

TRABALHO DE FORMATURA

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Avaliação da disponibilidade e demanda hídrica na UGRHI-05 (Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí), com foco na sub-bacia do rio Atibainha, por meio de geotecnologias e análise de séries históricas hidrológicas

Pedro De Losso Campos

Professora Doutora Lucilia do Carmo Giordano

Rio Claro - SP

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

PEDRO DE LOSSO CAMPOS

Avaliação da disponibilidade e demanda hídrica na UGRHI-05 (Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí), com foco na sub-bacia do rio Atibainha, por meio de geotecnologias e análise de séries históricas hidrológicas

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2026

C.198a Campos, Pedro De Losso

Avaliação da disponibilidade e demanda hídrica na UGRHI-05 (Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí), com foco na sub-bacia do rio Atibainha, por meio de geotecnologias e análise de séries históricas hidrológicas / Pedro De Losso Campos. -- Rio Claro, 2026

159 p. : tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Lucilia do Carmo Giordano

1. Recursos hídricos.. 2. Bacias PCJ.. 3. Geotecnologias.. I. Título.

PEDRO DE LOSSO CAMPOS

Avaliação da disponibilidade e demanda hídrica na UGRHI-05 (Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí), com foco na sub-bacia do rio Atibainha, por meio de geotecnologias e análise de séries históricas hidrológicas

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Lucilia do Carmo Giordano
Maria Luísa Nerys de Moraes Carneiro
Ademir Abdala Prata Junior
Paulina Setti Riedel

Rio Claro, 23 de junho de 2026.

Assinatura do aluno

Assinatura da Orientadora

Agradeço, primeiramente, aos recomeços. Às possibilidades que, mesmo surgindo em momentos inesperados, abriram caminhos para que eu pudesse chegar até aqui. Retomar uma graduação aos 31 anos foi, acima de tudo, compreender que nenhuma trajetória anterior se perde. Cada escolha, cada dificuldade, cada tentativa e cada aprendizado fizeram parte de um percurso necessário. Hoje entendo que não cheguei a este momento apesar do que vivi, mas também por causa de tudo o que vivi.

Agradeço à vida por ter me permitido reconstruir planos, rever certezas e encontrar novos sentidos em uma caminhada que nem sempre foi linear. Houve momentos de dúvida, cansaço e insegurança, mas também houve amadurecimento, persistência e a descoberta de que ainda era possível começar de novo. Este trabalho representa não apenas a conclusão de uma etapa acadêmica, mas também a confirmação de que os caminhos percorridos, mesmo os mais difíceis, contribuíram para me formar como pessoa.

À minha mãe Cassia Fernanda De Losso, deixo um agradecimento que ultrapassa qualquer palavra. Com o tempo, sua história passou a ocupar em mim um lugar diferente: mais profundo, mais compreensivo.. Hoje consigo olhar para muitas coisas vividas e enxergar de forma diferente, entendendo que cada pessoa carrega suas próprias dores, limitações, escolhas e formas possíveis de amar. Sua presença permanece em mim de maneiras que não se explicam completamente, mas que se sentem. Entre tantas lembranças, guardo com especial importância o orgulho que demonstrou sentir. Essa certeza me acompanhou e continuará me acompanhando como força silenciosa, afeto e direção.

À minha orientadora, Professora Doutora Lucilia do Carmo Giordano, expresso minha sincera e profunda gratidão. Agradeço por acreditar no meu desenvolvimento, muitas vezes antes mesmo que eu conseguisse acreditar plenamente. Sua orientação, paciência, confiança e apoio foram fundamentais não apenas para a construção deste trabalho, mas também para minha formação acadêmica e pessoal. Não tenho como agradecer, em palavras suficientes, por tudo que fez e faz por mim. Sua presença neste processo foi essencial para que eu pudesse avançar, aprender e reconhecer novas possibilidades em minha própria trajetória.

Agradeço à minha família, em especial a Carmem e a Tarita De Losso, pelo apoio, pela confiança e por todo incentivo de um valor imenso e ajudaram a tornar possível a conclusão

desta etapa. Agradeço também a todos que, de alguma maneira, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Àqueles que ofereceram apoio, escuta, orientação, amizade, incentivo ou aprendizado, deixo meu reconhecimento. Cada encontro, cada palavra e cada experiência somaram-se à minha formação e à minha história.

Por fim, agradeço a todos os caminhos que me trouxeram até este momento. Aos que foram leves e aos que exigiram mais de mim. Aos que encerraram ciclos e aos que abriram novas possibilidades. Este trabalho carrega não apenas pesquisa, esforço e dedicação, mas também a marca de uma trajetória construída por recomeços, aprendizados e pessoas que, de alguma forma, permanecerão comigo.

RESUMO

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais desafios da gestão ambiental e dos recursos hídricos, especialmente em regiões submetidas à elevada pressão urbana, industrial e agrícola. Este trabalho avaliou a disponibilidade e a demanda hídrica na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGRHI-05), correspondente às Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), com foco na sub-bacia do Atibainha, integrante do Sistema Cantareira. A metodologia baseou-se na integração de geotecnologias, séries históricas hidrológicas, dados telemétricos recentes, informações operacionais do reservatório, dados de qualidade da água, uso e cobertura da terra e variáveis fisiográficas. A sub-bacia foi delimitada em ambiente SIG, com área aproximada de 449,56 km², e analisada a partir de dados da ANA, DAEE/SP-Águas, SAISP, CETESB, MapBiomas, IBGE, SEMIL, INPE e Copernicus DEM. Os resultados indicaram que a disponibilidade hídrica local é condicionada pela interação entre precipitação, relevo, drenagem, armazenamento, operação do reservatório, demanda hídrica, qualidade da água e conservação ambiental. A sub-bacia apresenta relevo ondulado com 53,98% da área em declividade superior a 20%, fator que amplia a sensibilidade ao escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos quando associado a usos antrópicos. A análise multitemporal do MapBiomas demonstrou predomínio de formação florestal entre 1985 e 2024, embora com expansão expressiva da silvicultura e permanência de áreas antropizadas e edificadas. Os dados de qualidade da água evidenciaram maior criticidade no ponto associado ao rio Atibainha, especialmente para indicadores microbiológicos, carga orgânica, oxigenação e metais, reforçando a necessidade de avaliar a disponibilidade hídrica em termos quali-quantitativos. A demanda municipal apresentou crescimento entre 1980 e 2020, com previsão de aumento até 2040, indicando pressão adicional sobre os recursos hídricos. A análise integrada permitiu elaborar um mapa final de vulnerabilidade hidrológica/ambiental, identificando áreas prioritárias para conservação, recuperação de APPs, controle de erosão e monitoramento. Conclui-se que a segurança hídrica da sub-bacia do Atibainha depende da articulação entre gestão operacional do Sistema Cantareira, conservação das áreas produtoras de água, controle do uso do solo e monitoramento contínuo da quantidade e qualidade da água.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Disponibilidade hídrica. Demanda hídrica. Sub-bacia do Atibainha. Bacias PCJ. Sistema Cantareira. Geotecnologias. Séries históricas.

ABSTRACT

Water availability is one of the main challenges in environmental and water resources management, especially in regions subject to high urban, industrial, and agricultural pressure. This study evaluated water availability and demand in Water Resources Management Unit 05 (UGRHI-05), corresponding to the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Basins (PCJ), with a focus on the Atibainha sub-basin, which is part of the Cantareira System. The methodology was based on the integration of geotechnologies, historical hydrological series, recent telemetric data, reservoir operational information, water quality data, land use and land cover data, and physiographic variables. The sub-basin was delimited in a GIS environment, with an approximate area of 449.56 km², and analyzed using data from ANA, DAEE/SP-Águas, SAISP, CETESB, MapBiomass, IBGE, SEMIL, INPE, and Copernicus DEM. The results indicated that local water availability is controlled by the interaction among precipitation, relief, drainage, storage, reservoir operation, water demand, water quality, and environmental conservation. The sub-basin is characterized by strongly undulating relief, with 53.98% of its area showing slopes greater than 20%, a factor that increases sensitivity to surface runoff, erosion, and sediment transport when associated with anthropogenic land uses. The multitemporal MapBiomass analysis showed a predominance of forest formation between 1985 and 2024, although with significant expansion of silviculture and the persistence of anthropized and built-up areas. Water quality data indicated greater criticality at the monitoring point associated with the Atibainha River, especially regarding microbiological indicators, organic load, oxygenation, and metals, reinforcing the need to assess water availability from both quantitative and qualitative perspectives. Municipal water demand increased between 1980 and 2020, with a projected increase by 2040, indicating additional pressure on water resources. The integrated analysis enabled the development of a final hydrological/environmental vulnerability map, identifying priority areas for conservation, restoration of Permanent Preservation Areas, erosion control, and monitoring. It is concluded that water security in the Atibainha sub-basin depends on the articulation between the operational management of the Cantareira System, conservation of water-producing areas, land use control, and continuous monitoring of water quantity and quality.

Keywords: Water resources. Water availability. Water demand. Atibainha sub-basin. PCJ Basins. Cantareira System. Geotechnologies. Historical series.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Superfície de água no Brasil de 1985 a 2024.	19
Figura 2 - UGRHI – 05 – Bacia PCJ.....	33
Figura 3 - Sub Bacia Atibainha.....	34
Figura 4 - Canal principal e reservatório Atibainha.....	35
Figura 5 - Aquedutos - Atlas Águas 2020.....	37
Figura 6 - Geomorfologia.....	39
Figura 7 - Drenagem.	40
Figura 8 – Declividade.	41
Figura 9 - Hipsometria.	42
Figura 10 - Forma das vertentes da área de estudo.	43
Figura 11 - Aspecto de Incidência Solar.	44
Figura 12 - Perfil longitudinal.....	45
Figura 13 - Área de aplicação da Lei da Mata Atlântica.....	46
Figura 14 - Unidades da Mata Atlântica.	48
Figura 15 - Cadastro Nacional de Florestas Públicas.....	49
Figura 16 - Unidades de Conservação.	50
Figura 17 - Áreas de Preservação Permanente.....	51
Figura 18 - Composição Pedológica.	53
Figura 19 - AWC, capacidade de água disponível no solo.	55
Figura 20 - Massa de água total da Sub Bacia.	57
Figura 21 - Uso e ocupação do solo, SEMIL 2013.	58
Figura 22 - Composição municipal da Sub Bacia.....	61
Figura 23 - Divisão municipal.....	62
Figura 24 - Outorgas superficiais e subterrâneas.	63
Figura 25 - Previsão da ANA quanto a disponibilidade hídrica em m ³ /s em 2040.....	66
Figura 26 - Modelo Digital de Elevação.	69
Figura 27 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.	84
Figura 28 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.	85
Figura 29 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.	86

Figura 30 - Processamento da imagem Sentinel para geração dos índices espectrais e produtos hídricos.	87
Figura 31 - Cruzamento espacial entre APPs e MapBiomas para identificação de conflitos de uso.	87
Figura 32 - Cruzamento espacial entre uso do solo e declividade para identificação de áreas críticas.	88
Figura 33 - Cruzamento espacial entre uso do solo e TWI para identificação de áreas.	88
Figura 34 - Cruzamento espacial entre uso do solo e curvatura para identificação de áreas côncavas sensíveis.	89
Figura 35 - Integração dos cruzamentos espaciais para elaboração do mapa de vulnerabilidade hidrológica.	90
Figura 36 - Pontos de Análise quali-quantitativos da Sub Bacia do Atibainha.	94
Figura 37 - Localização do ponto fluviométrico 3E-089 Mascate, no trecho de jusante do Atibainha.	95
Figura 38 - Perfis transversais observados e perfil médio do ponto 3E-089 Mascate.	96
Figura 39 - Seção transversal média representativa do ponto 3E-089 Mascate.	96
Figura 40 - Cálculo de área transversal a montante.	97
Figura 41 - Localização do ponto fluviométrico 3E-121 Atibainha Montante.	98
Figura 42 - Perfis transversais observados e perfil médio do ponto 3E-121 Atibainha Montante.	99
Figura 43 - Seção transversal média representativa do ponto 3E-121 Atibainha Montante.	99
Figura 44 - Cálculo de área transversal a montante.	100
Figura 45 - Principais parâmetros de BAIN02950 com excedência/potencial, não conforme.	104
Figura 46 - Principais parâmetros de RAIN008800 com alertas.	104
Figura 47 - Comparação de alteração observada entre os pontos de amostragem.	105
Figura 48 - Vazões de referência histórica.	107
Figura 49 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 1985.	112
Figura 50 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 1995.	113
Figura 51 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2005.	114
Figura 52 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2013.	115
Figura 53 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2014.	116

Figura 54 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2015.....	117
Figura 55 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2016.....	118
Figura 56 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2017.....	119
Figura 57 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2018.....	120
Figura 58 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2019.....	121
Figura 59 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2020.....	122
Figura 60 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2021.....	123
Figura 61 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2022.....	124
Figura 62 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2023.....	125
Figura 63 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2024.....	126
Figura 64 - Variação do uso e ocupação do solo entre 1985 e 2024.....	128
Figura 65 - Variação da cobertura pelo tempo.	129
Figura 66 – NDVI.	130
Figura 67 – NDWI.	131
Figura 68 – NDTI.....	132
Figura 69 - Índice TWI.	133
Figura 70 - Cruzamento do Índice TWI com Uso e ocupação do Solo 2024.	135
Figura 71 - Cruzamento entre Declividade, TWI, curvatura e vulnerabilidade hidrológica	137
Figura 72 - Área de Preservação Permanente <i>versus</i> Uso e Ocupação do Solo.	140
Figura 73 - Vazão retirada municipal 1980, 2020 e 2040 por município.	142
Figura 74 - Índice final de vulnerabilidade.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Outorgas superficiais e subterrâneas na Sub Bacia através de dados oficiais da ANA.	63
Tabela 2- Resumo Médio das Vazões outorgadas e disponíveis.	64
Tabela 3- Uso da Água por Município de composição da sub bacia.	65
Tabela 4- Distribuição hipsométrica da sub-bacia do Atibainha	92
Tabela 5- Declividade agrupada da sub-bacia do Atibainha.....	93
Tabela 6- Comparação das áreas transversais de montante e jusante.	101
Tabela 7- Síntese das bases integradas.....	101
Tabela 8- Excedências e Alertas quanto a qualidade da água.....	103
Tabela 9- Síntese pluviométrica histórica DAEE/SP-Águas	106
Tabela 10- Maiores chuvas diárias registradas	106
Tabela 11- Síntese fluviométrica histórica DAEE/SP-Águas.....	107
Tabela 12- Q7,10 estimada a partir da base operacional	108
Tabela 13- Correlações entre chuva e variáveis operacionais	108
Tabela 14- Síntese operacional do reservatório Atibainha	110
Tabela 15- Síntese ANA/Sistema Cantareira para o Atibainha	111
Tabela 16- Variação do uso e cobertura da terra – MapBiomas Coleção 10.1.....	127
Tabela 17- Distribuição das classes de TWI.....	134
Tabela 18- Distribuição das classes de curvatura	135
Tabela 19- Agrupamento da exposição solar das vertentes	138
Tabela 20- Conflito entre uso e ocupação do solo <i>versus</i> APP.....	141
Tabela 21- Uso da água por município associado à sub-bacia.....	142
Tabela 22- Comparação entre demanda municipal e vazões de referência	143
Tabela 23- Comprometimento hídrico por microbacia em 2040.....	144
Tabela 24- Classes finais do índice de vulnerabilidade hidrológica/ambiental	147
Tabela 25- Síntese espacial da vulnerabilidade hidrológica/ambiental	147

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	$\Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}$	71
Equação 2	$Dd = LtA$	71
Equação 3	$S = (H_{\text{inicial}} - H_{\text{final}})L$	72
Equação 4	$E = TE_{\text{Evaporação}} \cdot A_{\text{Água}}$	72
Equação 5	$\text{Desvio acima \%} = (X - \text{Limite})\text{Limite} \times 100$	75
Equação 6	$\text{Desvio abaixo \%} = (\text{Limite} - X)\text{Limite} \times 100$	75
Equação 7	$\text{Valor tratado} = LQ2$	75
Equação 8	$A_i = \text{Count}_i \times A_{\text{pixel}}$	76
Equação 9	$P_i = A_i A_{\text{total}} \times 100$	76
Equação 10	$\Delta A = A_{\text{ano final}} - A_{\text{ano inicial}}$	76
Equação 11	$NDVI = (NIR - RED)(NIR + RED)$	77
Equação 12	$NDWI = (GREEN - NIR)(GREEN + NIR)$	77
Equação 13	$NDTI = (RED - GREEN)(RED + GREEN)$	77
Equação 14	$P\% = m(n + 1) \times 100$	77
Equação 15	$Q7j = (Q_j + Q_{j+1} + Q_{j+2} + Q_{j+3} + Q_{j+4} + Q_{j+5} + Q_j +$ 6)/ 7	78
Equação 16	$d_i = H - z_i$	78
Equação 17	$A_i = (d_i + d_{i+1})2. \Delta x_i$	79
Equação 18	$A = \sum A_i$	79
Equação 19	$Rh = AP$	79
Equação 20	$Hm = AB$	79
Equação 21	$P_{\text{acum}, k(t)} = \sum P_t - i$	80
Equação 22	$r = \sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})] / \sqrt{[\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2]}$	80
Equação 23	$Y = a + bX$	80
Equação 24	$R^2 = 1 - SSE/SST$	80
Equação 25	$SSE = \sum Y_i - Y_i^2$	80
Equação 26	$SST = \sum Y_i - Y^2$	81
Equação 27	$\Delta Q = Q_{\text{final}} - Q_{\text{inicial}}$	82
Equação 28	$\Delta Q\% = (Q_{\text{final}} - Q_{\text{inicial}})Q_{\text{inicial}} \times 100$	82
Equação 29	$TWI = \ln \tan \beta$	82
Equação 30	$V = \sum (w_i \cdot c_i) \sum w_i$	83

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	21
2.1.	Objetivo geral	21
2.2.	Objetivos específicos.....	21
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1.	Gestão de recursos hídricos e segurança hídrica	23
3.2.	Disponibilidade hídrica e vazões de referência	24
3.3.	Demanda hídrica e usos consuntivos.....	25
3.4.	Bacias hidrográficas, uso do solo e resposta hidrológica	26
3.5.	Sistema Cantareira e reservatório Atibainha	28
3.6.	Geotecnologias aplicadas à análise hidrológica	29
3.7.	Qualidade da água e disponibilidade quali-quantitativa.....	30
4.	ÁREA DE ESTUDO	31
4.1.	Localização da sub-bacia do Atibainha	32
4.2.	Inserção na UGRHI-05 e nas Bacias PCJ.....	35
4.3.	Relação com o Sistema Cantareira	36
4.4.	Características físicas: relevo, drenagem, altitude e declividade	38
4.5.	Características ambientais e territoriais	45
4.6.	Municípios de composição da Sub bacia: Nazaré Paulista, Piracaia e Bom Jesus dos Perdões	59
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
5.1.	Delimitação da sub-bacia em ambiente SIG.....	69
5.2.	Bases cartográficas e sistema de referência.....	70
5.3.	Caracterização fisiográfica da sub-bacia	71
5.4.	Pedologia, domínios de superfície, AWC e massas d'água	72

5.5.	Dados pluviométricos e fluviométricos históricos	73
5.6.	Dados telemétricos recentes e dados operacionais	73
5.7.	Qualidade da água e disponibilidade quali-quantitativa.....	74
5.8.	Uso e cobertura da terra.....	75
5.9.	Sensoriamento remoto e índices espectrais	76
5.10.	Cálculo dos parâmetros hidrológicos	77
5.11.	Relação entre chuva, vazão, nível e armazenamento	79
5.12.	Demanda hídrica, outorgas e consumo municipal.....	81
5.13.	Cruzamentos espaciais e vulnerabilidade hidrológica.....	82
5.14.	Elaboração dos mapas, gráficos e síntese integrada	83
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
6.1.	Caracterização fisiográfica da sub-bacia do Atibainha	91
6.2.	Rede de monitoramento hidrológico e qualidade da água.....	93
6.3.	Análise qualitativa	102
6.4.	Análise pluviométrica histórica e recente.....	105
6.5.	Análise fluviométrica histórica e recente	106
6.6.	Relação chuva, vazão, nível e armazenamento	108
6.7.	Dinâmica operacional do reservatório Atibainha	109
6.8.	Uso e cobertura da terra na sub-bacia.....	111
6.9.	Índices espectrais: NDVI, NDWI e NDTI.....	129
6.10.	Declividade, TWI, curvatura e vulnerabilidade hidrológica	132
6.11.	Exposição solar e orientação das vertentes.....	137
6.12.	Conflitos em APPs e áreas sensíveis	138
6.13.	Síntese integrada da disponibilidade e demanda hídrica	141
6.14.	Mapa final de vulnerabilidade hidrológica/ambiental	144
7.	CONCLUSÃO.....	148

8.	REFERÊNCIAS	152
9.	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	159

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais desafios da gestão ambiental em regiões marcadas por elevada demanda urbana, industrial e agrícola. A água é essencial à manutenção dos ecossistemas, ao abastecimento público, à produção agropecuária, às atividades industriais, à geração de energia, à diluição de efluentes e à organização territorial das sociedades. Nas últimas décadas, a gestão dos recursos hídricos passou a exigir uma abordagem integrada, capaz de relacionar disponibilidade, demanda, qualidade da água, uso e ocupação do solo, variabilidade climática, infraestrutura hidráulica e capacidade institucional de planejamento. Essa perspectiva está alinhada à Agenda 2030, que estabelece a necessidade de assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos, reforçando a importância de estudos voltados ao diagnóstico, ao monitoramento e à segurança hídrica (ONU, 2015).

