRA, A. C.; NETO NOGUEIRA, C.; SANTOS, A. H. M. **Metodologia para Análise Preliminar de Potência Residual disponível em Cascatas de Usinas Hidrelétricas em Operação**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII. Anais. São Paulo, 2007.

SOUZA, Z. SANTOS, A. H. M., BORTONI, E.C. **Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

SOUZA, Z.; TIAGO FILHO, G.L. **O Limite Energético Aproveitável de um Potencial Hidroenergético de um Curso d'água**. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo Horizonte – MG, 21 de abril de 2008.

SOUZA, Z.; TIAGO FILHO, G.L.; BARROS, R.M.; SILVA DOS SANTOS, I.F.; DA SILVA, F. G.B.; PRADO LEITE, M.D.; PRUDENTE, E.P. **The Limit of Sequential Explotation of a River's Hydraulic Potential**. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 272-285. 2017.

TIAGO FILHO, G. L., STANO JÚNIOR, A., BITENCOURT, V. A. **Hidráulica**. In: Série Energias Renováveis. Itajubá – MG. 1ª Edição. FAPEPE. 2007.

TIAGO FILHO, G. L.; GALHARDO, C. R.; BARBOSA, A. D.; BARROS, R. M.; & SILVA, F. D. **Analysis of Brazilian SHP Policy and its Regulation Scenario**. *Energy Policy*, v. 39, p. 6689-6697, Agosto 2011.

TUCCI, C.E.M, et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª Edição. 4ª reimpressão. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2012.

VALLEJOS, J.; BORTONI, E. **Determinación del Potencial Hidroenergético Utilizando Herramientas SIG: cuenca Del Río Ypané**. *Revista Científica de la UCSA*, v. 2, n° 1. Assunción. June 2015.

VIANA, A. N. C. **Bombas funcionando como turbinas**. Itajubá, MG: Editora ACTA, 2009.

APÊNDICE A – DADOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS CUJOS POTENCIAIS HIDROENERGÉTICOS FORAM PROSPECTADOS

Como mencionado anteriormente, foram escolhidos rios pertencentes ao estado de Minas Gerais, mais precisamente alocados nas Sub - Bacias Hidrográficas 61, 60 e 56. Serão apresentados os estudos dos 18 cursos d'água, que foram Prospectados anteriormente e confirmados com a presença de aproveitamentos em cascata, cada qual, respeitando as características dos locais analisados. Assim, os nomes dos rios foram modificados para uma numeração ordinal a fim de se preservar as informações de prospecção dos potenciais identificados. Logo, apresenta-se para os rios a denominação crescente de Curso d'água I, Curso d'água II, Curso d'água III ...até o Curso d'água XIX.

Segue-se então, os estudos de Prospecção de Potenciais Hidrelétricos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 61. Vale ressaltar que o estudo do Curso d'água I encontra-se no texto e os demais rios da sub-bacia em questão, estão listados a seguir.

Curso d'água II

O rio apresenta 5 afluentes principais analisados, 5 confluências e 5 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 52 e 53, e nas Tabelas 19 e 20.

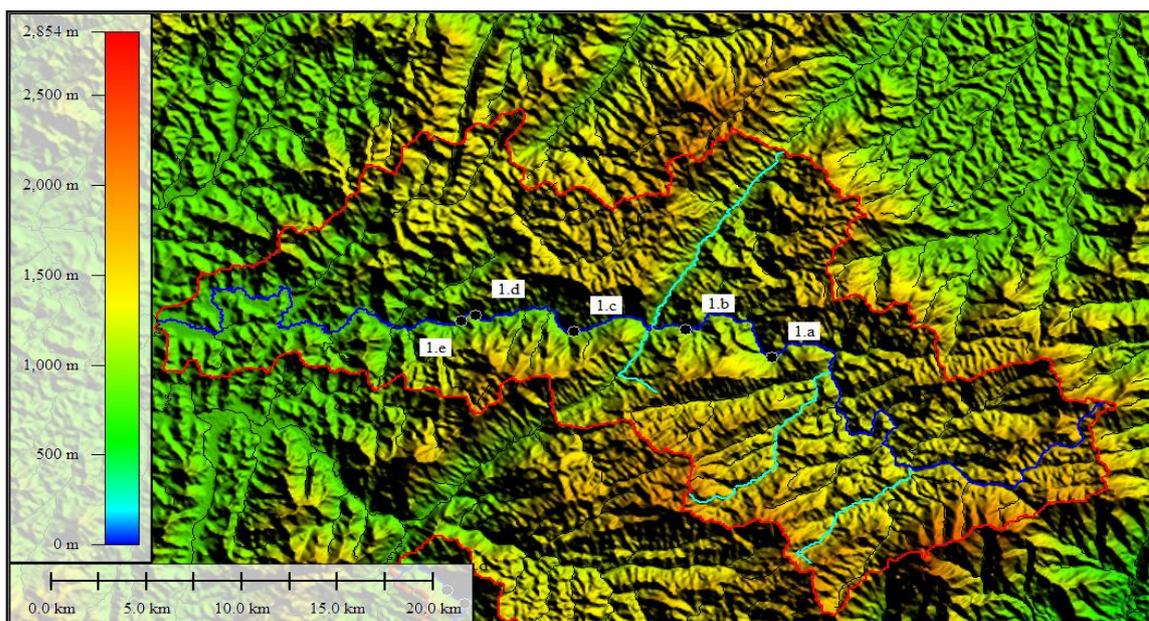


Figura 52: Representação do Curso d'água II com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor.

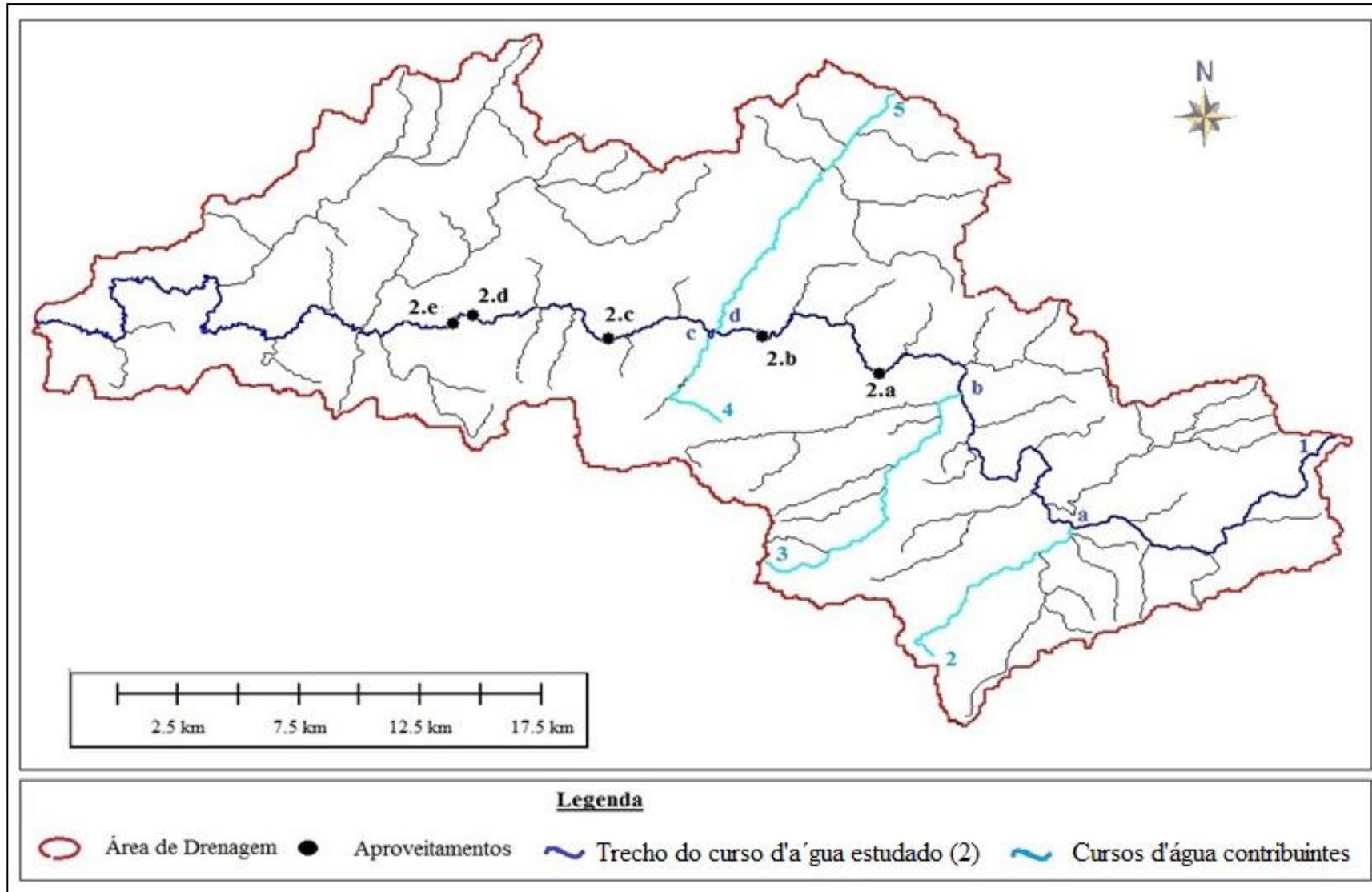


Figura 53: Bacia Hidrográfica do Curso d'água II e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor.

Tabela 19: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água II.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.760,00										
Confluência 1-a		1.268,74	43,0	12,0	1,3	2.288,00	491,26	6.265,04			
Nascente 2	1.737,94										
Confluência 2-a		1.268,74	43,7	9,4	1,19	2.068,15	469,20	5.477,39			
Nascente 3	1.872,75										
Confluência 3-b		1.161,62	61,3	12,4	1,67	3.127,49	711,13	11.650,23			
Nascente 4	1.415,24										
Confluência 4-c		993,39	22,5	7,5	0,61	863,30	421,85	2.524,39			
Nascente 5	1.847,15										
Confluência 5-e		995,58	75,0	14,4	2,04	3.768,19	851,57	17.041,96			
Σ					6,81	12.115,12					
\bar{NA}_{total}	1.779,02										
(2.a)	1.124,00	1.079,00	256,27	33,11	6,54		45		2.887,08	9,00	3.973,05
(2.b)	1.022,80	984,00	287,11	40,57	7,8		38,8		2.968,90	10,50	3.996,59
(2.c)	977,80	913,40	408,29	46,86	9,98		64,4		6.305,00	13,44	8.490,91
(2.d)	894,00	866,00	436,31	54,7	9,99		28		2.744,05	10,00	2.746,80
(2.e)	864,50	853,30	438,12	55,92	10		11,2		1.098,72	11,25	1.236,06
Foz no rio principal		834,00	655,26	89	17		945,02	157.600,92			
Σ								157.600,92	16.003,76		20.443,41

Fonte: Autor.

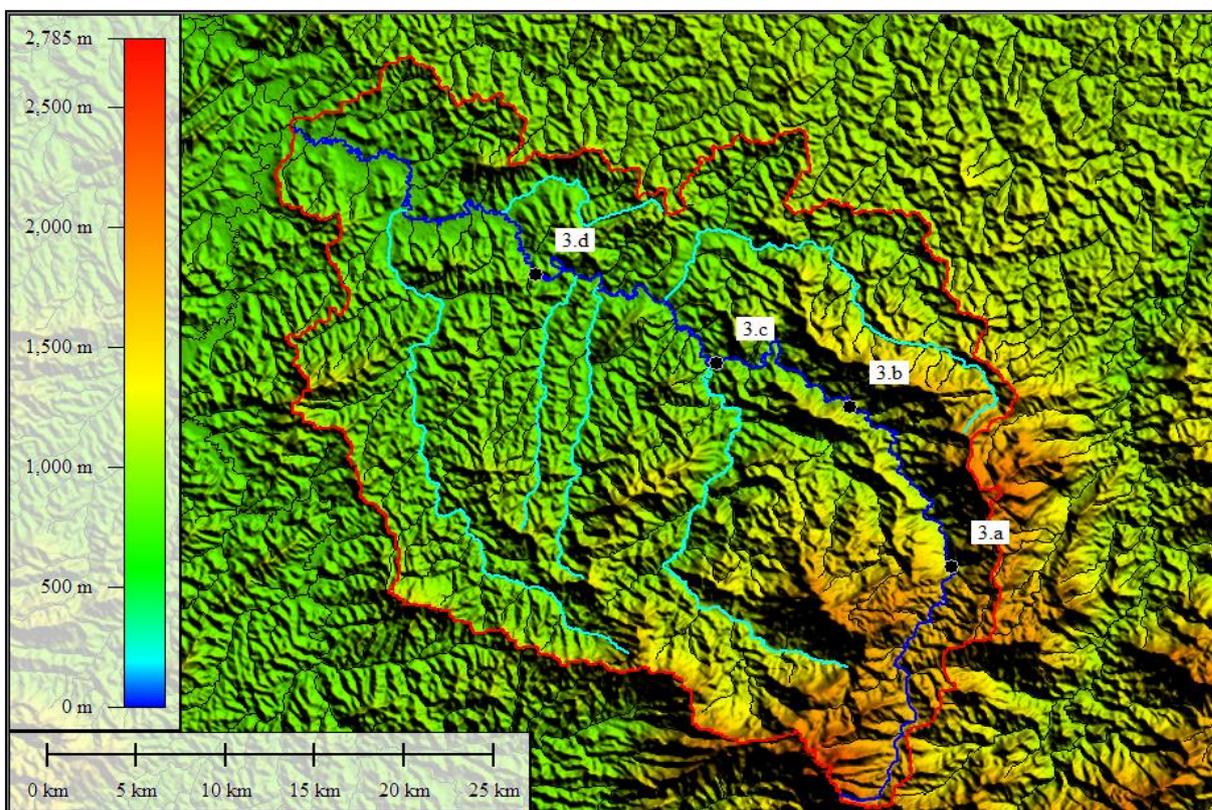
Tabela 20: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água II.

Parâmetros	Curso d'água II
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	157.600,92
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	78.800,46
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	16.003,76
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	20.443,41
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0259
Declividade – I_{BH} (m/km)	10,618
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	2,70
Fator de forma - K_F	0,083
Tempo de Concentração - TC (horas)	12,13
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,102
K_{zbp}	0,130

Fonte: Autor.

Curso d'água III

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 4 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 54 e 55, e nas Tabelas 21 e 22.

**Figura 54:** Representação do Curso d'água III com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

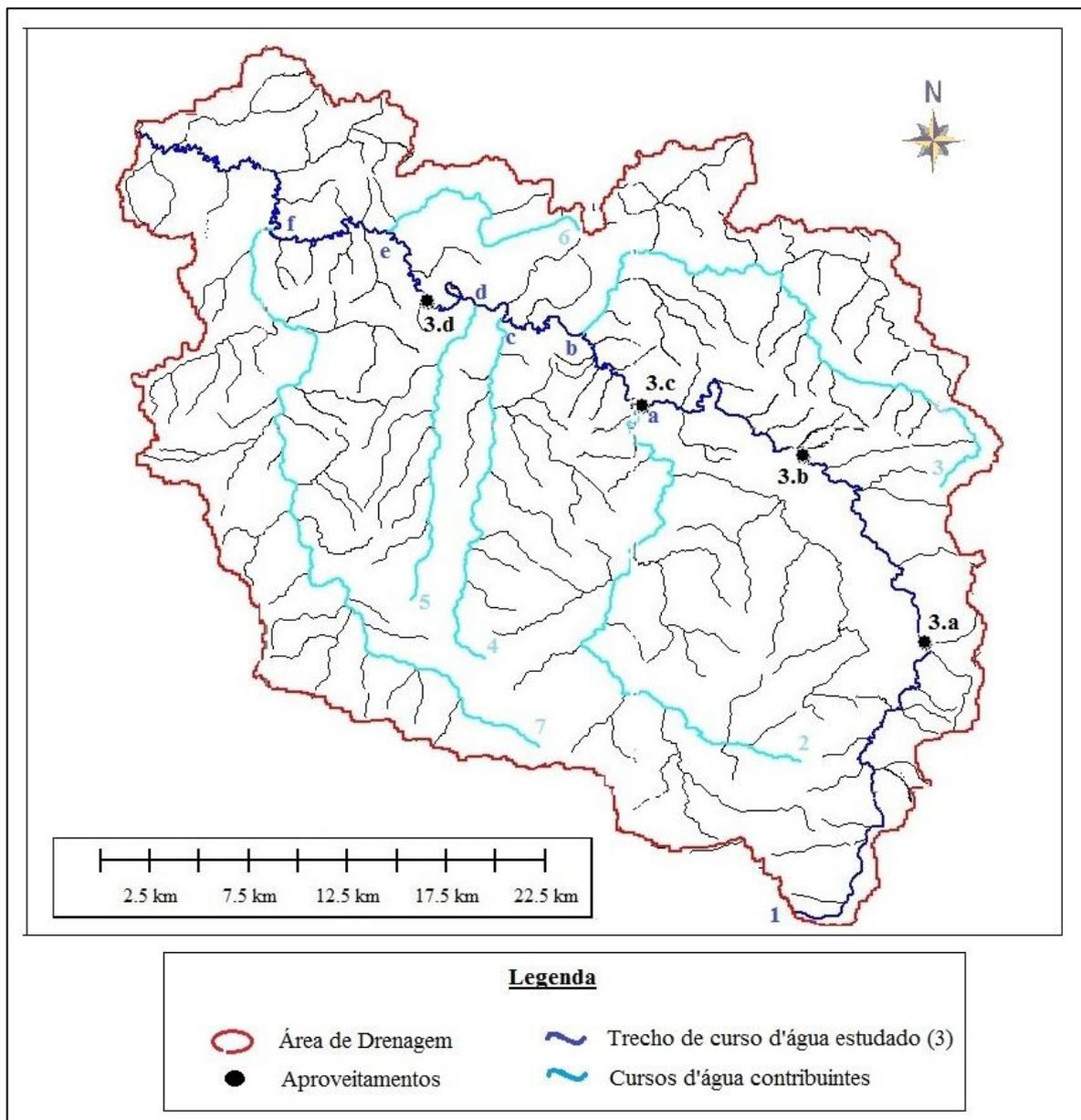


Figura 55: Bacia Hidrográfica do Curso d'água III e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 21: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água III.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	2.050,00										
Confluência 1-a		895,00	175,2	52,2	4,94	10.127,00	1.155,00	55.972,92			
Nascente 2	1.400,00										
Confluência 2-a		895,00	264,4	32,5	7,46	10.444,00	505,00	36.957,21			
Nascente 3	1.750,00										
Confluência 3-b		885,00	160,4	33,7	4,53	7.927,50	865,00	38.439,99			
Nascente 4	1.150,00										
Confluência 4-c		880,00	84,1	20,9	2,37	2.725,50	270,00	6.277,42			
Nascente 5	1.125,00										
Confluência 5-d		875,00	53,0	17,5	1,5	1.687,50	250,00	3.678,75			
Nascente 6	1.080,00										
Confluência 6-e		865,00	32,7	14,3	0,92	993,60	215,00	1.940,42			
Nascente 7	1.255,00										
Confluência 7-f		860,00	217,3	40,8	6,13	7.693,15	395,00	23.753,44			
Σ					27,85	41.598,25					
$\overline{NA}_{\text{max}}$	1.493,65										
(3.a)	1.360,00	1.180,00	74,0	21,5	2,09		180,00		3.690,52	3,22	4.507,00
(3.b)	1.094,00	976,00	133,0	37,5	3,75		118		4.340,93	5,79	5.309,65
(3.c)	914,00	884,00	175,0	51,6	4,94		30		1.453,84	7,62	1.734,25
(3.d)	884,00	868,00	736,0	75,5	20,76		16		3.258,49	24,82	2.994,86
Foz no rio principal		850,00	1.142,20	112,07	32,22		643,65	203.444,84			
Σ								203.444,84	12.743,78		14.545,76

Fonte: Autor.

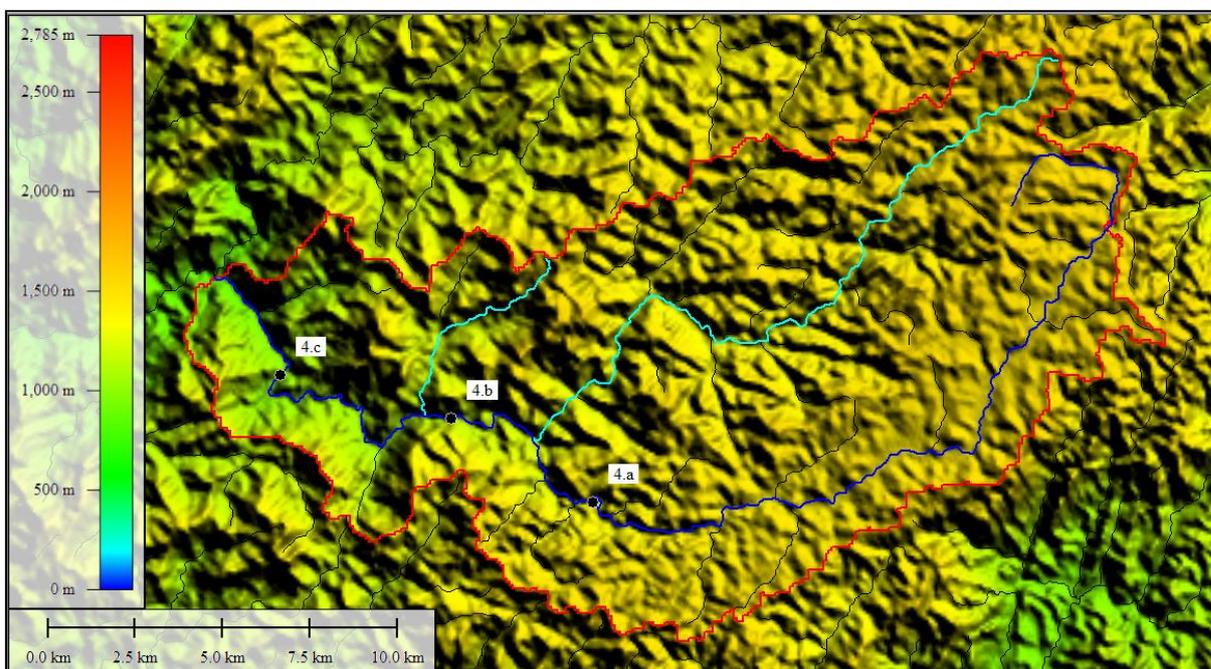
Tabela 22: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água III.

Parâmetros	Curso d'água III
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	203.444,84
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	101.722,42
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	12.743,78
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	14.545,76
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0282
Declividade – I_{BH} (m/km)	5,743
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	1,59
Fator de forma - K_F	0,091
Tempo de Concentração - TC (horas)	18,35
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,063
K_{zbp}	0,071

Fonte: Autor.

Curso d'água IV

O rio apresenta 3 afluentes principais analisados, 2 confluências e 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 56 e 57, e nas Tabelas 23 e 24.

**Figura 56:** Representação do Curso d'água IV com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

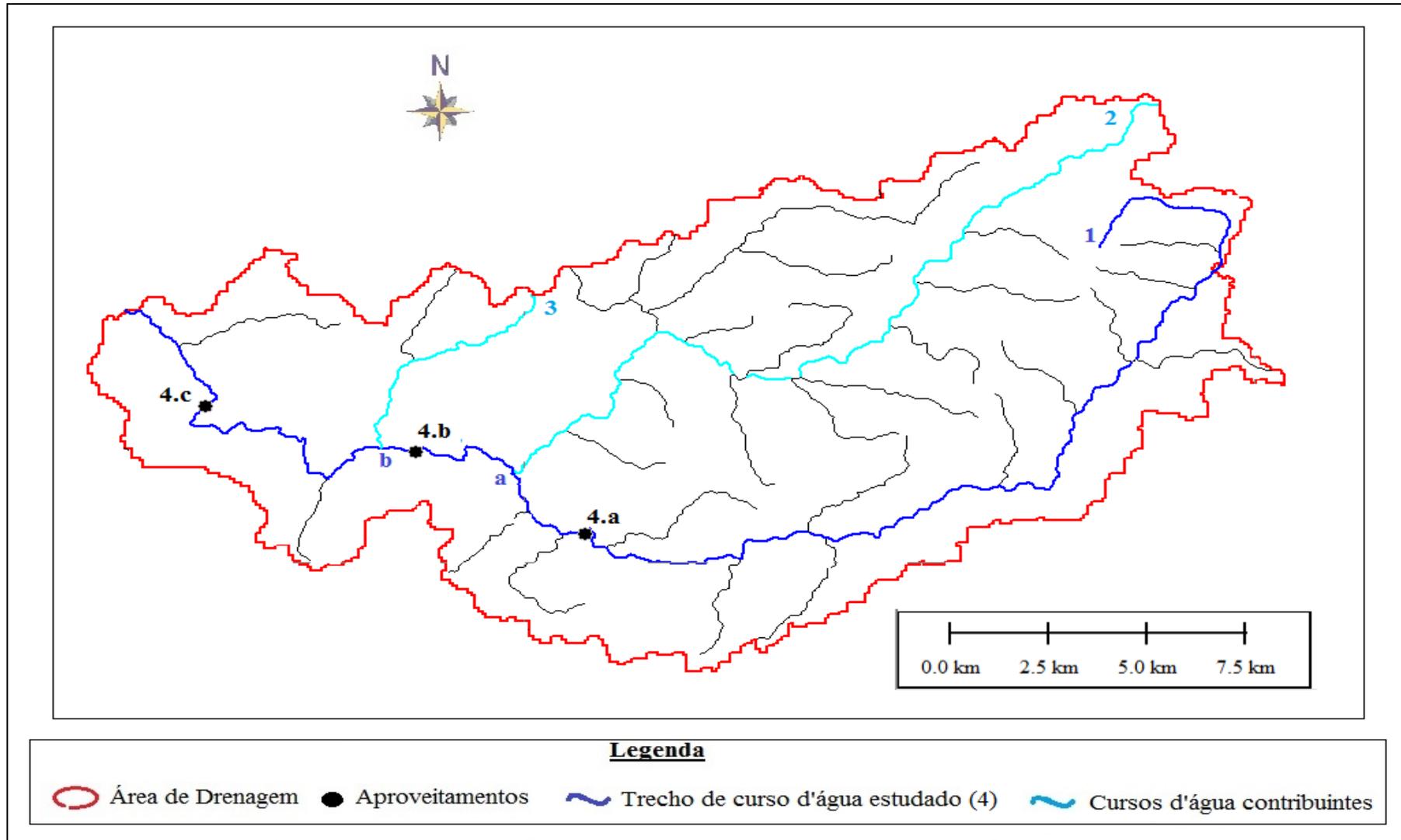


Figura 57: Bacia Hidrográfica do Curso d'água IV e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor.

Tabela 23: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água IV.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.535,00										
Confluência 1-a		1.215,00	80,5	31,3	1,47	2.256,45	320,00	4.614,62			
Nascente 2	1.575,00										
Confluência 2-a		1.215,00	99,2	24,7	1,87	2.945,25	360,00	6.604,09			
Nascente 3	1.485,00										
Confluência 3-b		1.145,00	17,6	7,2	0,25	371,25	340,00	833,85			
Σ					3,59	5.572,95					
\overline{NA}_{nasce}	1.552,35										
(4.a)	1.324,00	1.248,00	97,0	28,0	2,23		76,00		1.662,60	3,61	2.119,89
(4.b)	1.178,00	1.090,00	167,0	34,4	3,83		88		3.306,36	6,22	4.252,97
(4.c)	1.022,00	960,00	205,0	42,8	4,71		62		2.864,72	7,64	3.687,46
Foz no rio principal		910,00	256,4	46,9	5,63		642,35	35.477,39			
Σ								35.477,39	7.833,68		10.060,32

Fonte: Autor.

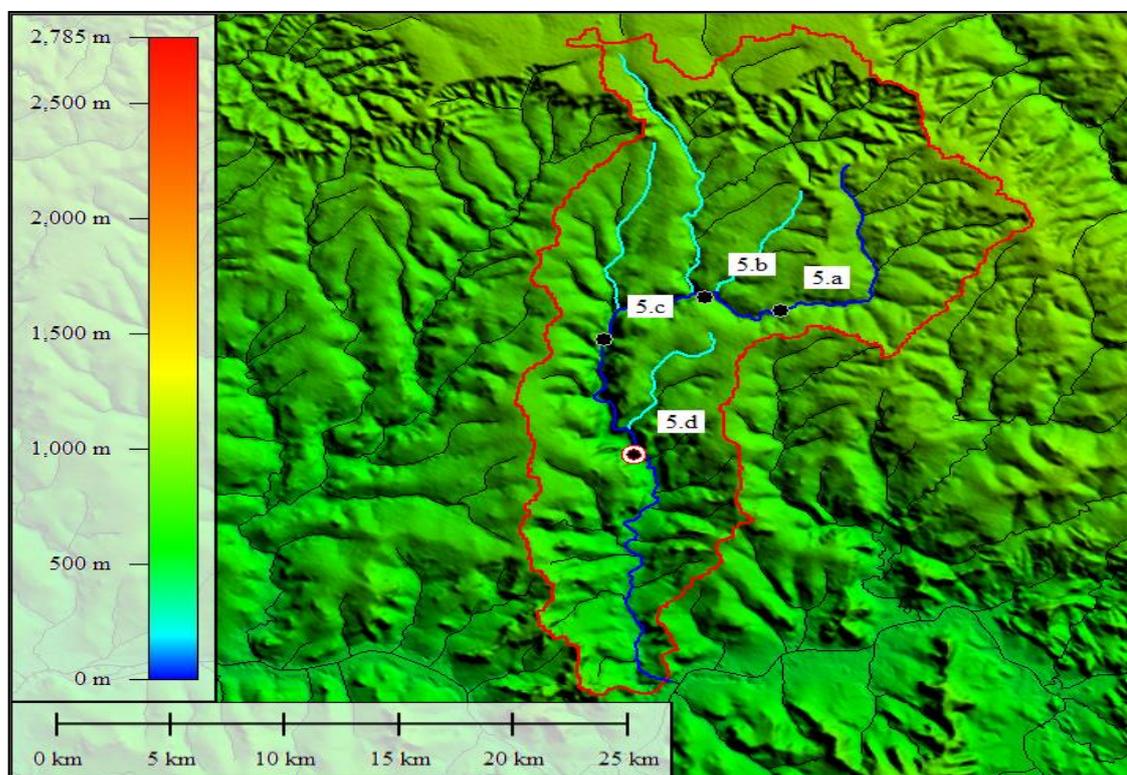
Tabela 24: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água IV.

Parâmetros	Curso d'água IV
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	35.477,39
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	17.738,70
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	7.833,68
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	10.060,32
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0220
Declividade – I_{BH} (m/km)	13,700
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	2,95
Fator de forma - K_F	0,117
Tempo de Concentração - TC (horas)	6,71
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,221
K_{zbp}	0,284

Fonte: Autor.

Curso d'água V

O rio apresenta 4 afluentes principais analisados, 4 confluências e 4 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 58 e 59, e nas Tabelas 25 e 26.