No Brasil, embora exista elevada disponibilidade hídrica em termos absolutos, a distribuição espacial e temporal da água é desigual, sobretudo nas regiões mais urbanizadas, industrializadas e densamente povoadas. A concentração populacional, a expansão urbana, a intensificação dos usos consuntivos, a degradação de mananciais e as incertezas associadas às mudanças climáticas ampliam a complexidade do planejamento hídrico. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, as mudanças climáticas acrescentam uma camada adicional de incerteza à gestão das águas, pois podem afetar simultaneamente a oferta e a demanda hídrica, com alterações nos padrões de precipitação, evapotranspiração, disponibilidade hídrica, frequência de estiagens e ocorrência de eventos extremos (ANA, 2024a).

Esse cenário torna necessário compreender a disponibilidade hídrica não apenas como volume físico de água, mas como resultado da interação entre clima, relevo, cobertura vegetal, uso do solo, infraestrutura de reservação, qualidade da água, operação dos sistemas e demandas humanas. A própria ANA destaca que os estudos de impacto climático devem subsidiar estratégias de adaptação e planejamento, uma vez que decisões tomadas sem considerar tais incertezas podem se mostrar inadequadas diante de futuros hidroclimáticos distintos (ANA, 2024a). Assim, estudos em escala de bacia hidrográfica tornam-se fundamentais para identificar vulnerabilidades, avaliar tendências e orientar ações de conservação, recuperação e gestão dos recursos hídricos.

No Estado de São Paulo, a criticidade da segurança hídrica tem sido reforçada por diagnósticos técnicos e notícias recentes. Levantamento divulgado pelo Estadão, com base em estudo da SP Águas, indicou mananciais paulistas com risco futuro de indisponibilidade hídrica, associando esse quadro à necessidade de recomposição florestal, proteção de áreas úmidas, controle de erosão, estabilização de margens e aumento da resiliência dos sistemas de abastecimento (TOMAZELA, 2026). Ainda que a notícia trate de diferentes regiões do Estado, sua relevância para este trabalho está em demonstrar que a disponibilidade hídrica depende diretamente da conservação dos mananciais, da integridade das margens, da redução do assoreamento e da capacidade de adaptação dos municípios frente a eventos climáticos extremos.

Nesse contexto, as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), correspondentes à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGRHI-05), apresentam grande relevância econômica, social e ambiental para o Estado de São Paulo. Trata-se de uma região marcada por forte urbanização, dinamismo industrial, produção agropecuária, adensamento populacional e presença de importantes mananciais superficiais. Ao mesmo tempo, a região apresenta elevada pressão sobre os recursos hídricos, em razão da concentração populacional, da expansão urbana, da atividade industrial, dos usos agropecuários e da dependência de sistemas produtores de água (COBRAPE; CBH-PCJ, 2010; SHS, 2006). O Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias PCJ também indica que a disponibilidade hídrica superficial na região é limitada e que a redução da disponibilidade por habitante constitui um dos principais desafios para a gestão regional (COMITÊS PCJ, 2025).

A relevância da UGRHI-05 é ampliada pela presença do Sistema Cantareira, um dos principais sistemas produtores de água do Estado de São Paulo. O sistema é formado por reservatórios interligados e foi implantado com o objetivo de transferir vazões da bacia do Piracicaba para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. Essa condição produziu uma dinâmica hidroterritorial complexa, pois parte da água gerada nas bacias formadoras do sistema é direcionada para fora da bacia doadora, contribuindo historicamente para conflitos entre regiões produtoras e consumidoras de água (SOUZA, 2007).

Do ponto de vista institucional e operacional, o Sistema Cantareira passou a ser regulado por regras que consideram o armazenamento acumulado, os períodos hidrológicos seco e úmido e faixas operacionais de volume útil. A Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925/2017 estabeleceu condições de operação do sistema e constitui referência importante para compreender a gestão das vazões transferidas e liberadas para as Bacias PCJ (ANA; DAEE,

2017). Desse modo, a disponibilidade hídrica regional não depende apenas da precipitação e da vazão natural dos rios, mas também da operação integrada dos reservatórios, das regras de alocação, das demandas concorrentes e das condições ambientais das áreas produtoras de água.

A sub-bacia do Atibainha assume papel central nesse debate por integrar o Sistema Cantareira e por se relacionar diretamente à regularização de vazões, ao abastecimento público e à disponibilidade hídrica a jusante. O reservatório Atibainha, localizado principalmente em Nazaré Paulista, compõe o arranjo hidráulico responsável por transferir água para a Região Metropolitana de São Paulo, ao mesmo tempo em que influencia a disponibilidade hídrica para municípios das Bacias PCJ. Sua importância estratégica não se restringe à função de armazenamento, pois envolve também conflitos associados à operação do sistema, aos usos múltiplos da água e à dependência de diferentes regiões em relação ao Cantareira (FRASCARELI et al., 2019).

A crise hídrica de 2013/2014 evidenciou a vulnerabilidade desse sistema. Durante esse período, a redução acentuada das vazões afluentes e dos volumes armazenados levou à adoção de medidas emergenciais, demonstrando que a segurança hídrica depende de regras operacionais adequadas, monitoramento contínuo, diversificação de fontes e proteção das áreas produtoras de água (KELMAN, 2015; ZUFFO et al., 2023). A experiência do Cantareira mostra que grandes sistemas de abastecimento não podem ser analisados apenas como obras hidráulicas, pois sua eficiência e resiliência dependem da interação entre clima, uso do solo, qualidade ambiental, demanda urbana, operação de reservatórios e governança da água.

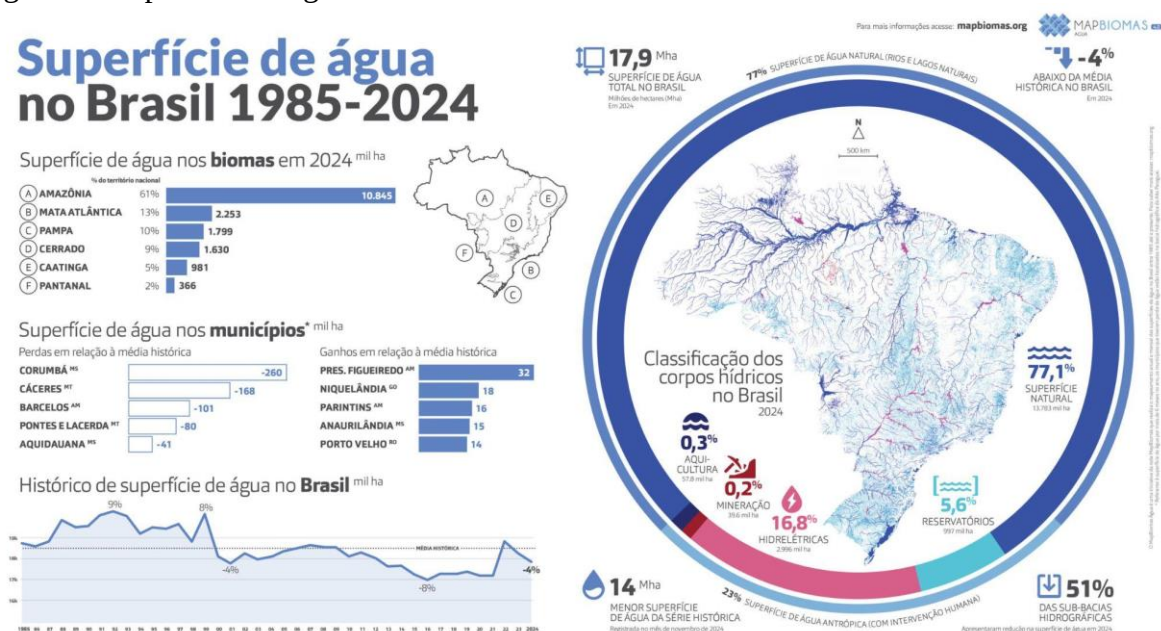
A notícia da Agência das Bacias PCJ sobre a limpeza da calha do Atibainha evidencia a relevância prática da manutenção das condições hidráulicas do rio para a operação do Sistema Cantareira. Segundo a Agência, a intervenção buscou melhorar o fluxo do rio Atibainha, tornar mais eficientes as descargas de vazão do sistema, evitar desperdícios em períodos de estiagem e contribuir para a manutenção da água armazenada no reservatório (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2019). Esse exemplo reforça que a disponibilidade hídrica não depende apenas da precipitação e do volume reservado, mas também das condições físicas da rede de drenagem, do controle do assoreamento, da conservação das margens e da gestão territorial da bacia.

As mudanças no uso e cobertura da terra acrescentam outra dimensão à análise. Estudos sobre o Sistema Cantareira indicam que as sub-bacias Cachoeira e Atibainha apresentaram alterações na dinâmica de vazões associadas não apenas à variabilidade climática, mas também a mudanças antrópicas no uso e cobertura da terra (FREITAS, 2020). Dessa forma, a

disponibilidade hídrica deve ser compreendida como resultado da interação entre clima, relevo, vegetação, solo, reservatórios, operação hidráulica e padrões de ocupação territorial.

A análise da superfície de água também reforça a necessidade de monitoramento contínuo. O MapBiomias Água, ao avaliar a série 1985–2024, Figura 1, indica redução da superfície de água no Brasil em relação à média histórica em 2024 e diminuição em parte significativa das sub-bacias hidrográficas avaliadas (MAPBIOMAS ÁGUA, 2024). Ainda que a dinâmica nacional envolva biomas, usos e regimes hidrológicos distintos, esse dado reforça a importância de acompanhar a variação de corpos hídricos em escala local, especialmente em áreas estratégicas para abastecimento público, como a sub-bacia do Atibainha.

Figura 1 - Superfície de água no Brasil de 1985 a 2024.



Fonte: MapBiomias - infográfico da Coleção 3 do MapBiomias Água (disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/>, acesso 05/06/2026)

Além da oferta, a demanda hídrica constitui componente fundamental da segurança hídrica. Nos municípios diretamente relacionados ao recorte deste estudo, os usos da água envolvem abastecimento humano, atividades industriais, práticas agropecuárias e outros usos consuntivos. Esses usos devem ser analisados em conjunto com a função estratégica regional do reservatório e com as transferências de água do Sistema Cantareira, uma vez que a

disponibilidade local se insere em um sistema de gestão mais amplo e interdependente (ANA, 2019).

A disponibilidade hídrica também deve ser avaliada em termos quali-quantitativos. Em bacias densamente ocupadas, a água pode estar fisicamente presente, mas apresentar restrições de uso em razão de poluição difusa, lançamento de efluentes, eutrofização, contaminação por atividades urbanas, agrícolas e industriais ou presença de substâncias não monitoradas de forma sistemática. Nas Bacias PCJ, estudos recentes identificaram contaminantes emergentes em rios da região, indicando influência das atividades agrícolas, urbanas e industriais sobre a qualidade das águas superficiais (MADEIRA et al., 2023). Assim, a análise da disponibilidade hídrica na sub-bacia do Atibainha deve articular quantidade, qualidade, uso do solo e vulnerabilidades ambientais.

Diante dessa complexidade, o presente trabalho parte da proposta inicial de análise da UGRHI-05, mas reduz a escala espacial para a sub-bacia do Atibainha. Essa redefinição torna o estudo mais executável e metodologicamente preciso, permitindo analisar com maior detalhe um recorte estratégico do Sistema Cantareira e das Bacias PCJ. A adoção da sub-bacia como unidade de análise permite integrar aspectos hidrológicos, ambientais e territoriais, além de favorecer a interpretação das relações entre disponibilidade hídrica, demanda, qualidade da água, uso do solo e operação do sistema.

As geotecnologias constituem ferramentas fundamentais para esse tipo de avaliação. O sensoriamento remoto permite acompanhar mudanças no uso e cobertura da terra, variações em corpos d'água, supressão vegetal, expansão urbana, silvicultura e alterações na paisagem. Os Sistemas de Informação Geográfica possibilitam integrar dados hidrológicos, climáticos, geomorfológicos, socioeconômicos e ambientais, permitindo análises espaciais mais consistentes. A base MapBiomas, construída a partir de imagens Landsat e processamento em Google Earth Engine, permite reconstruir séries históricas anuais de uso e cobertura da terra, sendo útil para identificar transformações territoriais associadas à dinâmica hidrológica (SOUZA JUNIOR et al., 2020).

A análise de séries históricas hidrológicas complementa essa abordagem ao permitir a avaliação de tendências temporais de precipitação, vazão, nível d'água, permanência de vazões, eventos extremos e estiagens. No recorte do Atibainha, a integração entre dados históricos, registros recentes, informações operacionais de reservatórios, produtos de sensoriamento remoto e variáveis fisiográficas permite estruturar um diagnóstico integrado da bacia. Essa integração é necessária porque a disponibilidade hídrica não decorre de uma única variável,

mas da relação entre chuva, relevo, cobertura da terra, armazenamento, operação hidráulica, demanda e qualidade da água.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a disponibilidade e a demanda hídrica na UGRHI-05, com foco na sub-bacia do Atibainha, por meio da integração de geotecnologias e análise de séries históricas. A pesquisa busca compreender a dinâmica hidrológica da área de estudo, identificar pressões associadas ao uso e ocupação do solo, avaliar padrões de precipitação e vazão, relacionar disponibilidade hídrica, demanda, qualidade da água e características fisiográficas, e indicar processos relevantes para a gestão territorial e hídrica. Ao articular dados históricos, informações espaciais, evidências institucionais e notícias recentes sobre segurança hídrica, o estudo pretende contribuir para o planejamento integrado dos recursos hídricos, a segurança hídrica regional e a definição de estratégias de conservação e recuperação ambiental na sub-bacia do Atibainha e no contexto das Bacias PCJ.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a disponibilidade e a demanda hídrica na UGRHI-05, com foco na sub-bacia do Atibainha, por meio da integração de geotecnologias e análise de séries históricas hidrológicas, ambientais e territoriais, visando compreender as relações entre precipitação, vazão, armazenamento, uso e cobertura da terra, qualidade da água e pressões antrópicas, de modo a subsidiar o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos no contexto das Bacias PCJ e do Sistema Cantareira.

2.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, este trabalho busca, inicialmente, delimitar e caracterizar a sub-bacia do Atibainha em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), considerando sua inserção territorial na UGRHI-05, nas Bacias PCJ e no Sistema Cantareira. Essa etapa permite reconhecer os principais aspectos hidrográficos, fisiográficos, ambientais e territoriais que condicionam a disponibilidade hídrica da área de estudo.

Em seguida, pretende-se identificar, organizar e espacializar as estações pluviométricas, fluviométricas, telemétricas e de qualidade da água localizadas a montante, no entorno e a jusante do reservatório Atibainha. A organização dessas informações tem como finalidade

estruturar uma base de dados consistente para a análise integrada do comportamento hidrológico da sub-bacia, articulando registros históricos e dados recentes de monitoramento.

O estudo também tem como objetivo levantar e sistematizar séries históricas de precipitação e vazão provenientes de bases oficiais, como ANA, DAEE/SP-Águas e demais instituições responsáveis pelo monitoramento hidrológico. Essas séries serão utilizadas para caracterizar o regime hidrológico da sub-bacia, avaliar a variabilidade temporal dos dados e, conforme a disponibilidade e consistência das informações, determinar parâmetros de disponibilidade hídrica, como vazões médias, mínimas e máximas, curvas de permanência, Q95 e Q7,10.

Além da análise histórica, o trabalho busca integrar dados recentes de monitoramento telemétrico e informações operacionais do reservatório Atibainha, considerando variáveis como precipitação, vazão, cota, nível d'água, armazenamento e condição operacional no contexto do Sistema Cantareira. Essa integração permitirá relacionar a resposta hidrológica da sub-bacia com a dinâmica recente do reservatório, contribuindo para a compreensão das relações entre pluviosidade, fluviosidade, regularização hidráulica e disponibilidade hídrica.

Outro objetivo específico consiste em avaliar a qualidade da água em pontos de monitoramento selecionados, considerando os parâmetros físico-químicos, biológicos e microbiológicos disponíveis. Essa análise busca compreender a condição ambiental da água e sua relação com os usos predominantes na bacia, reconhecendo que a disponibilidade hídrica deve ser avaliada de forma quali-quantitativa.

No campo das geotecnologias, pretende-se mapear e analisar o uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha a partir de bases geoespaciais, especialmente MapBiomas, imagens orbitais e arquivos vetoriais selecionados. Essa análise será articulada a variáveis fisiográficas, como declividade, hipsometria, curvatura, drenagem e áreas de maior suscetibilidade hidrológica, de modo a compreender como a organização territorial e as características físicas da bacia influenciam a resposta hidrológica e a conservação dos mananciais.

Por fim, o trabalho busca relacionar os padrões de uso e cobertura da terra com a disponibilidade hídrica, a resposta hidrológica e a qualidade da água, considerando as pressões antrópicas e ambientais incidentes sobre a sub-bacia. A partir dessa integração, serão elaborados mapas, gráficos, tabelas e sínteses interpretativas capazes de subsidiar o diagnóstico hidrológico e ambiental da área de estudo, bem como discutir a relevância da sub-bacia do Atibainha para a segurança hídrica regional, especialmente em razão de sua função no Sistema Cantareira e de sua relação com as Bacias PCJ.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Gestão de recursos hídricos e segurança hídrica

A gestão dos recursos hídricos envolve a articulação entre disponibilidade, demanda, qualidade da água, uso do solo, conservação ambiental, infraestrutura hidráulica e governança territorial. No Brasil, essa gestão é orientada pela Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, que estabelece a água como bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico. A mesma lei define a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gestão, além de reconhecer os usos múltiplos da água e a necessidade de gestão descentralizada e participativa, com atuação do poder público, usuários e comunidades (BRASIL, 1997).

A Política Nacional de Recursos Hídricos também estabelece instrumentos fundamentais para a gestão, como os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos d'água, a outorga de direito de uso, a cobrança pelo uso da água e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Esses instrumentos buscam compatibilizar a oferta hídrica com as demandas sociais, econômicas e ambientais, considerando tanto a quantidade quanto a qualidade da água disponível (BRASIL, 1997). Dessa forma, a gestão hídrica não pode ser compreendida apenas como controle de volumes, mas como processo integrado de planejamento territorial, regulação dos usos, proteção dos mananciais e monitoramento contínuo das condições hidroambientais.

A segurança hídrica, por sua vez, refere-se à capacidade de garantir água em quantidade e qualidade adequadas para o abastecimento humano, as atividades econômicas e a conservação dos ecossistemas, considerando níveis aceitáveis de risco associados a secas, cheias, degradação ambiental e falhas de infraestrutura (ANA, 2022). Em regiões densamente ocupadas e economicamente dinâmicas, como as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), esse conceito torna-se especialmente relevante, pois a disponibilidade hídrica é pressionada simultaneamente por demandas urbanas, industriais, agrícolas e por sistemas de transferência de água entre bacias.