**Figura 58:** Representação do Curso d'água V com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

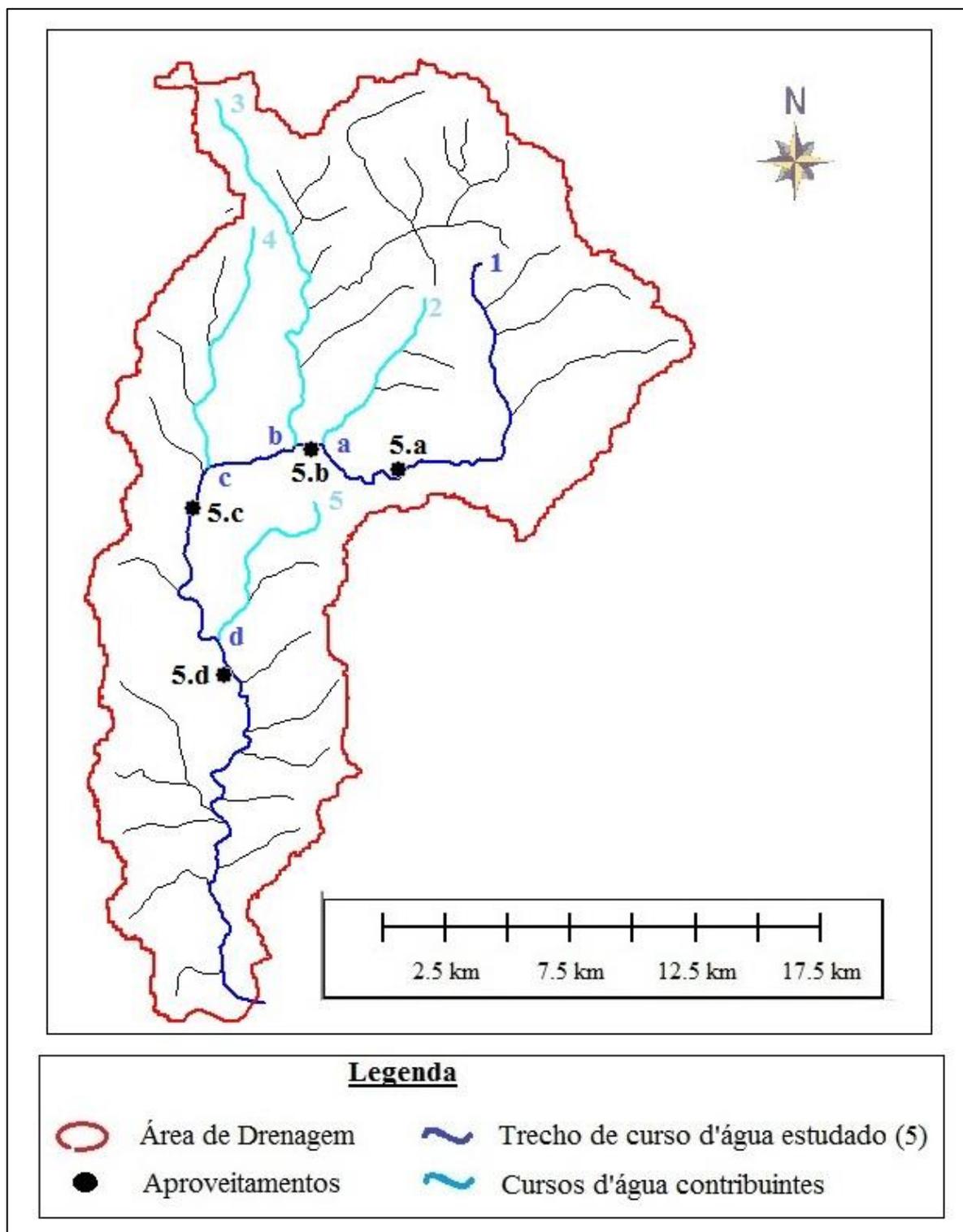


Figura 59: Bacia Hidrográfica do Curso d'água V e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 25: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água V.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.000,00										
Confluência 1-a		775,00	145,0	17,3	2,54	2.540,00	225,00	5.606,42			
Nascente 2	965,00										
Confluência 2-a		755,00	19,2	7,3	0,34	328,10	210,00	700,43			
Nascente 3	1.075,00										
Confluência 3-b		750,00	109,7	16,1	1,92	2.064,00	325,00	6.121,44			
Nascente 4	925,00										
Confluência 3-c		675,00	34,6	10,5	0,61	564,25	250,00	1.496,03			
Nascente 5	850,00										
Confluência 3-d		585,00	24,1	8,3	0,42	357,00	265,00	1.091,85			
Σ					5,83	5.853,35					
\overline{NA}_{nas}	1.004,01										
(5.a)	842	782	137,0	12,7	2,4		60,00		1.412,64	3,43	1.600,31
(5.b)	762	680	165,0	17,773	2,89		82		2.324,77	4,14	2.630,94
(5.c)	660	616	240,0	23,682	4,21		44		1.817,20	6,02	2.033,90
(5.d)	600	552	297,0	32,05	5,21		48		2.453,28	7,45	2.756,75
Foz no rio principal		525	427,4	49,113	7,5		479,01	35.242,80			
Σ								35.242,80	8.007,90		9.021,90

Fonte: Autor

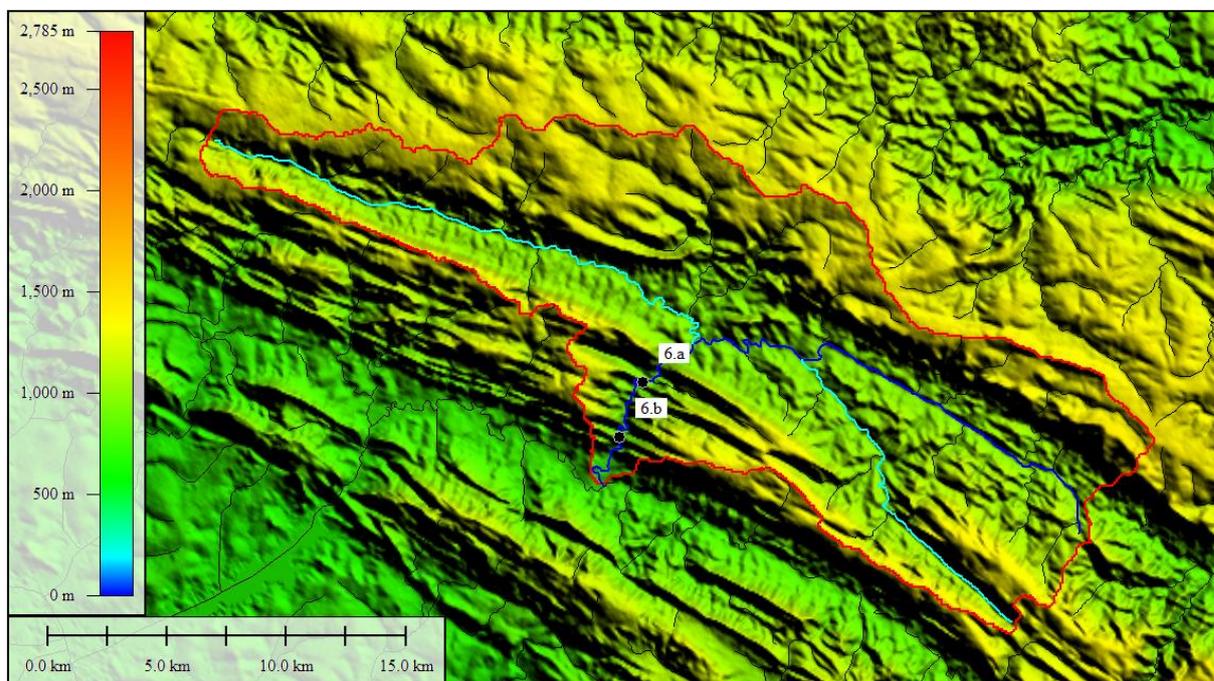
Tabela 26: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água V.

Parâmetros	Curso d'água V
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	35.242,80
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	17.621,40
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	8.007,90
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	9.021,90
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0175
Declividade – I_{BH} (m/km)	9,753
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	1,68
Fator de forma - K_F	0,177
Tempo de Concentração - TC (horas)	7,93
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,227
K_{zbp}	0,256

Fonte: Autor.

Curso d'água VI

O rio apresenta 3 afluentes principais analisados, 2 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 60 e 61, e nas Tabelas 27 e 28.

**Figura 60:** Representação do Curso d'água VI com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

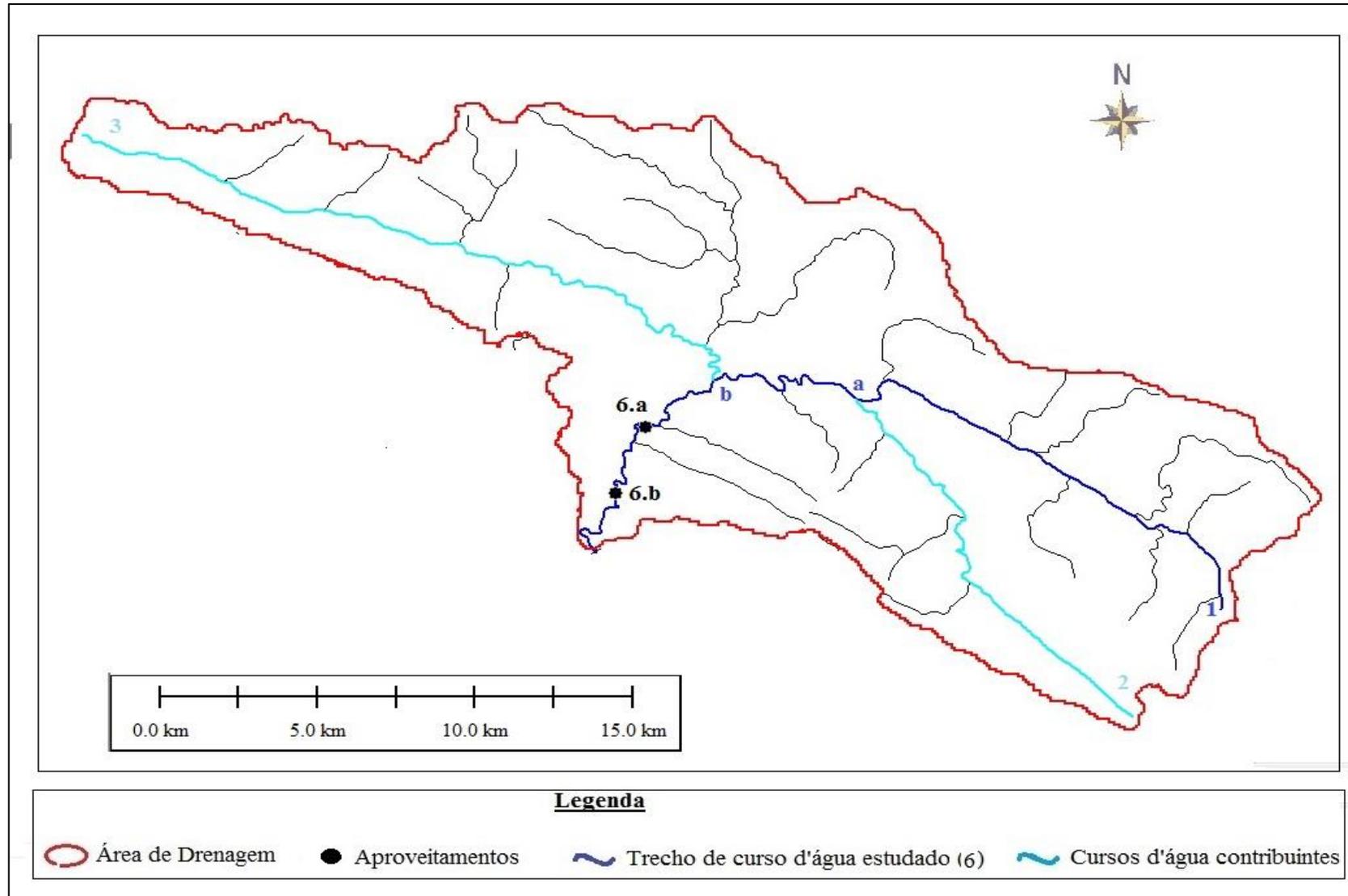


Figura 61: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VI e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor.

Tabela 27: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VI.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.100,00										
Confluência 1-a		970,00	93,9	15,9	2,96	3.256,00	130,00	3.774,89			
Nascente 2	1.210,00										
Confluência 2-a		970,00	48,0	16,0	1,61	1.948,10	240,00	3.790,58			
Nascente 3	1.175,00										
Confluência 3-b		950,00	126,1	25,4	3,86	4.535,50	225,00	8.519,99			
Σ					8,43	9.739,60					
\overline{NA}_{total}	1.155,35										
(6.a)	950,00	916,00	320,0	25,793	8,97		34,00		2.991,85	12,83	3.302,63
(6.b)	862,00	766,00	340,0	29,48	9,48		96		8.927,88	11,23	8.913,56
Foz no rio principal		763,00	344,52	33,02	9,59		392,35	36.911,46			
Σ								36.911,46	11.919,74		12.216,19

Fonte: Autor.

Tabela 28: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VI.

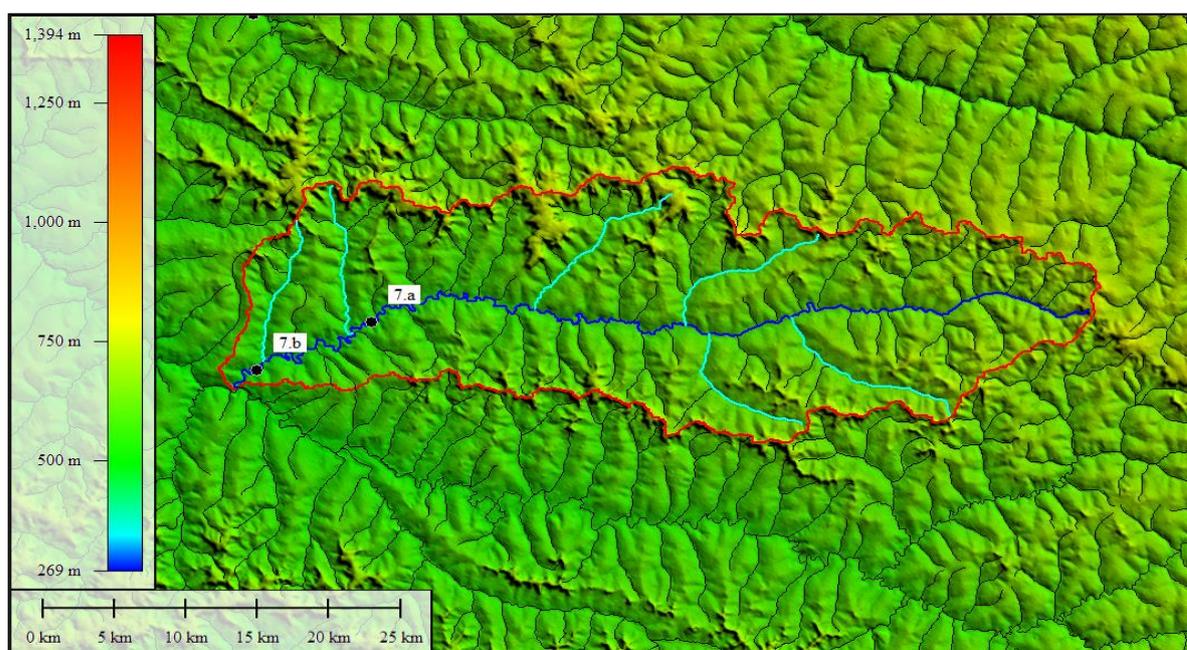
Parâmetros	Curso d'água VI
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	36.911,46
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	18.455,73
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	11.919,74
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	12.216,19
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0278
Declividade – I_{BH} (m/km)	11,884
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	3,25
Fator de forma - K_F	0,316
Tempo de Concentração - TC (horas)	5,41
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,323
K_{zbp}	0,331

Fonte: Autor.

Segue-se então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 60.

Curso d'água VII

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 62 e 63, e nas Tabelas 29 e 30.

**Figura 62:** Representação do Curso d'água VII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

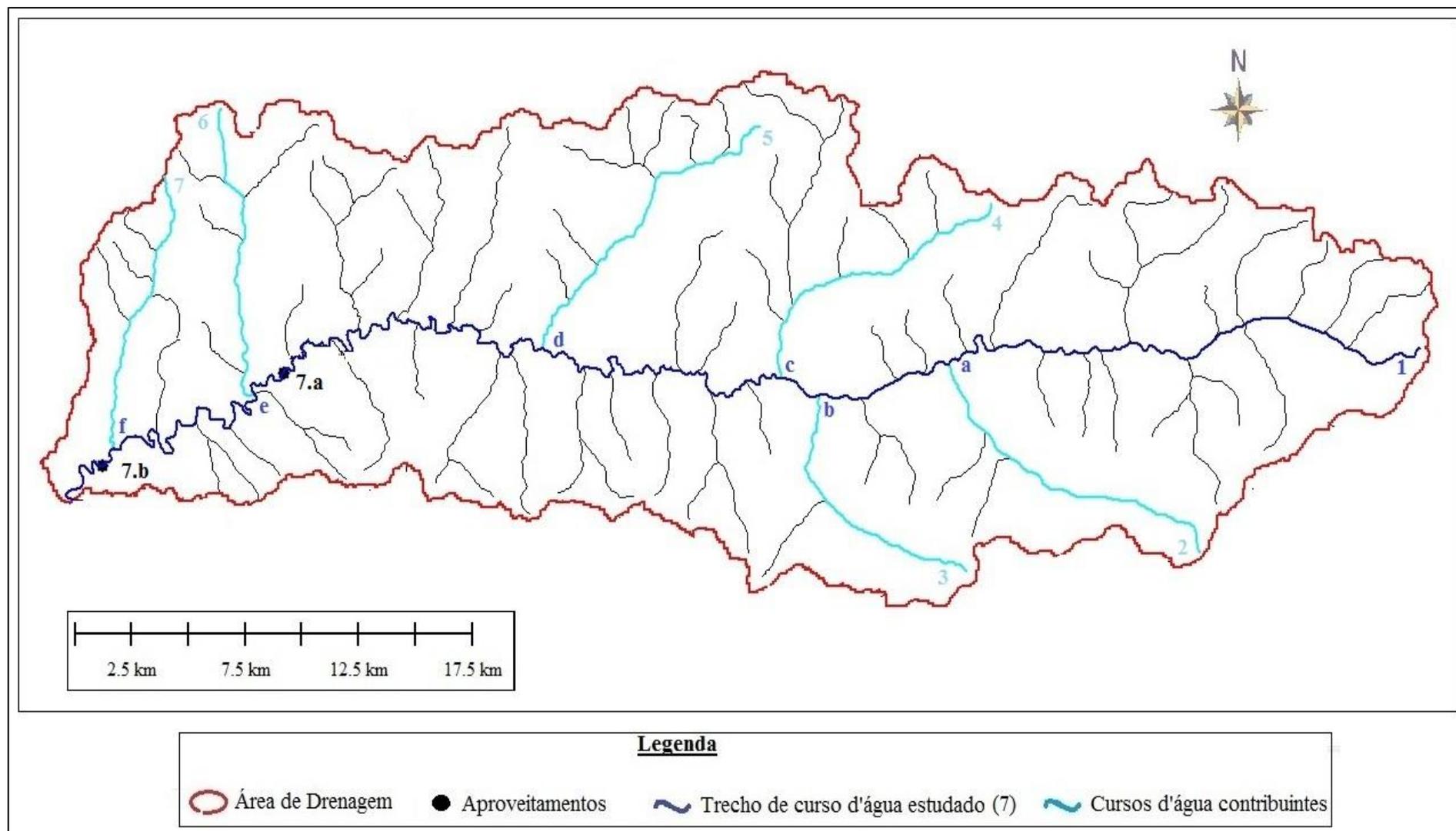


Figura 63: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 29: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	755,00										
Confluência 1-a		600,00	193,2	24,9	3,04	2.291,58	155,00	4.615,17			
Nascente 2	710,00										
Confluência 2-a		600,00	54,4	14,9	0,86	607,26	110,00	922,95			
Nascente 3	665,00										
Confluência 3-b		590,00	44,0	11,8	0,69	459,45	75,00	508,33			
Nascente 4	700,00										
Confluência 4-c		585,00	79,6	13,6	1,25	875,49	115,00	1.410,98			
Nascente 5	750,00										
Confluência 5-d		565,00	61,6	14,9	0,97	726,08	185,00	1.756,96			
Nascente 6	630,00										
Confluência 6-e		540,00	47,0	13,0	0,74	464,75	90,00	651,32			
Nascente 7	625,00										
Confluência 7-f		520,00	37,4	12,3	0,59	367,19	105,00	605,15			
Σ					8,1254	5.791,79					
\overline{NA}_{total}	712,80										
(7.a)	542,00	532,00	716,3	69,08	11,25		10,00		1.103,63	14,92	1.080,18
(7.b)	522,00	510,00	848,5	86,70	13,33		12		1.569,21	18,42	1.629,92
Foz no rio principal		510,00	851,61	90,43	12,17		202,80	24.211,91			
Σ								24.211,91	2.672,83		2.710,10

Fonte: Autor.

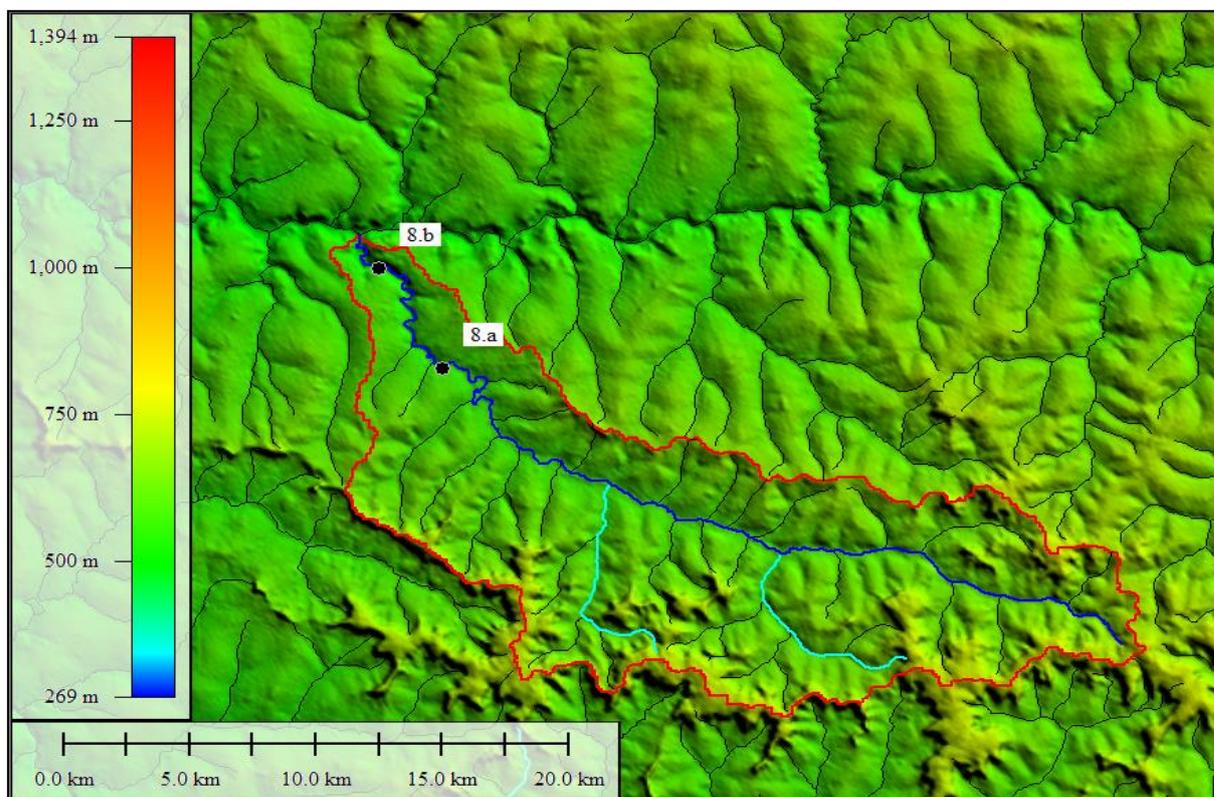
Tabela 30: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VII.

Parâmetros	Curso d'água VII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	24.211,91
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	12.105,96
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	2.672,83
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	2.710,10
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0143
Declividade – I_{BH} (m/km)	2,243
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,31
Fator de forma - K_F	0,104
Tempo de Concentração - TC (horas)	22,34
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,110
K_{zbp}	0,112

Fonte: Autor.

Curso d'água VIII

O rio apresenta 3 afluentes principais analisados, 2 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 64 e 65, e nas Tabelas 31 e 32.

**Figura 64:** Representação do Curso d'água VIII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

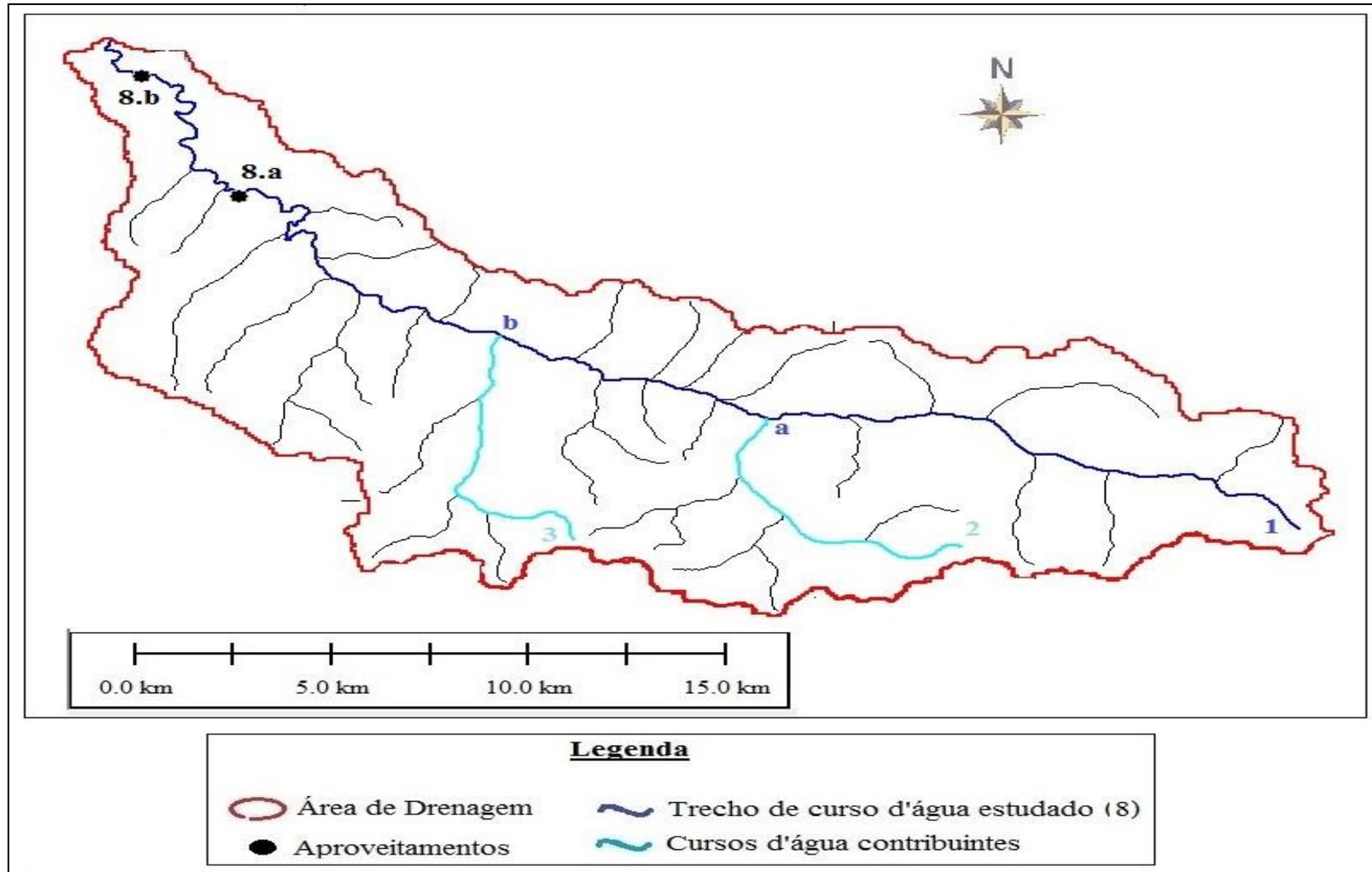


Figura 65: Bacia Hidrográfica do Curso d'água VIII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 31: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água VIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	695,00										
Confluência 1-a		595,00	81,9	15,7	1,29	893,90	100,00	1.261,74			
Nascente 2	725,00										
Confluência 2-a		595,00	39,5	9,5	0,62	449,88	130,00	791,36			
Nascente 3	710,00										
Confluência 3-b		580,00	31,0	10,2	0,49	346,20	130,00	621,85			
Σ					2,39432	1.689,98					
\overline{NA}_{nause}	705,83										
(8.a)	560,00	538,00	268,9	35,76	4,22		22,00		911,72	6,54	1.077,84
(8.b)	528,00	502,00	291,2	43,68	4,57		26		1.166,76	7,08	1.423,82
Foz no rio principal		500,00	295,45	46,25	4,64		205,83	9.372,14			
Σ								9.372,14	2.078,48		2.501,66

Fonte: Autor.

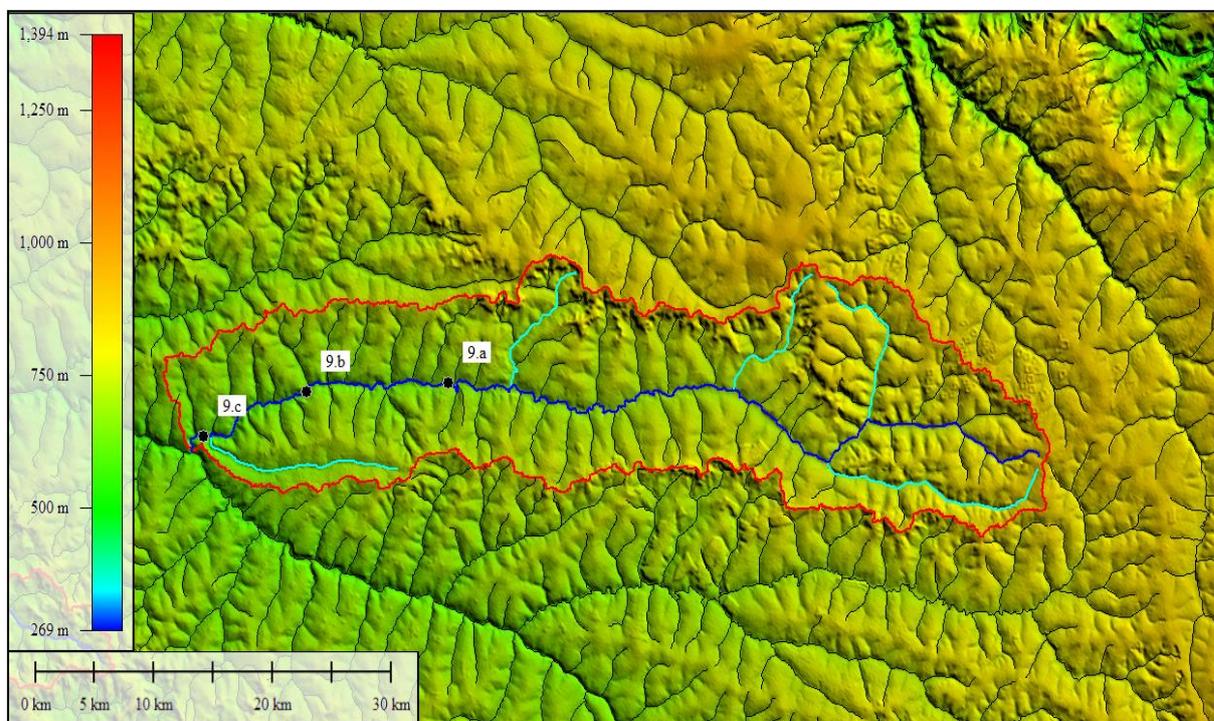
Tabela 32: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água VIII.

Parâmetros	Curso d'água VIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	9.372,14
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	4.686,07
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	2.078,48
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	2.501,66
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0157
Declividade – I_{BH} (m/km)	4,450
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,69
Fator de forma - K_F	0,138
Tempo de Concentração - TC (horas)	10,24
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,222
K_{zbp}	0,267

Fonte: Autor.

Curso d'água IX

O rio apresenta 6 afluentes principais analisados, 5 confluências e 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 66 e 67, e nas Tabelas 33 e 34.

**Figura 66:** Representação do Curso d'água IX com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

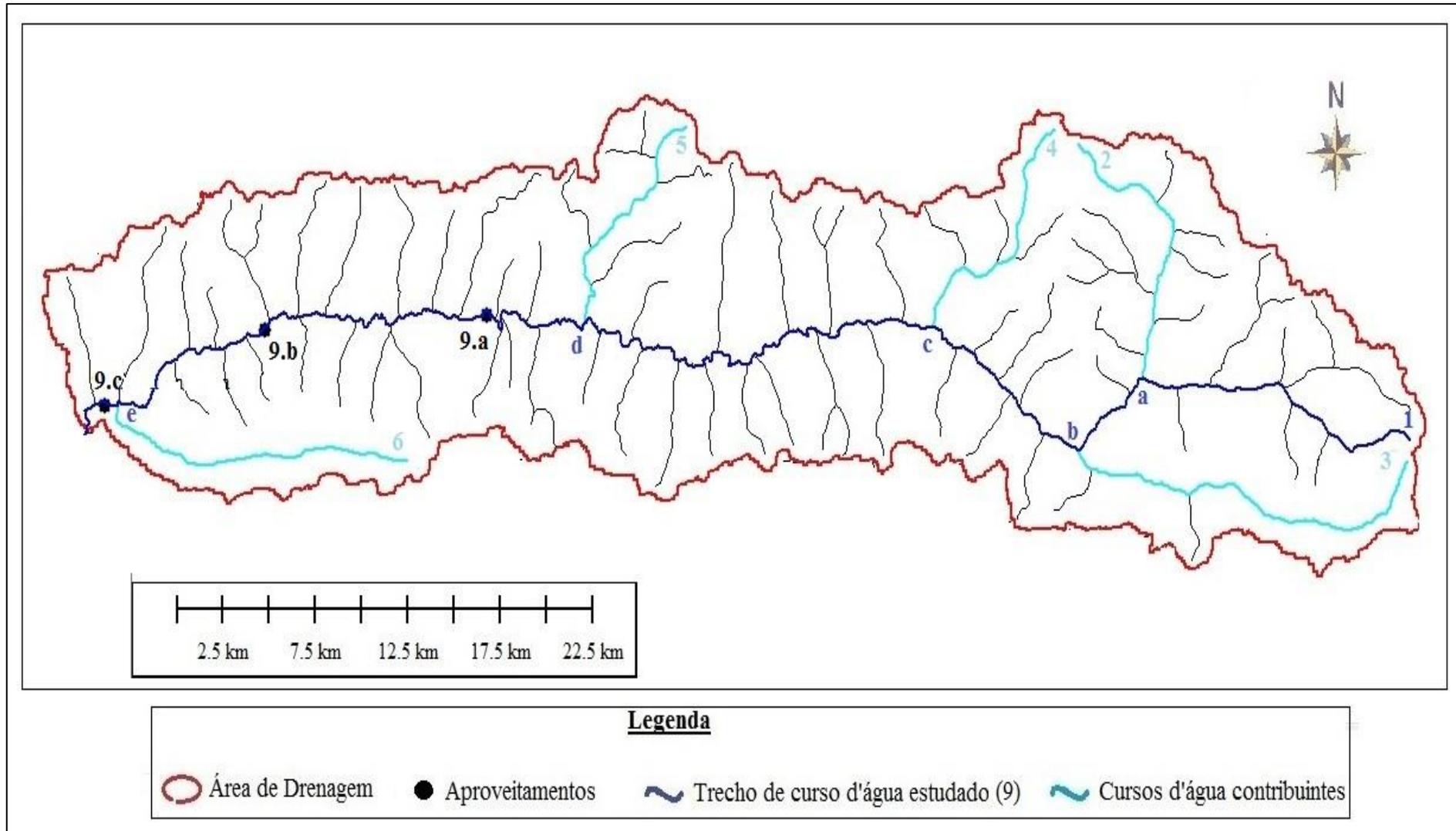


Figura 67: Bacia Hidrográfica do Curso d'água IX e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor.

Tabela 33: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água IX.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	865,00										
Confluência 1-a		735,00	96,3	16,5	1,51	1.308,00	130,00	1.928,43			
Nascente 2	855,00										
Confluência 2-a		735,00	77,1	14,1	1,21	1.036,07	120,00	1.426,51			
Nascente 3	870,00										
Confluência 3-b		730,00	67,3	21,1	1,06	919,94	140,00	1.452,23			
Nascente 4	850,00										
Confluência 4-c		710,00	46,5	13,0	0,73	621,11	140,00	1.003,57			
Nascente 5	765,00										
Confluência 5-d		665,00	54,9	12,4	0,86	659,22	100,00	845,36			
Nascente 6	720,00										
Confluência 6-e		590,00	42,1	17,2	0,66	476,08	130,00	843,25			
Σ					6,03499	5.020,42					
$\overline{NA}_{\text{total}}$	831,89										
(9.a)	662,00	644,00	672,8	64,31	10,57		18,00		1.866,45	13,81	1.888,54
(9.b)	622,00	608,00	819,7	78,83	12,88		14		1.768,94	17,65	1.845,74
(9.c)	594,00	580,00	927,5	90,28	14,57		14		2.001,04	20,51	2.144,83
Foz no rio principal		575,00	940,7	92,66	14,7784		256,89	37.242,36			
Σ								37.242,36	5.636,43		5.879,11

Fonte: Autor.