A UGRHI-05, correspondente às Bacias PCJ, representa um caso emblemático de gestão hídrica complexa no Estado de São Paulo. A região apresenta elevada densidade populacional, forte presença industrial, atividades agropecuárias expressivas e importantes mananciais superficiais, além de estar diretamente relacionada ao Sistema Cantareira. Essa configuração torna a gestão da água dependente da articulação entre planejamento regional, operação de

reservatórios, controle de demandas, conservação ambiental e monitoramento qualitativo (COBRAPE; CBH-PCJ, 2010; SHS, 2006; COMITÊS PCJ, 2025).

As mudanças climáticas acrescentam uma camada adicional de incerteza à gestão dos recursos hídricos. Alterações nos padrões de precipitação, evapotranspiração, frequência de estiagens, cheias e eventos extremos podem afetar tanto a oferta quanto a demanda de água. Por isso, a avaliação da disponibilidade hídrica deve incorporar não apenas séries históricas observadas, mas também a compreensão das vulnerabilidades ambientais e operacionais dos sistemas hídricos (ANA, 2024a). Nesse contexto, estudos em escala de bacia hidrográfica são fundamentais para identificar áreas críticas, avaliar riscos e subsidiar decisões voltadas à segurança hídrica.

3.2. Disponibilidade hídrica e vazões de referência

A disponibilidade hídrica corresponde à quantidade de água que pode ser utilizada em determinada bacia, sistema ou manancial, considerando as condições naturais do regime hidrológico, as restrições ambientais, as demandas existentes e as regras de gestão. Em estudos hidrológicos, essa disponibilidade é geralmente avaliada por meio de séries históricas de precipitação, vazão, nível d'água e armazenamento, permitindo compreender a variabilidade temporal da oferta hídrica e identificar períodos de estiagem, cheias e regularização de vazões.

A análise de séries históricas é fundamental para caracterizar o comportamento hidrológico de uma bacia, pois permite avaliar médias, extremos, sazonalidade, permanência de vazões e tendências temporais. Em bacias com reservatórios, essa análise deve considerar também a interferência da operação hidráulica, uma vez que as vazões observadas a jusante podem refletir tanto as condições naturais de chuva e escoamento quanto decisões operacionais de armazenamento, liberação e transferência de água. Assim, no caso do Atibainha, a disponibilidade hídrica deve ser interpretada a partir da relação entre precipitação, vazões afluentes, vazões liberadas, armazenamento do reservatório e regras operacionais do Sistema Cantareira.

Entre os principais parâmetros utilizados para representar a disponibilidade hídrica estão as vazões médias, mínimas, máximas, as curvas de permanência e as vazões de referência. A curva de permanência expressa a porcentagem do tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada, sendo amplamente utilizada na avaliação da disponibilidade hídrica superficial, no planejamento de usos da água e na definição de critérios de outorga (CRUZ; TUCCI, 2008). A partir dela, podem ser extraídas vazões como a Q95, que representa a vazão

igualada ou superada em 95% do tempo, frequentemente associada a condições de estiagem e disponibilidade conservadora.

Outro parâmetro relevante é a Q7,10, definida como a menor vazão média de sete dias consecutivos associada a um período de retorno de dez anos. Esse indicador é utilizado em estudos de disponibilidade hídrica, enquadramento, diluição de efluentes e análise de restrições ambientais, pois representa uma condição crítica de baixa vazão. A adoção de vazões de referência deve considerar a qualidade, extensão e consistência das séries disponíveis, bem como as características hidrológicas da bacia e a influência de obras de regularização (PRUSKI; BRANDÃO, 2011).

No contexto das Bacias PCJ, a disponibilidade hídrica apresenta elevada importância para a gestão regional, pois a região possui forte pressão de usos múltiplos e depende de decisões operacionais associadas ao Sistema Cantareira. A Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925/2017 estabeleceu regras de operação para o sistema, considerando armazenamento acumulado, períodos hidrológicos seco e úmido e faixas operacionais de volume útil. Portanto, a disponibilidade hídrica regional não depende apenas da vazão natural dos rios, mas também da operação dos reservatórios, das vazões transferidas, das vazões liberadas a jusante e dos compromissos de atendimento às Bacias PCJ e à Região Metropolitana de São Paulo (ANA; DAEE, 2017).

3.3. Demanda hídrica e usos consuntivos

A demanda hídrica representa o volume de água requerido pelos diferentes setores usuários em determinado território e período. Em uma bacia hidrográfica, essa demanda pode estar associada ao abastecimento humano, à indústria, à irrigação, à dessedentação animal, à mineração, à termoelectricidade e a outros usos que dependem da disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas. A avaliação da demanda é indispensável para o balanço hídrico, pois permite comparar a água disponível com a água requerida pelos usos existentes e projetados.

A ANA define os usos consuntivos como aqueles em que a água é retirada e consumida parcial ou totalmente no processo a que se destina, não retornando imediatamente ao corpo hídrico de origem. Essa indisponibilidade pode ocorrer por evapotranspiração, infiltração, incorporação em produtos ou outras formas de consumo. Os usos consuntivos são geralmente analisados por três componentes: retirada, consumo e retorno. A retirada corresponde ao

volume captado no manancial; o consumo representa a fração efetivamente indisponibilizada; e o retorno corresponde à parcela que retorna ao corpo hídrico após o uso (ANA, 2024b).

O Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil constitui uma referência metodológica fundamental para estimar demandas hídricas setoriais em escala nacional, estadual, municipal e de bacias hidrográficas. Sua segunda edição atualiza o diagnóstico e o prognóstico das demandas hídricas brasileiras de 1931 a 2040, consolidando a Base Nacional de Referência de Usos Consuntivos da Água. Essa base é utilizada para subsidiar balanços hídricos, outorgas, planos de recursos hídricos, definição de áreas críticas, alocação de água, fiscalização e planejamento setorial (ANA, 2024b).

Em bacias com reservatórios, a demanda hídrica deve ser compreendida de forma ainda mais integrada. Os reservatórios ampliam a regularização da oferta, mas também alteram o regime natural de vazões, influenciam a evaporação, criam condições para usos múltiplos e podem transferir água entre bacias. A evaporação líquida de reservatórios artificiais deve ser considerada no balanço hídrico, pois representa uma perda adicional de água associada à existência do reservatório e à sua operação (ANA, 2021). Assim, no caso do Sistema Cantareira e do reservatório Atibainha, a análise da demanda deve considerar tanto os usos locais da sub-bacia quanto a função estratégica regional do sistema.

Nas Bacias PCJ, a demanda hídrica é condicionada pela concentração populacional, pela atividade industrial, pela agricultura e pela relação com a Região Metropolitana de São Paulo. Parte das águas produzidas nas bacias formadoras do Sistema Cantareira é transferida para o Alto Tietê, o que torna a análise da demanda regional indissociável da operação dos reservatórios e dos conflitos entre bacias produtoras e consumidoras de água (FRASCARELI et al., 2019). Portanto, avaliar a demanda hídrica na sub-bacia do Atibainha exige considerar os usos consuntivos locais, a transferência de água para abastecimento metropolitano e as vazões necessárias à manutenção dos usos a jusante.

3.4. Bacias hidrográficas, uso do solo e resposta hidrológica

A bacia hidrográfica constitui uma unidade física e funcional do ciclo hidrológico, delimitada por divisores topográficos e composta por uma rede de drenagem que conduz o escoamento superficial até um ponto de saída. Por integrar relevo, solos, vegetação, clima, drenagem e formas de ocupação humana, a bacia hidrográfica é a unidade mais adequada para

estudos de disponibilidade hídrica, planejamento ambiental e gestão dos recursos hídricos (BRASIL, 1997).

A resposta hidrológica de uma bacia corresponde ao modo como ela transforma a precipitação em escoamento, infiltração, evapotranspiração, armazenamento e recarga. Essa resposta depende de fatores naturais, como declividade, forma da bacia, densidade de drenagem, solos, cobertura vegetal e condições climáticas, mas também de fatores antrópicos, como urbanização, supressão de vegetação, agricultura, silvicultura, compactação do solo, impermeabilização e intervenções hidráulicas. Assim, alterações no uso e cobertura da terra podem modificar a velocidade do escoamento superficial, a capacidade de infiltração, o transporte de sedimentos, a recarga de aquíferos rasos e a manutenção das vazões mínimas.

A vegetação exerce papel fundamental na regulação hidrológica, pois interfere na interceptação da chuva, na infiltração, na estabilidade do solo, na evapotranspiração e no controle da erosão. Áreas de mata ciliar, vegetação nativa e cobertura permanente contribuem para reduzir o escoamento superficial direto, proteger margens, estabilizar encostas e preservar a qualidade da água. Por outro lado, a substituição da cobertura natural por usos urbanos, agrícolas ou áreas expostas tende a ampliar a conectividade superficial do escoamento, aumentar o carreamento de sedimentos e reduzir a capacidade de retenção hídrica do sistema.

No Sistema Cantareira, a relação entre uso do solo e vazão tem sido destacada por estudos recentes. Freitas (2020) identificou tendência significativa de redução de vazões nas sub-bacias Cachoeira e Atibainha, associando tais alterações não apenas à variabilidade climática, mas também a mudanças antrópicas no uso e cobertura da terra. Segundo a autora, a redução de áreas de pastagem e áreas abandonadas, paralelamente ao aumento de reflorestamento e silvicultura, contribuiu para alterações na relação de precipitação–escoamento. Esses resultados demonstram que a disponibilidade hídrica deve ser analisada de forma integrada, considerando clima, uso do solo, vegetação, operação de reservatórios e demandas humanas.

A análise do uso e cobertura da terra é, portanto, essencial para compreender a dinâmica hidrológica da sub-bacia do Atibainha. Mudanças na vegetação, expansão de áreas urbanizadas, avanço de silvicultura, alteração de áreas agrícolas e ocupação de áreas sensíveis podem influenciar a geração de escoamento, a produção de sedimentos, a qualidade da água e a disponibilidade hídrica. A integração entre mapas de uso do solo, dados fisiográficos e séries hidrológicas permite identificar padrões territoriais associados a maior pressão sobre os mananciais e a áreas prioritárias para conservação ou recuperação ambiental.

3.5. Sistema Cantareira e reservatório Atibainha

O Sistema Cantareira é um dos principais sistemas produtores de água do Estado de São Paulo e desempenha papel estratégico no abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo e na dinâmica hídrica das Bacias PCJ. O sistema é composto por reservatórios interligados, entre eles Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, além de estruturas de transferência que permitem a reversão de vazões para a bacia do Alto Tietê. Essa configuração confere ao sistema elevada importância para a segurança hídrica regional, mas também amplia a complexidade da gestão, uma vez que envolve demandas de diferentes regiões e usos múltiplos da água (ANA; DAEE, 2017; FRASCARELI et al., 2019).

O reservatório Atibainha integra esse sistema e apresenta importância estratégica por participar da regularização, armazenamento e transferência de água. Localizado principalmente no município de Nazaré Paulista, o reservatório contribui para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo e influencia a disponibilidade hídrica nas Bacias PCJ. A jusante do reservatório, o rio Atibainha segue seu curso até se juntar ao rio Cachoeira, formando o rio Atibaia, um dos principais cursos d'água da UGRHI-05 (FRASCARELI et al., 2019).

A inserção do Atibainha no Sistema Cantareira gera uma dinâmica hidroterritorial complexa. Parte da água produzida na bacia doadora é transferida para o abastecimento metropolitano, enquanto os municípios e usuários das Bacias PCJ dependem da manutenção de vazões a jusante e da conservação dos mananciais. Esse contexto contribui para conflitos históricos entre regiões produtoras e consumidoras de água, especialmente em períodos de estiagem e redução dos volumes armazenados (SOUZA, 2007; FRASCARELI et al., 2019).

A crise hídrica de 2013/2014 evidenciou a vulnerabilidade do Sistema Cantareira. A redução das vazões afluentes e dos volumes armazenados levou à adoção de medidas emergenciais e revelou a dependência da Região Metropolitana de São Paulo em relação ao sistema. Estudos posteriores destacaram que a segurança hídrica do Cantareira depende não apenas da infraestrutura de reservação, mas também de regras operacionais adequadas, diversificação de fontes, gestão da demanda, monitoramento contínuo e proteção das áreas produtoras de água (KELMAN, 2015; ZUFFO et al., 2023).

Do ponto de vista normativo, a Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925/2017 representa marco importante para a operação do Sistema Cantareira. A norma estabelece condições de operação associadas ao armazenamento acumulado, aos períodos hidrológicos seco e úmido e

às faixas de volume útil, buscando compatibilizar a retirada de água para a Região Metropolitana de São Paulo com a manutenção de vazões para as Bacias PCJ (ANA; DAEE, 2017). Dessa forma, qualquer análise da disponibilidade hídrica na sub-bacia do Atibainha deve considerar a operação integrada do Sistema Cantareira e suas implicações para a disponibilidade a montante, no reservatório e a jusante.

3.6. Geotecnologias aplicadas à análise hidrológica

As geotecnologias compreendem um conjunto de técnicas e ferramentas voltadas à aquisição, processamento, análise e representação espacial de informações ambientais. Entre essas ferramentas destacam-se o sensoriamento remoto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os Modelos Digitais de Elevação (MDE), os bancos de dados geográficos, os algoritmos de classificação de imagens e os produtos derivados de imagens orbitais. Em estudos hidrológicos, essas tecnologias permitem integrar variáveis físicas, climáticas, hidrológicas, ambientais e socioeconômicas, favorecendo diagnósticos em escala espacial e temporal.

Os Sistemas de Informação Geográfica são amplamente utilizados na engenharia de recursos hídricos porque permitem delimitar bacias hidrográficas, extrair redes de drenagem, calcular parâmetros morfométricos, espacializar estações de monitoramento, cruzar camadas temáticas e gerar mapas de vulnerabilidade ou suscetibilidade ambiental (JOHNSON, 2009). A partir de um MDE, por exemplo, é possível derivar produtos como declividade, hipsometria, orientação de vertentes, curvatura, direção de fluxo, fluxo acumulado, densidade de drenagem e índice topográfico de umidade, todos relevantes para interpretar a resposta hidrológica de uma bacia.

No contexto da sub-bacia do Atibainha, as geotecnologias são fundamentais para delimitar o recorte espacial do estudo, localizar pontos de monitoramento, caracterizar o relevo, analisar a rede de drenagem e relacionar variáveis ambientais com dados hidrológicos. A delimitação de sub-bacias por ferramentas como ArcGIS Pro, associada ao uso de MDE, direção de fluxo e fluxo acumulado, possibilita organizar a área de contribuição e estruturar uma base espacial compatível com a análise hidrológica.

O sensoriamento remoto complementa essa abordagem ao permitir o acompanhamento das mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo. A iniciativa MapBiomass constitui uma das principais bases para esse tipo de análise no Brasil, pois produz mapas anuais de uso e cobertura da terra com base em imagens de satélite, processamento em nuvem e algoritmos de classificação. A abordagem original do MapBiomass utiliza imagens Landsat e Google Earth

Engine para reconstruir séries históricas de uso e cobertura da terra, permitindo avaliar transformações da paisagem em diferentes biomas brasileiros (SOUZA JUNIOR et al., 2020).

Mais recentemente, o MapBiomas também passou a disponibilizar produtos com resolução espacial de 10 m derivados de imagens Sentinel-2, ampliando a capacidade de análise de feições mais detalhadas, como áreas urbanas, propriedades rurais, matas ciliares e áreas de preservação permanente. Esses produtos utilizam mosaicos anuais, índices espectrais, classificadores como Random Forest, Gradient Tree Boosting e U-Net, além de filtros espaciais e temporais para reduzir ruídos e melhorar a consistência das classificações (MAPBIOMAS, 2025).

A integração entre MapBiomas, MDE, hidrografia, estações de monitoramento e séries históricas permite construir uma análise espacializada da disponibilidade hídrica. Essa integração é especialmente relevante para o presente TCC, pois a disponibilidade de água na sub-bacia do Atibainha não depende apenas da chuva e da vazão, mas também da organização territorial, da cobertura vegetal, das áreas antropizadas, da rede de drenagem, das características do relevo e da operação do reservatório.

3.7. Qualidade da água e disponibilidade quali-quantitativa

A disponibilidade hídrica deve ser compreendida de forma quali-quantitativa. Isso significa que a água disponível em termos de volume nem sempre está disponível para todos os usos caso sua qualidade esteja comprometida. Em bacias hidrográficas submetidas a pressões urbanas, industriais e agrícolas, a qualidade da água pode ser afetada por lançamento de efluentes domésticos e industriais, poluição difusa, erosão, assoreamento, nutrientes, matéria orgânica, contaminantes emergentes e alterações nas condições físicas dos corpos d'água.

A Política Nacional de Recursos Hídricos estabelece como diretriz a gestão sistemática dos recursos hídricos sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, além da articulação da gestão da água com a gestão ambiental e o uso do solo (BRASIL, 1997). Essa diretriz é central para o presente estudo, pois a sub-bacia do Atibainha deve ser avaliada não apenas quanto às vazões, armazenamento e demandas, mas também quanto às condições ambientais da água e aos usos que podem ser sustentados por essa disponibilidade.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece a classificação dos corpos de água superficiais e as diretrizes ambientais para seu enquadramento, definindo padrões de qualidade de acordo com os usos preponderantes. Parâmetros como oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nutrientes, turbidez, sólidos, pH, coliformes e outros indicadores

permitem avaliar a condição ambiental dos corpos hídricos e sua conformidade com a classe de enquadramento (CONAMA, 2005). Assim, a análise da qualidade da água contribui para verificar se a disponibilidade existente é compatível com os usos pretendidos.

Nas Bacias PCJ, a qualidade da água constitui tema estratégico para a gestão regional. O Plano de Recursos Hídricos das Bacias PCJ 2020–2035 utiliza dados das redes de monitoramento da CETESB para avaliar parâmetros como DBO, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, oxigênio dissolvido e E. coli/coliformes termotolerantes, classificando-os conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005 (COMITÊS PCJ, 2020). Esses parâmetros permitem discutir tanto a influência de cargas pontuais quanto difusas sobre os rios e reservatórios da região.

Além dos parâmetros convencionais, estudos recentes vêm demonstrando a presença de contaminantes emergentes em rios das Bacias PCJ, incluindo pesticidas, fármacos, compostos industriais e PFAS. A ocorrência dessas substâncias indica influência das atividades agrícolas, urbanas e industriais sobre os corpos hídricos e reforça a necessidade de ampliar a compreensão da disponibilidade hídrica para além dos indicadores tradicionais de vazão e volume (MADEIRA et al., 2023).

Dessa forma, a avaliação da disponibilidade hídrica na sub-bacia do Atibainha deve articular quantidade e qualidade da água. A integração entre séries de vazão, precipitação, dados operacionais do reservatório, uso e cobertura da terra e parâmetros de qualidade permite compreender como as pressões territoriais e ambientais interferem na condição dos mananciais. Essa abordagem quali-quantitativa é essencial para subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos, a conservação da sub-bacia e a segurança hídrica regional.