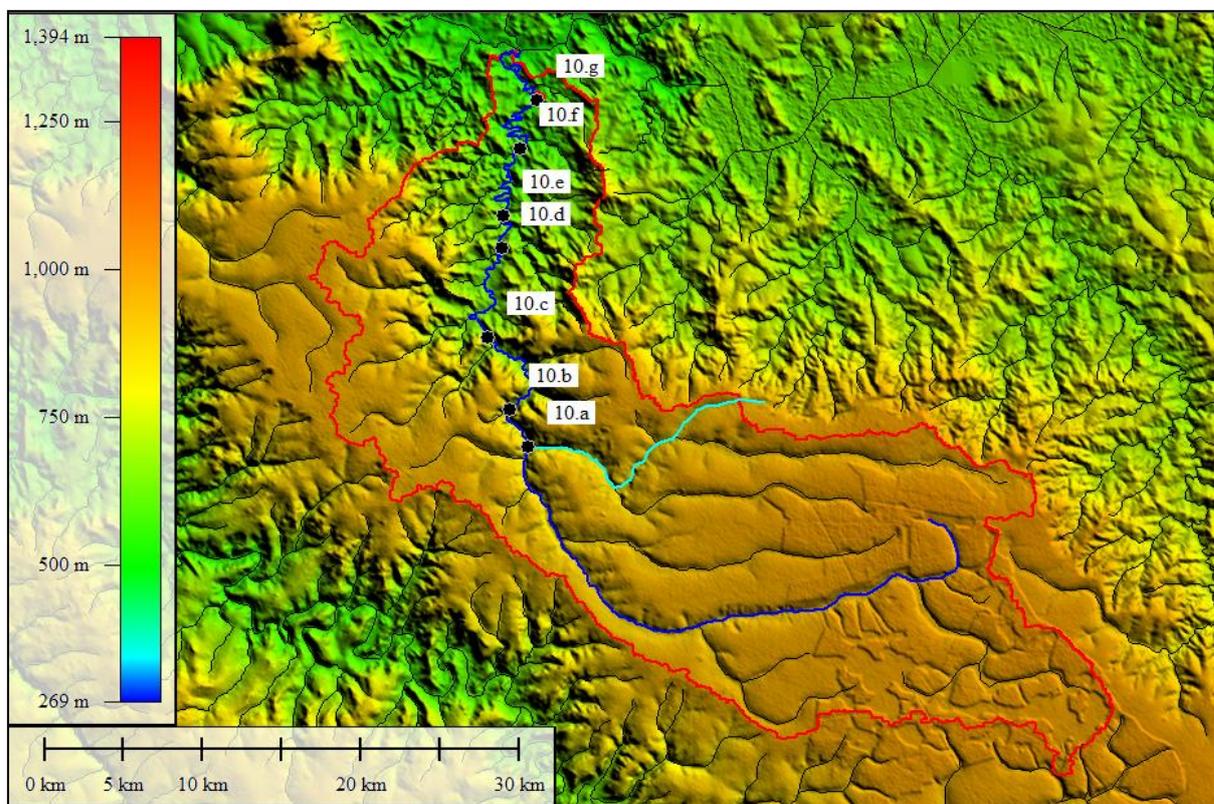
Tabela 34: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água IX.

Parâmetros	Curso d'água IX
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	37.242,36
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	18.621,18
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	5.636,43
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	5.879,11
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0157
Declividade – I_{BH} (m/km)	2,772
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,43
Fator de forma - K_F	0,110
Tempo de Concentração - TC (horas)	20,98
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,151
K_{zbp}	0,158

Fonte: Autor.

Curso d'água X

O rio apresenta 2 afluentes principais analisados, 1 confluências e 7 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 68 e 69, e nas Tabelas 35 e 36.

**Figura 68:** Representação do Curso d'água X com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

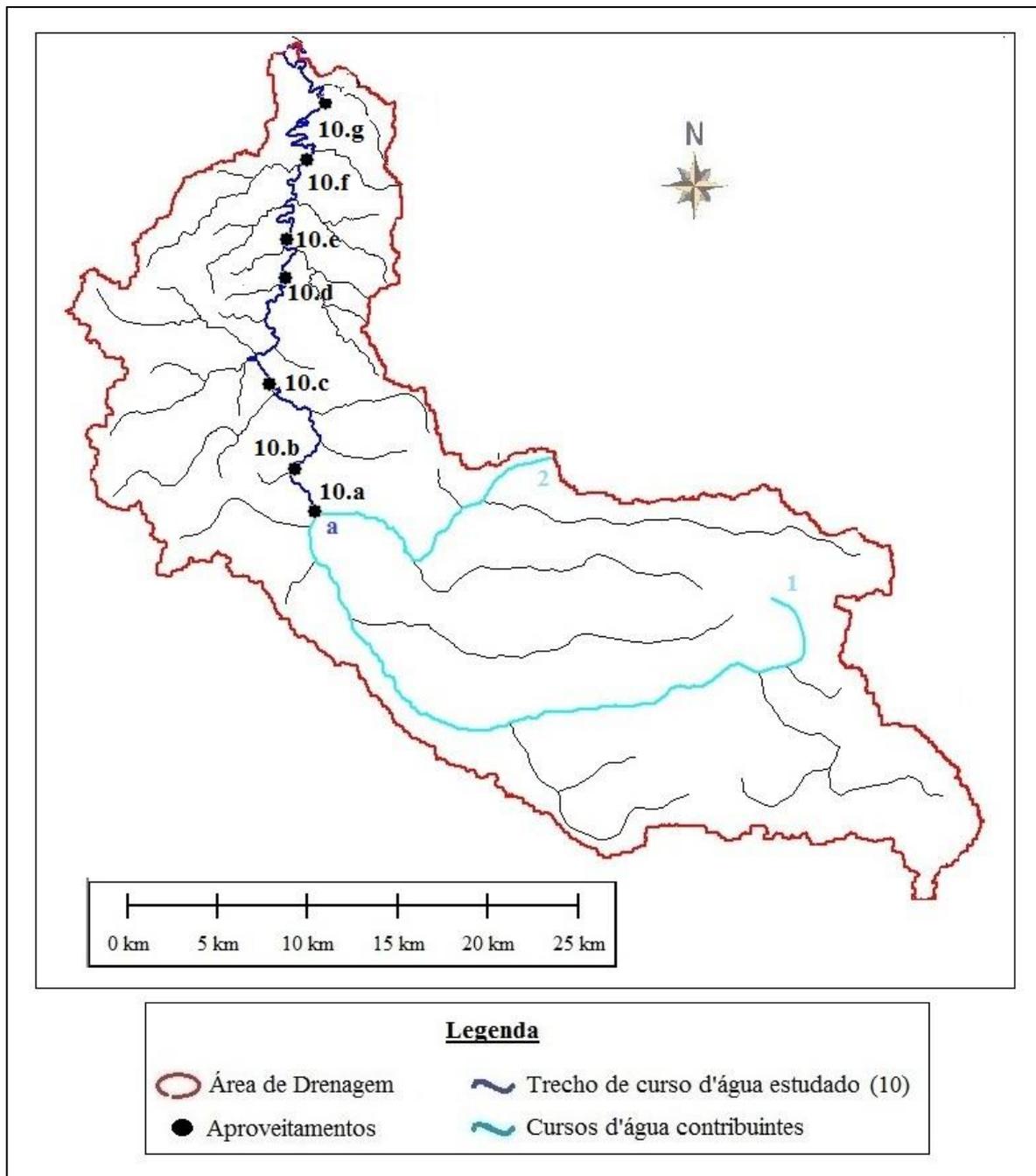


Figura 69: Bacia Hidrográfica do Curso d'água X e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 35: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água X.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	980,00										
Confluência 1-a		760,00	418,6	41,4	6,81	6.673,21	220,00	14.696,05			
Nascente 2	930,00										
Confluência 2-a		760,00	183,8	19,0	2,99	2.780,89	170,00	4.986,76			
Σ					9,7996	9.454,10					
\overline{NA}_{nause}	964,74										
(10.a)	762,00	736,00	608,2	41,6	9,89		26,00		2.522,54	14,43	2.901,95
(10.b)	724,00	688,00	617,4	44,7	10,04		36,00		3.545,73	14,64	4.004,08
(10.c)	676,00	642,00	703,8	52,8	11,45		34,00		3.819,03	16,89	4.296,25
(10.d)	634,00	620,00	798,3	63,0	12,99		14		1.784,05	18,94	1.980,64
(10.e)	614,00	588,00	826,9	66,7	13,45		26		3.430,56	19,62	3.945,68
(10.f)	578,00	564,00	897,5	75,1	14,6		14		2.005,16	21,29	2.226,39
(10.g)	550,00	536,00	954,2	84,7	15,03		14		2.064,22	21,92	2.292,28
Foz no rio principal		530,00	932,84	93,7	15,18		434,74	64.720,09			
Σ								64.720,09	19.171,29		21.647,27

Fonte: Autor.

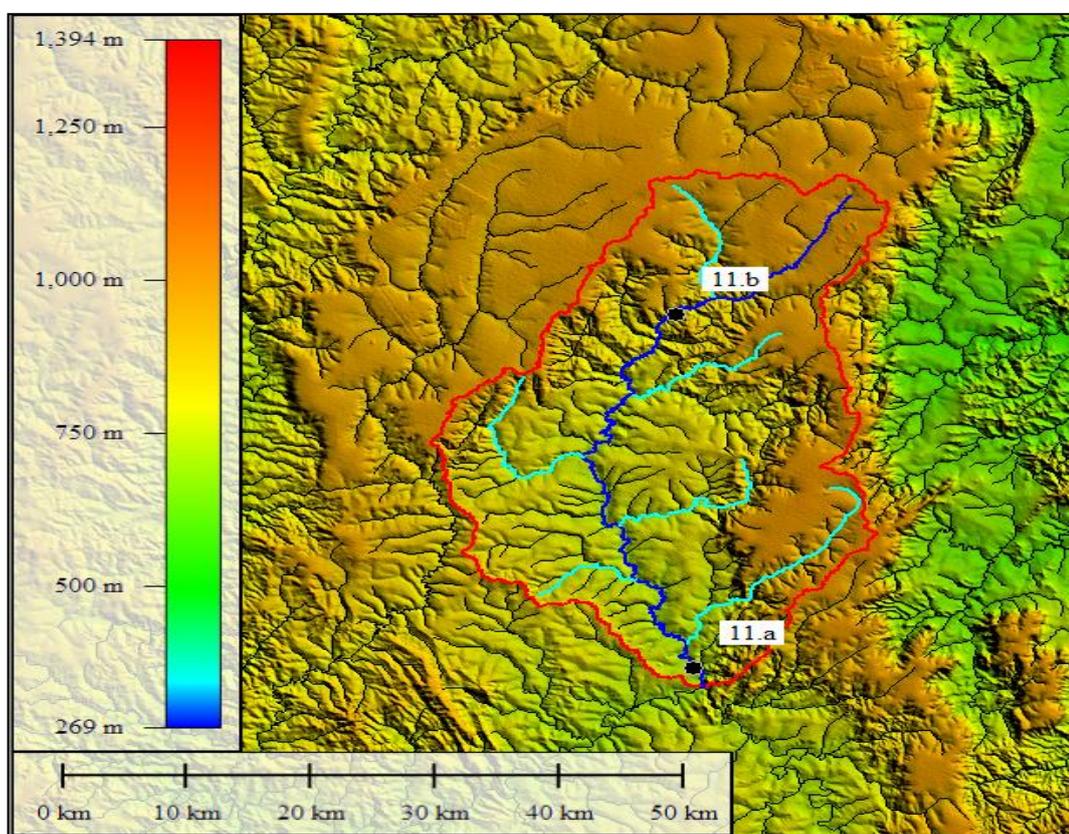
Tabela 36: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água X.

Parâmetros	Curso d'água X
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	64.720,09
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	32.360,05
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	19.171,29
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	21.647,27
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0163
Declividade – I_{BH} (m/km)	4,642
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,74
Fator de forma - K_F	0,106
Tempo de Concentração - TC (horas)	17,34
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,296
K_{zbp}	0,334

Fonte: Autor.

Curso d'água XI

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 70 e 71, e nas Tabelas 37 e 38.

**Figura 70:** Representação do Curso d'água XI com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

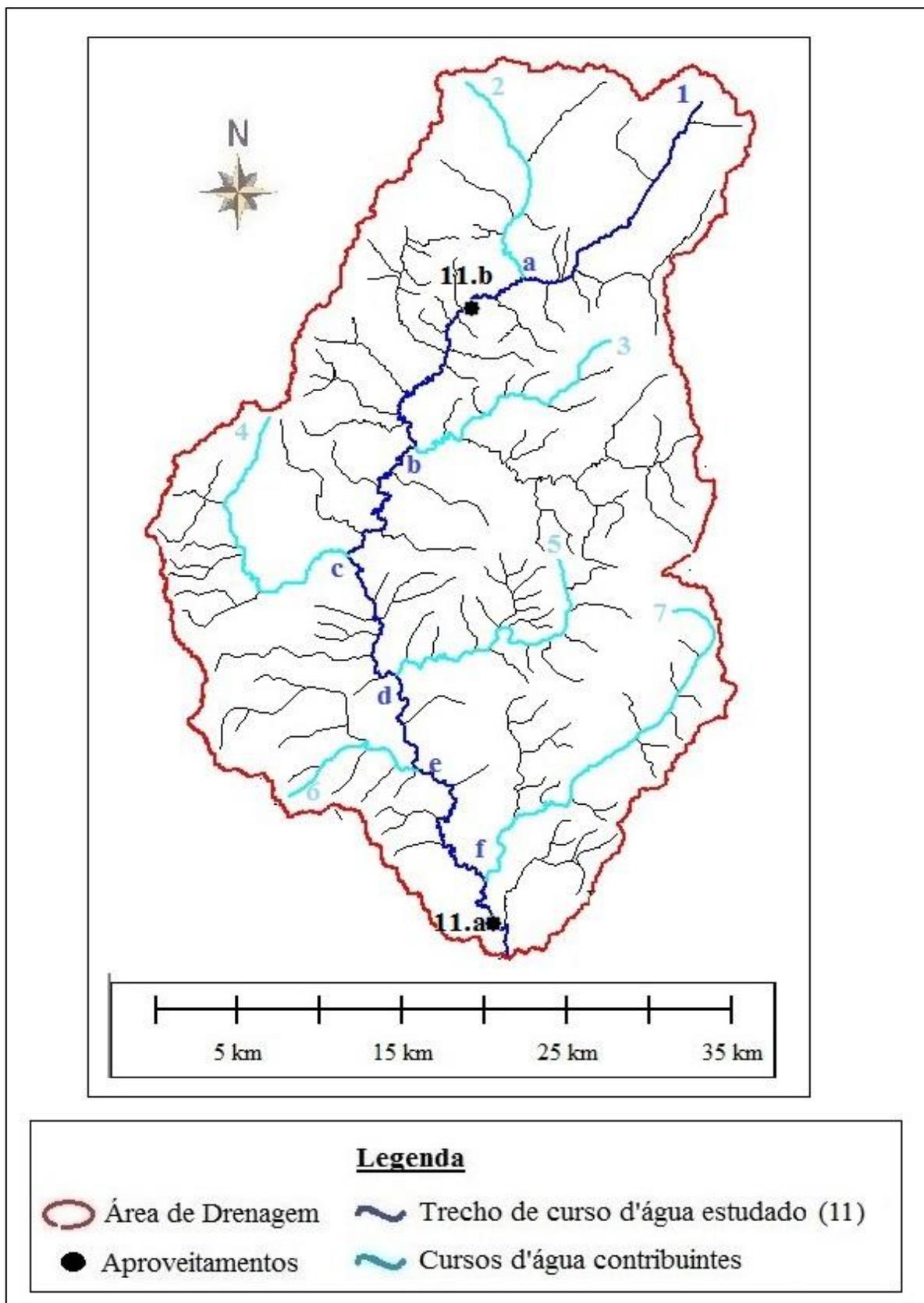


Figura 71: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XI e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 37: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XI.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	960,00										
Confluência 1-a		815,00	135,5	19,5	2,02	1.940,71	145,00	2.875,58			
Nascente 2	985,00										
Confluência 2-a		815,00	119,0	15,7	1,77	1.748,05	170,00	2.959,62			
Nascente 3	970,00										
Confluência 3-b		740,00	184,7	18,1	2,75	2.672,16	230,00	6.215,66			
Nascente 4	935,00										
Confluência 4-b		730,00	100,5	20,9	1,50	1.402,25	205,00	3.016,03			
Nascente 5	865,00										
Confluência 5-b		725,00	109,5	19,9	1,63	1.412,89	140,00	2.243,31			
Nascente 6	825,00										
Confluência 6-b		720,00	81,4	10,9	1,21	1.001,80	105,00	1.250,79			
Nascente 7	980,00										
Confluência 7-b		710,00	142,6	27,9	2,13	2.085,37	270,00	5.636,25			
Σ					13,0264	12.263,22					
\overline{NA}_{total}	941,41										
(11.b)	812,00	776,00	279,4	25,4	4,17		36,00		1.472,68	5,90	1.613,67
(11.a)	714,00	706,00	1.303,0	93,2	19,44		8		1.525,65	27,54	1.550,76
Foz no rio principal		700,00	1.322,3	96,65	19,73		241,41	46.717,25			
Σ								46.717,25	2.998,33		3.164,43

Fonte: Autor.

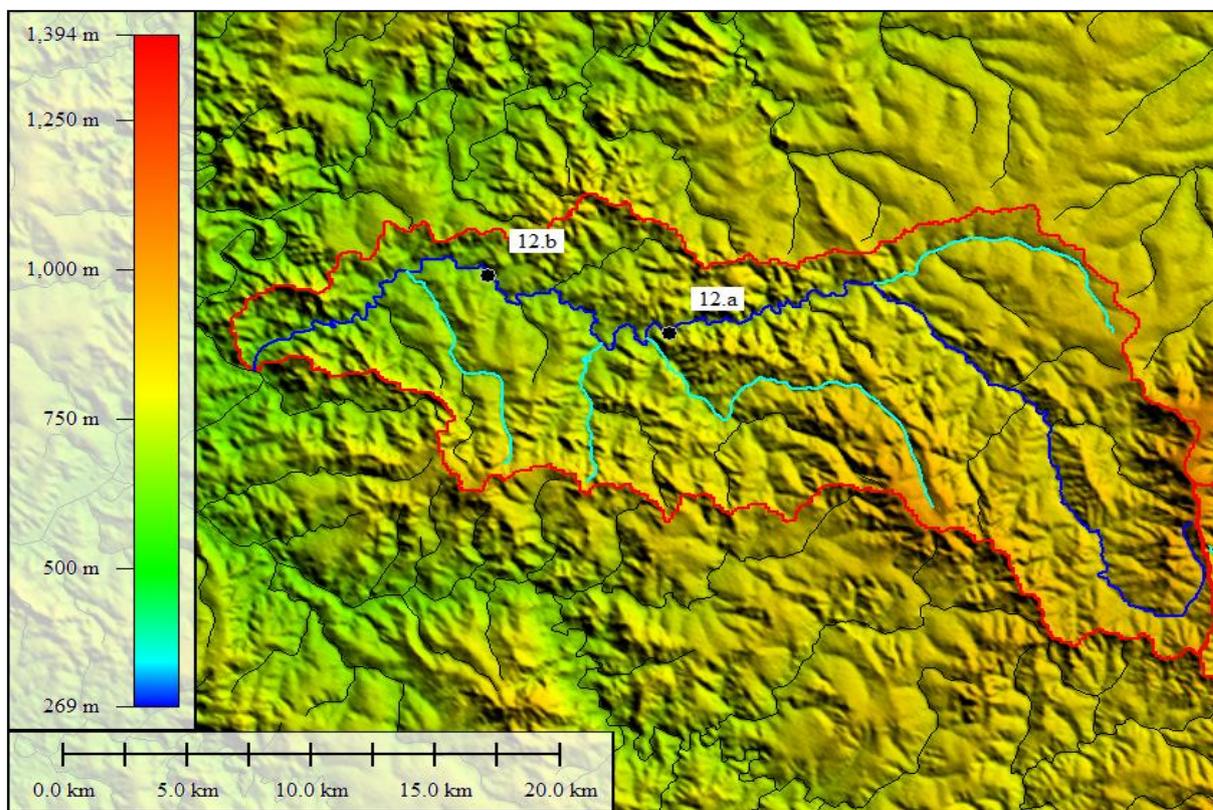
Tabela 38: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XI.

Parâmetros	Curso d'água XI
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	46.717,25
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	23.358,62
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	2.998,33
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	3.164,43
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0149
Declividade – I_{BH} (m/km)	2,498
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,37
Fator de forma - K_F	0,142
Tempo de Concentração - TC (horas)	22,56
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,064
K_{zbp}	0,068

Fonte: Autor.

Curso d'água XII

O rio apresenta 5 afluentes principais analisados, 4 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 72 e 73, e nas Tabelas 39 e 40.

**Figura 72:** Representação do Curso d'água XII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

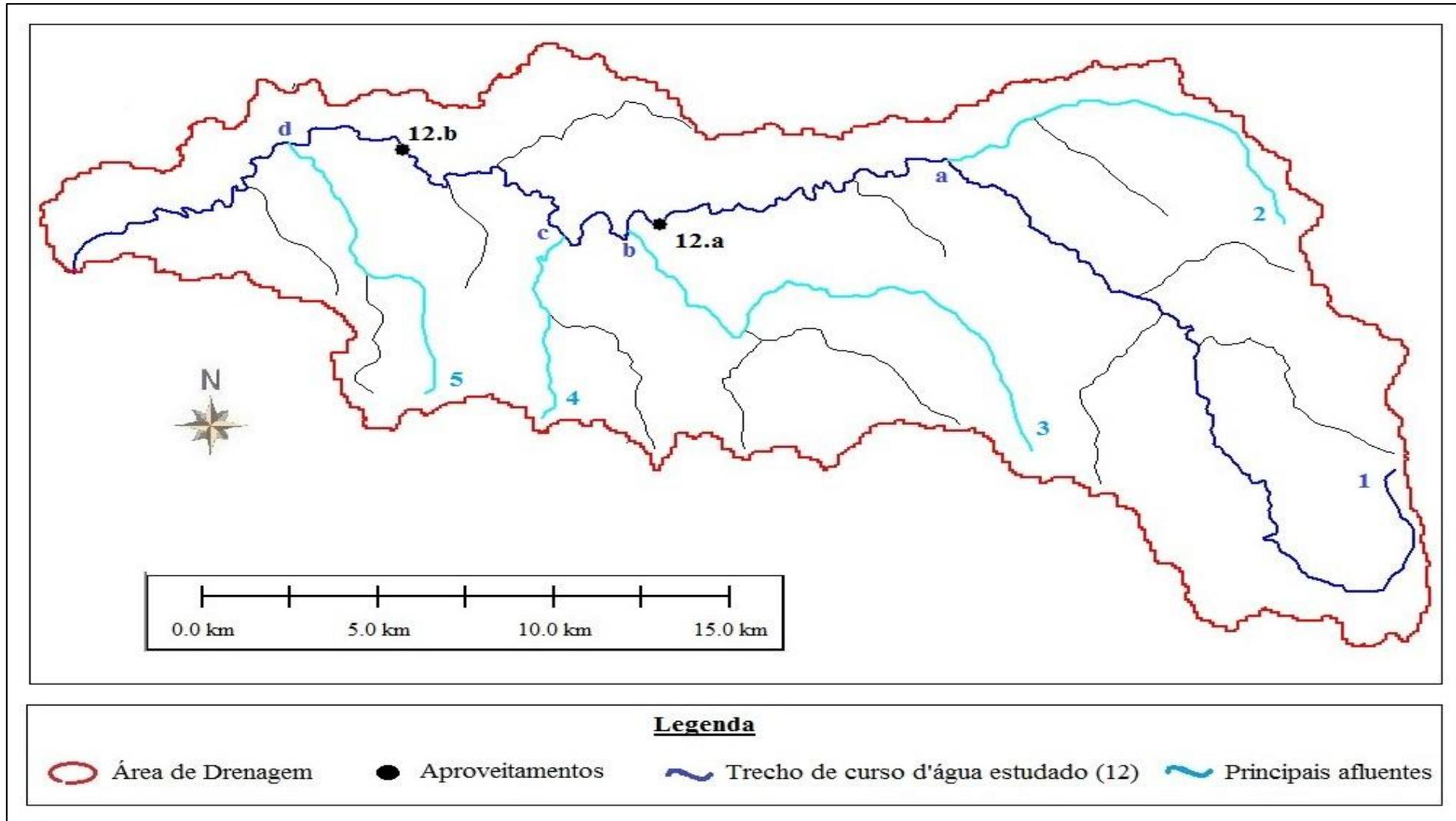


Figura 73: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XII e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor.

Tabela 39: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.000,00										
Confluência 1-a		760,00	139,2	29,1	2,42	2.419,79	240,00	5.697,15			
Nascente 2	865,00										
Confluência 2-a		760,00	40,6	13,1	0,71	610,67	105,00	727,19			
Nascente 3	960,00										
Confluência 3-b		715,00	66,1	18,8	1,15	1.103,90	245,00	2.763,73			
Nascente 4	840,00										
Confluência 4-c		705,00	30,5	7,6	0,53	445,15	135,00	701,83			
Nascente 5	865,00										
Confluência 5-d		660,00	22,9	11,4	0,40	344,75	205,00	801,52			
Σ					5,20417	4.924,27					
\bar{NA}_{max}	946,22										
(12.a)	744,00	706,00	276,1	41,2	4,80		38,00		1.789,34	6,41	1.856,28
(12.b)	686,00	668,00	367,6	55,5	6,39		18		1.128,35	8,54	1.167,86
Foz no rio principal		640,00	433,29	71,2	7,53		306,22	22.629,63			
Σ								22.629,63	2.917,69		3.024,14

Fonte: Autor.

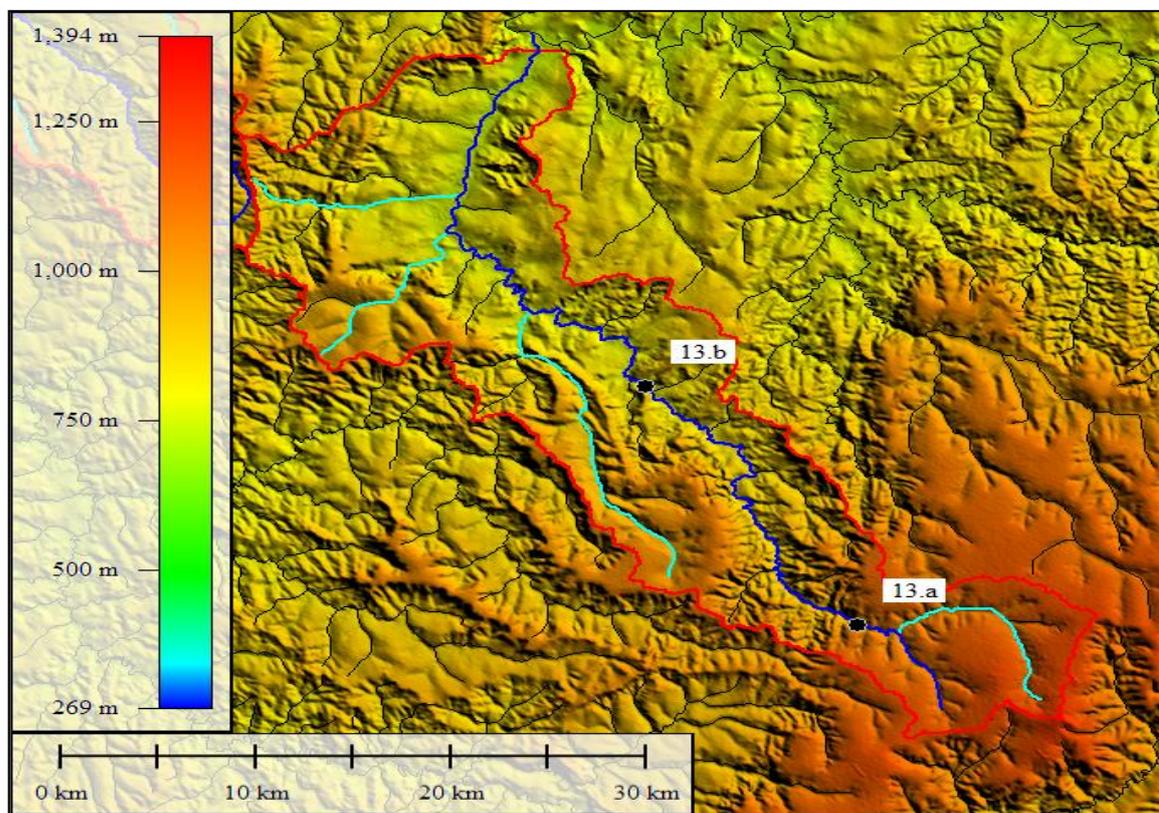
Tabela 40: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XII.

Parâmetros	Curso d'água XII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	22.629,63
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	11.314,81
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	2.917,69
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	3.024,14
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0174
Declividade – I_{BH} (m/km)	4,302
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,73
Fator de forma - K_F	0,086
Tempo de Concentração - TC (horas)	14,46
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,129
K_{zbp}	0,134

Fonte: Autor.

Curso d'água XIII

O rio apresenta 5 afluentes principais analisados, 4 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 74 e 75, e nas Tabelas 41 e 42.

**Figura 74:** Representação do Curso d'água XIII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

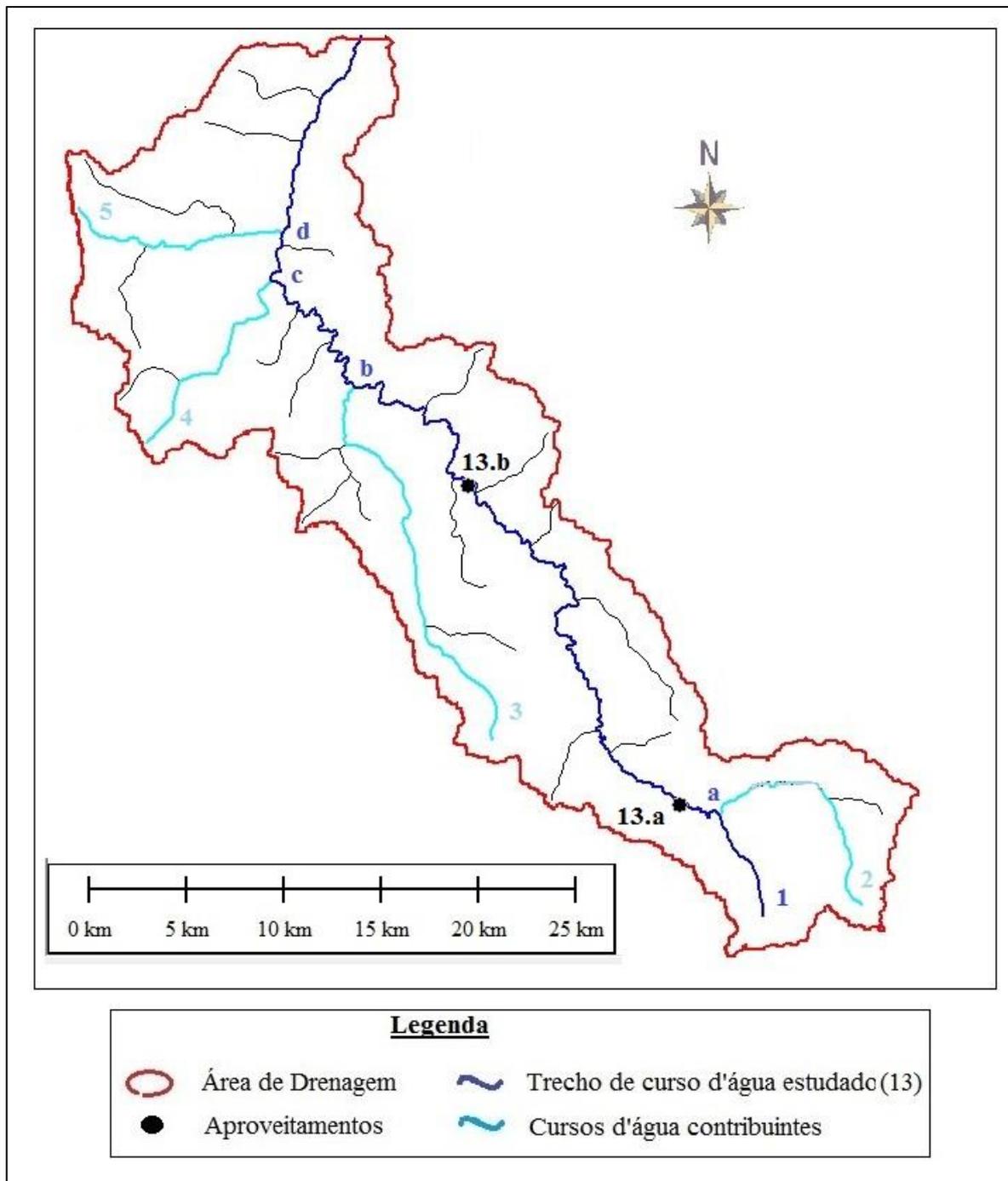


Figura 75: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 41: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.095,00										
Confluência 1-a		1.035,00	86,7	6,0	1,56	1.713,31	60,00	920,96			
Nascente 2	1.170,00										
Confluência 2-a		1.035,00	56,5	13,1	1,02	1.193,82	135,00	1.351,31			
Nascente 3	995,00										
Confluência 3-b		775,00	90,9	22,6	1,64	1.631,14	220,00	3.538,02			
Nascente 4	950,00										
Confluência 4-c		760,00	47,2	12,4	0,85	809,22	190,00	1.587,69			
Nascente 5	925,00										
Confluência 5-d		755,00	72,1	12,4	1,30	1.202,68	170,00	2.168,33			
Σ					6,38	6.550,17					
\bar{NA}_{nas}	1.027,26										
(13.a)	1.014,00	952,00	91,7	8,83	1,66		62,00		1.009,65	2,63	1.238,41
(13.b)	824,00	788,00	235,7	36,78	4,25		36		1.500,93	6,76	1.848,88
Foz no rio principal		750,00	647,79	77,57	11,69		277,26	31.792,86			
Σ								31.792,86	2.510,58		3.087,29

Fonte: Autor.

Tabela 42: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIII.

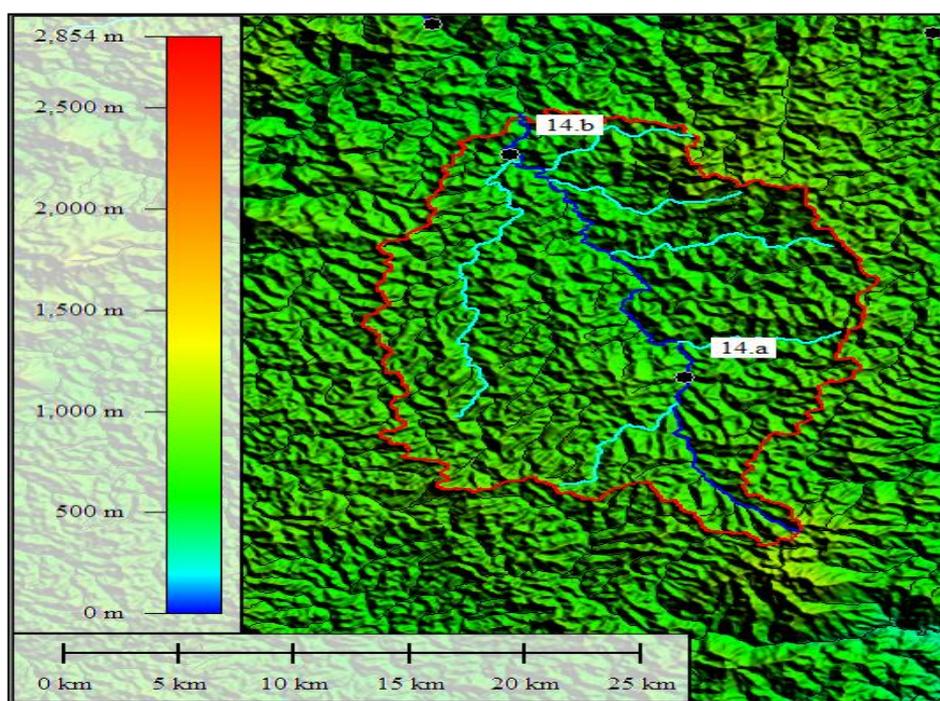
Parâmetros	Curso d'água XIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	31.792,86
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	15.896,43
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	2.510,58
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	3.087,29
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0180
Declividade – I_{BH} (m/km)	3,574
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,63
Fator de forma - K_F	0,108
Tempo de Concentração - TC (horas)	16,59
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,079
K_{zbp}	0,097

Fonte: Autor.

Segue-se então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 56.

Curso d'água XIV

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 76 e 77, e nas Tabelas 43 e 44.

**Figura 76:** Representação do Curso d'água XIV com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

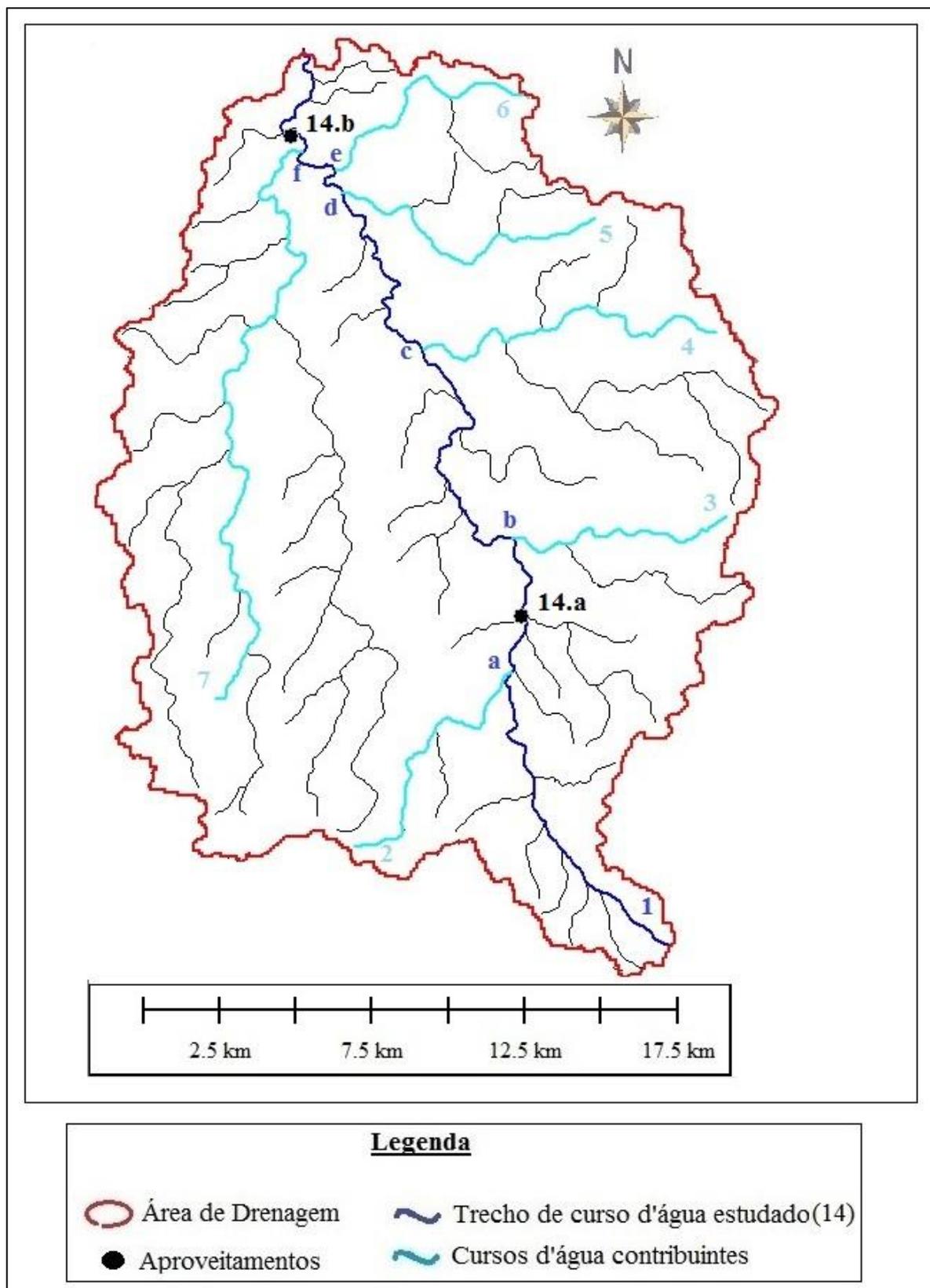


Figura 77: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XIV e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 43: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XIV.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.010,00										
Confluência 1-a		670,00	30,9	12,1	0,91	918,03	340,00	3.031,68			
Nascente 2	800,00										
Confluência 2-a		670,00	20,3	9,7	0,60	476,66	130,00	759,85			
Nascente 3	830,00										
Confluência 3-b		620,00	28,1	8,4	0,83	686,12	210,00	1.702,98			
Nascente 4	830,00										
Confluência 4-c		575,00	64,8	12,2	1,91	1.581,86	255,00	4.767,58			
Nascente 5	885,00										
Confluência 5-d		565,00	22,9	10,3	0,67	596,60	320,00	2.116,20			
Nascente 6	900,00										
Confluência 6-e		550,00	19,4	8,9	0,57	513,55	350,00	1.959,19			
Nascente 7	815,00										
Confluência 7-f		545,00	158,6	24,6	4,66	3.798,35	270,00	12.344,40			
Σ					10,14254	8.571,15					
\overline{NA}_{max}	845,07										
(14.a)	676,00	628,00	127,9	14,3	3,76		48,00		1.770,51	5,13	1.898,27
(14.b)	566,00	540,00	467,7	38,8	13,75		26		3.507,08	16,13	3.243,82
Foz no rio principal		530,00	453,28	43,1	13,3219		315,07	41.175,79			
Σ								41.175,79	5.277,58		5.142,09

Fonte: Autor.

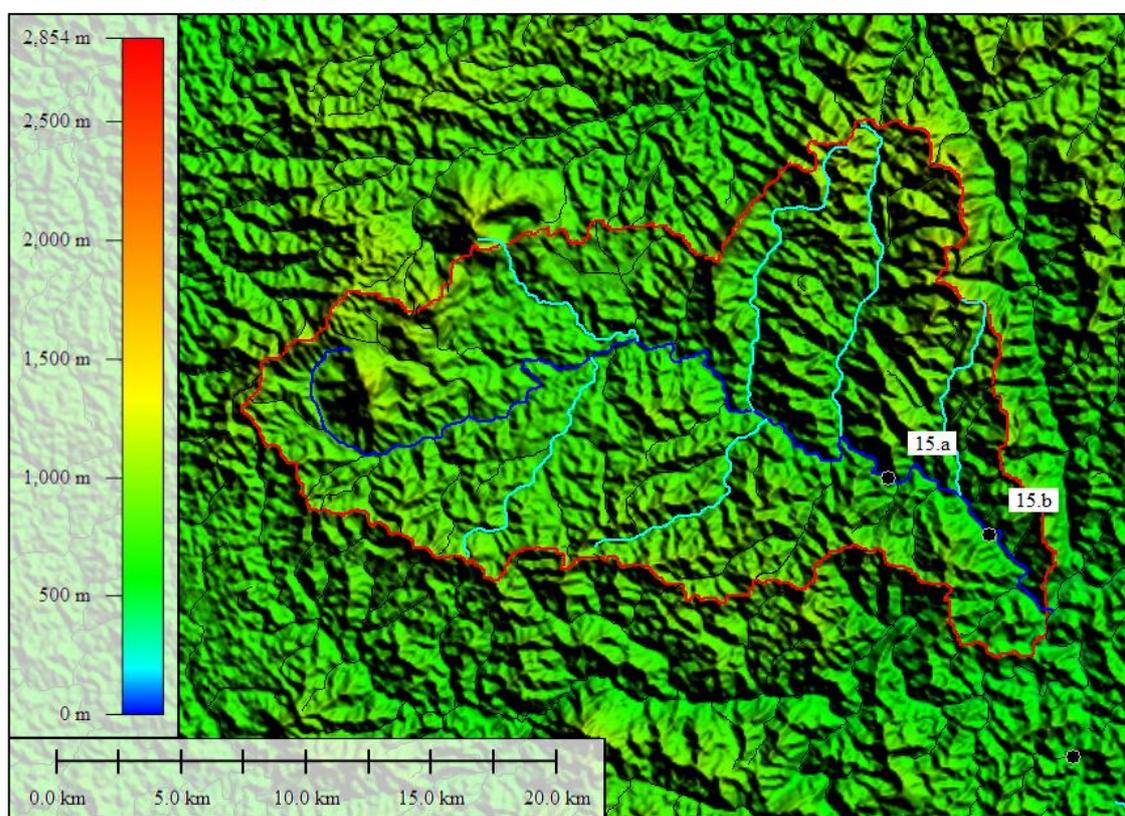
Tabela 44: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XIV.

Parâmetros	Curso d'água XIV
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	41.175,79
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	20.587,89
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	5.277,58
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	5.142,09
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0294
Declividade – I_{BH} (m/km)	7,310
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	2,11
Fator de forma - K_F	0,244
Tempo de Concentração - TC (horas)	8,01
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,128
K_{zbp}	0,125

Fonte: Autor

Curso d'água XV

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 78 e 79, e nas Tabelas 45 e 46.

**Figura 78:** Representação do Curso d'água XV com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

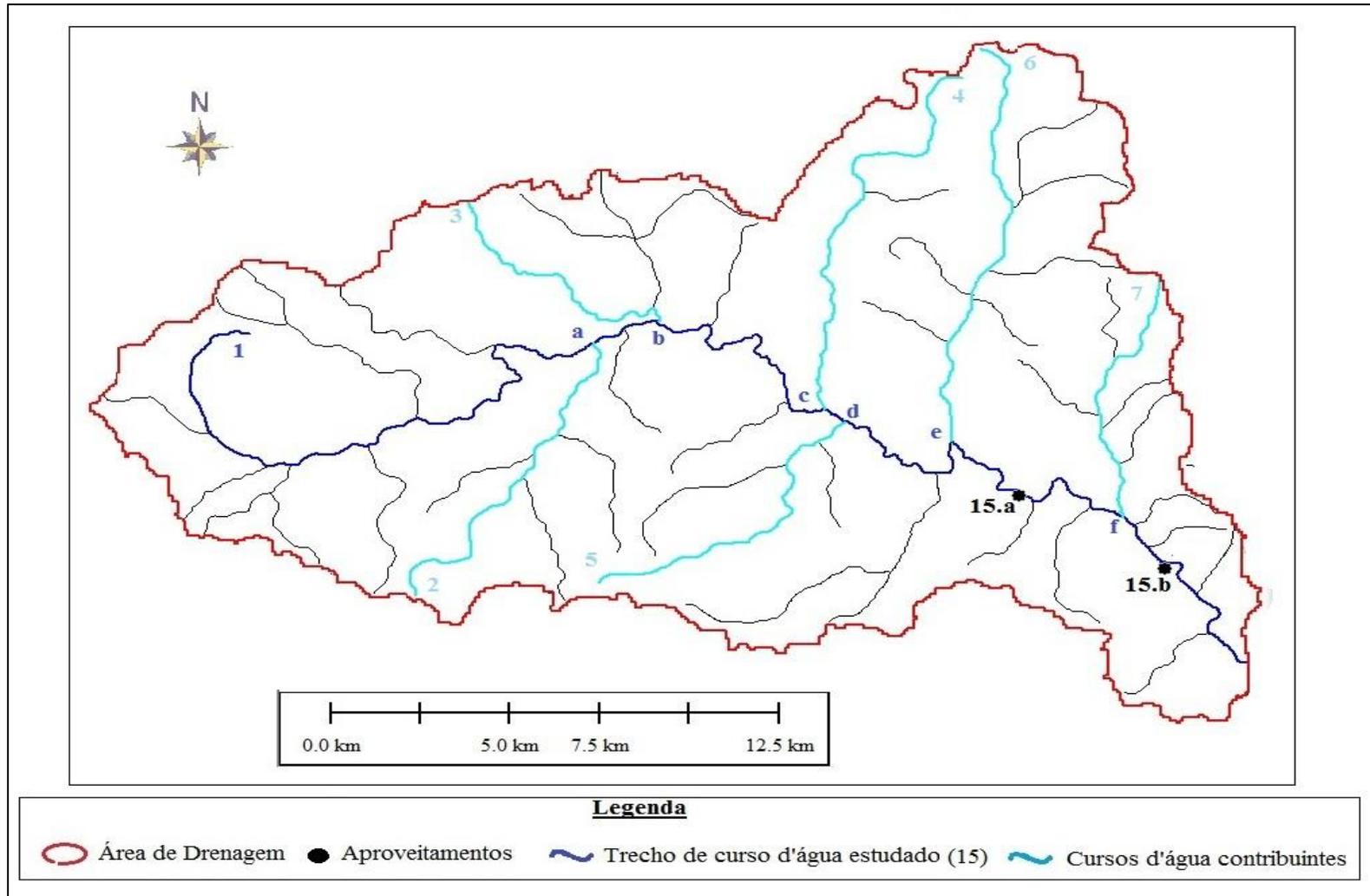


Figura 79: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XV e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor.

Tabela 45: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XV.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	900,00										
Confluência 1-a		675,00	87,0	20,0	2,56	2.302,53	225,00	5.646,96			
Nascente 2	975,00										
Confluência 2-a		675,00	33,6	11,6	0,99	963,30	300,00	2.907,68			
Nascente 3	850,00										
Confluência 3-b		670,00	38,3	8,3	1,12	956,11	180,00	1.986,24			
Nascente 4	1.085,00										
Confluência 4-c		630,00	31,0	14,7	0,91	987,20	455,00	4.061,21			
Nascente 5	855,00										
Confluência 5-d		625,00	26,6	10,4	0,78	668,41	230,00	1.763,91			
Nascente 6	1.020,00										
Confluência 6-e		635,00	59,5	14,6	1,75	1.782,54	385,00	6.600,39			
Nascente 7	865,00										
Confluência 7-f		555,00	24,5	10,1	0,72	621,60	310,00	2.185,36			
Σ					8,83	8.281,70					
$\overline{NA}_{\text{total}}$	938,01										
(15.a)	640,00	580,00	343,8	39,4	10,10		60,00		5.944,86	11,35	5.618,39
(15.b)	576,00	526,00	393,1	45,5	11,55		50		5.665,28	13,25	5.428,07
Foz no rio principal		515,00	410,13	50,7	12,05		423,01	50.019,18			
Σ								50.019,18	11.610,14		11.046,46

Fonte: Autor.

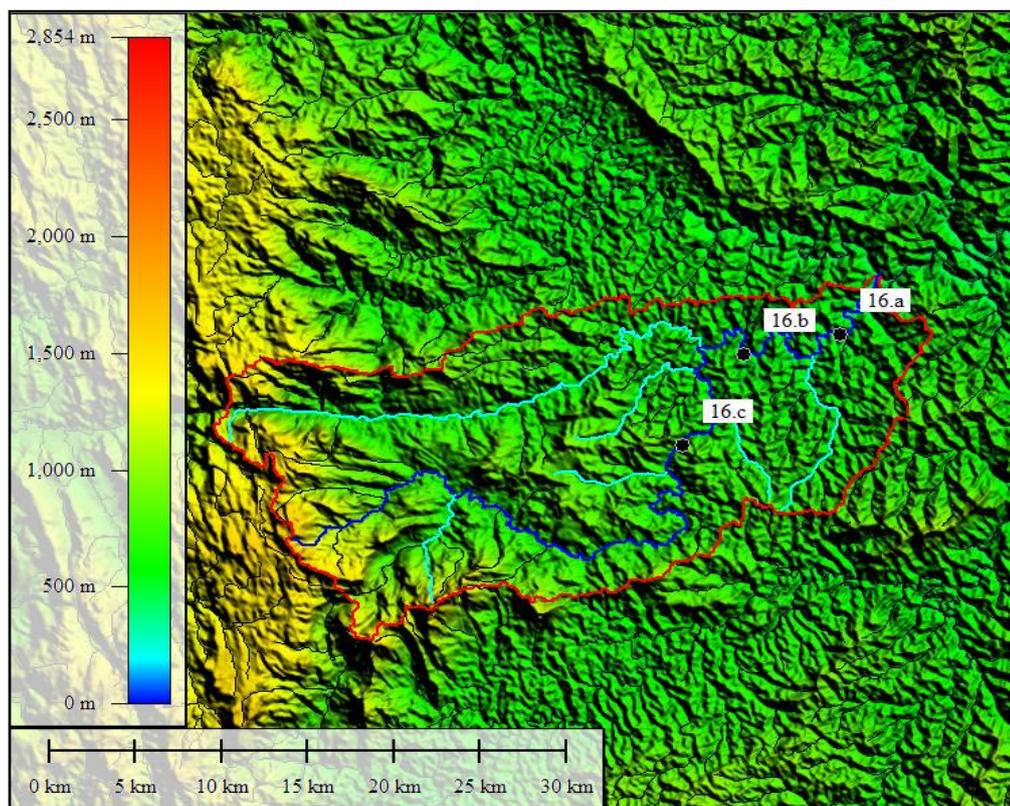
Tabela 46: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XV.

Parâmetros	Curso d'água XV
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	50.019,18
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	25.009,59
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	11.610,14
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	11.046,46
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0294
Declividade – I_{BH} (m/km)	8,351
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	2,41
Fator de forma - K_F	0,160
Tempo de Concentração - TC (horas)	8,62
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,232
K_{zbp}	0,221

Fonte: Autor.

Curso d'água XVI

O rio apresenta 7 afluentes principais analisados, 6 confluências e 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 80 e 81, e nas Tabelas 47 e 48.

**Figura 80:** Representação do Curso d'água XVI com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

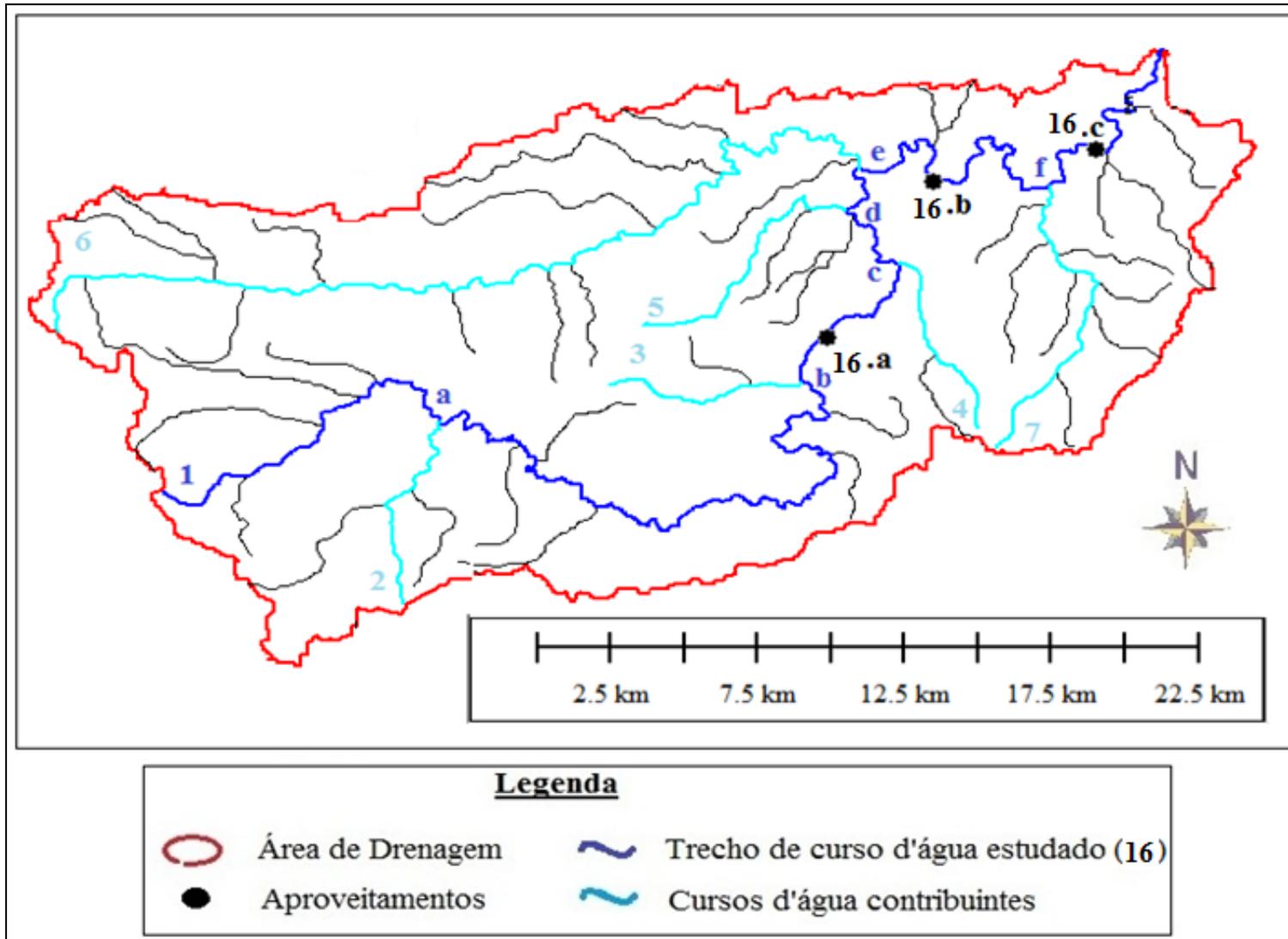


Figura 81: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVI e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 47: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVI.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	1.620,00										
Confluência 1-a		665,00	55,2	14,0	1,024684	1.659,99	955,00	9.599,80			
Nascente 2	1.415,00										
Confluência 2-a		665,00	42,9	8,8	0,796935	1.127,66	750,00	5.863,45			
Nascente 3	855,00										
Confluência 3-b		640,00	20,0	7,3	0,371834	317,92	215,00	784,25			
Nascente 4	740,00										
Confluência 4-c		550,00	19,5	7,5	0,362135	267,98	190,00	674,98			
Nascente 5	900,00										
Confluência 5-d		550,00	19,2	10,5	0,35632	320,69	350,00	1.223,42			
Nascente 6	1.220,00										
Confluência 6-e		545,00	170,9	39,5	3,175254	3.873,81	675,00	21.025,74			
Nascente 7	700,00										
Confluência 7-f		490,00	51,4	12,9	0,955345	668,74	210,00	1.968,11			
Σ					7,042506	8.236,79					
\overline{NA}_{max}	1.169,58										
(17.a)	644,00	558,00	212,2	46,0	3,94		86,00		3.324,02	4,79	3.198,13
(17.b)	524,00	502,00	466,2	62,1	8,66		22		1.869,00	10,52	1.777,12
(17.c)	486,00	466,00	537,6	73,9	9,99		20		1.960,04	12,14	1.855,48
Foz no rio principal		460,00	564,31	80,9	10,48466		709,58	72.983,67			
Σ								72.983,67	7.153,06		6.830,73

Fonte: Autor.

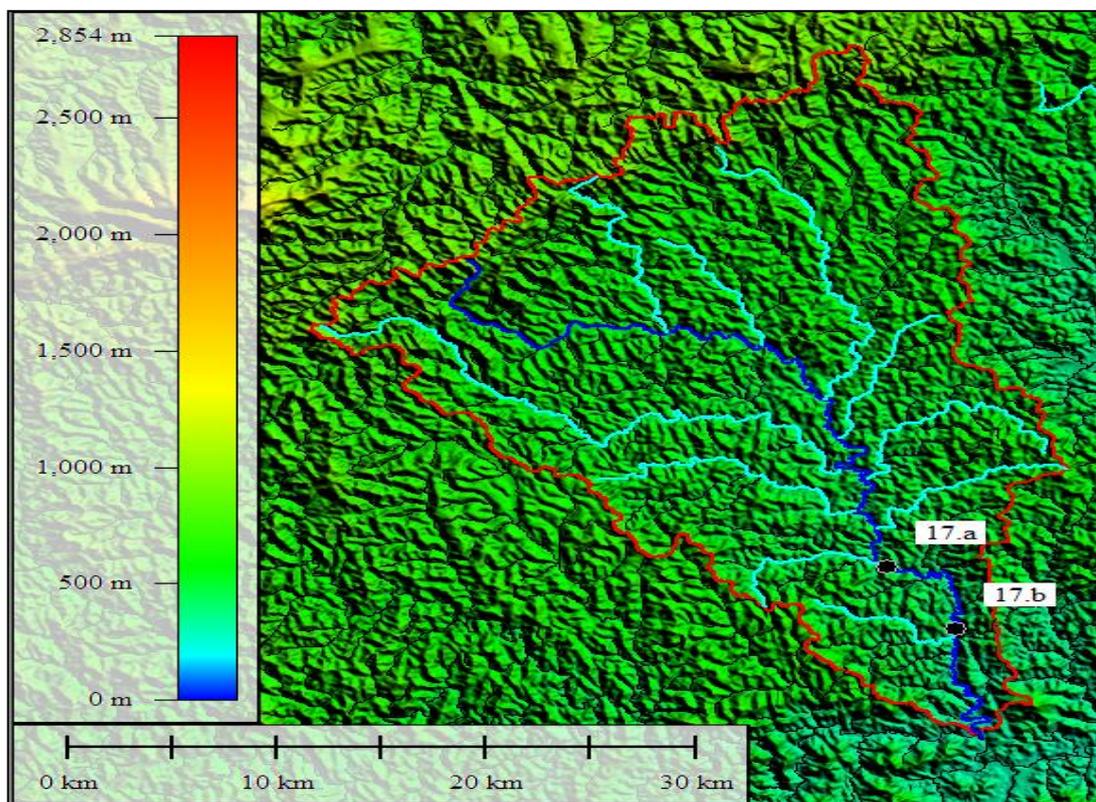
Tabela 48: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVI.

Parâmetros	Curso d'água XVI
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	72.983,67
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	36.491,84
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	7.153,06
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	6.830,73
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0186
Declividade – I_{BH} (m/km)	8,776
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	1,60
Fator de forma - K_F	0,086
Tempo de Concentração - TC (horas)	12,12
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,098
K_{zbp}	0,094

Fonte: Autor.

Curso d'água XVII

O rio apresenta 11 afluentes principais analisados, 10 confluências e 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 82 e 83, e nas Tabelas 49 e 50.

**Figura 82:** Representação do Curso d'água XVII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

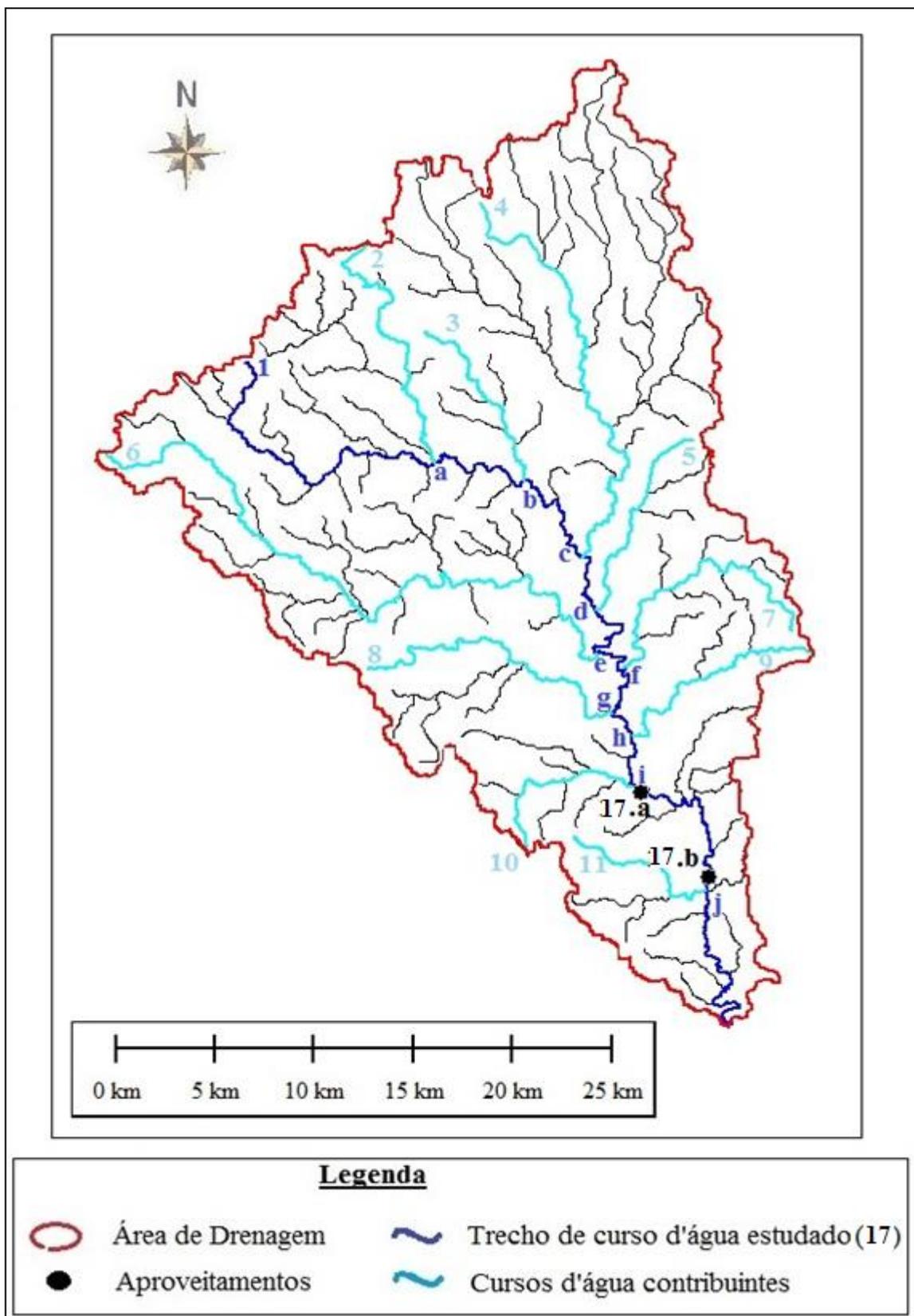


Figura 83: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 49: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	895,00										
Confluência 1-a		500,00	64,2	18,9	0,63	565,42	395,00	2.448,00			
Nascente 2	945,00										
Confluência 2-a		500,00	59,5	17,9	0,59	553,17	445,00	2.555,40			
Nascente 3	620,00										
Confluência 3-b		480,00	34,5	11,1	0,34	210,49	140,00	466,27			
Nascente 4	925,00										
Confluência 4-c		465,00	213,5	27,8	2,10	1.943,68	460,00	9.482,20			
Nascente 5	545,00										
Confluência 5-d		445,00	23,8	12,5	0,23	127,64	100,00	229,74			
Nascente 6	880,00										
Confluência 6-e		430,00	144,2	41,5	1,42	1.249,29	450,00	6.267,04			
Nascente 7	600,00										
Confluência 7-f		425,00	46,8	17,7	0,46	276,19	175,00	790,25			
Nascente 8	575,00										
Confluência 8-g		405,00	57,7	18,5	0,57	326,39	170,00	946,64			
Nascente 9	600,00										
Confluência 9-h		400,00	29,3	14,0	0,29	173,22	200,00	566,42			
Nascente 10	550,00										
Confluência 10-i		395,00	40,3	10,1	0,40	217,91	155,00	602,44			
Nascente 11	520,00										
Confluência 11-j		320,00	27,3	9,5	0,27	139,97	200,00	528,10			
Σ					7,293744	5.783,36					

Continua.

Tabela 49 (Cont.): Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
\bar{NA}_{max}	792,92										
(18.a)	412,00	364,00	663,6	54,1	6,53		48,00		3.074,85	9,47	3.504,21
(18.b)	358,00	314,00	704,9	64,0	6,94		44		2.995,58	10,06	3.398,84
Foz no rio principal		300,00	864,57	77,4	8,51		492,92	41.150,10			
Σ								41.150,10	6.070,43		6.903,05

Fonte: Autor.

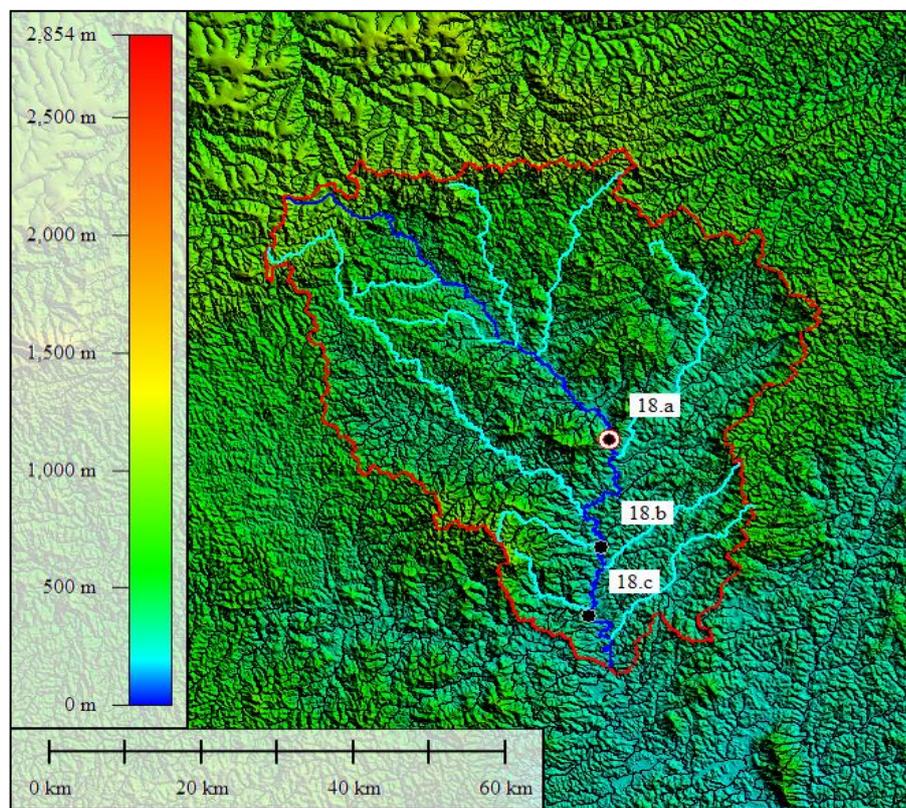
Tabela 50: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVII.