4. ÁREA DE ESTUDO

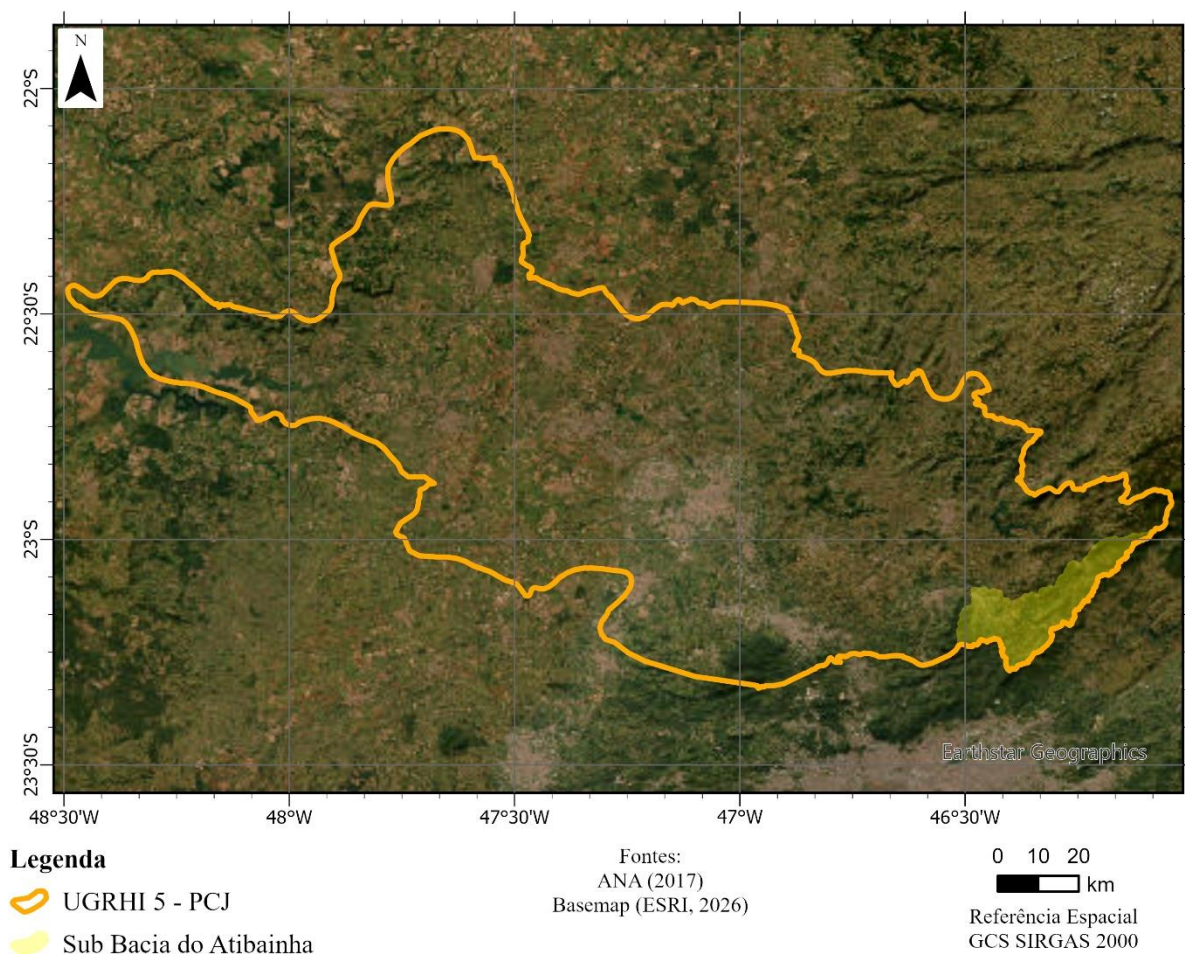
O Reservatório Atibainha foi implantado nas adjacências de Nazaré Paulista como parte das obras da primeira etapa do Sistema Cantareira, tendo entrado em operação em 1974. A estrutura é formada por barragem de aterro compactado e ocupa posição intermediária no sistema, entre os reservatórios Cachoeira e Paiva Castro. Sua função principal é armazenar e regularizar as águas do rio Atibainha, recebendo tanto as contribuições naturais da bacia quanto vazões provenientes das reversões dos rios Jaguari, Jacaré e Cachoeira, por meio do Túnel 6. A partir do reservatório, a água é conduzida pelo Túnel 5 em direção à bacia do rio Juqueri, integrando o arranjo hidráulico responsável pela transferência de água do Sistema Cantareira.

Além disso, o reservatório possui estruturas destinadas ao controle de cheias, descargas a jusante e tomada de água, evidenciando sua importância operacional para a regularização hídrica e o abastecimento regional (FABHAT, 2017).

4.1. Localização da sub-bacia do Atibainha

A área de estudo corresponde à sub-bacia do Atibainha, Figura 2, localizada no Estado de São Paulo, no setor leste-nordeste das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que correspondem à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGRHI-05). A sub-bacia está associada ao rio Atibainha e ao reservatório de mesmo nome, compondo uma área de elevada importância hidrológica e ambiental por integrar o conjunto de mananciais do Sistema Cantareira.

Figura 2 - UGRHI – 05 – Bacia PCJ.

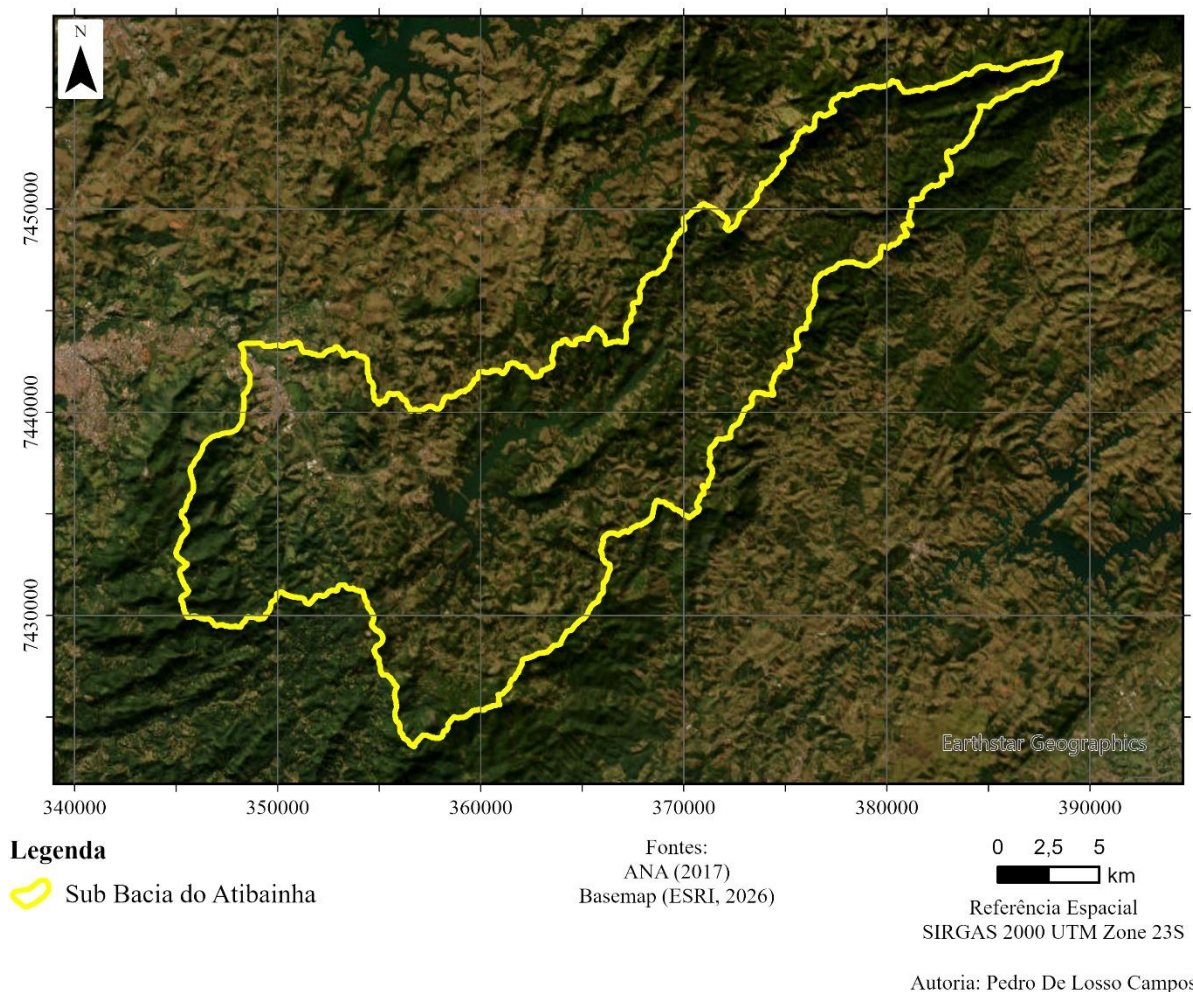


A localização regional mostra a inserção da sub-bacia do Atibainha no setor leste da UGRHI-05 — Bacias PCJ, destacando sua posição estratégica como área contribuinte do sistema Atibainha–Atibaia e, portanto, relevante para a análise da disponibilidade hídrica regional e no início da Bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí. A UGRHI-05 possui aproximadamente 14.366,05 km², enquanto a sub-bacia do Atibainha apresenta cerca de 449,56 km², correspondendo a aproximadamente 3,13% da área total das Bacias PCJ. Essa localização justifica o recorte do trabalho, pois permite analisar em detalhe uma unidade hidrográfica menor, mas diretamente relacionada à produção de água, à drenagem de montante, ao reservatório e à disponibilidade hídrica a jusante.

O recorte adotado neste trabalho abrange a área de contribuição associada ao reservatório Atibainha, Figura 3, considerando sua relação com os trechos de montante, o reservatório e os setores a jusante. A delimitação da sub-bacia foi realizada em ambiente de Sistema de

Informação Geográfica, a partir de bases hidrográficas oficiais, Modelo Digital de Elevação e processamento hidrológico, permitindo identificar divisores topográficos, rede de drenagem, direção de fluxo e área de contribuição.

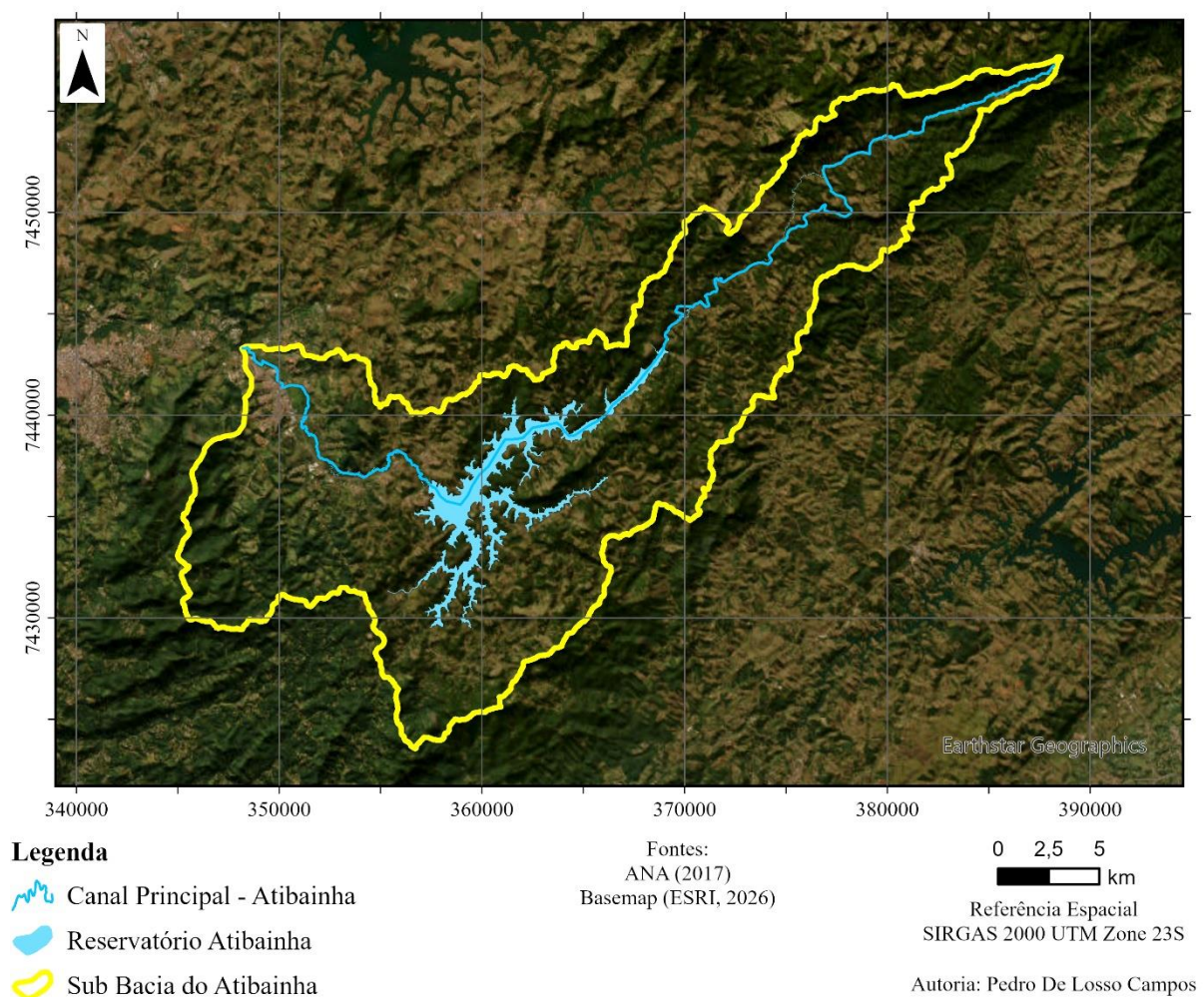
Figura 3 - Sub Bacia Atibainha.



No contexto do presente estudo, a sub-bacia do Atibainha possui área aproximada de 449,56 km², localizada no setor leste da UGRHI-05/Bacias PCJ, funcionando como unidade de análise para integrar relevo, drenagem, uso e cobertura da terra, dados hidrológicos e demanda hídrica. A delimitação permite concentrar a avaliação em uma área contribuinte estratégica do sistema Atibainha–Atibaia, onde os processos de montante, reservatório e jusante influenciam diretamente a disponibilidade hídrica regional. Essa área representa o recorte espacial utilizado para as análises de disponibilidade hídrica, demanda, uso e cobertura da terra, características fisiográficas, qualidade da água e integração com séries históricas hidrológicas.

A Figura 4 apresenta o mapa do canal principal e do reservatório Atibainha destaca a organização hidrológica central da sub-bacia, com o rio Atibainha conectando as áreas de montante, o reservatório e o trecho de jusante em direção ao sistema Atibainha–Atibaia, dentro das Bacias PCJ. O reservatório ocupa aproximadamente 17,86 km² (4,0% da área analisada), enquanto a sub-bacia possui cerca de 449,56 km², evidenciando que a disponibilidade hídrica depende tanto do armazenamento superficial quanto da contribuição das vertentes, drenagens secundárias, uso do solo e conservação das áreas de entorno.

Figura 4 - Canal principal e reservatório Atibainha.



4.2. Inserção na UGRHI-05 e nas Bacias PCJ

A sub-bacia do Atibainha está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGRHI-05), correspondente às Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. A UGRHI-05 constitui uma das regiões hidrográficas mais estratégicas do

Estado de São Paulo, tanto pela sua relevância econômica e populacional quanto pela complexidade de sua gestão hídrica.

As Bacias PCJ abrangem áreas com forte urbanização, atividade industrial, produção agropecuária e elevada demanda por água. Além disso, apresentam importantes mananciais superficiais e uma rede hidrográfica composta por rios de grande relevância regional, como Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiaí e Piracicaba. Nesse conjunto, o rio Atibainha exerce papel importante por sua ligação direta com o Sistema Cantareira e por sua contribuição à formação do rio Atibaia, juntamente com o rio Cachoeira.

A inserção da sub-bacia do Atibainha na UGRHI-05 torna sua análise particularmente relevante para a compreensão da disponibilidade hídrica regional. A dinâmica hidrológica local não está relacionada apenas aos processos naturais de precipitação, escoamento, infiltração e armazenamento, mas também à operação de reservatórios, à transferência de vazões, ao atendimento de demandas múltiplas e à manutenção das condições de disponibilidade a jusante.

4.3. Relação com o Sistema Cantareira

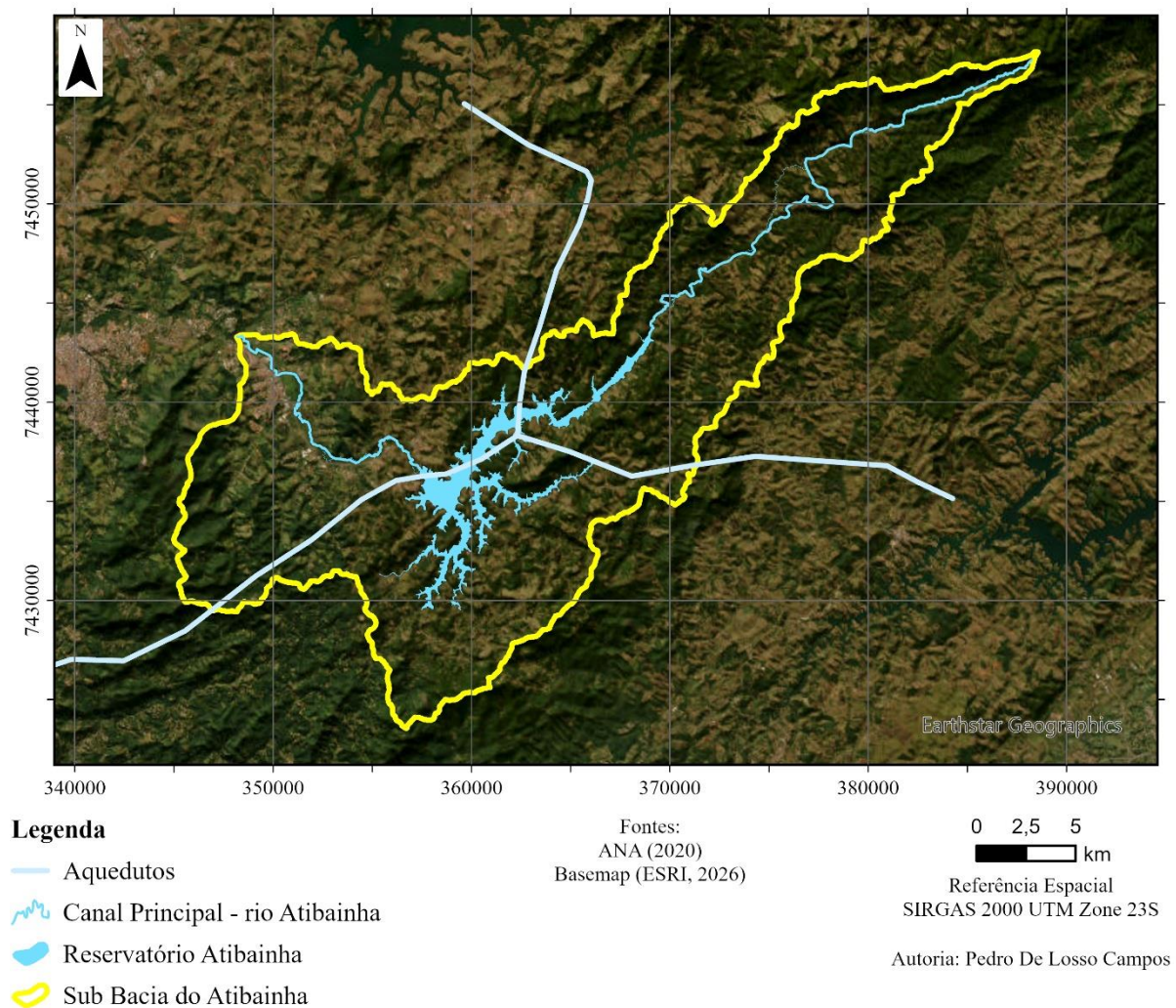
O reservatório Atibainha integra o Sistema Cantareira, um dos principais sistemas produtores de água do Estado de São Paulo. O Sistema Cantareira é composto por reservatórios interligados por canais, túneis e estruturas hidráulicas, com a função de regularizar, armazenar e transferir água para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, ao mesmo tempo em que influencia a disponibilidade hídrica nas Bacias PCJ.

De acordo com a Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925/2017, o Sistema Cantareira é delimitado, para fins operacionais, como o conjunto dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. A operação desse sistema considera o armazenamento acumulado, os períodos hidrológicos seco e úmido, as faixas de volume útil e as vazões mínimas a serem liberadas para os pontos de controle. Assim, a disponibilidade hídrica do Atibainha deve ser compreendida tanto pela contribuição natural da sub-bacia quanto pelas regras de operação do sistema.

O reservatório Atibainha, formado pelas águas do rio Atibainha, situa-se principalmente nas proximidades do município de Nazaré Paulista. Além das contribuições naturais de sua bacia hidrográfica, recebe influência das reversões e interligações hidráulicas associadas aos reservatórios Jaguari-Jacareí e Cachoeira, Figura 5, compondo o arranjo operacional do Sistema Cantareira. Essa condição confere à área de estudo papel estratégico, pois a sub-bacia participa

da produção de água, da regularização de vazões e da disponibilidade hídrica para diferentes regiões.

Figura 5 - Aquedutos - Atlas Águas 2020.



A relação entre a sub-bacia do Atibainha e o Sistema Cantareira torna a área sensível tanto a variações climáticas quanto a pressões territoriais e operacionais. Em períodos de estiagem, a redução das vazões afluentes e dos volumes armazenados pode ampliar conflitos entre usos e evidenciar a importância da conservação dos mananciais, do controle do assoreamento, da manutenção das áreas vegetadas e do monitoramento contínuo das séries hidrológicas.

4.4. Características físicas: relevo, drenagem, altitude e declividade

A sub-bacia do Atibainha apresenta características físicas marcadas por relevo fortemente ondulado a montanhoso, forte controle estrutural, presença de serras, morros, montanhas e vales encaixados. Trata-se de uma área situada no contexto do Planalto Atlântico, com influência de formas de relevo associadas à Serra da Mantiqueira e à Serra da Cantareira. A região é condicionada por estruturas geológicas importantes, que controlam segmentos de escarpas descontínuas e influenciam o direcionamento de trechos da drenagem.

O mapa geomorfológico da sub-bacia do Atibainha, Figura 6, indica predomínio de planaltos, com cerca de 326,11 km², equivalentes a 72,97% da área analisada, seguido por depressões com 95,72 km² (21,42%), corpo d'água continental com 17,86 km² (4,00%) e planícies com 7,23 km² (1,62%). Essa configuração demonstra que a bacia possui forte controle do relevo sobre a dinâmica hídrica, pois os planaltos e áreas mais dissecadas favorecem maior energia de escoamento, enquanto depressões, planícies e o reservatório Atibainha concentram processos de acumulação, armazenamento e transporte de água e sedimentos. Assim, a geomorfologia reforça a importância da conservação da cobertura vegetal, do controle da ocupação em áreas sensíveis e da proteção do reservatório para a manutenção da disponibilidade hídrica no contexto do Sistema Cantareira

A rede hidrográfica da sub-bacia é organizada a partir do rio Atibainha e de seus afluentes, que conduzem o escoamento superficial das vertentes em direção ao reservatório e aos trechos a jusante. A configuração da drenagem reflete a interação entre relevo, estrutura geológica, solos, declividade e cobertura vegetal. Em áreas de maior declividade, a resposta hidrológica tende a ser mais rápida, com maior potencial de escoamento superficial e transporte de sedimentos. Em setores de menor declividade, especialmente próximos ao reservatório e aos vales principais, predominam condições mais favoráveis à deposição de sedimentos, regularização do fluxo e maior influência do armazenamento superficial.

A Figura 6 apresentou os domínios de superfície complementando a análise pedológica ao indicar a distribuição das formas gerais do relevo na sub-bacia do Atibainha, com ocorrência de Planaltos e Serras e Depressões e Tabuleiros. Os setores associados a planaltos e serras tendem a apresentar maior energia do relevo, maior declividade e maior potencial de escoamento superficial e erosão, enquanto as áreas de depressões e tabuleiros estão mais relacionadas a superfícies rebaixadas ou suavizadas, com maior tendência à acumulação de água e sedimentos.

Figura 6 - Geomorfologia.

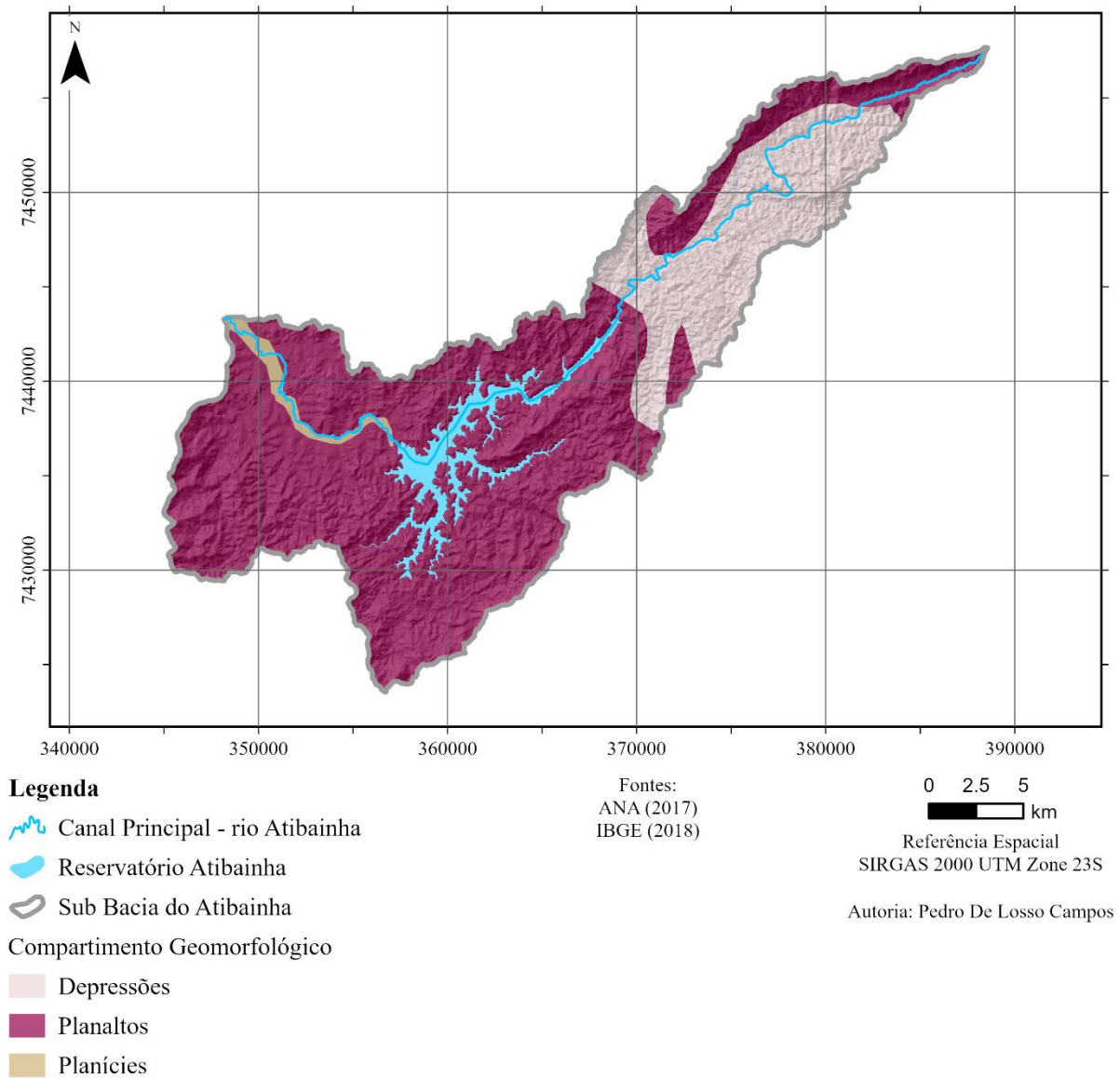
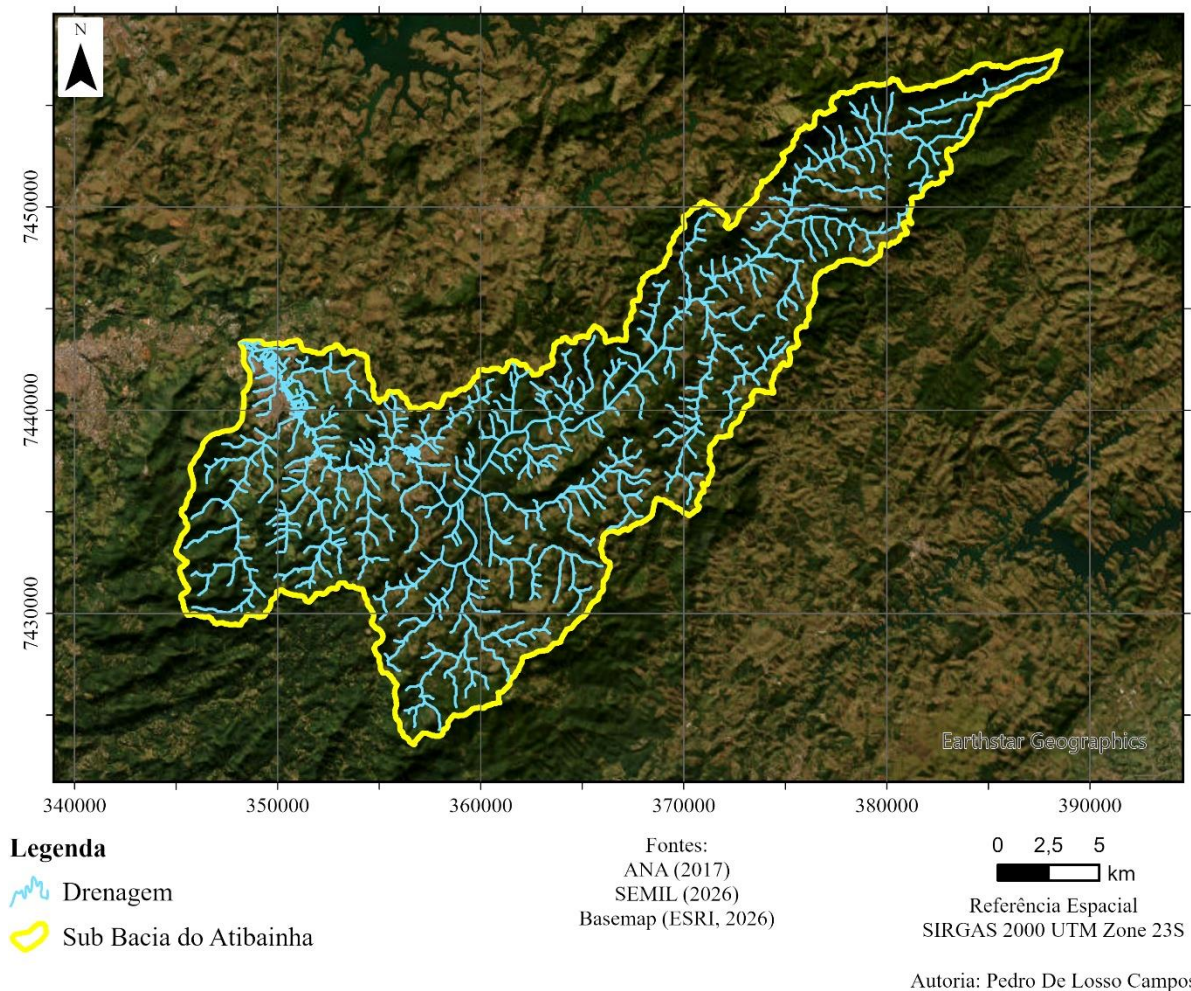


Figura 7 apresenta o mapa da rede de drenagem mostra a organização hidrográfica da sub-bacia do Atibainha, com canais distribuídos desde as áreas de cabeceira até os setores de vale e reservatório, totalizando aproximadamente 242,49 km de drenagem para uma área de 449,56 km², o que resulta em densidade de drenagem de 0,54 km/km². Essa configuração indica uma rede ramificada, condicionada pelo relevo, sendo fundamental para compreender a condução do escoamento superficial, o transporte de sedimentos e a contribuição hídrica da sub-bacia para o sistema Atibainha–Atibaia, no contexto da disponibilidade hídrica das Bacias PCJ

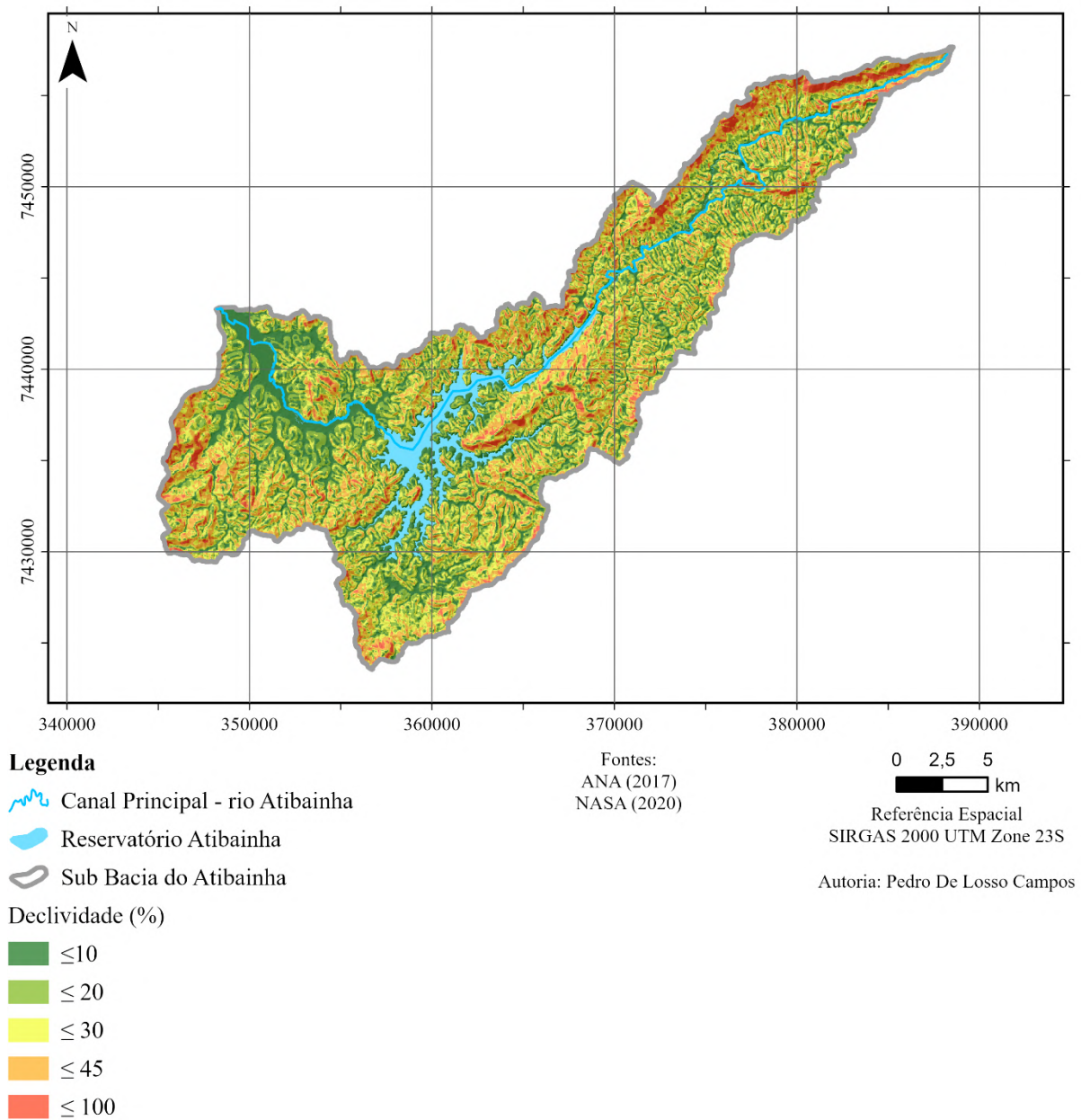
Figura 7 - Drenagem.



As análises relacionadas ao relevo foram produzidas pela extração de feição do Copernicus Global Digital Elevation Model com 30m de resolução nativa (ESA, 2024).

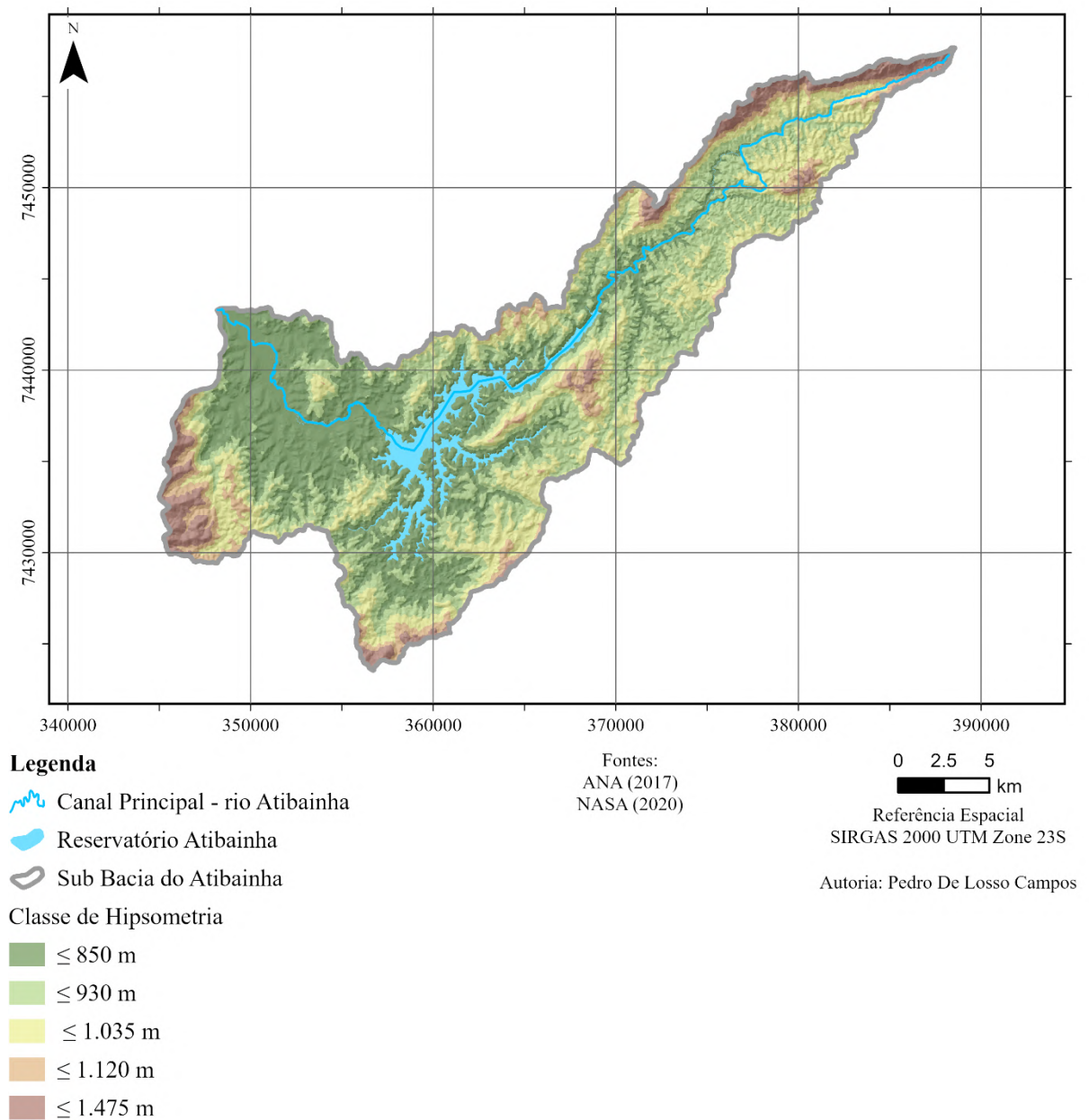
A Figura 8 apresenta a declividade da sub-bacia do Atibainha evidenciando predomínio de relevo com forte influência sobre a resposta hidrológica, pois 201,13 km² da área estão entre 20% e 40% de declividade (44,74%) e 41,56 km² apresentam declividade superior a 40% (9,24%), totalizando 53,98% da sub-bacia em alta a muito alta declividade. Essa condição favorece maior velocidade do escoamento superficial, aumento do potencial erosivo e maior transporte de sedimentos para a rede de drenagem, especialmente quando associada a usos antrópicos ou baixa cobertura vegetal; por isso, a declividade é uma variável central para avaliar vulnerabilidade ambiental, conservação de mananciais e disponibilidade hídrica.

Figura 8 – Declividade.