Parâmetros	Curso d'água XVII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	41.150,10
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	20.575,05
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	6.070,43
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	6.903,05
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0098
Declividade – I_{BH} (m/km)	6,366
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,61
Fator de forma - K_F	0,144
Tempo de Concentração - TC (horas)	13,27
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,148
K_{zbp}	0,168

Fonte: Autor.

Curso d'água XVIII

O rio apresenta 11 afluentes principais analisados, 10 confluências e 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 84 e 85, e nas Tabelas 51 e 52.

**Figura 84:** Representação do Curso d'água XVIII com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor.

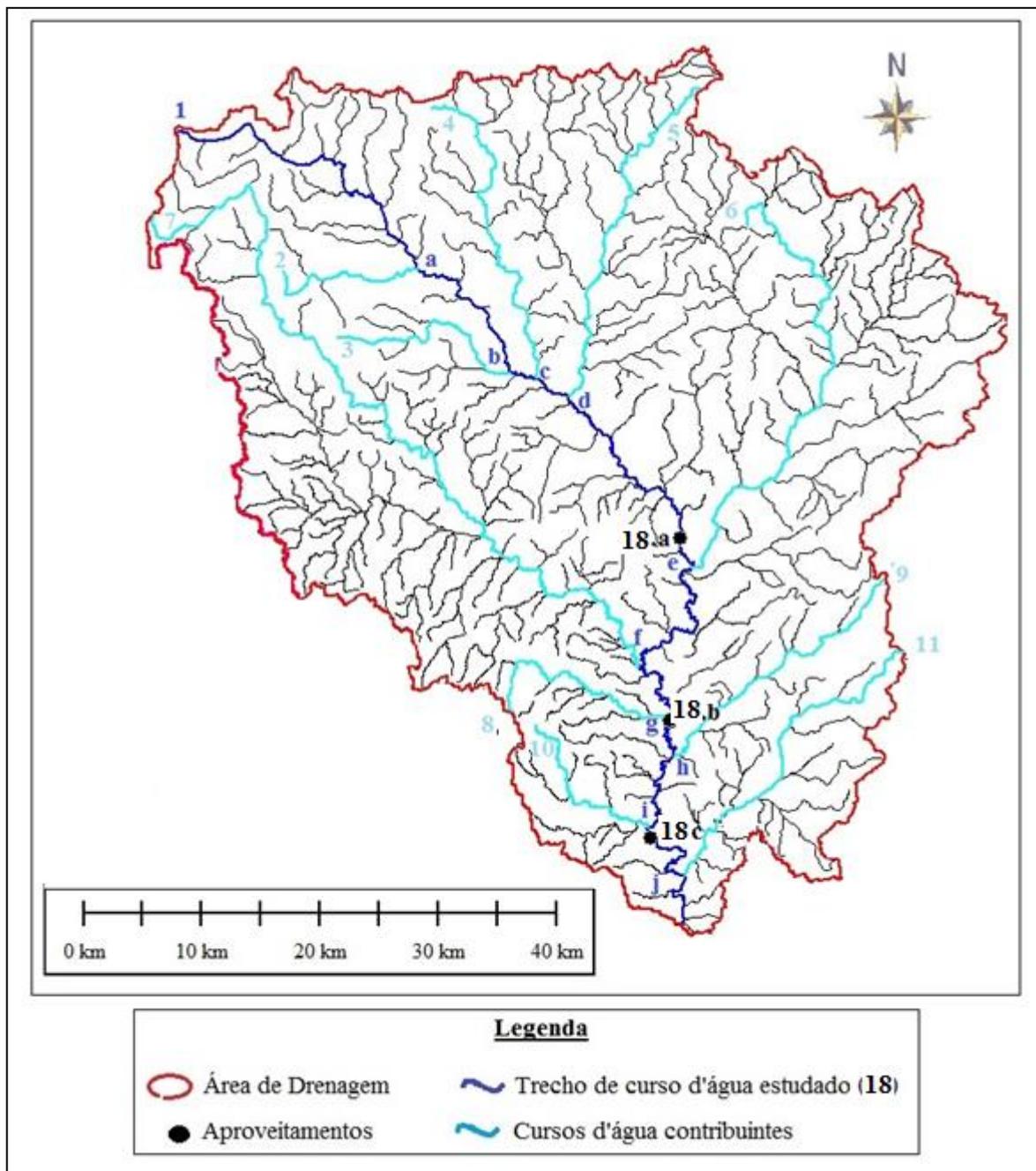


Figura 85: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XVIII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor.

Tabela 51: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
Nascente 1	965,00										
Confluência 1-a		380,00	208,9	31,8	1,72	1.655,53	585,00	9.845,44			
Nascente 2	675,00										
Confluência 2-a		380,00	53,0	15,8	0,44	294,03	295,00	1.260,60			
Nascente 3	570,00										
Confluência 3-b		335,00	73,2	19,5	0,60	342,51	235,00	1.385,26			
Nascente 4	940,00										
Confluência 4-c		330,00	151,8	33,6	1,25	1.171,87	610,00	7.460,20			
Nascente 5	970,00										
Confluência 5-d		320,00	331,1	37,0	2,72	2.637,68	650,00	17.339,31			
Nascente 6	675,00										
Confluência 6-e		275,00	664,7	49,0	5,46	3.684,41	400,00	21.418,68			
Nascente 7	975,00										
Confluência 7-f		260,00	728,7	88,3	5,98	5.834,83	715,00	41.975,77			
Nascente 8	930,00										
Confluência 8-g		255,00	63,2	23,0	0,52	482,87	675,00	3.438,11			
Nascente 9	610,00										
Confluência 9-h		245,00	128,0	27,1	1,05	641,30	365,00	3.764,36			
Nascente 10	795,00										
Confluência 10-i		240,00	84,5	16,9	0,69	551,34	555,00	3.775,83			
Nascente 11	705,00										
Confluência 11-j		235,00	188,8	33,1	1,55	1.093,29	470,00	7.150,10			
Σ					21,9756	18.389,64					
NA_{max}	836,82										

Continua.

Tabela 51 (Cont.): Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XVIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	$h_{Ni} * \bar{Q}_{Fi}$	H_{NF} (m)	Potência Hídrica Disponível (kW)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto P_{proj} (kW)
(19.a)	290,00	276,00	1.113,00	74,1	9,14		14,00		1.255,29	12,41	1.297,77
(19.b)	256,00	246,00	2.784,24	108,3	22,86		10		2.242,57	28,46	2.060,44
(19.c)	244,00	234,00	3.049,14	127,7	25,04		10		2.456,42	3,16	2.284,15
Foz no rio principal		225,00	3.263,01	144,6	26,80		611,82	160.828,60			
Σ								160.828,60	5.954,28		5.642,36

Fonte: Autor.

Tabela 52: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XVIII.

Parâmetros	Curso d'água XVIII
Potência hidráulica teórica máxima - P_{TMAX} (kW)	160.828,60
Potência hidráulica teórica disponível - P_{HTDisp} (kW)	80.414,30
Potência teórica instalada - P_{Tinst} (kW)	5.954,28
Potência total de projeto - P_{Tproj} (kW)	5.642,36
Vazão específica da bacia - Q_{esp} (m ³ /s.km ²)	0,0082
Declividade – I_{BH} (m/km)	4,231
Potência específica - P_{esp} (kW/km ²)	0,34
Fator de forma - K_F	0,156
Tempo de Concentração - TC (horas)	25,11
K_{zb}	0,50
K_{zbt}	0,037
K_{zbp}	0,035

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – CORRELAÇÕES DOS PARÂMETROS DE POTÊNCIA K_{ZBT} E K_{ZBP} COM CARACTERÍSTICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Considerando os resultados das análises dos 18 cursos d’água apresentados no Apêndice A, e dos indicadores expostos na Tabela 7 (rios de I a IX) e Tabela 8 (rios de X a XVIII) no corpo do texto, observa-se que os valores encontrados para os fatores de correção do K_{zb} (K_{zbt} e K_{zbp}) são variáveis para cada curso d’água selecionado. Os números estão entre 0,04 e 0,32 para o K_{zbt} e entre 0,04 e 0,33 para o K_{zbp}, apresentando discrepâncias significativas entre os fatores calculados.

Logo, para encontrar uma correlação dos parâmetros de potência que, teoricamente, se é possível gerar (K_{zbt}) e dos parâmetros de potência com cálculos mais detalhados de projeto (K_{zbp}) para cada curso d’água estudado, sugere-se, a princípio, aplicar esses fatores a gráficos correlacionando-os com algumas características das bacias hidrográficas tais como a declividade e a vazão específica do rio. Posteriormente, optou-se por desenvolver melhor as relações entre os parâmetros das bacias hidrográficas, bem como a relação deles com os indicadores de correção do fator de uso, respeitando as indicações de variação crescente e decrescente que foram obtidas nos gráficos anteriores. Foram também testadas várias relações existentes entre os parâmetros analisados.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 10 e 11 no corpo do texto com base nas Figuras 86 a 104, apresentadas a seguir.

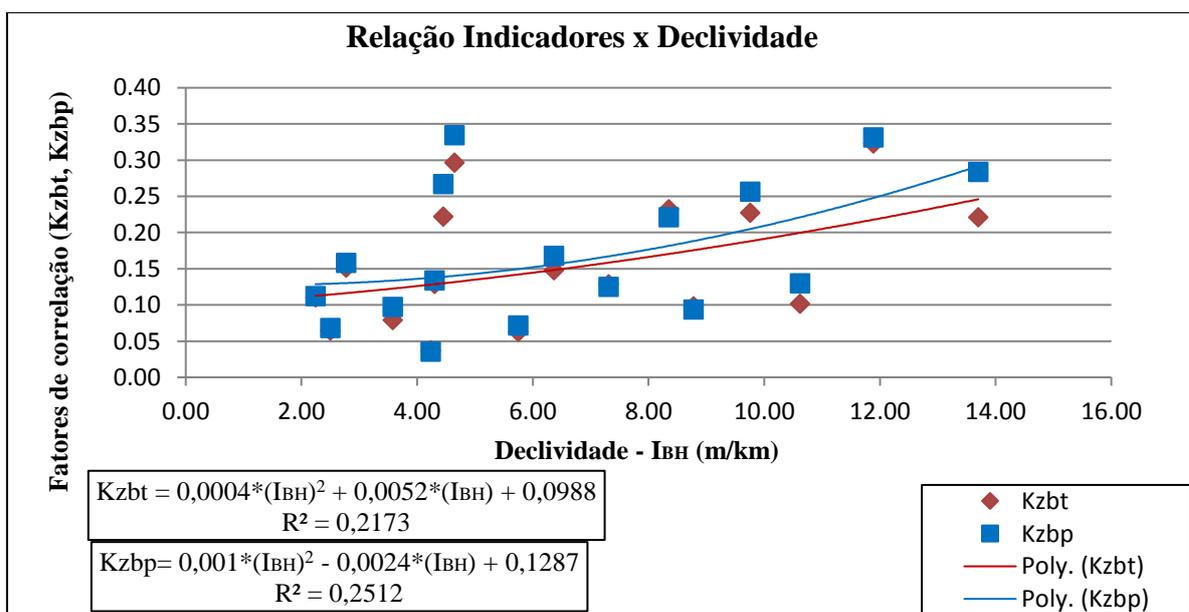


Figura 86: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as declividades dos cursos d’água.
 Fonte: Autor.

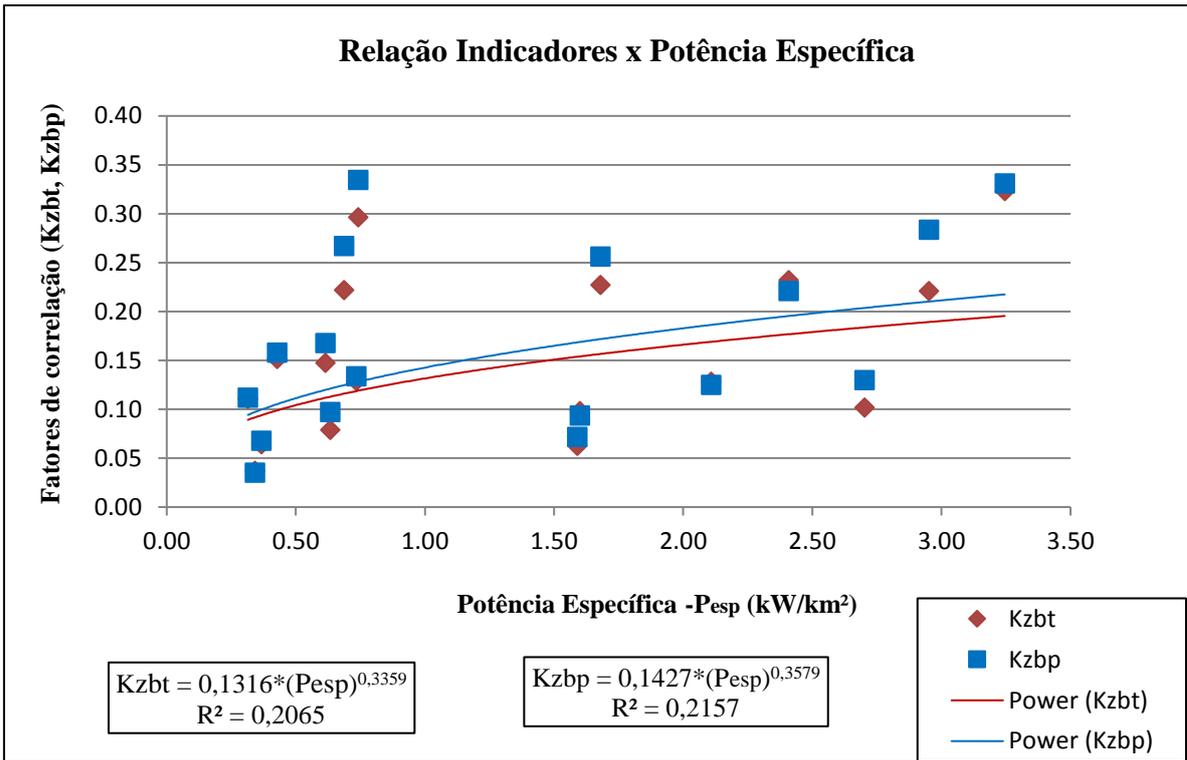


Figura 87: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as potências específicas dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

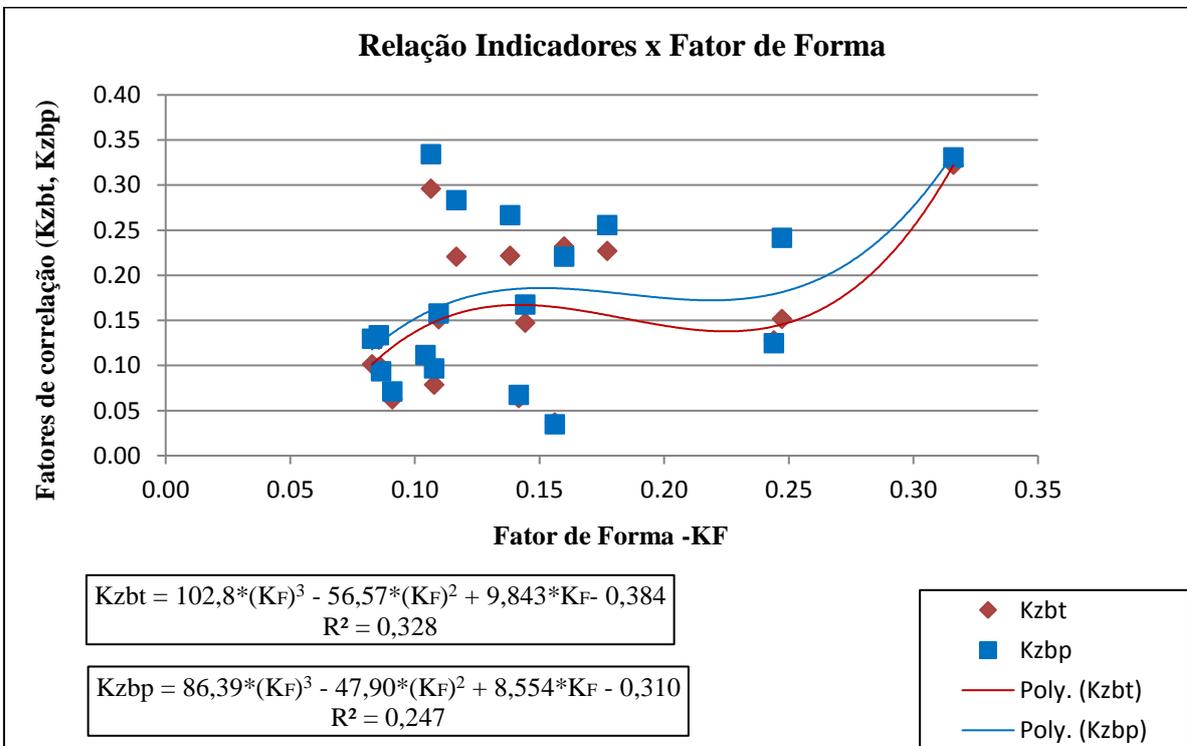


Figura 88: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os fatores de forma dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

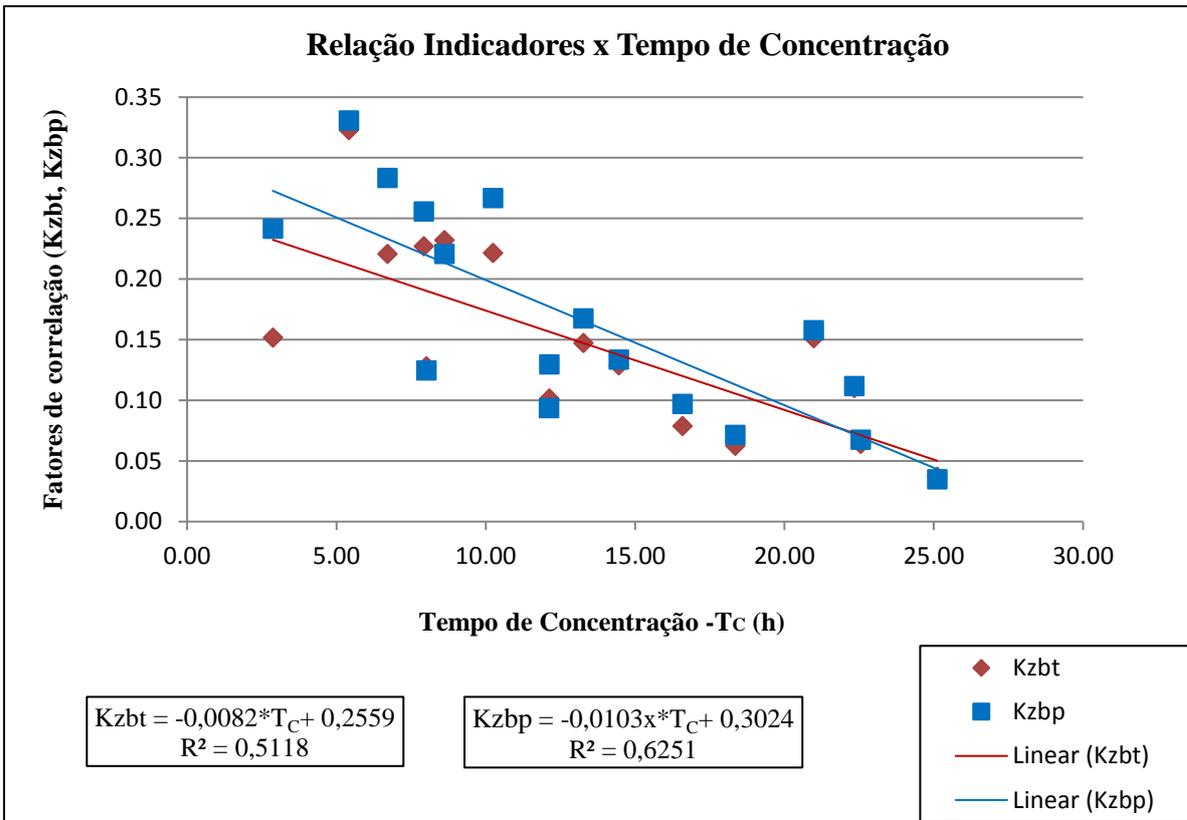


Figura 89: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os tempos de concentração dos cursos d'água.
Fonte: Autor.

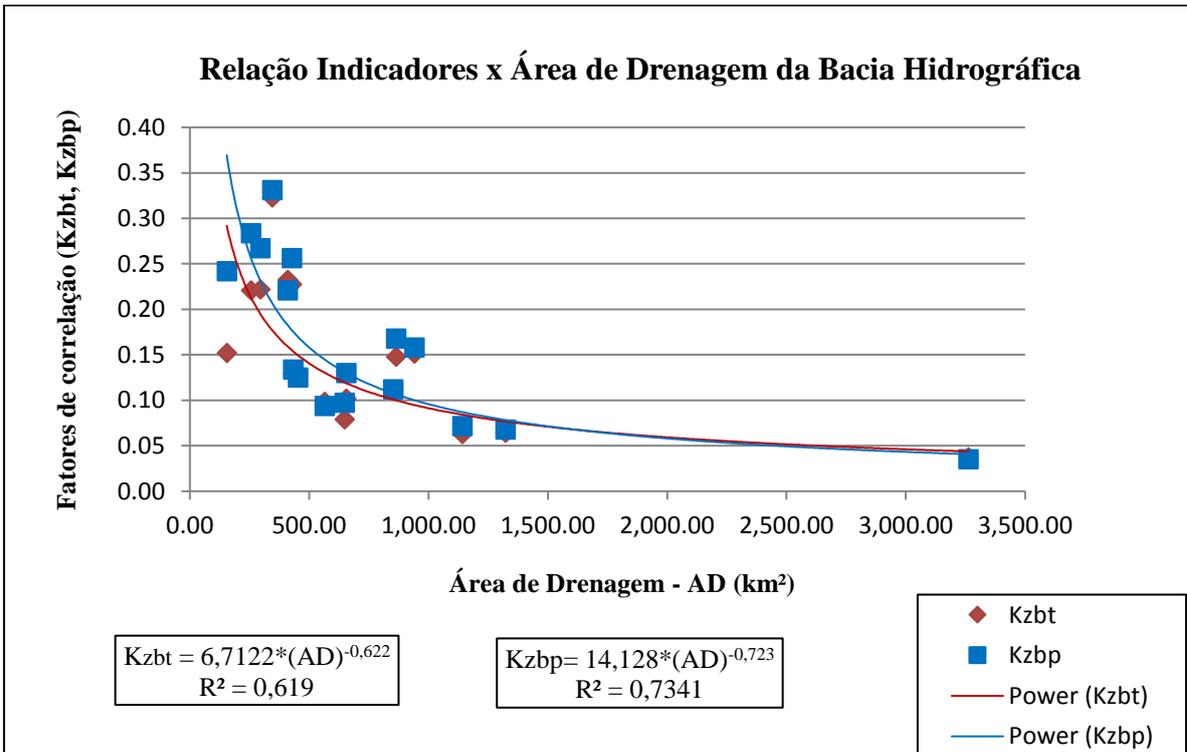


Figura 90: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as áreas de drenagem dos cursos d'água.
Fonte: Autor.

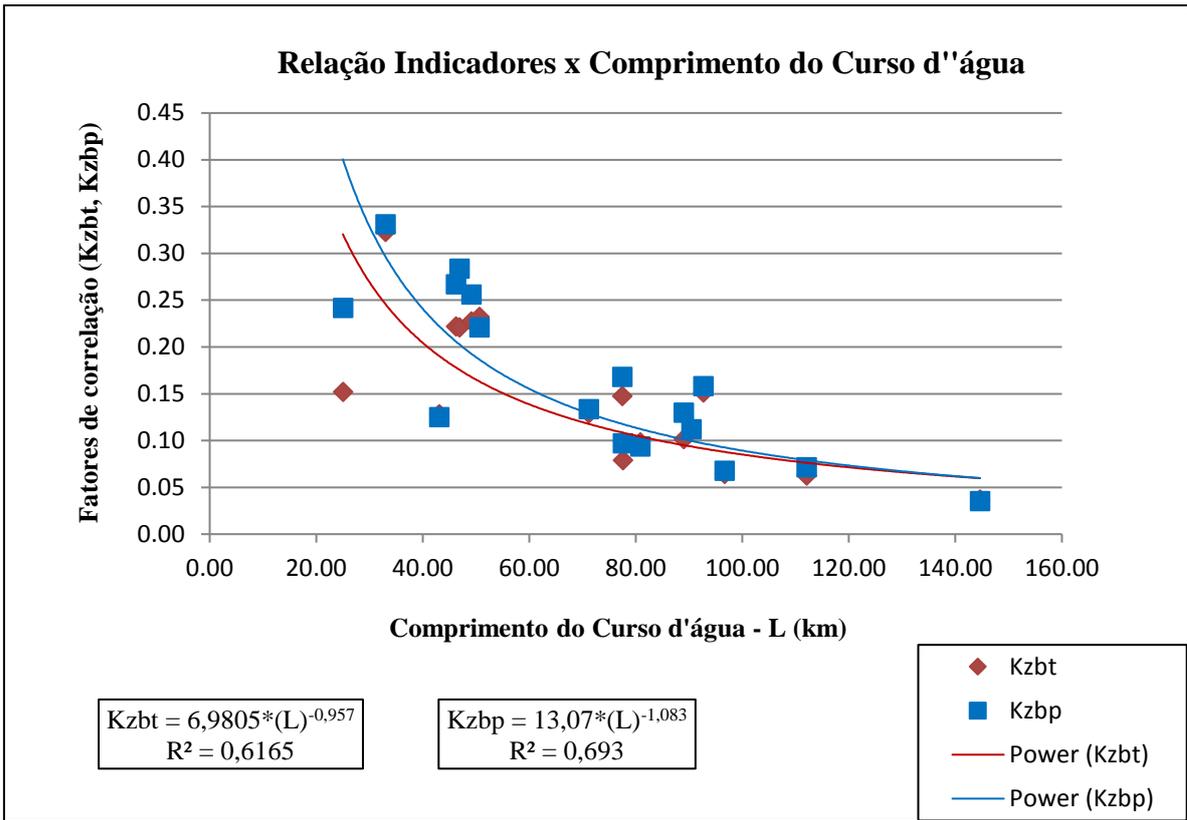


Figura 91: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os comprimentos dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

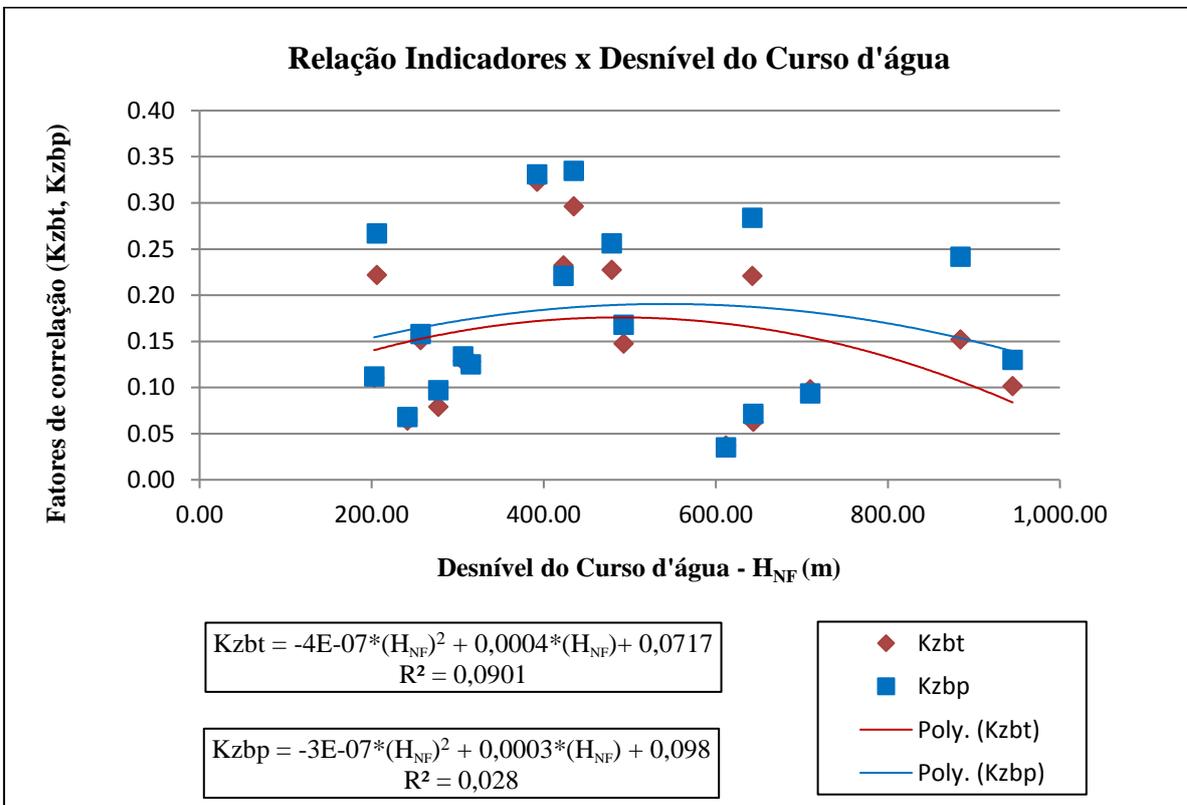


Figura 92: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e os desníveis dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

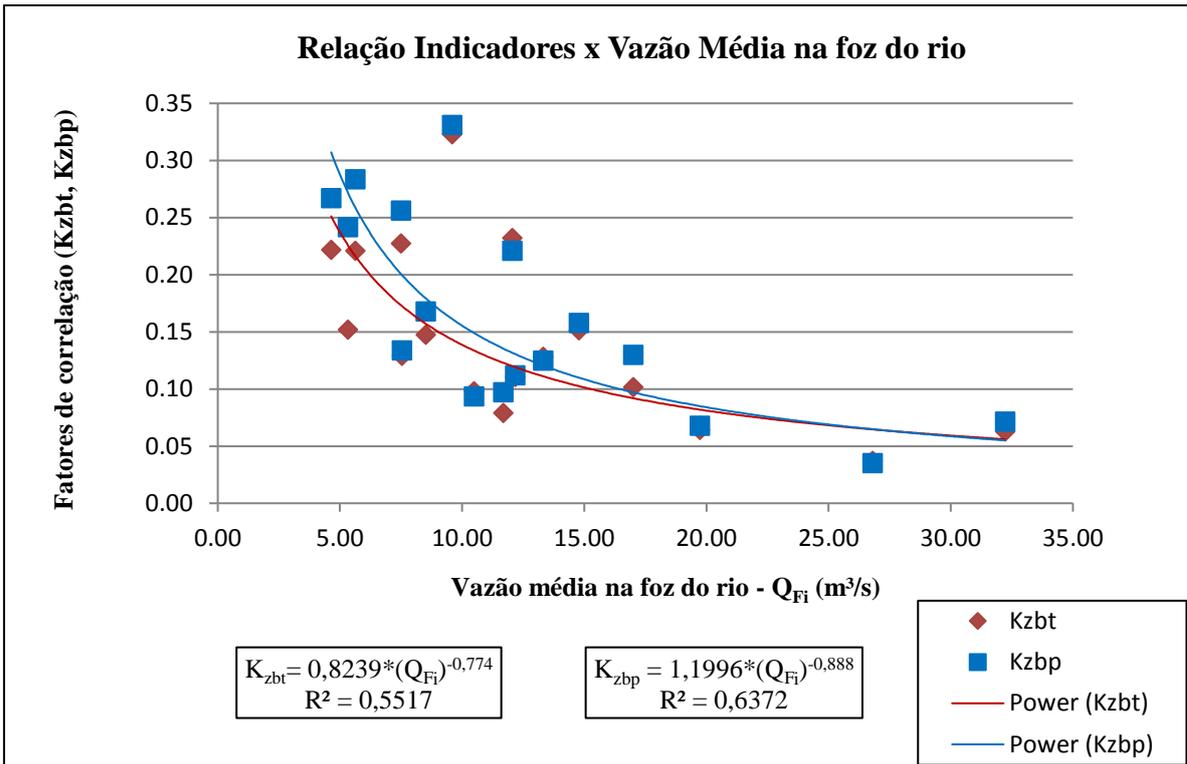


Figura 93: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as vazões médias dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

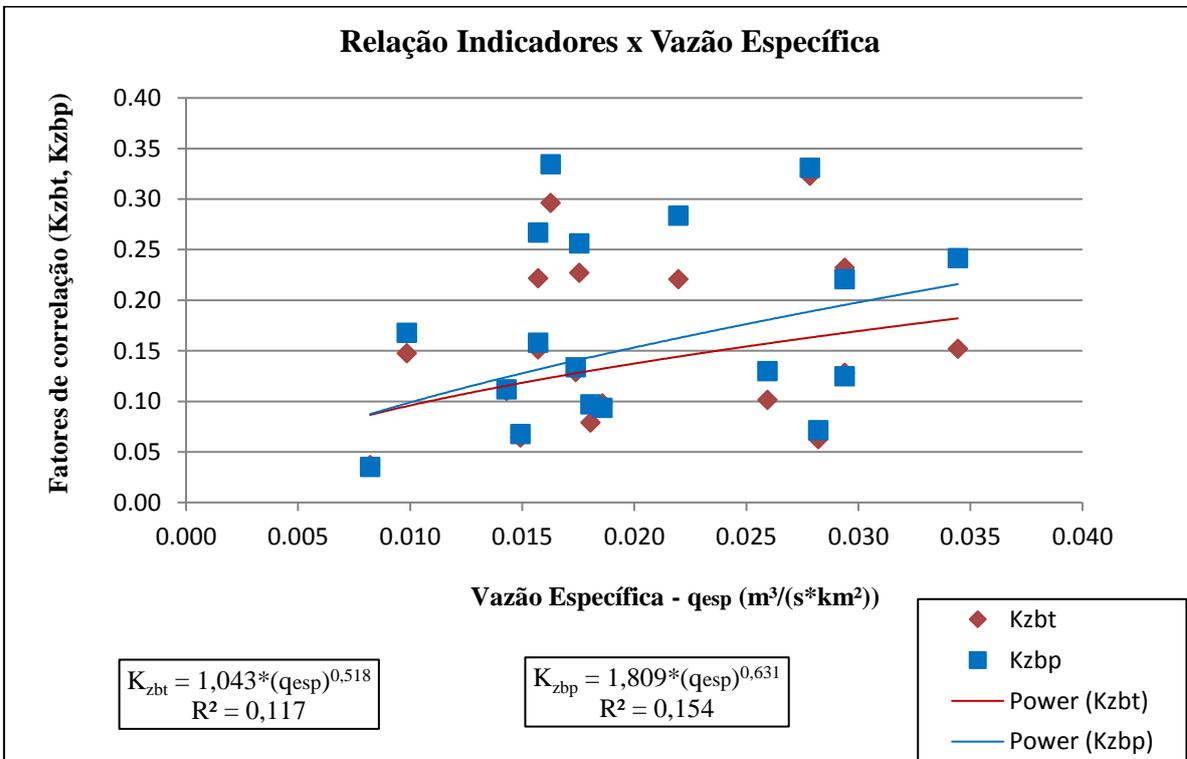


Figura 94: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) e as vazões específicas dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

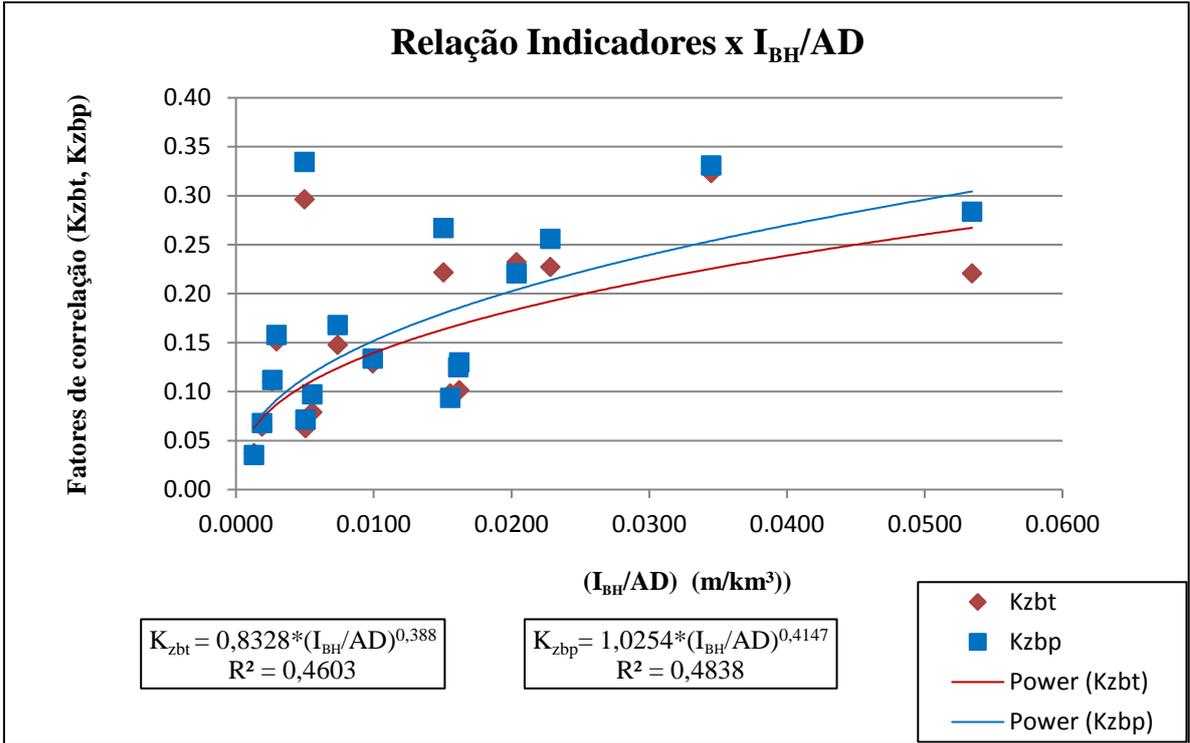


Figura 95: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as áreas de drenagem e as declividades dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

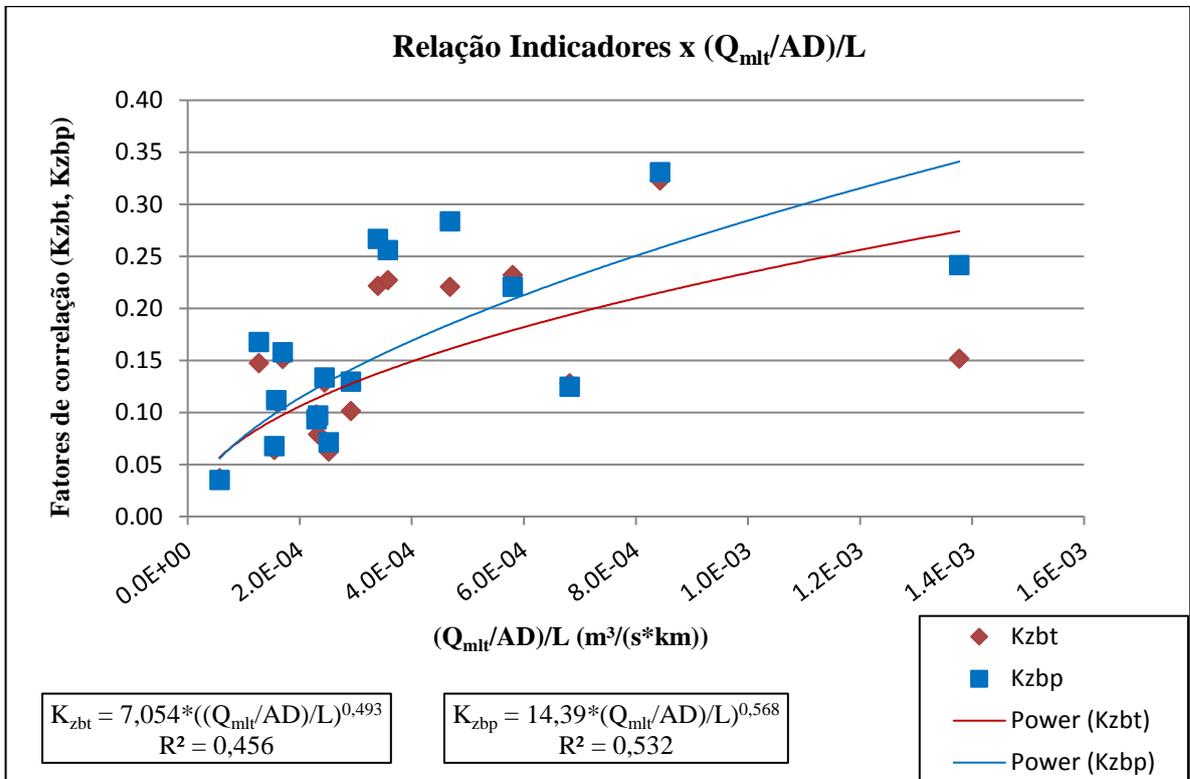


Figura 96: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as vazões médias, as áreas de drenagem e os comprimentos dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

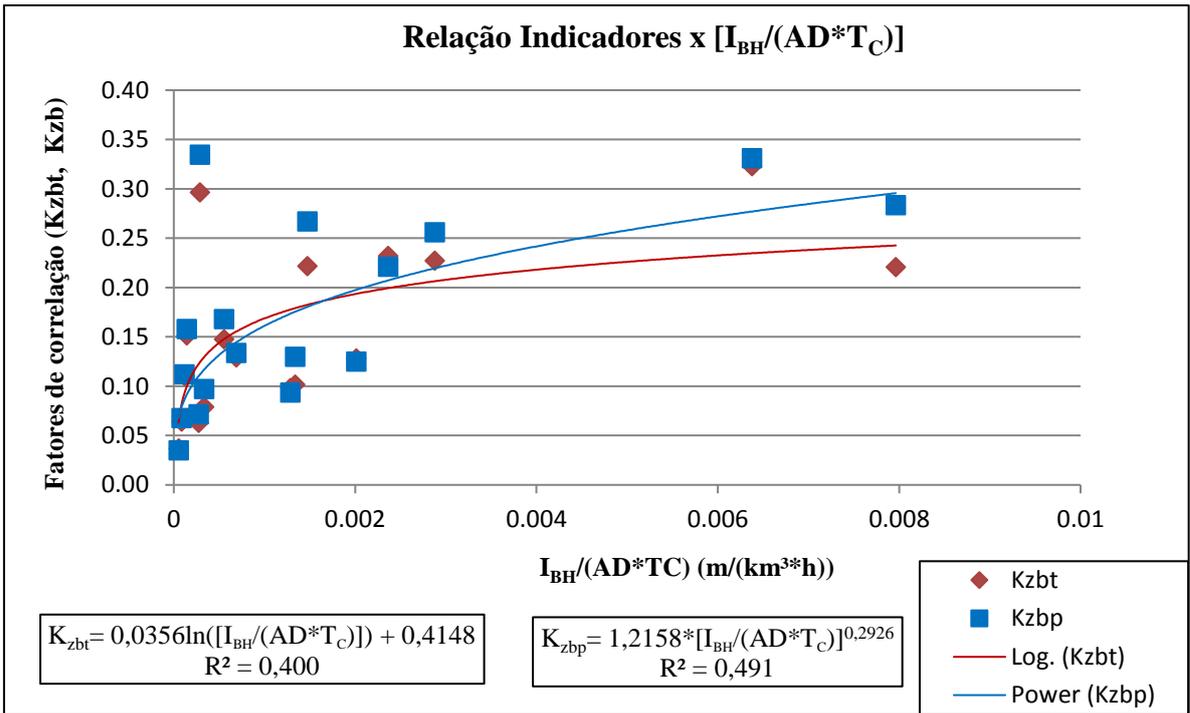


Figura 97: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as áreas de drenagem, os tempos de concentração e as declividades dos cursos d'água.

Fonte: Autor.

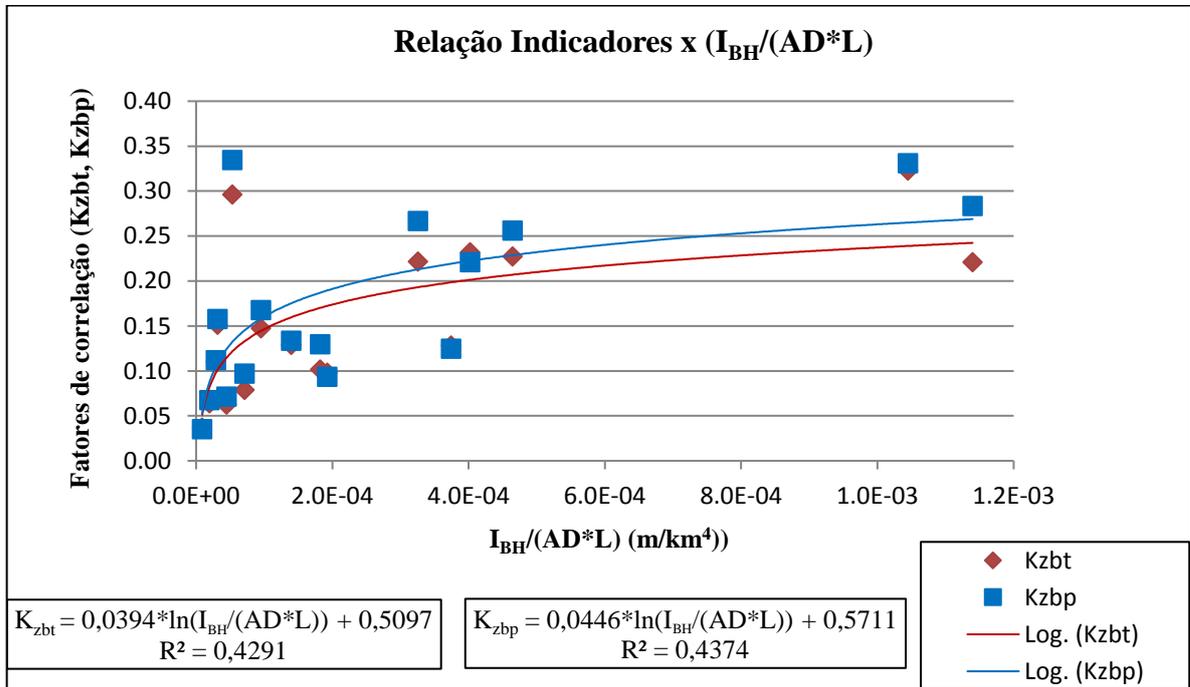


Figura 98: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as áreas de drenagem, as declividades e os comprimentos dos cursos d'água.

Fonte: Autor.

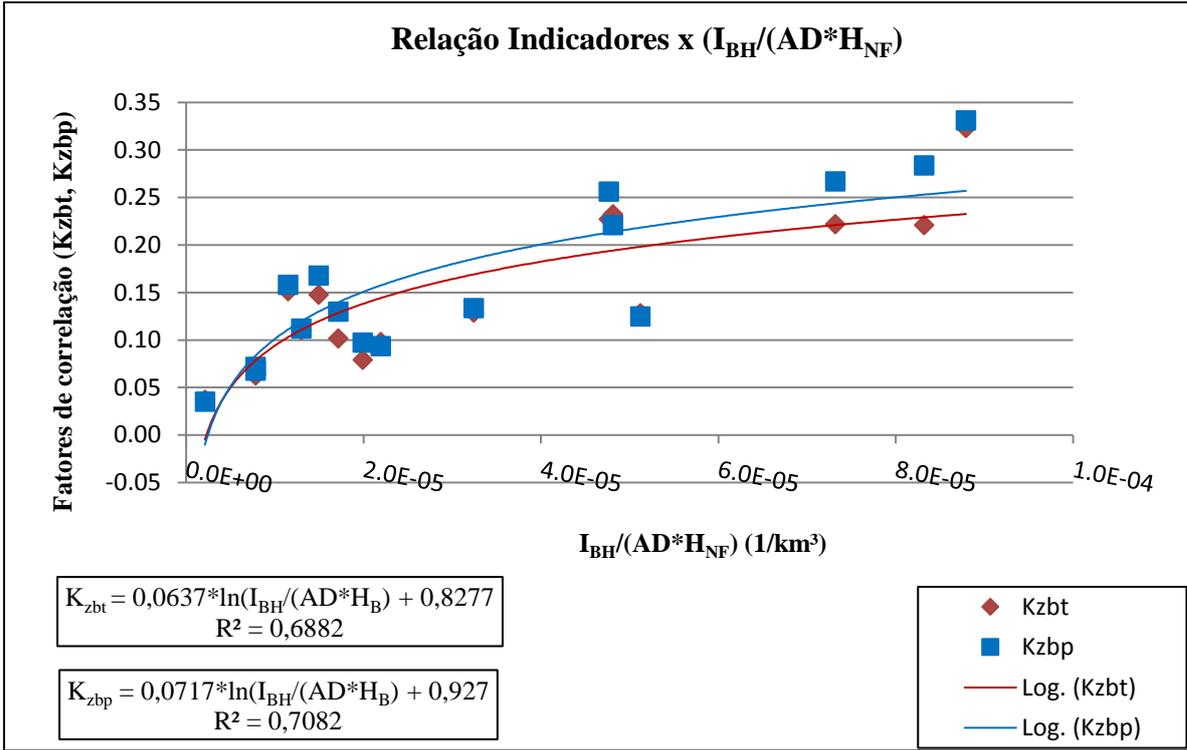


Figura 99: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, as áreas de drenagem e os desníveis dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

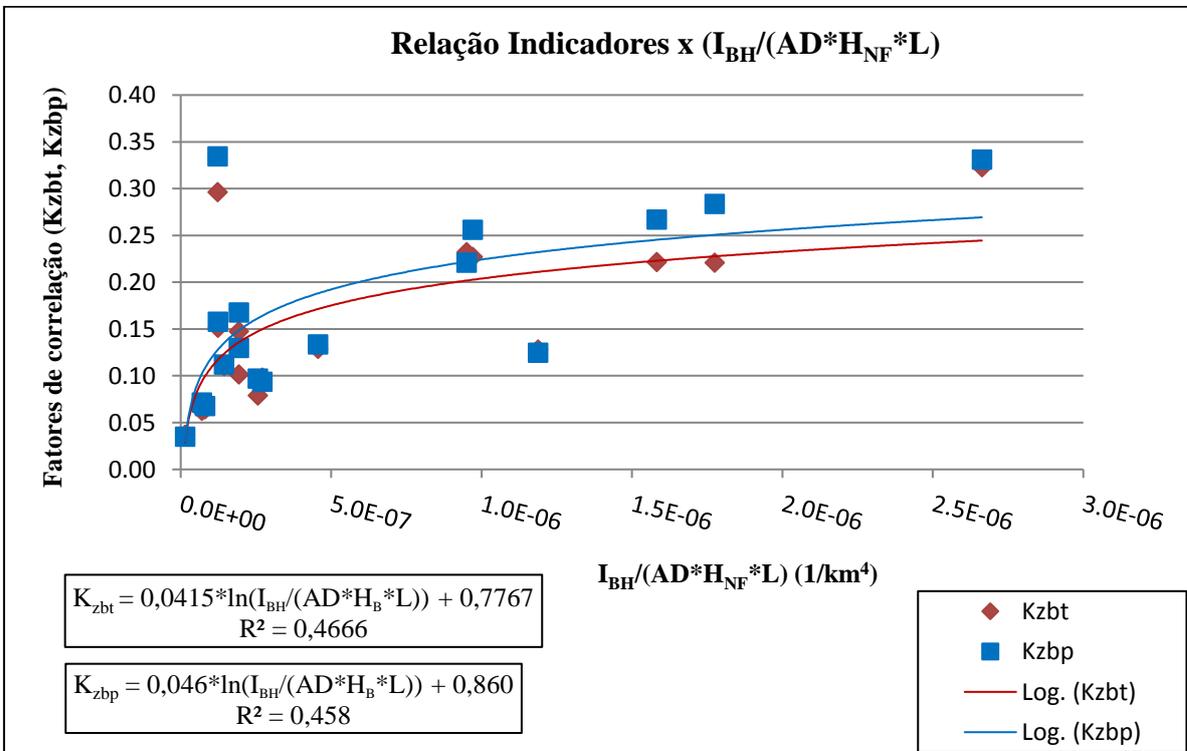


Figura 100: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, as áreas de drenagem, os desníveis e os comprimentos dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

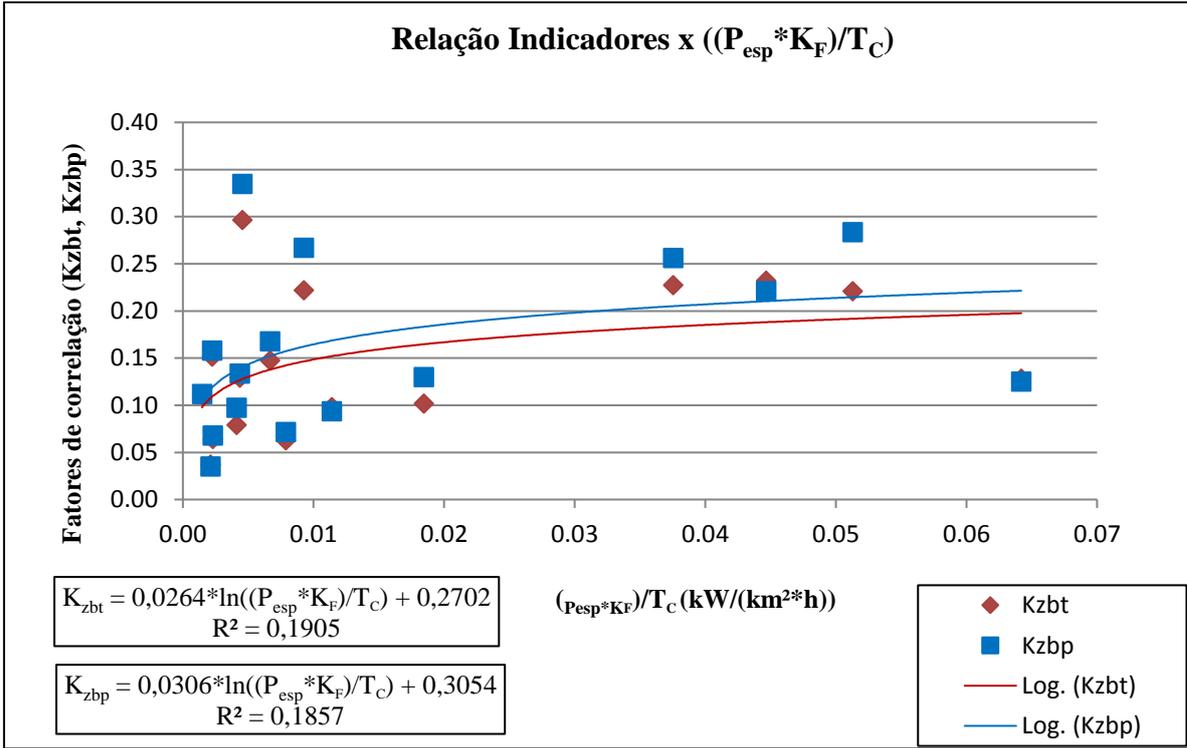


Figura 101: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as potências específicas, os fatores de forma e os tempos de concentração dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

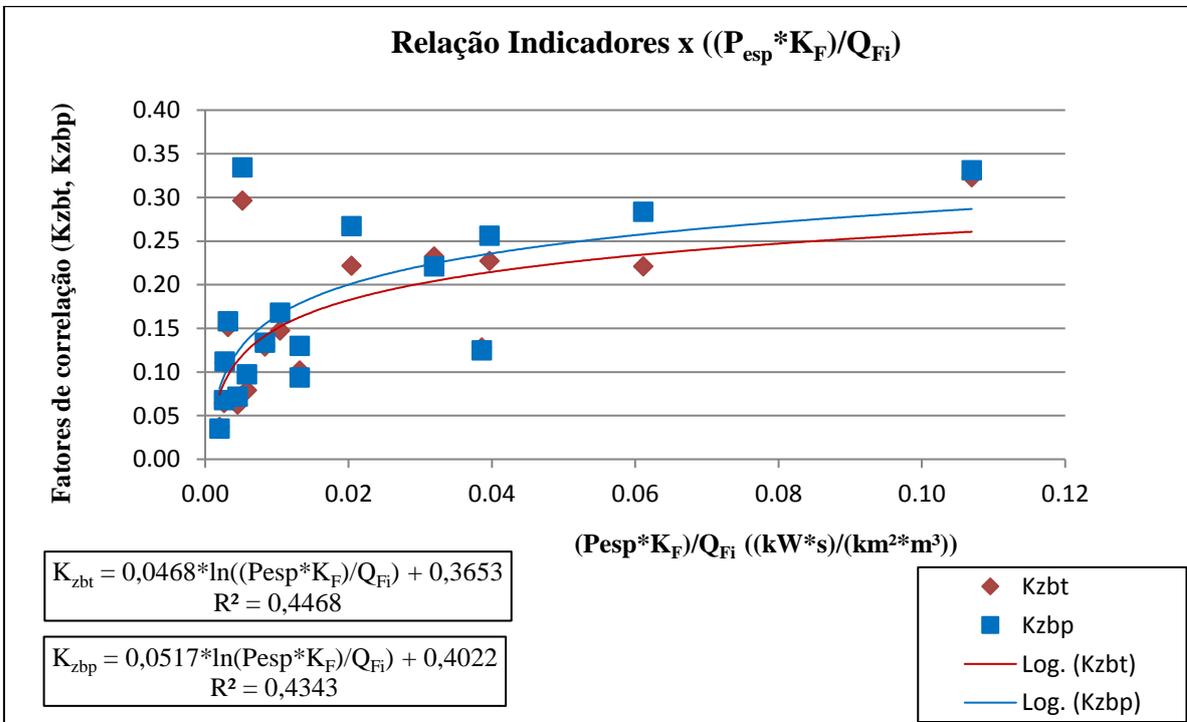


Figura 102: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as potências específicas, os fatores de forma e as vazões médias dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

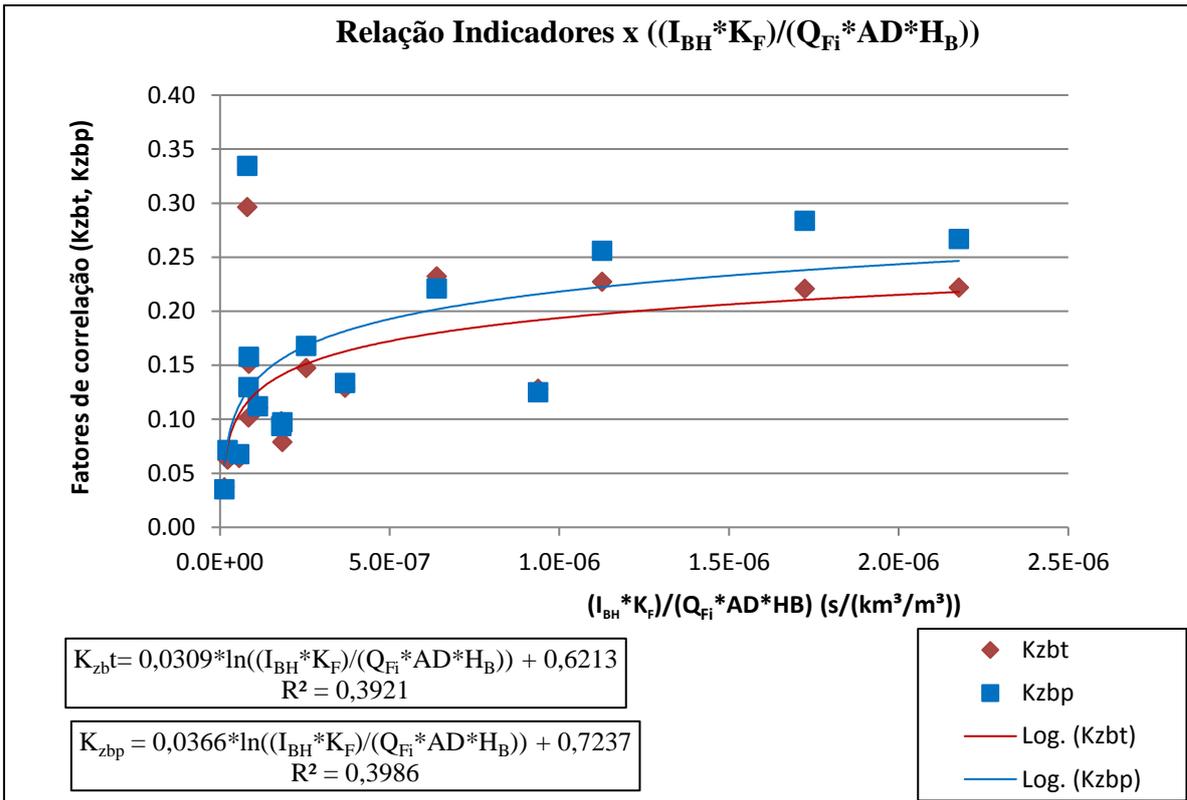


Figura 103: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp), as declividades, os fatores de forma, as vazões médias, as áreas de drenagem e os desníveis dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

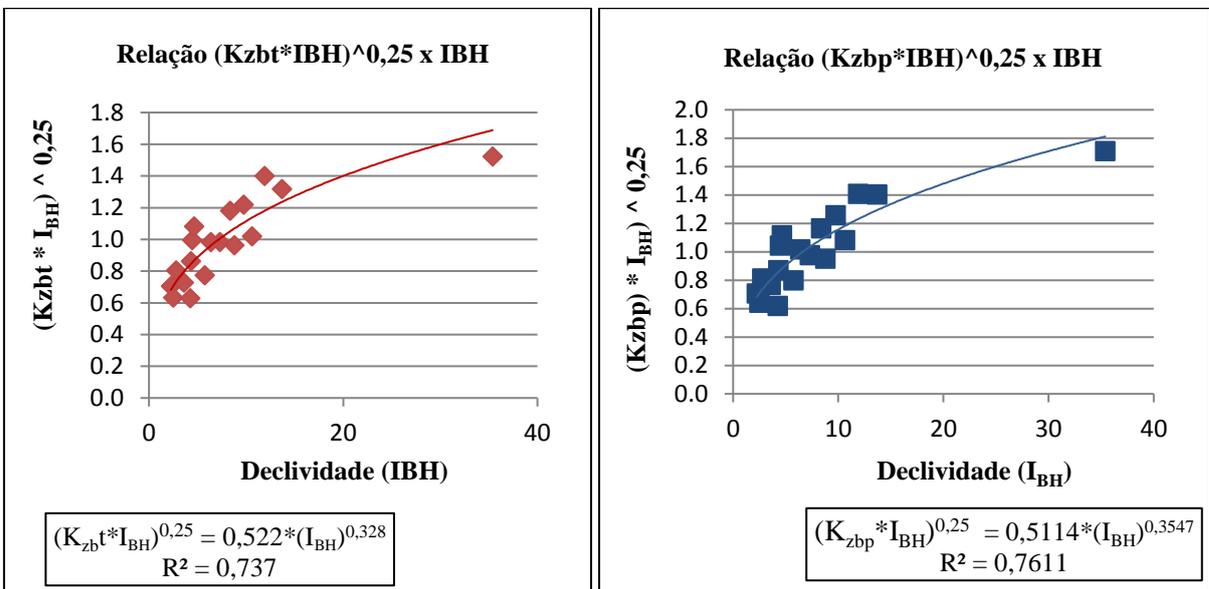


Figura 104: Relação entre os indicadores (Kzbt, Kzbp) em função das declividades dos cursos d'água.
 Fonte: Autor.

A Equação 3, a seguir, é oriunda do gráfico de relação de K_{zbt} em função da Declividade, e resulta, de uma maneira mais simplificada, na Equação 34.

$$(K_{zbt} * I_{BH})^{0,25} = 0,522 * (I_{BH})^{0,328} \quad \text{(Equação 33)}$$

$$K_{zbt} = 0,074 * (I_{BH})^{0,312} \quad \text{(Equação 34)}$$

A Equação 35, a seguir, é oriunda do gráfico de relação de K_{zbp} em função da Declividade, e resulta, de uma maneira mais simplificada, na Equação 36.

$$(K_{zbp} * I_{BH})^{0,25} = 0,511 * (I_{BH})^{0,354} \quad \text{(Equação 35)}$$

$$K_{zbp} = 0,085 * (I_{BH})^{0,416} \quad \text{(Equação 36)}$$

Com a finalidade de se obter uma correlação entre os indicadores (K_{zbt} e K_{zbp}) e os parâmetros da bacia hidrográfica analisados no trabalho, encontraram-se as equações que melhor representassem os dados. Alguns números foram suprimidos, a fim de se conseguir uma lei mais expressiva. Sendo assim, para as Figuras 86, 87, 95, 97, 98 e 100, retirou-se o rio I; para as Figuras 89, 90, 91, 93, 96 e 99, suprimiu-se o rio X; para as Figuras 102 e 103, suprimiram-se os rios I e VI. Contudo, os valores dos desvios padrões são referentes a todos os 18 cursos d'água analisados.

APÊNDICE C – VALIDAÇÃO DA FÓRMULA PARA O CALCULO DA POTÊNCIA MÁXIMA APROVEITÁVEL EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Como mencionado anteriormente, para a validação do equacionamento encontrado na Equação 32 descrita no corpo do texto do estudo, a mesma foi aplicada nos cursos d'água utilizados anteriormente nas sub-bacias hidrográficas 61, 60 e 56, bem como em alguns outros rios também alocados no Estado de Minas Gerais, pertencentes as sub-bacias de código 55, 42, 41 e 40. Serão apresentados os dados referentes aos 10 novos cursos d'água, que foram prospectados e confirmados com a presença de aproveitamentos hidrelétricos em cascata, cada qual, respeitando as características das áreas analisadas. Ressalta-se o fato das usinas identificadas apresentarem potencial hidrelétrica igual ou superior a 1 MW, tanto para a PPH anterior como para essa de aplicação da fórmula, o que pode acarretar em um número menor de usinas identificadas.

Os nomes dos novos rios apresentados também foram modificados para uma numeração ordinal a fim de se preservar as informações de PPH. Contudo, essa numeração será consecutiva aos rios já estudados anteriormente. Logo, apresenta-se a denominação crescente de Curso d'água XIX, Curso d'água XX ... até o Curso d'água XXVIII. Mais uma vez, os aproveitamentos identificados nos estudos de casos são apresentados da nascente para a foz do rio principal com a numeração ordinal correspondente ao nome do curso d'água e seguidos de uma letra do alfabeto que é responsável pela identificação da quantidade de centrais em cascata presentes no rio.

Tendo em vista que os dados dos 18 cursos d'água estudados anteriormente encontram-se apresentados no APÊNDICE A, segue-se a análise realizada para os demais rios, com base nas considerações e critérios mencionados para a dissertação.

São apresentados então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 55. Vale ressaltar que o estudo do Curso d'água XIX encontra-se no texto e os demais rios da sub-bacia em questão, estão listados a seguir.

Curso d'água XX

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 105 e 106 e nas Tabelas 53 e 54.