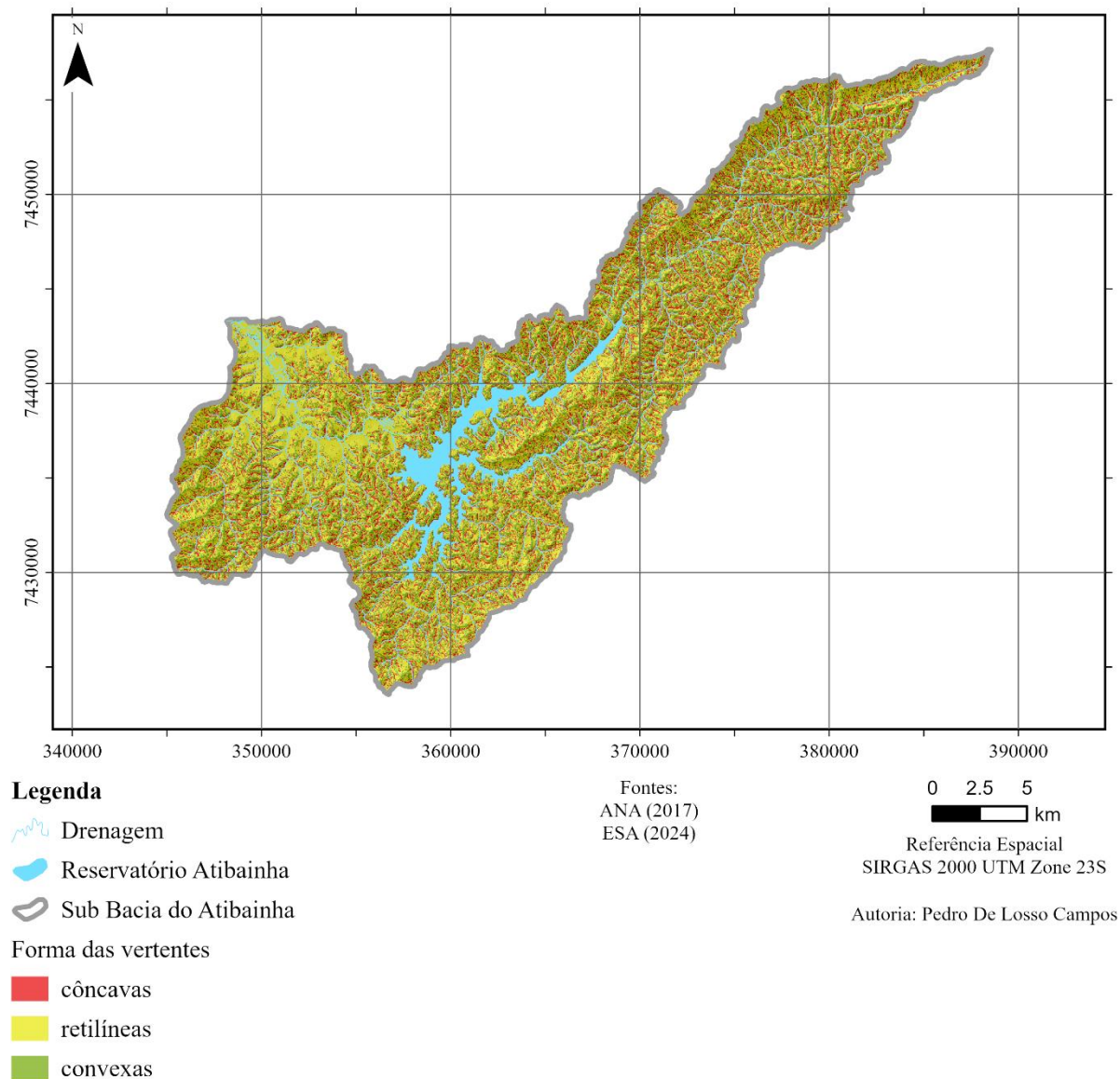
A Hipsometria, Figura 9, indica que a sub-bacia do Atibainha apresenta predomínio de baixas e médias altitudes, com 159,88 km² até 850 m (35,23%) e 138,90 km² entre 850 e 950 m (30,60%), concentradas nos vales, entorno do reservatório e eixo principal de drenagem; já as faixas mais elevadas, acima de 1050 m, somam 58,82 km² (12,96%) e correspondem principalmente a divisores topográficos e áreas de cabeceira. Essa variação altimétrica, de aproximadamente 754 m a 1472 m, condiciona a direção do escoamento, a formação das drenagens e o aporte hídrico para o sistema Atibainha–Atibaia, sendo relevante para compreender a disponibilidade hídrica da sub-bacia no contexto das Bacias PCJ.

Figura 9 - Hipsometria.



A Figura 10 exibe a curvatura da sub-bacia com forte alternância entre formas de concentração e dispersão do escoamento, com predomínio de áreas côncavas em 192,32 km² (42,37%) e convexas em 181,05 km² (39,89%), enquanto as áreas retilíneas ocupam 80,52 km² (17,74%).

Figura 10 - Forma das vertentes da área de estudo.

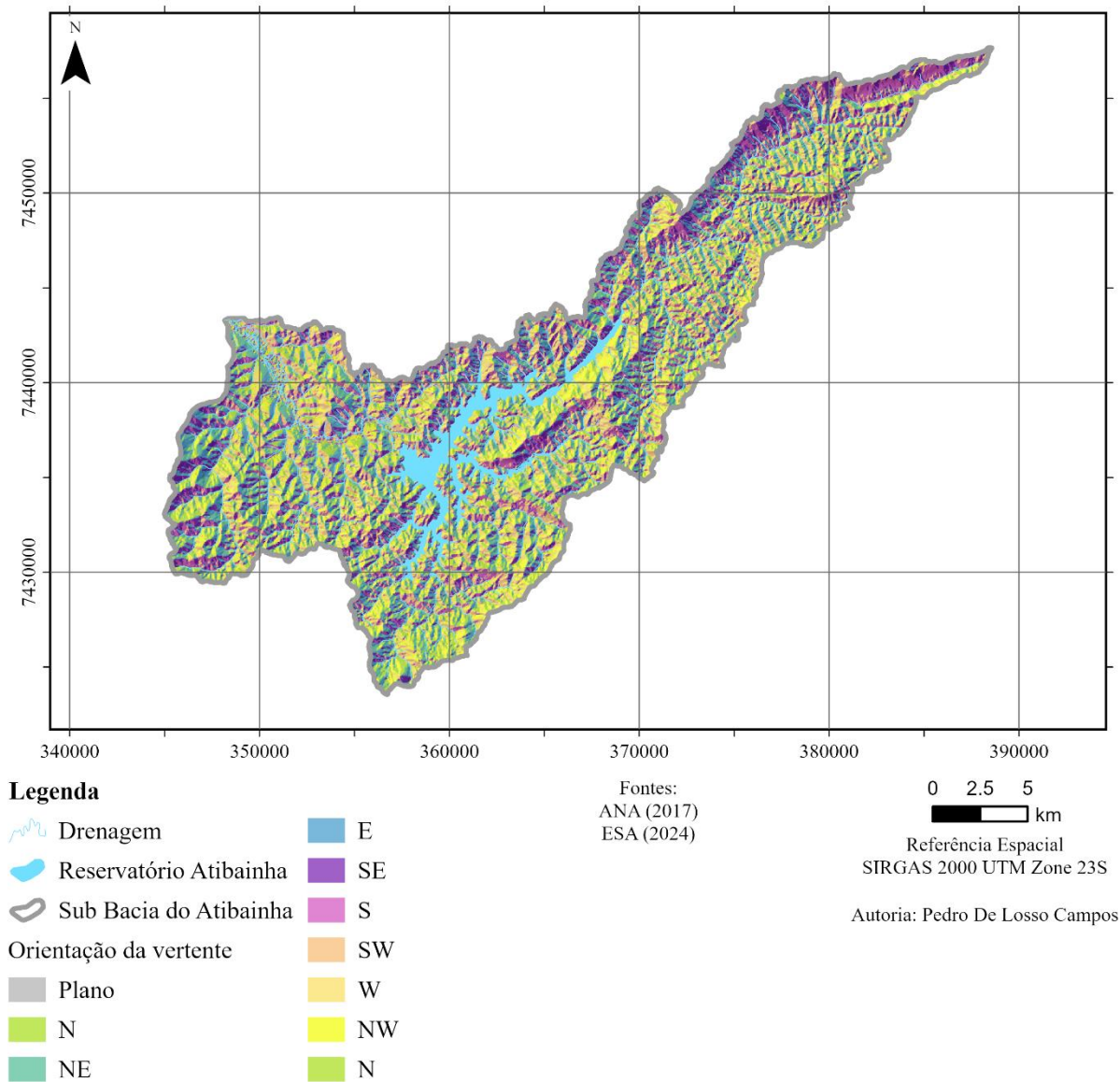


As formas côncavas são hidrologicamente mais sensíveis por favorecerem a convergência de fluxo, a concentração de umidade, o transporte de sedimentos e a conexão com vales e talvegues, já as formas convexas tendem à dispersão do escoamento em topos e divisores. Essa variável é importante para ajudar a identificar áreas com maior potencial de vulnerabilidade ambiental quando associadas a declividade elevada, uso antrópico e proximidade da drenagem, contribuindo para a análise da disponibilidade hídrica.

O mapa de aspecto de incidência solar, Figura 11, indica a distribuição das vertentes segundo a orientação solar, com 39,19% da sub-bacia voltada para setores de maior insolação

- norte, nordeste e noroeste, 34,66% em setores de menor insolação - sudeste, sul e sudoeste e 26,15% em condição intermediária - leste e oeste.

Figura 11 - Aspecto de Incidência Solar.

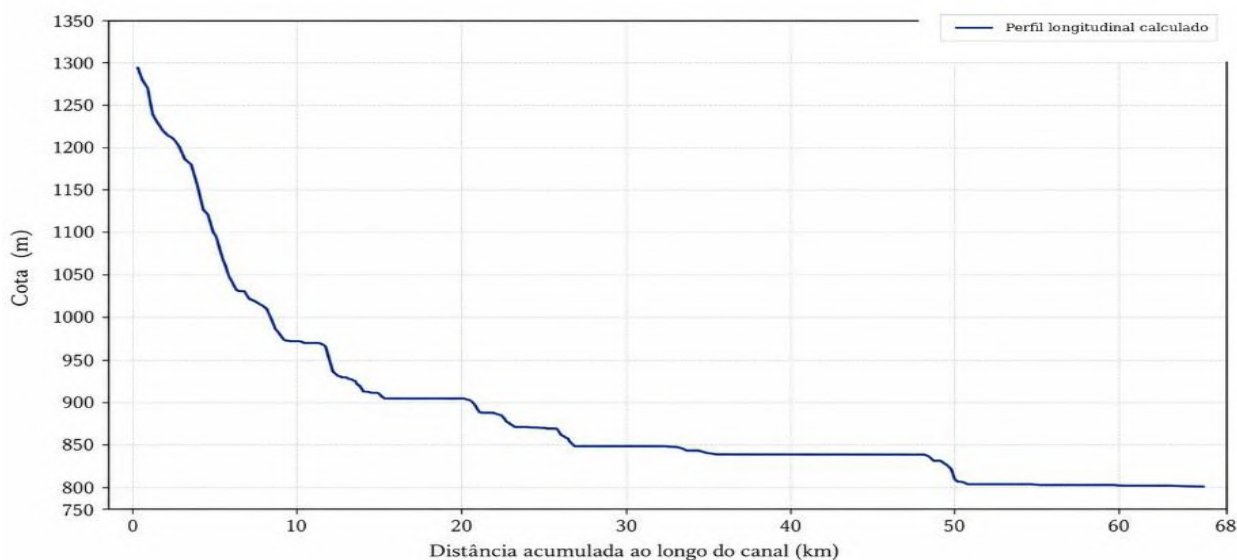


Essa variável contribui para a análise da disponibilidade hídrica porque vertentes mais expostas à radiação tendem a apresentar maior evaporação potencial e menor conservação de umidade superficial, enquanto vertentes menos expostas podem favorecer maior retenção de umidade, especialmente quando associadas à cobertura vegetal, solos menos expostos e áreas de convergência de fluxo, por isso, o aspecto deve ser interpretado em conjunto com declividade, curvatura, TWI e uso do solo no diagnóstico da sub-bacia.

O processamento fisiográfico realizado neste trabalho indica amplitude altimétrica significativa na sub-bacia. As cotas variam aproximadamente de 754,13 m a 1.472,20 m, resultando em desnível altimétrico de cerca de 718,07 m. Essa variação altimétrica evidencia a presença de setores serranos e áreas de cabeceira com elevada energia do relevo, bem como setores mais baixos associados ao vale principal e ao reservatório.

O perfil longitudinal calculado do canal principal do rio Atibainha, Figura 12, apresenta extensão aproximada de 66 km, com cotas variando de cerca de 1.290 m nas cabeceiras para aproximadamente 800 m a jusante, evidenciando forte perda altimétrica inicial e redução progressiva da declividade ao longo do curso. O trecho superior, principalmente até cerca de 10–12 km, concentra maior energia do relevo e maior potencial erosivo, enquanto os trechos médio e inferior apresentam declividade mais suave, favorecendo menor velocidade de escoamento, maior regularização do fluxo e possível deposição de sedimentos. Essa configuração é relevante para o TCC porque ajuda a compreender a contribuição da sub-bacia do Atibainha para a disponibilidade hídrica das Bacias PCJ, relacionando relevo, drenagem, transporte de sedimentos e resposta hidrológica.

Figura 12 - Perfil longitudinal.



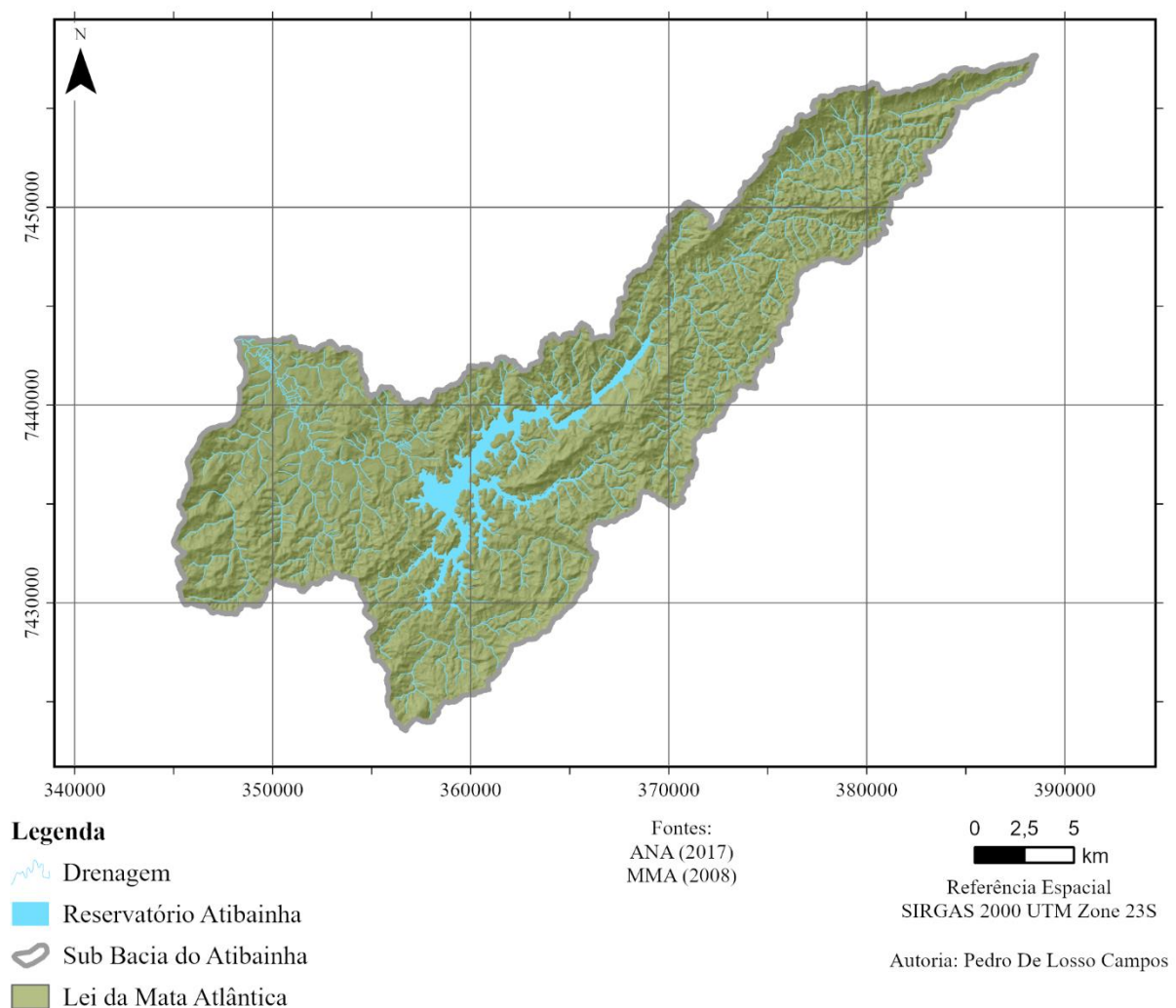
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. Características ambientais e territoriais

A inserção da sub-bacia do Atibainha na área de abrangência da Lei da Mata Atlântica reforça sua relevância ambiental no contexto das Bacias PCJ, uma vez que o território está sujeito a diretrizes específicas de proteção, conservação e recuperação da vegetação nativa. Essa condição legal contribui para orientar a análise do uso e cobertura da terra, especialmente em áreas de mananciais, margens de cursos d'água, nascentes e remanescentes florestais, diretamente relacionados à manutenção da disponibilidade hídrica e à redução da vulnerabilidade ambiental.

A Figura 13 indica que a sub-bacia do Atibainha está integralmente inserida na área de aplicação da Lei da Mata Atlântica, regida pela Lei Federal nº 11.428/2006 e regulamentada pelo Decreto nº 6.660/2008, que disciplinam a conservação, proteção, regeneração, uso e eventual supressão da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica.

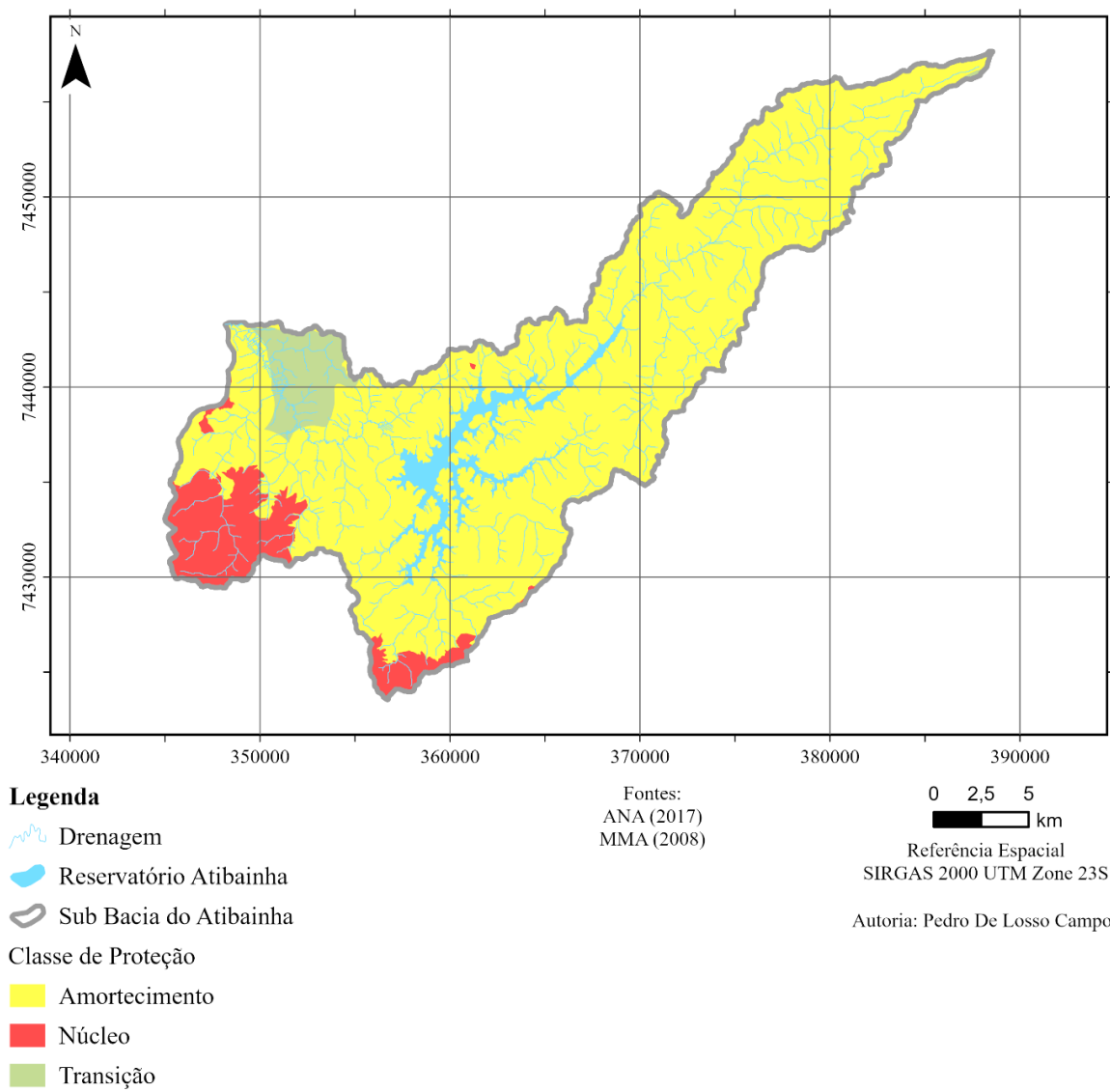
Figura 13 - Área de aplicação da Lei da Mata Atlântica.



Para o TCC, essa condição é relevante porque impõe restrições à supressão de vegetação primária e secundária, especialmente conforme o estágio de regeneração, e orienta a ocupação rural e urbana de modo compatível com a manutenção da biodiversidade, do regime hídrico e do equilíbrio ecológico; portanto, reforça a necessidade de proteger remanescentes florestais, APPs, margens, nascentes e áreas de recarga, elementos diretamente associados à disponibilidade hídrica da sub-bacia e das Bacias PCJ.

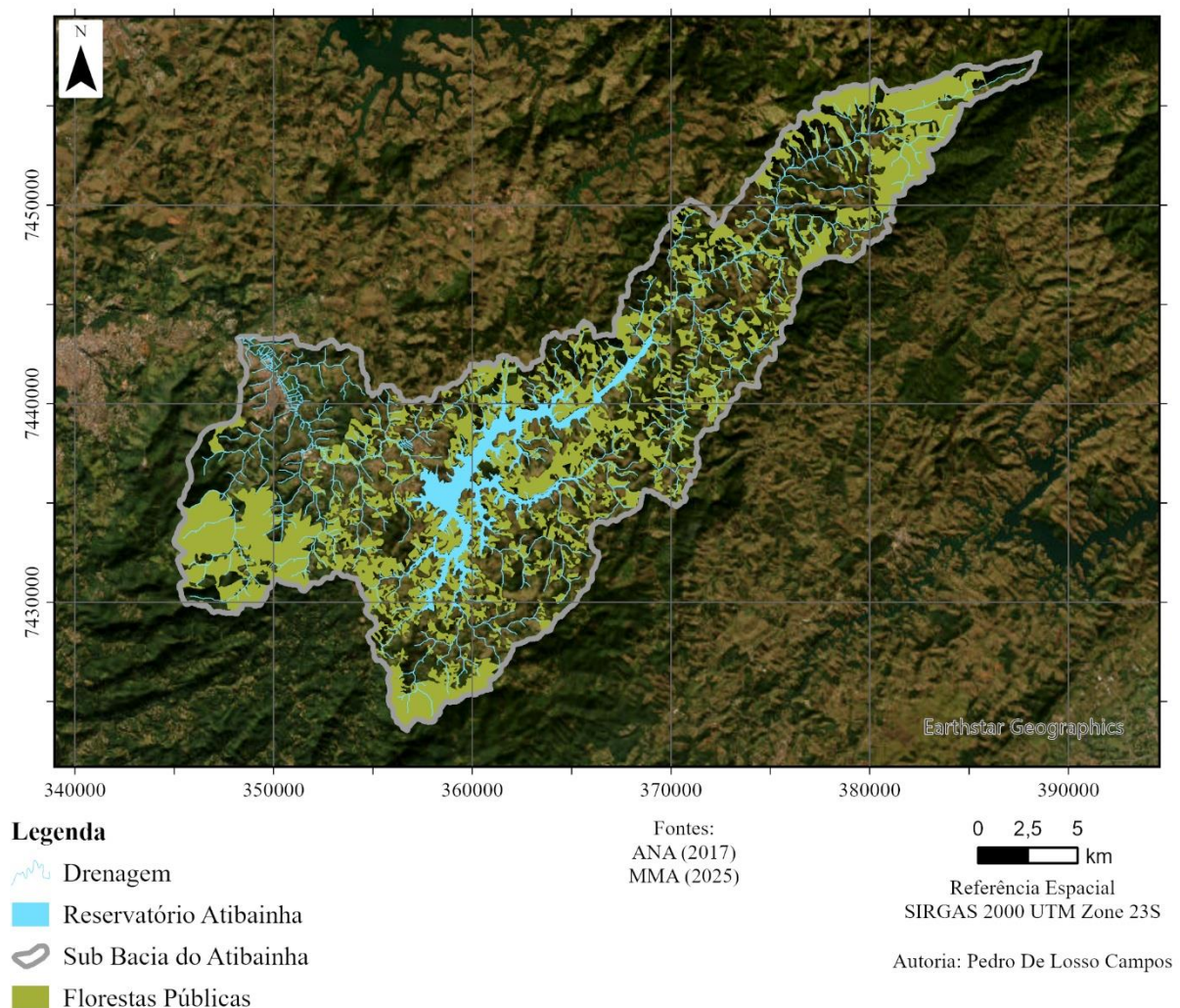
A classificação da Mata Atlântica indica que a sub-bacia do Atibainha está predominantemente inserida em zona de amortecimento, Figura 14, com áreas menores de núcleo e transição, especialmente no setor sudoeste da bacia, essa configuração reforça a importância ambiental do recorte estudado, pois evidencia a necessidade de compatibilizar uso do solo, conservação da vegetação nativa e proteção dos recursos hídricos, conforme os princípios da Lei da Mata Atlântica.

Figura 14 - Unidades da Mata Atlântica.



O mapa do Cadastro Nacional de Florestas Públicas, Figura 15, indica que parte expressiva da sub-bacia do Atibainha está inserida em áreas cadastradas pelo MMA, totalizando aproximadamente 155,58 km², ou cerca de 34,6% da área da sub-bacia. Essas áreas representam porções relevantes para a conservação ambiental, manutenção da cobertura vegetal, proteção de nascentes, margens e zonas de recarga, contribuindo para reduzir erosão, assoreamento e perda de qualidade da água.

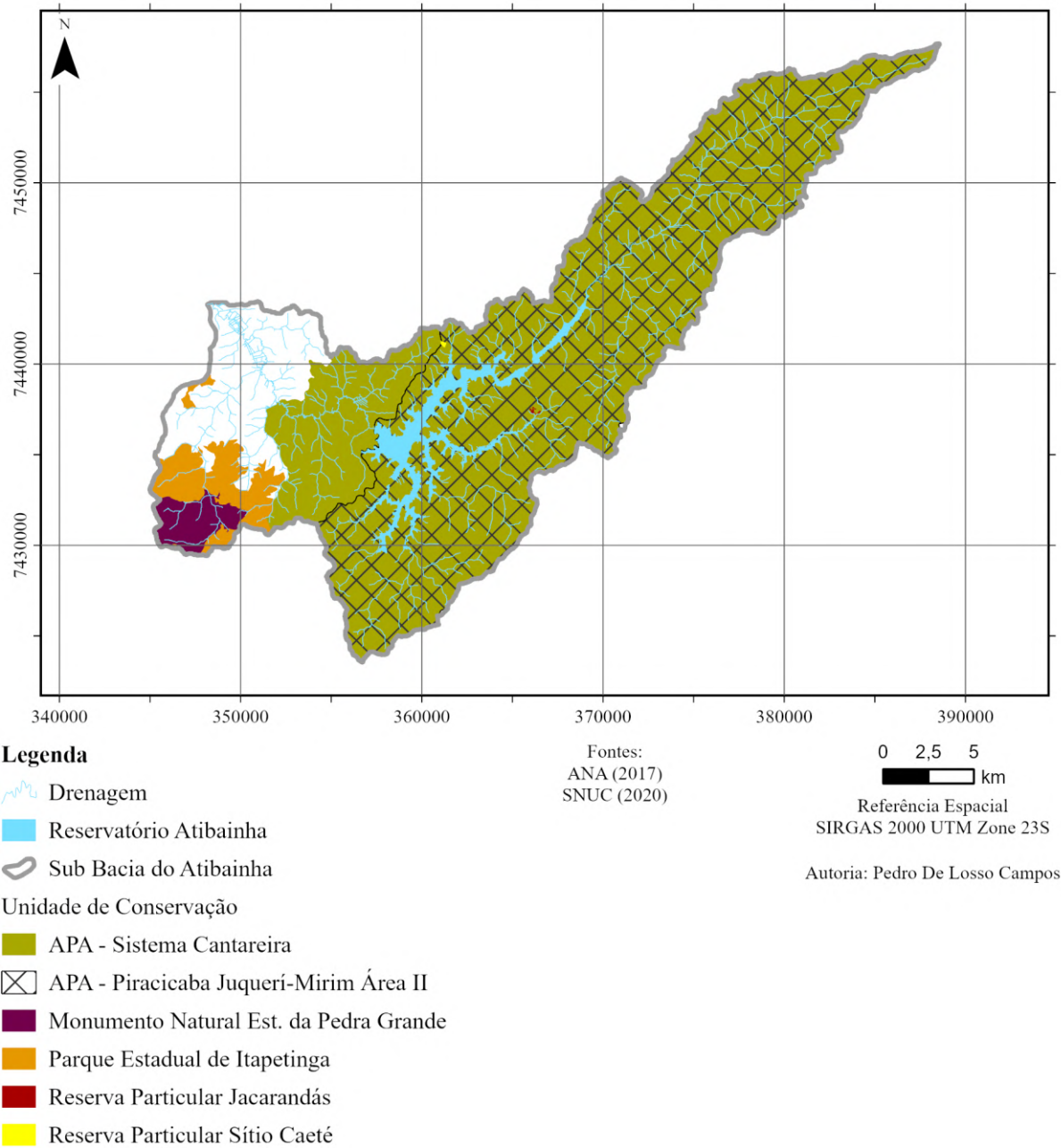
Figura 15 - Cadastro Nacional de Florestas Públicas.



Além desse fator, a sub-bacia do Atibainha está amplamente inserida em áreas protegidas, conforme é possível ver em Figura 16, com predomínio da APA Sistema Cantareira, além de sobreposição pontual com unidades como o Parque Estadual de Itapetinga, o Monumento Natural Estadual da Pedra Grande e reservas particulares. Essa condição é

relevante para o TCC porque as unidades de conservação, reguladas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza — SNUC, orientam o uso do território, restringem atividades incompatíveis com a proteção ambiental e favorecem a conservação da vegetação, das nascentes, das margens e das áreas de recarga.

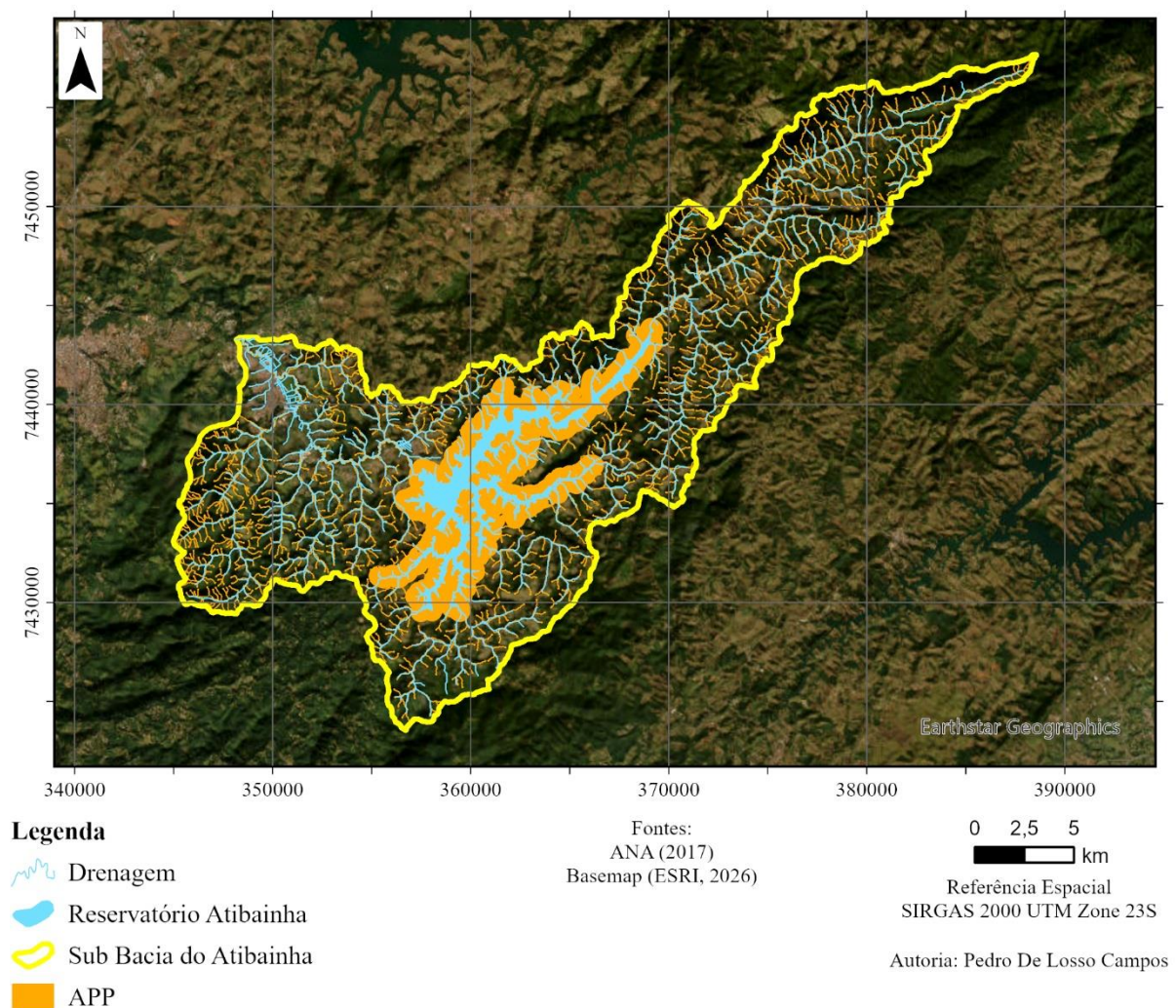
Figura 16 - Unidades de Conservação.



Após caracterização e exposição das áreas legalmente protegidas da sub-bacia do Atibainha, passa-se a considerar as Áreas de Preservação Permanente (APPs), por sua relação

direta com a proteção dos recursos hídricos. As APPs, definidas pela Lei Federal nº 12.651/2012, têm a função de preservar margens de cursos d'água, nascentes, reservatórios, encostas e áreas ambientalmente sensíveis, contribuindo para reduzir erosão, assoreamento e perda de qualidade da água. No mapa, Figura 17, essas áreas somam aproximadamente 120,50 km², cerca de 26,8% da sub-bacia, evidenciando sua importância para a conservação da drenagem, do reservatório Atibainha e da disponibilidade hídrica.

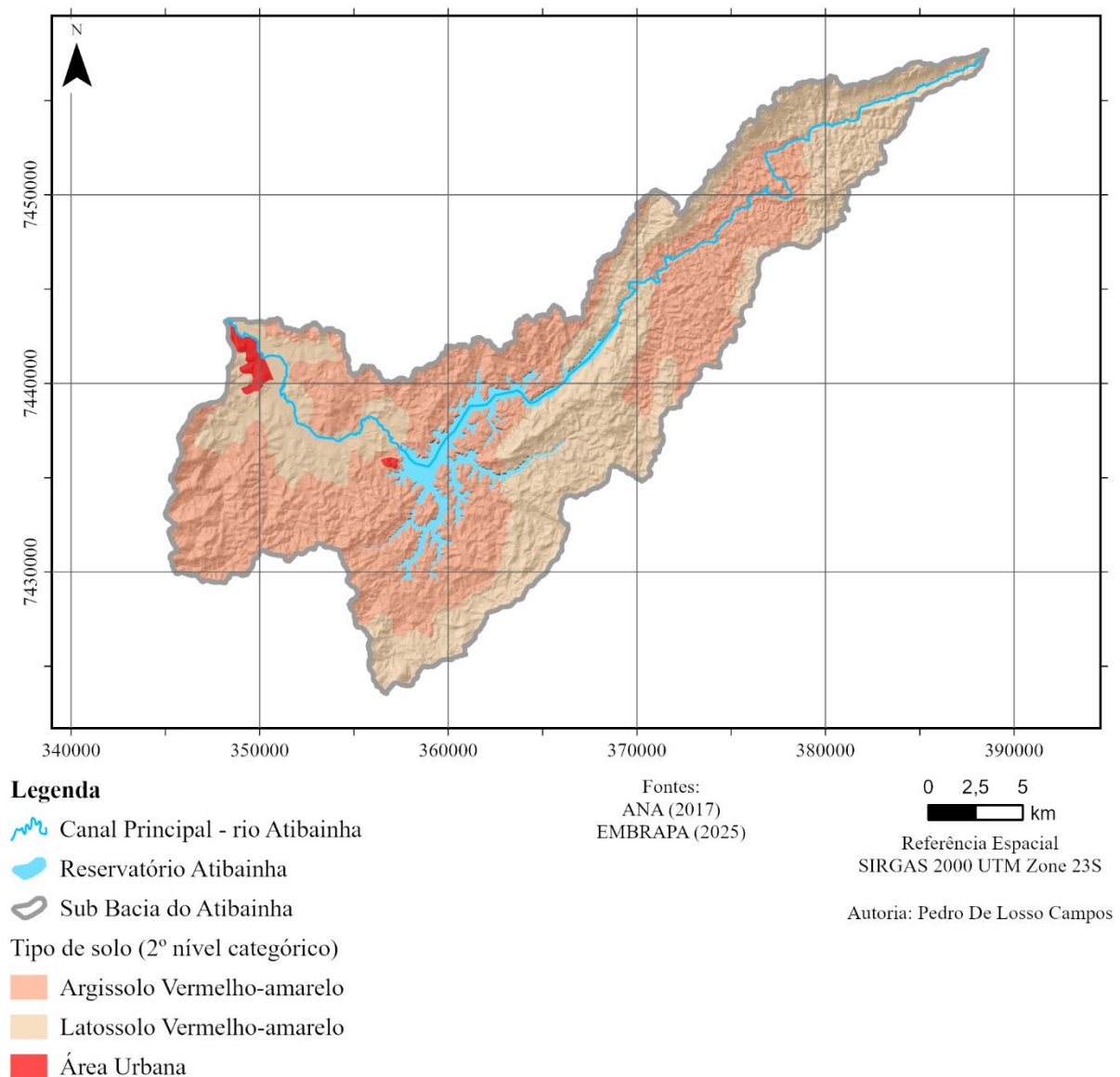
Figura 17 - Áreas de Preservação Permanente.



A análise pedológica da sub-bacia do Atibainha permite compreender como os tipos de solo condicionam a infiltração, o escoamento superficial, a erosão e o transporte de sedimentos para a rede de drenagem. A

Figura 18 indica predomínio da associação Neossolo Litólico e Cambissolo, principalmente nos setores oeste, central e sul da bacia, solos geralmente mais rasos, jovens e associados a relevo ondulado a montanhoso, com maior suscetibilidade à erosão quando expostos ou ocupados inadequadamente. A associação Latossolo e Argissolo ocorre de forma mais concentrada no setor nordeste, representando áreas com maior desenvolvimento pedológico, mas que também podem apresentar limitações quanto à infiltração e ao escoamento conforme textura, declividade e uso do solo. Assim, a pedologia reforça a necessidade de integrar solo, declividade, cobertura vegetal e APPs na avaliação da vulnerabilidade ambiental e da disponibilidade hídrica da sub-bacia no contexto das Bacias PCJ.