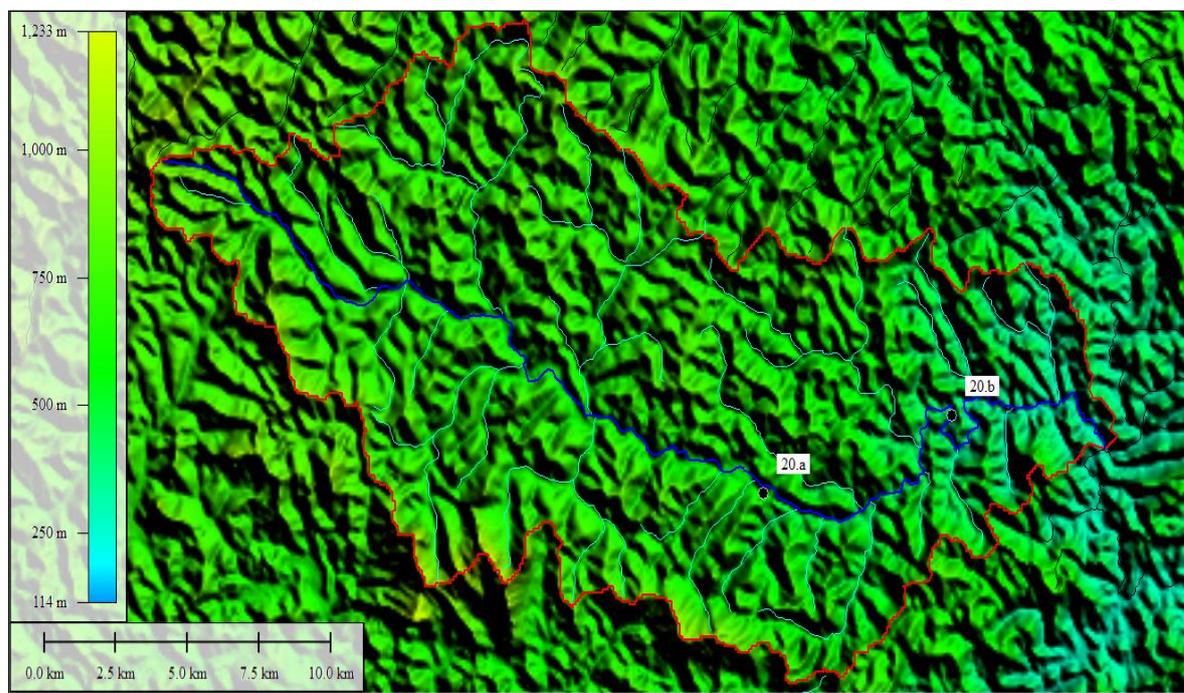


Figura 105: Representação do Curso d'água XX com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 53: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XX.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	975,00				
Confluência 1-a		625,00	50,4	14,1	0,36
Nascente 2	760,00				
Confluência 2-a		625,00	35,9	9,5	0,26
Nascente 3	895,00				
Confluência 3-b		615,00	34,6	11,3	0,25
Nascente 4	615,00				
Confluência 4-b		465,00	14,0	7,5	0,10
Nascente 5	760,00				
Confluência 5-b		435,00	31,1	11,3	0,23
Σ					1,20
$\frac{\Sigma}{NA_{n,asc}}$	841,11				

Fonte: Autor.

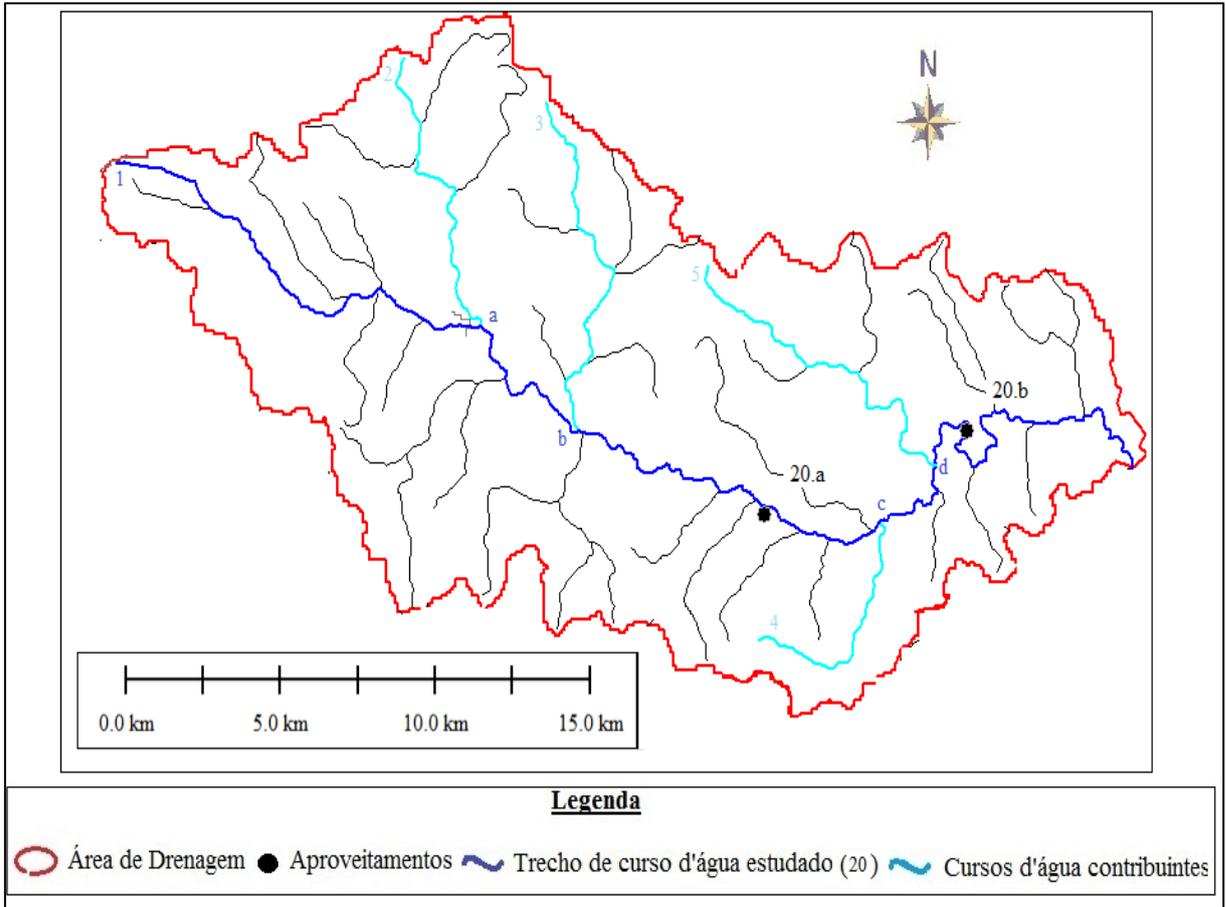


Figura 106: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XX e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor

Tabela 54: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XX.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	841,11							
(20.a)		195,4		1,41	97,0	1.345,28	2,09	1.580,36
(20.b)		275,0		1,99	67,0	1.307,89	2,95	1.518,74
Foz no rio principal	295,0	316,1	46,9	2,29	546,11			
Σ						2.653,18		3.099,11

Fonte: Autor.

Curso d'água XXI

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 107 e 108 e nas Tabelas 55 e 56.

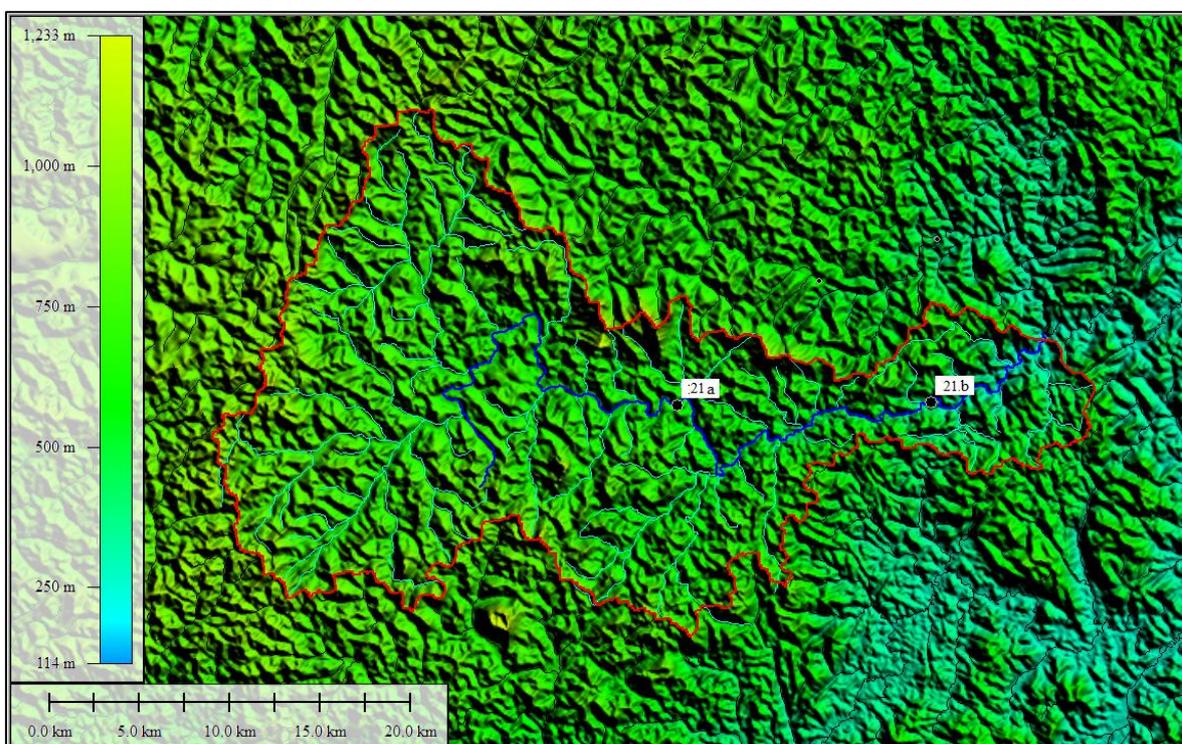


Figura 107: Representação do Curso d'água XXI com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 55: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXI.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	860,00				
Confluência 1-a		665,00	6,7	5,1	0,05
Nascente 2	1.000,00				
Confluência 2-a		665,00	158,0	15,5	1,14
Nascente 3	945,00				
Confluência 3-b		650,00	100,6	17,8	0,73
Nascente 4	685,00				
Confluência 4-b		595,00	22,9	5,7	0,17
Nascente 5	830,00				
Confluência 5-b		500,00	65,7	12,0	0,48
Σ					2,56
\bar{NA}_{nasce}	929,76				

Fonte: Autor.

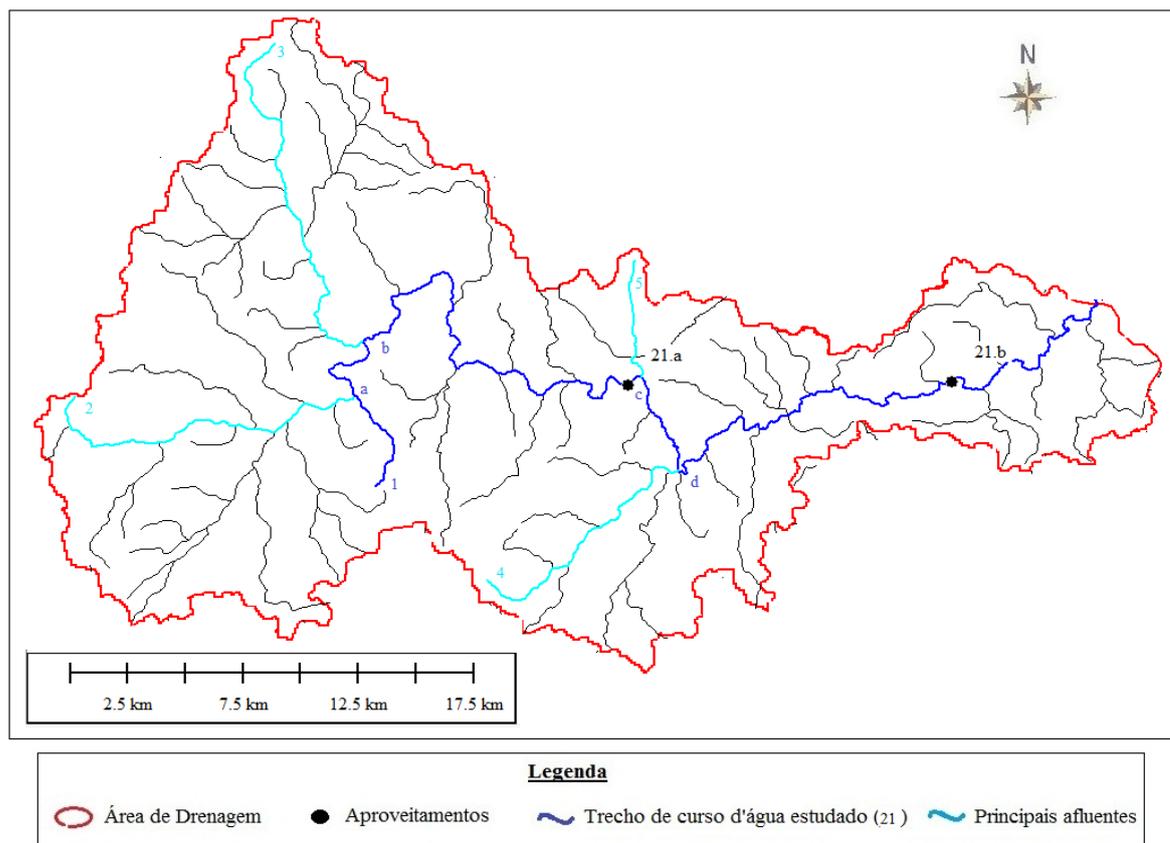


Figura 108: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXI e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor

Tabela 56: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXI.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	929,76							
(21.a)		399,7		2,89	58,0	1.644,35	4,07	1.859,92
(21.b)		565,1		4,09	104,0	4.172,78	6,06	4.874,79
Foz no rio principal	280,0	631,3	63,9	4,57	649,8			
Σ						5.817,13		6.734,70

Fonte: Autor.

São apresentados então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 41.

Curso d'água XXII

O rio apresenta 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 109 e 110 e nas Tabelas 57 e 58.

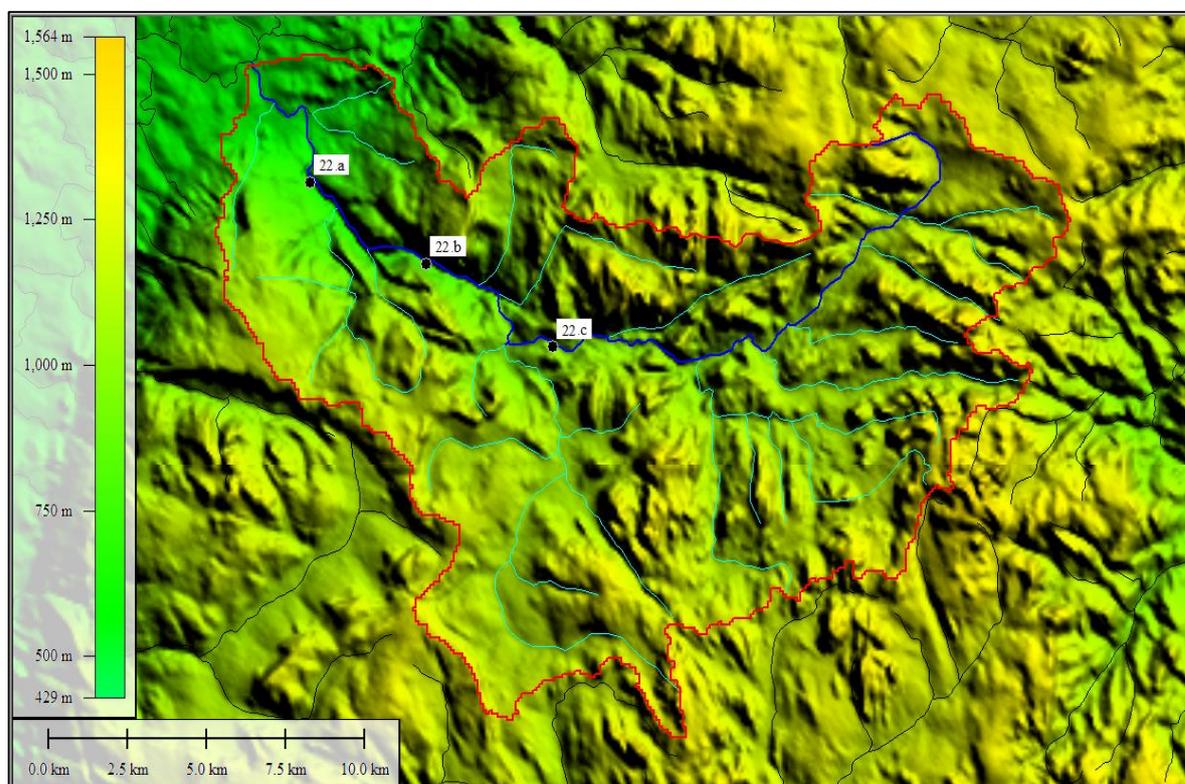


Figura 109: Representação do Curso d'água XXII com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 57: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	1.335,00				
Confluência 1-a		1.025,00	59,3	13,3	0,76
Nascente 2	1.340,00				
Confluência 2-a		1.025,00	46,1	10,7	0,59
Nascente 3	1.015,00				
Confluência 3-b		1.220,00	8,7	6,7	0,11
Nascente 4	1.305,00				
Confluência 4-b		980,00	62,1	16,4	0,79
Nascente 5	1.160,00				
Confluência 5-b		675,00	18,3	6,2	0,23
Σ NA_{nasce}	1295,81				2,48

Fonte: Autor.

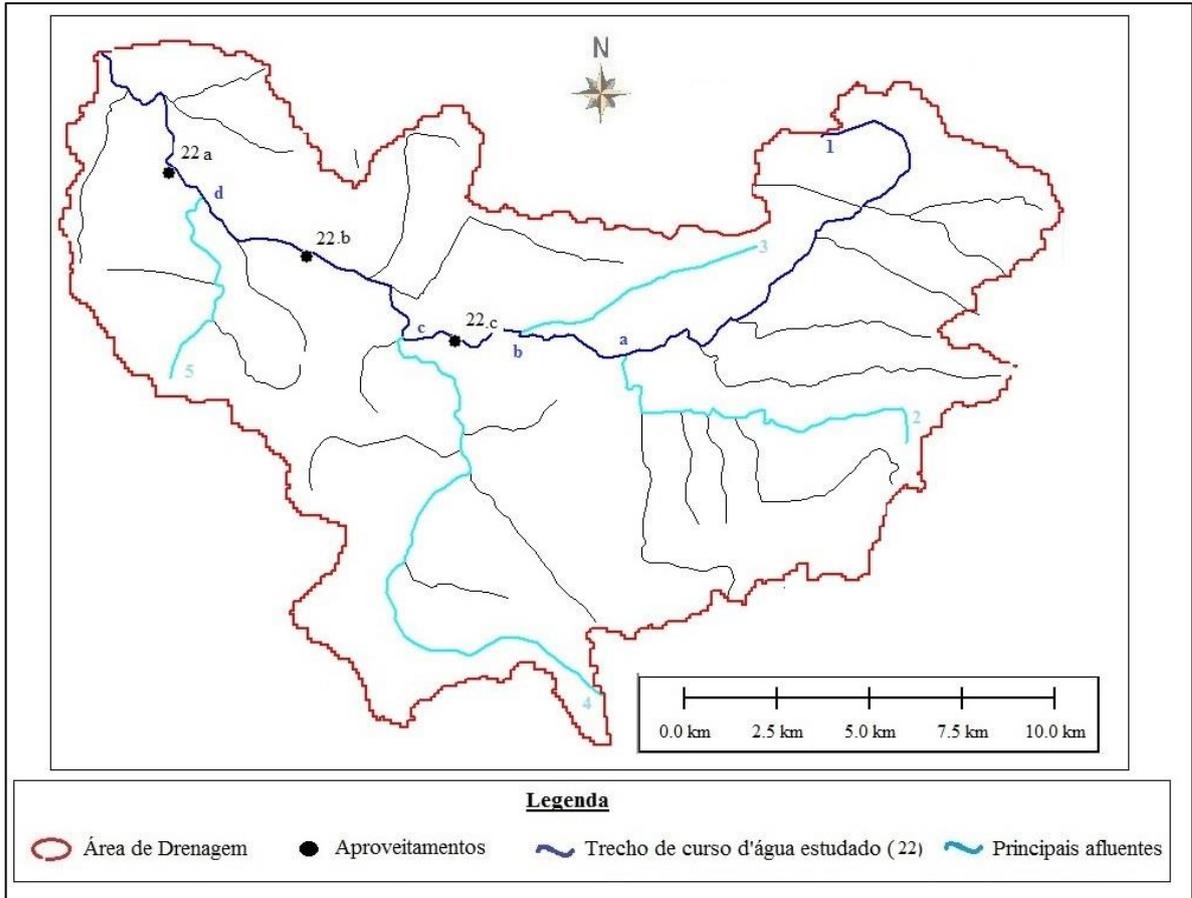


Figura 110: Bacia Hidrográfica do Curso d’água XXII e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor

Tabela 58: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d’água XXII.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	1.295,8							
(22.a)		123,5		1,57	144,0	2.222,56	0,94	1.051,06
(22.b)		210,5		2,68	112,0	2.944,57	1,61	1.398,73
(22.c)		239,7		3,05	88,0	2.633,00	1,83	1.251,28
Foz no rio principal	575,0	266,4	33,3	3,39	720,8			
Σ						7.800,13		3.701,06

Fonte: Autor.

Curso d'água XXIII

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 111 e 112 e nas Tabelas 59 e 60.

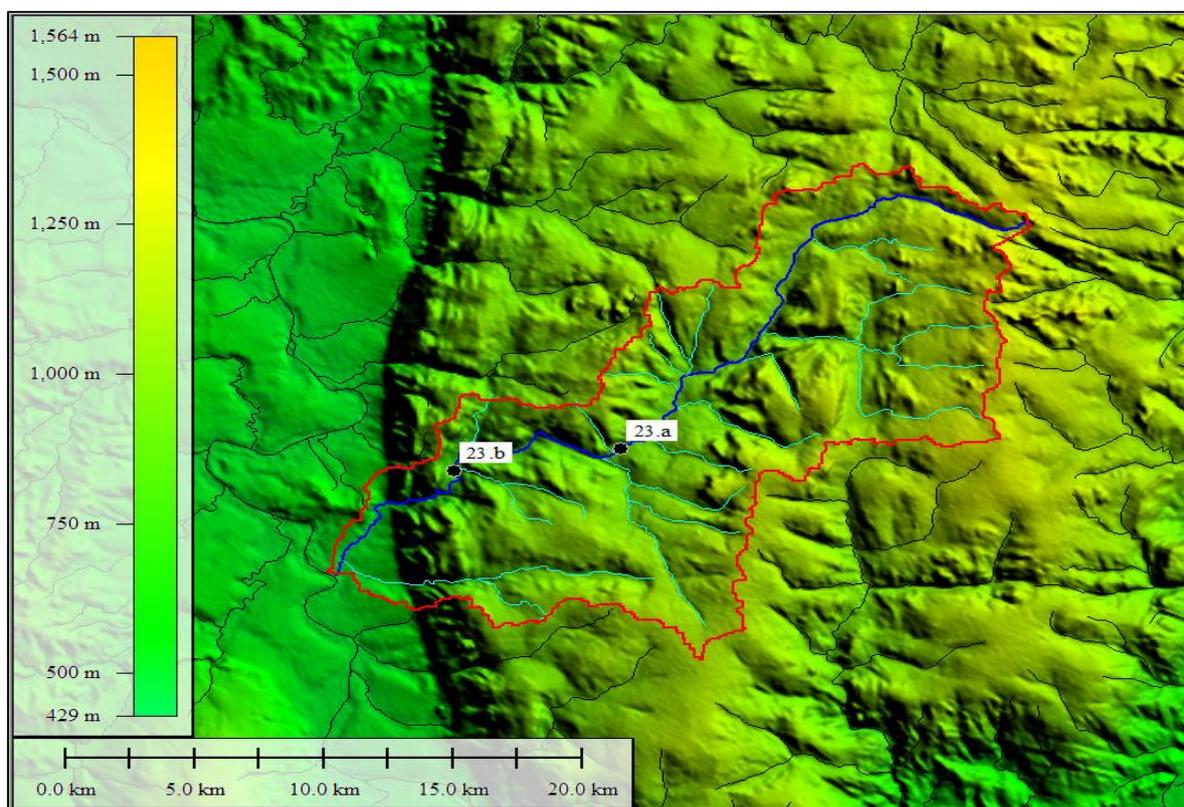


Figura 111: Representação do Curso d'água XXIII com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 59: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	1.250,00				
Confluência 1-a		975,00	47,1	15,0	0,60
Nascente 2	1.250,00				
Confluência 2-a		975,00	57,7	9,4	0,73
Nascente 3	1.110,00				
Confluência 3-b		920,00	35,2	9,9	0,45
Nascente 4	1.065,00				
Confluência 4-b		515,00	32,9	12,8	0,42
Σ					2,20
$NA_{nascente}$	1.186,30				

Fonte: Autor.

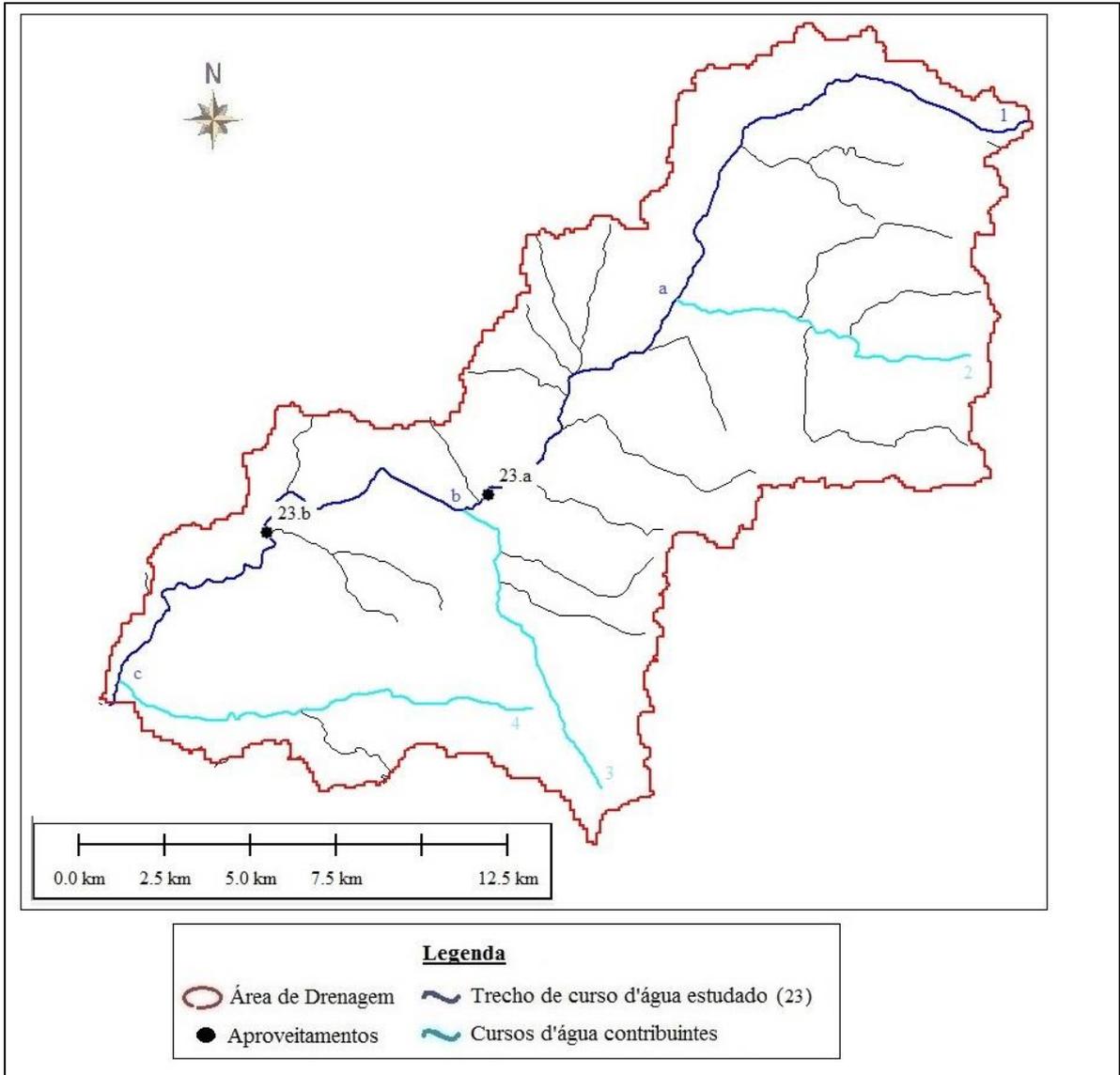


Figura 112: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXIII e seus aproveitamentos.
 Fonte: Autor

Tabela 60: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXIII.

Local	Cota NA [m]	AD [km ²]	L [km]	\bar{Q}_{Fi} [m ³ /s]	H_B [m]	Potência Instalada – Prospecção [kW]	Q_{proj} [m ³ /s]	Potência de Projeto [kW]
Nascente do rio principal	1.186,3							
(23.a)		163,7		2,08	108,0	2.208,80	1,25	1.045,75
(23.b)		221,6		2,82	260,0	7.201,85	1,69	3.634,76
Foz no rio principal	515,0	284,8	40,9	3,63	671,3			
Σ						9.410,65		4.680,50

Fonte: Autor.

São apresentados então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 40.

Curso d'água XXIV

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 113 e 114 e nas Tabelas 61 e 62.

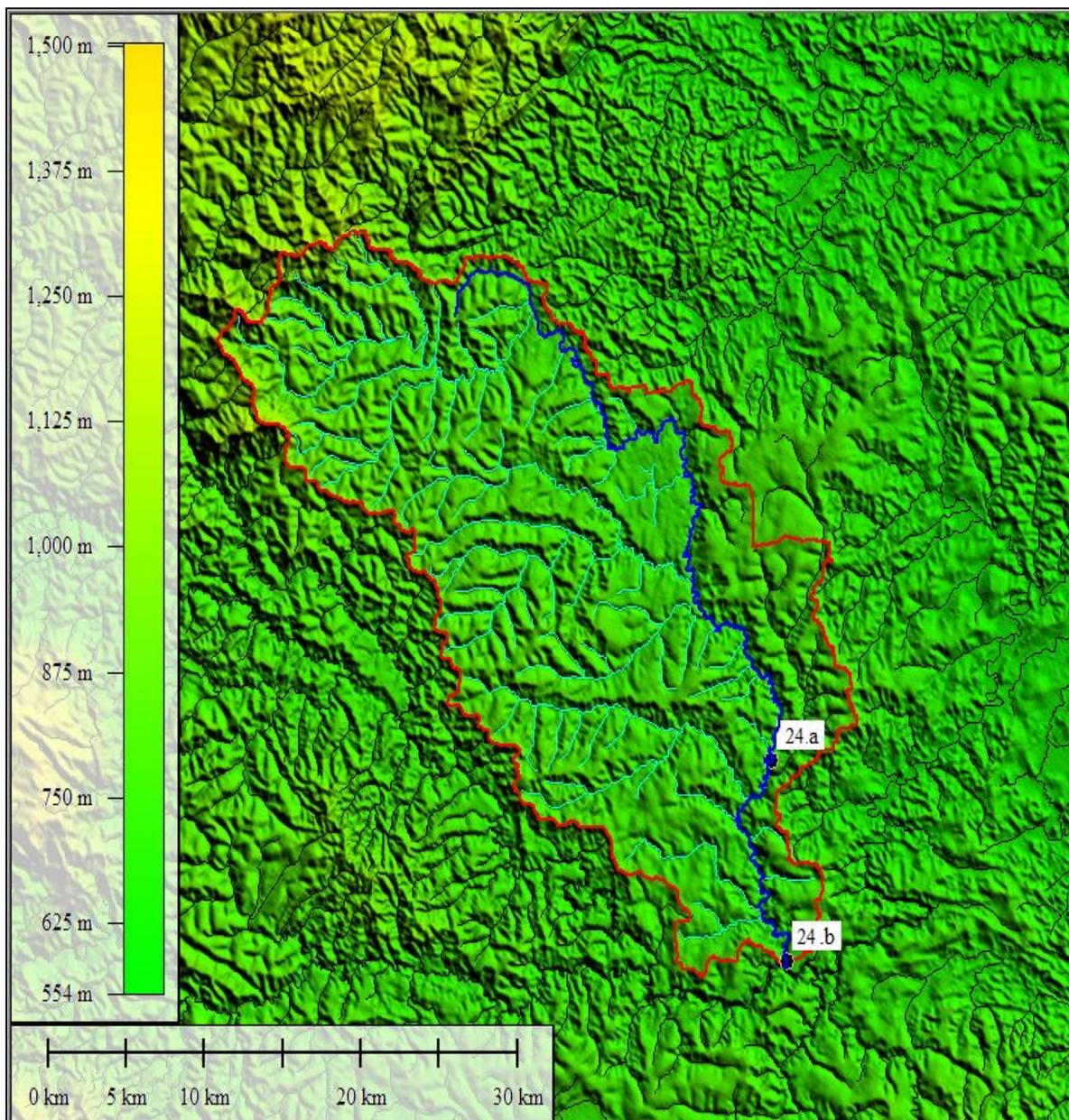
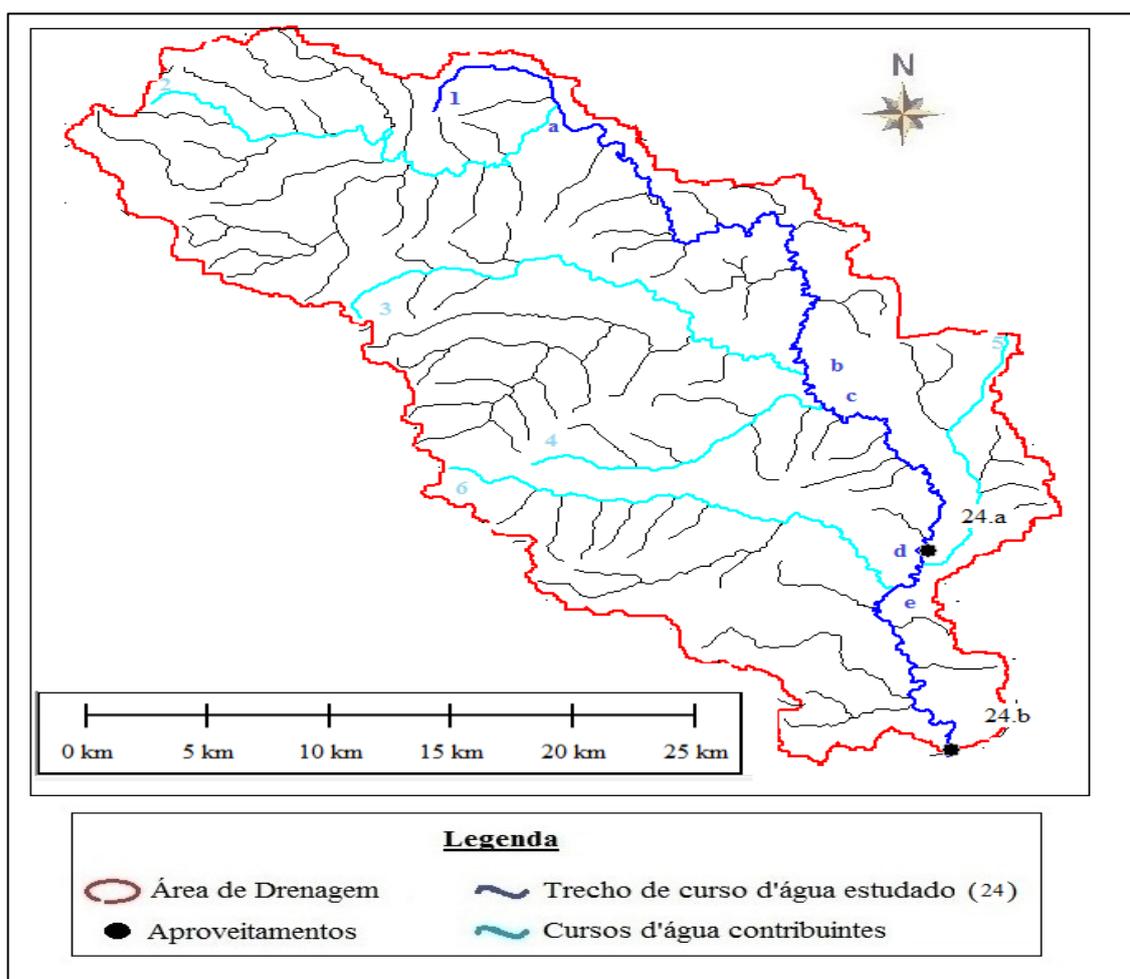


Figura 113: Representação do Curso d'água XXIV com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 61: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXIV.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	850,00				
Confluência 1-a		755,00	17,0	7,4	0,41
Nascente 2	1.010,00				
Confluência 2-a		755,00	169,8	27,4	4,05
Nascente 3	865,00				
Confluência 3-b		720,00	137,1	26,9	3,27
Nascente 4	845,00				
Confluência 4-b		720,00	45,9	14,1	1,09
Nascente 5	745,00				
Confluência 5-b		695,00	50,9	14,6	1,21
Nascente 6	835,00				
Confluência 6-b		695,00	91,3	22,5	2,18
Σ					12,21
\bar{NA}_{total}	893,52				

Fonte: Autor.

**Figura 114:** Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXIV e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor

Tabela 62: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXIV.

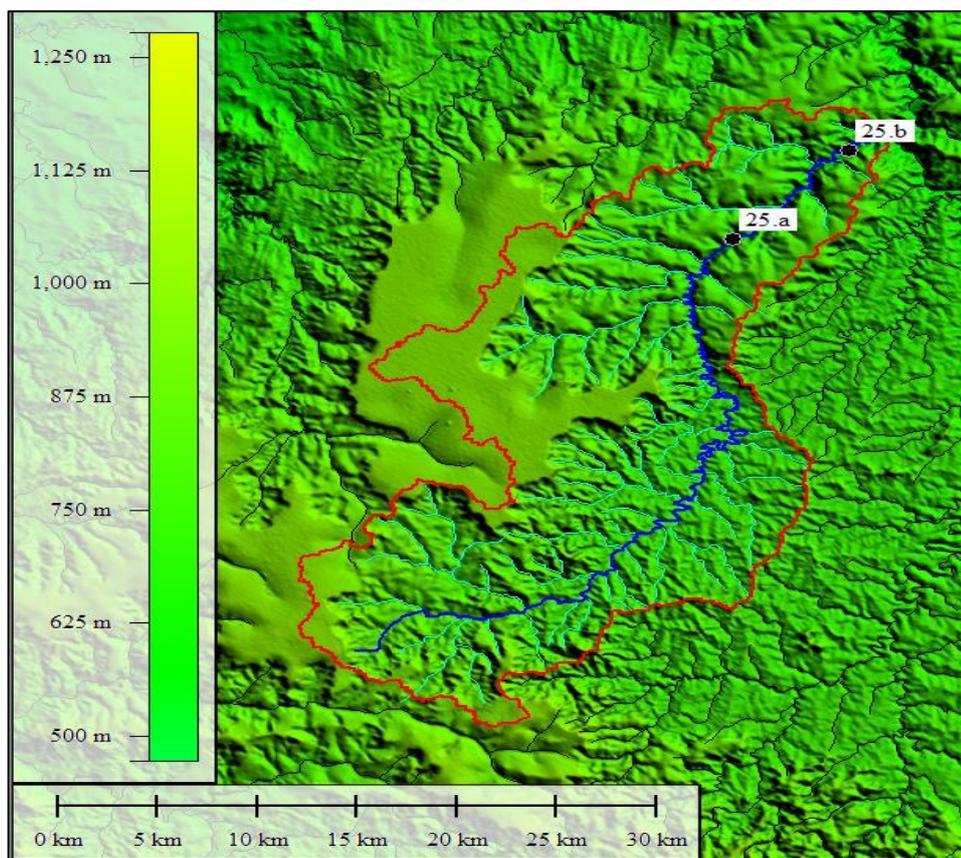
Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	893,5							
(24.a)		488,0		11,64	20,0	2.283,77	12,45	1.961,87
(24.b)		733,0		17,48	22,0	3.772,53	18,70	3.241,42
Foz no rio principal	675,0	733,2	78,0	17,49	218,5			
Σ						6.056,30		5.203,29

Fonte: Autor.

São apresentados então, os estudos para os rios alvos dessa dissertação alocados na Sub-bacia Hidrográfica 42.

Curso d'água XXV

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 115 e 116 e nas Tabelas 63 e 64.

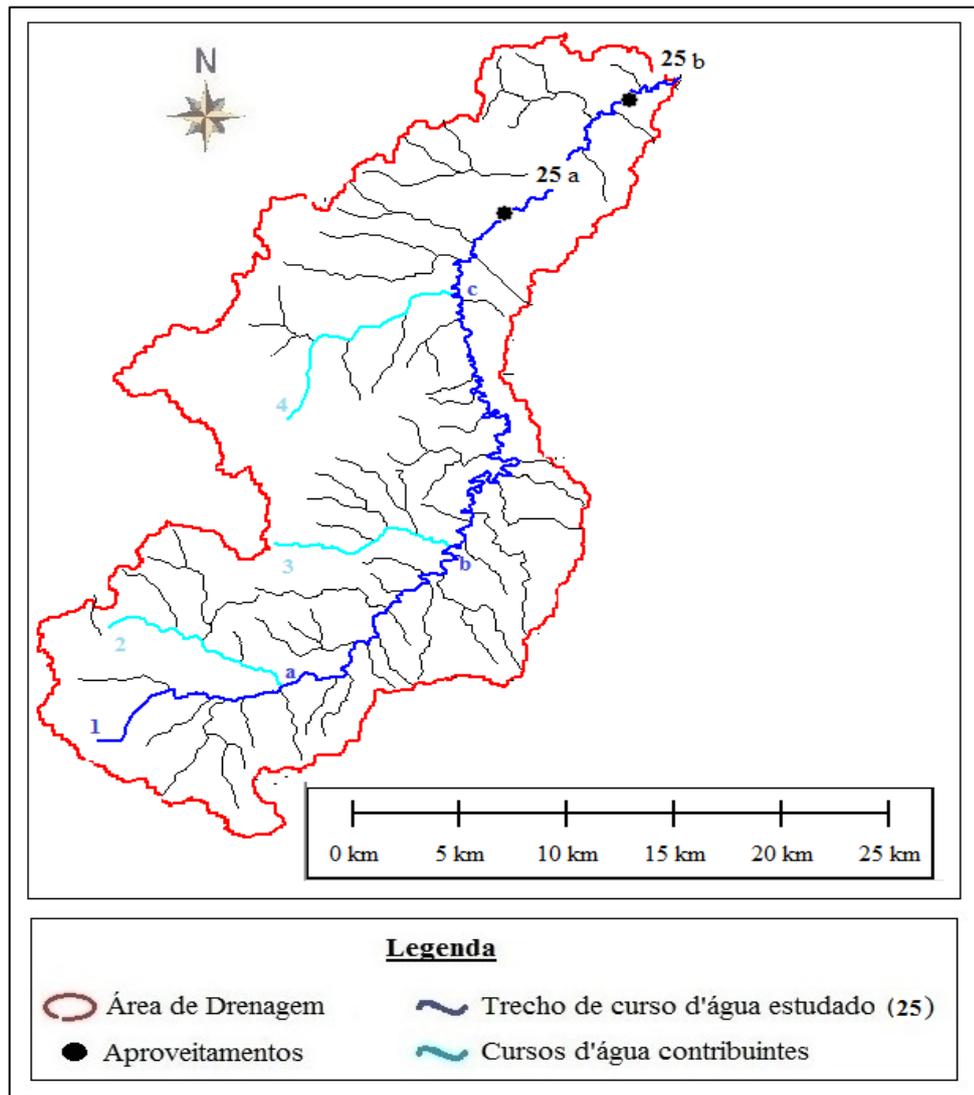
**Figura 115:** Representação do Curso d'água XXV com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor

Tabela 63: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXV.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	920,00				
Confluência 1-a		780,00	71,4	10,6	1,26
Nascente 2	905,00				
Confluência 2-a		780,00	49,2	9,9	0,87
Nascente 3	945,00				
Confluência 3-b		745,00	41,0	9,2	0,73
Nascente 4	945,00				
Confluência 4-b		705,00	83,7	11,9	1,48
\sum					4,34
$\frac{\sum}{NA_{max}}$	929,70				

Fonte: Autor.

**Figura 116:** Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXV e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor

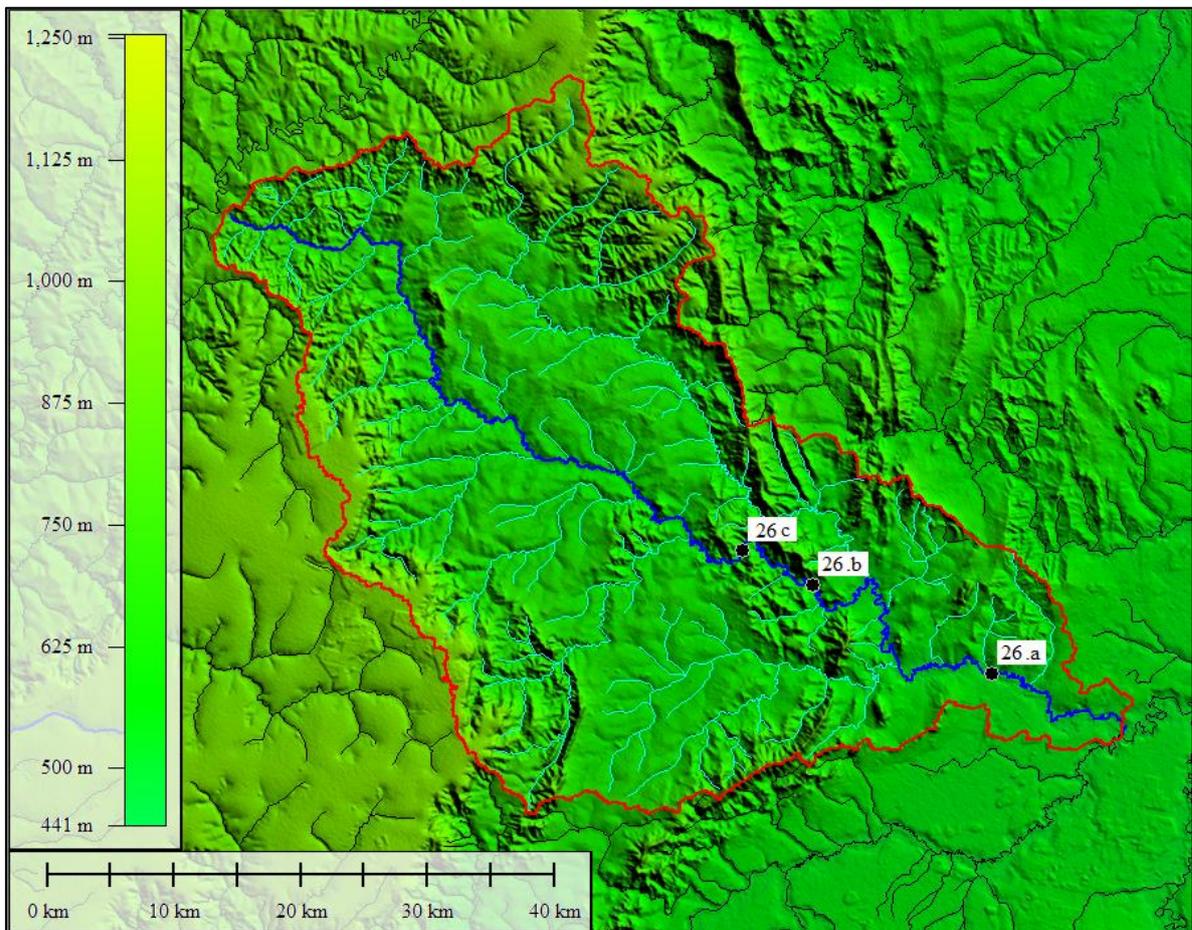
Tabela 64: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXV.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	929,7							
(25.a)		473,5		8,39	42,0	3.455,47	12,58	4.047,84
(25.b)		554,1		9,81	28,0	2.694,61	12,33	2.677,99
Foz no rio principal	580,0	561,7	81,7	9,95	349,7			
Σ						6.150,08		6.725,83

Fonte: Autor.

Curso d'água XXVI

O rio apresenta 3 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 117 e 118 e nas Tabelas 65 e 66.

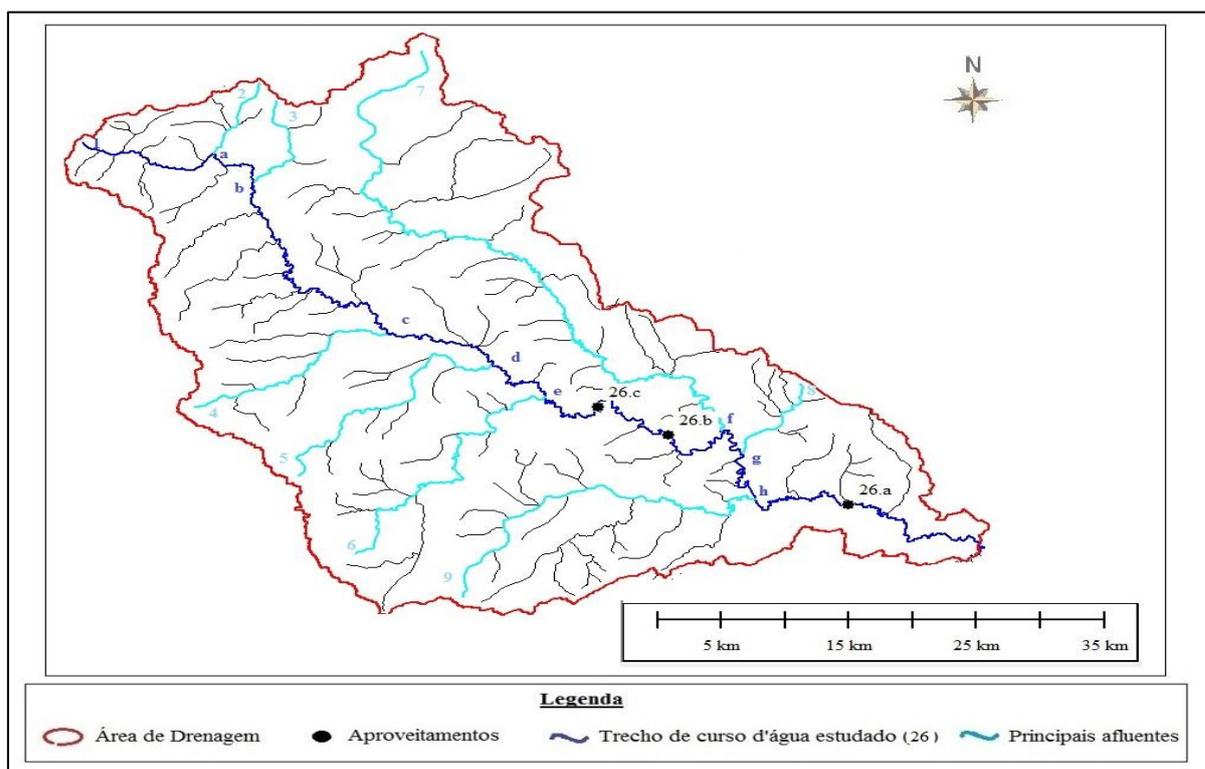
**Figura 117:** Representação do Curso d'água XXVI com base de imagem de satélite.

Fonte: Autor

Tabela 65: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVI.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	775,00				
Confluência 1-a		680,00	77,0	12,9	0,99
Nascente 2	880,00				
Confluência 2-a		680,00	38,4	8,9	0,49
Nascente 3	745,00				
Confluência 3-b		660,00	43,5	11,1	0,56
Nascente 4	880,00				
Confluência 4-b		600,00	117,7	20,5	1,52
Nascente 5	965,00				
Confluência 5-b		590,00	129,7	26,5	1,67
Nascente 6	835,00				
Confluência 6-b		585,00	180,9	32,7	2,33
Nascente 7	930,00				
Confluência 7-b		545,00	513,6	79,3	6,61
Nascente 8	650,00				
Confluência 8-b		545,00	50,0	10,1	0,64
Nascente 9	650,00				
Confluência 9-b		535,00	290,8	36,9	3,74
Σ					18,56
$\frac{\Sigma}{NA_{total}}$	835,76				

Fonte: Autor.

**Figura 118:** Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVI e seus aproveitamentos.

Fonte: Autor

Tabela 66: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVI.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	835,8							
(26.a)		1.401,4		18,04	10,0	1.769,72	24,18	1.750,58
(26.b)		1.426,0		18,36	18,0	3.242,01	24,61	3.365,45
(26.c)		1.977,2		25,45	10,0	2.496,65	31,53	2.282,70
Foz no rio principal	520,0	2.073,0	149,5	26,69	315,8			
Σ						7.508,38		7.398,73

Fonte: Autor.

Curso d'água XXVII

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 119 e 120 e nas Tabelas 67 e 68.

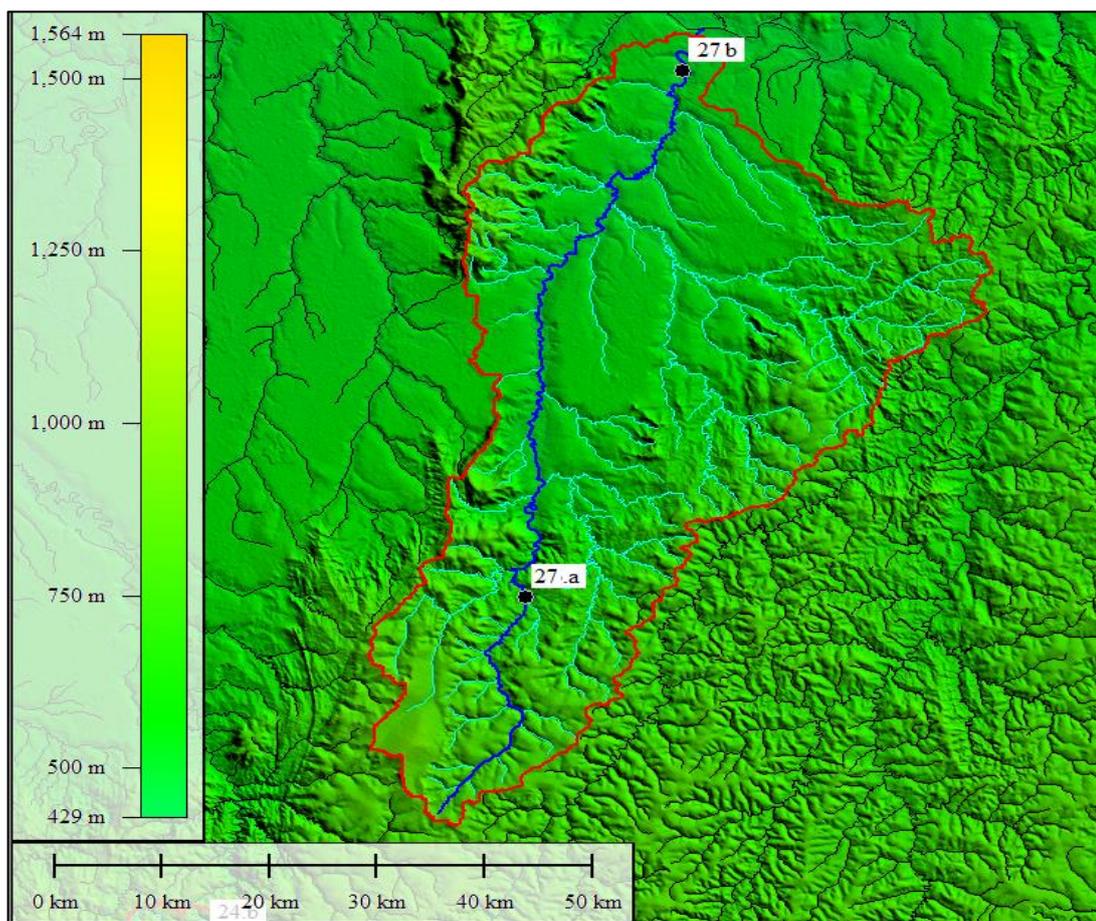
**Figura 119:** Representação do Curso d'água XXVII com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 67: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	805,00				
Confluência 1-a		585,00	235,7	39,4	2,72
Nascente 2	835,00				
Confluência 2-a		585,00	141,9	22,7	1,64
Nascente 3	785,00				
Confluência 3-b		535,00	238,9	40,8	2,75
Nascente 4	675,00				
Confluência 4-b		525,00	64,1	18,4	0,74
Nascente 5	725,00				
Confluência 5-b		505,00	636,5	60,6	7,34
Nascente 6	845,00				
Confluência 6-b		505,00	52,3	14,8	0,60
Nascente 7	650,00				
Confluência 7-b		505,00	42,9	11,1	0,49
Nascente 8	735,00				
Confluência 8-b		500,00	157,7	28,7	1,82
Σ					18,10
\bar{NA}_{total}	757,00				

Fonte: Autor.

Tabela 68: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVII.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	757,0							
(27.a)		232,0		2,68	68,0	1.787,77	2,62	1.369,93
(27.b)		2.188,2		25,23	8,0	1.980,05	24,78	1.395,35
Foz no rio principal	495,0	2.221,1	137,3	25,61	262,0			
Σ						3.767,82		2.765,27

Fonte: Autor.

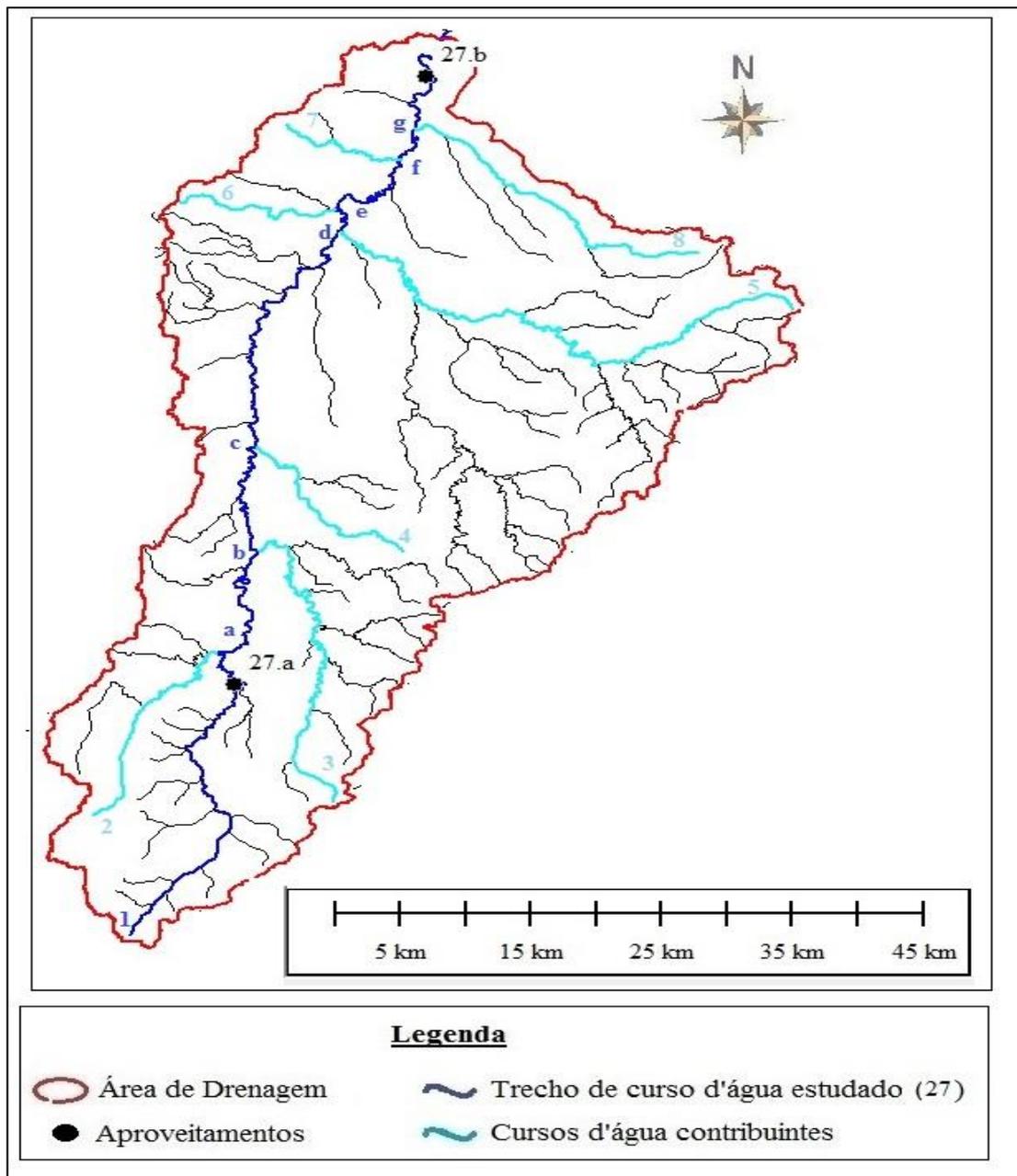


Figura 120: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor

Curso d'água XXVIII

O rio apresenta 2 aproveitamentos em cascata identificados nas Figuras 121 e 122 e nas Tabelas 69 e 70.

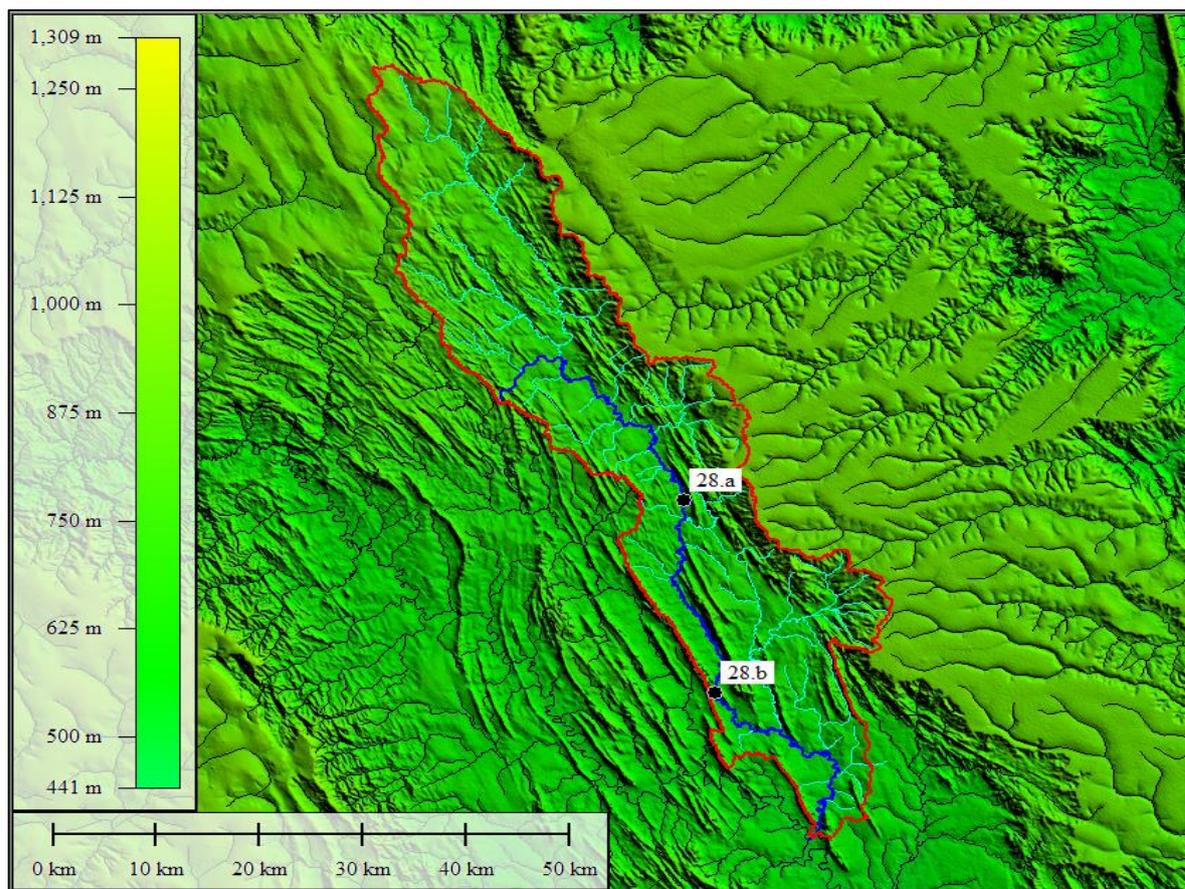


Figura 121: Representação do Curso d'água XXVIII com base de imagem de satélite.
Fonte: Autor

Tabela 69: Dados dos aproveitamentos do Curso d'água XXVIII.

Local	Cota NA Nascente - h_{Ni} (m)	Cota NA Jusante - h_{Fi} (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)
Nascente 1	795,00				
Confluência 1-a		675,00	41,7	9,5	0,46
Nascente 2	885,00				
Confluência 2-a		675,00	366,1	43,2	4,06
Nascente 3	950,00				
Confluência 3-b		640,00	73,2	14,3	0,81
Nascente 4	910,00				
Confluência 4-b		610,00	41,1	12,8	0,46
Nascente 5	925,00				
Confluência 5-b		555,00	166,7	33,2	1,85
Nascente 6	640,00				
Confluência 6-b		550,00	47,1	13,5	0,52
Nascente 7	610,00				
Confluência 7-b		550,00	14,4	6,8	0,16
\sum					8,31
$\frac{\sum}{NA_{n,az}}$	875,93				

Fonte: Autor.

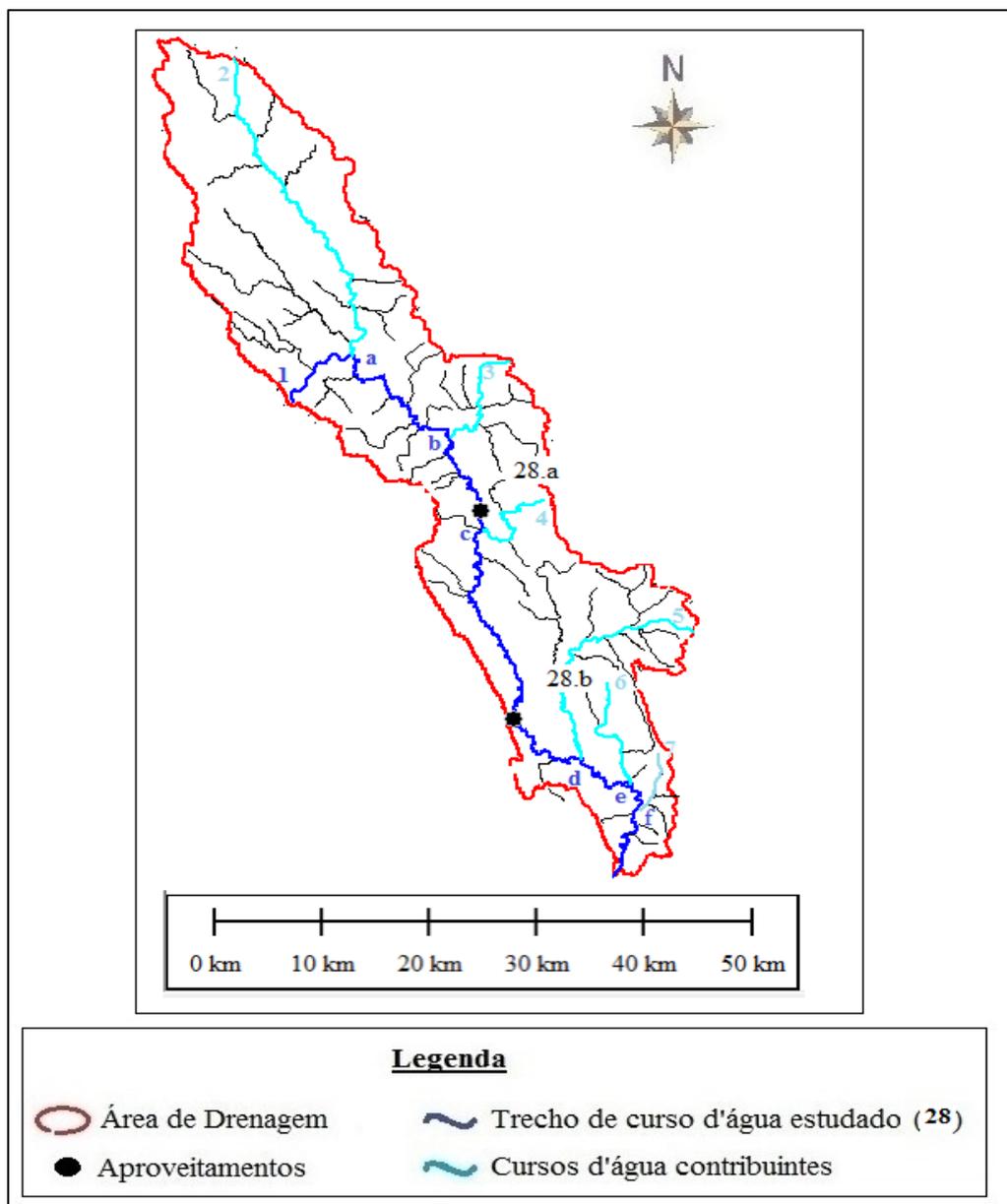


Figura 122: Bacia Hidrográfica do Curso d'água XXVIII e seus aproveitamentos.
Fonte: Autor

Tabela 70: Resultado da análise do potencial hidráulico do Curso d'água XXVIII.

Local	Cota NA (m)	AD (km ²)	L (km)	\bar{Q}_{Fi} (m ³ /s)	H_{NF} (m)	Potência Instalada – Prospecção (kW)	Q_{proj} (m ³ /s)	Potência de Projeto (kW)
Nascente do rio principal	875,9							
(28.a)		813,8		9,02	20,0	1.768,96	8,96	1.411,917
(28.b)		967,8		10,72	12,0	1.261,96	11,60	1.026,44
Foz no rio principal	535,0	1.065,5	113,2	11,81	340,9			
Σ						3.030,92		2.438,36

Fonte: Autor.