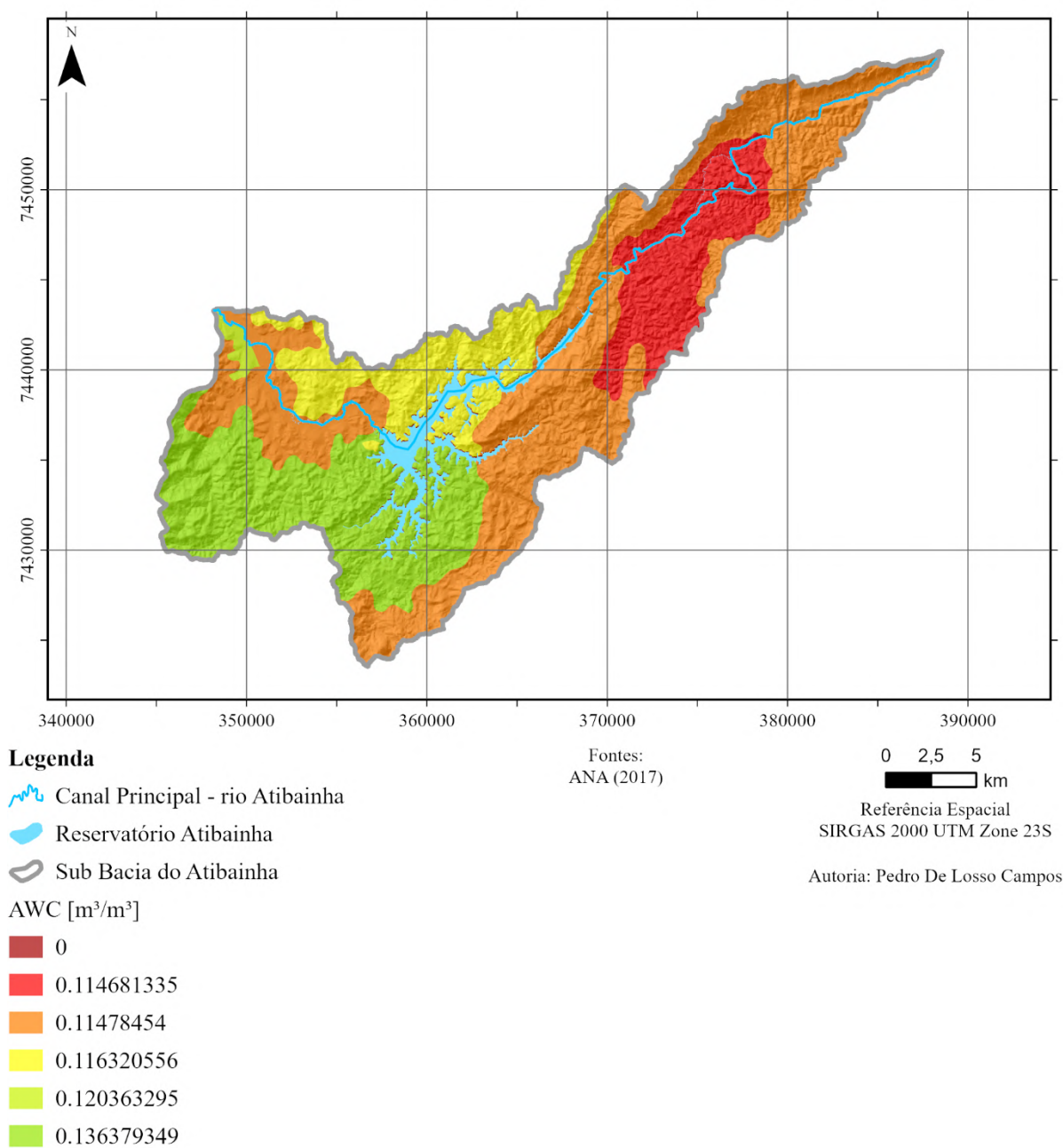
Figura 18 - Composição Pedológica.



Após a análise pedológica e dos domínios de superfície, a avaliação da capacidade de água disponível no solo — AWC — permite aprofundar a compreensão sobre o comportamento hídrico da sub-bacia do Atibainha. Enquanto a pedologia indica os tipos de solo predominantes e suas limitações quanto à infiltração, profundidade e suscetibilidade à erosão, os domínios de superfície evidenciam o controle do relevo sobre o escoamento e a acumulação de água. Nesse contexto, o mapa de AWC,

Figura 19, complementa a análise ao representar a capacidade dos solos de armazenar água disponível para a vegetação, contribuindo para interpretar a retenção hídrica, a recarga local, a resposta da bacia em períodos secos e a disponibilidade hídrica no contexto das Bacias PCJ.

Figura 19 - AWC, capacidade de água disponível no solo.

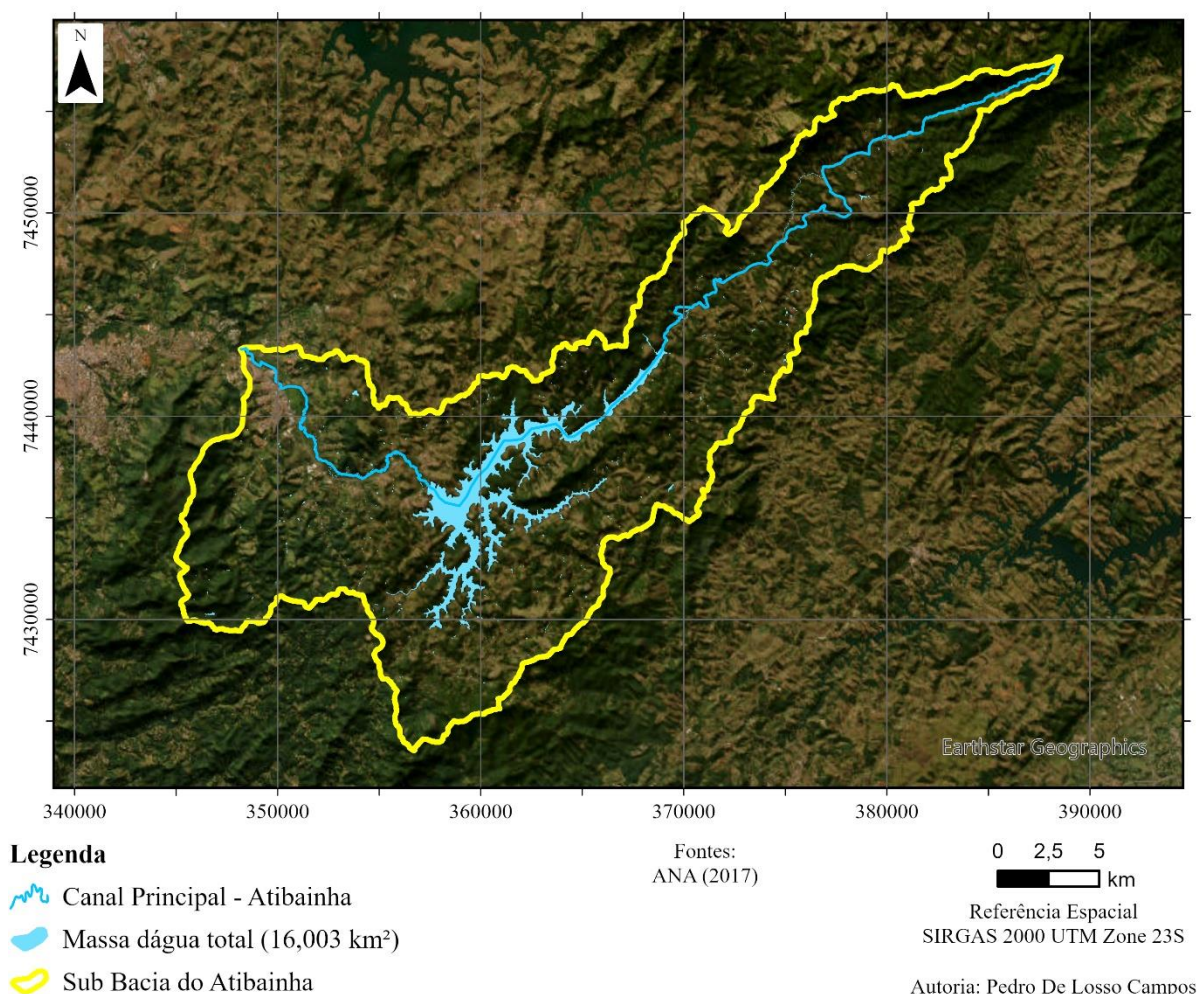


O mapa de AWC - capacidade de água disponível no solo indica variação entre aproximadamente 0,114 e 0,136 m³/m³, com predomínio da classe 0,1148 m³/m³, que ocupa cerca de 194,48 km² (43,5% da área analisada), seguida pela classe 0,1364 m³/m³, com 112,14 km² (25,1%). Esses valores representam a capacidade do solo de armazenar água disponível para a vegetação, sendo importantes para interpretar infiltração, retenção hídrica, recarga local e resposta da bacia em períodos secos; áreas com menor AWC tendem a apresentar menor armazenamento no solo e maior sensibilidade à estiagem, enquanto áreas com maior AWC podem favorecer maior manutenção da umidade e regulação do escoamento. Assim, esse mapa contribui para relacionar solo, vegetação, relevo e disponibilidade hídrica na sub-bacia do Atibainha, no contexto das Bacias PCJ.

A análise das massas d'água da sub-bacia do Atibainha deve ser compreendida em conjunto com a pedologia, os domínios de superfície e a capacidade de água disponível no solo - AWC. Enquanto os tipos de solo condicionam a infiltração, a retenção hídrica e a suscetibilidade à erosão, os domínios de relevo influenciam a direção do escoamento, a concentração de fluxos e a formação das áreas de acumulação. Nesse contexto, as massas d'água representam a expressão superficial dessa dinâmica, reunindo contribuições das vertentes, drenagens e áreas de maior armazenamento hídrico.

A análise das massas d'água da sub-bacia do Atibainha permite relacionar a superfície hídrica mapeada, Figura 20, com uma das componentes do balanço hídrico: a evaporação líquida. Embora os corpos d'água ocupem cerca de 16,00 km², equivalentes a aproximadamente 3,56% da área total da sub-bacia, eles representam áreas de perda hídrica contínua para a atmosfera. Considerando a taxa de evaporação líquida da UGRHI-05/PCJ, disponível na base da ANA, de 3,82 L/s/km², a perda estimada para as massas d'água da sub-bacia é de aproximadamente 61,13 L/s, ou 0,061 m³/s, equivalente a cerca de 1,93 hm³/ano. Esse resultado reforça que a disponibilidade hídrica deve ser analisada não apenas pelas entradas de precipitação e vazão, mas também pelas perdas associadas à lâmina d'água, ao armazenamento superficial e às condições ambientais do entorno, especialmente em uma área estratégica para as Bacias PCJ.

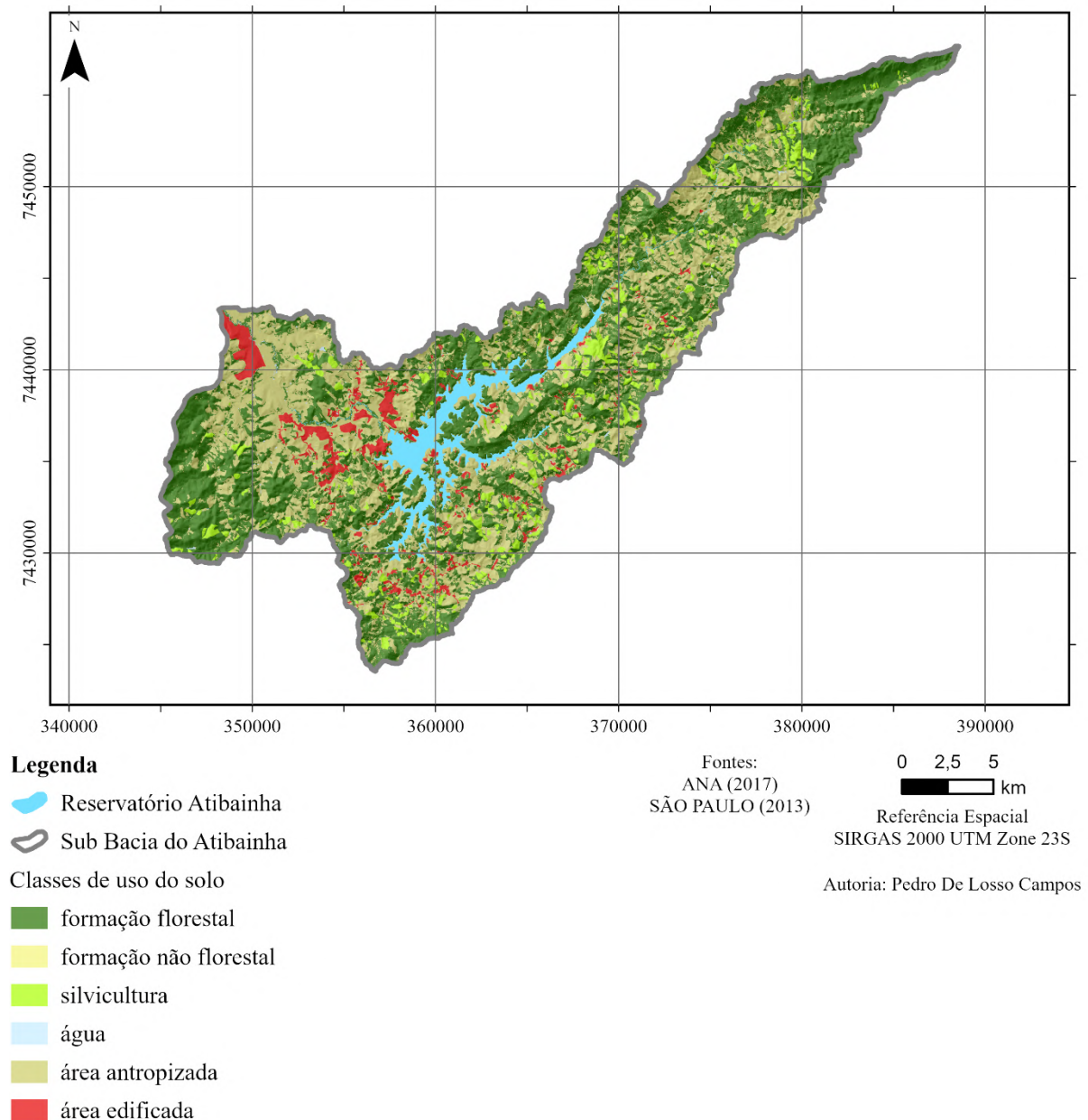
Figura 20 - Massa de água total da Sub Bacia.



A sub-bacia do Atibainha apresenta elevada importância ambiental por estar situada em área de manancial e por conter remanescentes de Mata Atlântica, vegetação secundária, áreas de silvicultura, pastagens, usos agropecuários, áreas urbanizadas e o espelho d'água do reservatório. O mapa de uso e ocupação do solo de 2013 da Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL), Figura 21, indica predomínio de formação florestal, com aproximadamente 218,04 km² (48,88% da área mapeada), seguida por área antropizada, com 161,52 km² (36,21%), além de silvicultura com 26,57 km² (5,96%), água com 20,74 km² (4,65%) e área edificada com 19,11 km² (4,28%). A paisagem atual resulta da combinação entre fatores naturais, como relevo, solos, drenagem e clima, e fatores antrópicos, como ocupação urbana, atividades rurais, infraestrutura viária, reflorestamento comercial e usos associados ao entorno do reservatório.

Essa distribuição demonstra que, embora a sub bacia do Atibainha ainda apresente expressiva cobertura florestal, há presença significativa de usos antrópicos, que devem ser avaliados em conjunto com declividade, solos, APPs e proximidade da drenagem, pois podem influenciar o escoamento superficial, a erosão, o assoreamento e a qualidade da água.

Figura 21 - Uso e ocupação do solo, SEMIL 2013.



Originalmente, a região era ocupada por formações florestais associadas à Mata Atlântica. No entanto, ao longo do processo histórico de ocupação, parte da cobertura vegetal foi substituída por pastagens, áreas agrícolas, silvicultura e ocupações urbanas ou periurbanas.

Essa transformação da paisagem influencia diretamente a dinâmica hidrológica, uma vez que alterações na cobertura vegetal e no uso do solo podem modificar a infiltração, o escoamento superficial, o transporte de sedimentos, a recarga local e a qualidade da água.

Do ponto de vista territorial, a presença do reservatório Atibainha impõe condicionantes específicas à ocupação. O reservatório atua como barreira física e elemento estruturador da paisagem, especialmente no município de Nazaré Paulista, onde se localiza próximo à sede urbana. Essa condição influencia a expansão urbana, os usos do entorno, as áreas de proteção e as restrições legais relacionadas à conservação dos mananciais.

A sub-bacia também apresenta relevância para estudos de vulnerabilidade ambiental. A combinação entre relevo declivoso, solos suscetíveis à erosão, áreas de convergência de fluxo, ocupações próximas à drenagem e usos antrópicos pode aumentar a sensibilidade da área a processos erosivos, assoreamento, perda de qualidade da água e redução da capacidade de regulação hidrológica. Por esse motivo, a análise integrada entre uso e cobertura da terra, relevo, drenagem, qualidade da água e séries hidrológicas é essencial para compreender as condições ambientais da sub-bacia.

4.6. Municípios de composição da Sub bacia: Nazaré Paulista, Piracaia e Bom Jesus dos Perdões

O recorte espacial adotado neste trabalho intercepta porções dos municípios de Nazaré Paulista, Piracaia e Bom Jesus dos Perdões, que compõem a base territorial da análise da sub-bacia do Atibainha. Esses municípios apresentam diferentes relações com o rio Atibainha, o reservatório e os trechos de drenagem associados à disponibilidade hídrica regional. O mapa municipal, Figura 22, contextualiza a inserção territorial da sub-bacia do Atibainha no setor leste da UGRHI-05/Bacias PCJ, abrangendo principalmente áreas dos municípios de Nazaré Paulista, Piracaia e Bom Jesus dos Perdões, com o reservatório Atibainha localizado de forma central no recorte analisado.

Nazaré Paulista constitui o município de maior destaque na área de estudo, pois abriga parte significativa do reservatório e apresenta relação direta com a barragem, o espelho d'água e as áreas de entorno do manancial. A presença do reservatório condiciona o uso do território, influencia a ocupação urbana e estabelece restrições ambientais associadas à proteção da água e das margens.

Piracaia está associada aos setores de montante e às áreas de contribuição da sub-bacia, apresentando relevância para a geração de escoamento, conservação de cabeceiras, manutenção

de cobertura vegetal e controle de processos erosivos. As características físicas do relevo e da drenagem nesses setores influenciam diretamente a quantidade e a qualidade da água que chega ao reservatório.

Bom Jesus dos Perdões relaciona-se aos trechos de jusante e à continuidade hidrológica do sistema Atibainha–Atibaia, sendo importante para compreender os efeitos da regularização de vazões, da operação do reservatório e da disponibilidade hídrica após a barragem. Sua inclusão no recorte territorial contribui para uma leitura mais integrada da sub-bacia, considerando não apenas a área de armazenamento, mas também os efeitos hidrológicos a jusante.

O mapa dos setores censitários, Figura 23, evidencia o predomínio de áreas rurais na sub-bacia do Atibainha, com núcleos urbanos concentrados principalmente nos setores oeste e no entorno de áreas associadas ao reservatório e à rede viária.

Essa configuração territorial é importante porque ajuda a interpretar a distribuição da demanda hídrica, das outorgas e das pressões sobre os mananciais: as áreas rurais tendem a estar mais associadas a usos agropecuários, captações dispersas e conservação de cobertura vegetal, enquanto os setores urbanos concentram maior pressão por abastecimento, impermeabilização e alteração do escoamento superficial. Assim, a leitura censitária complementa a análise municipal, de uso do solo e de disponibilidade hídrica no contexto da sub-bacia do Atibainha.

A diferenciação entre os três municípios também se expressa na distribuição das outorgas de uso da água, que permite identificar onde se concentram as pressões formais sobre os recursos hídricos da sub-bacia. Os registros levantados indicam maior número de outorgas em Bom Jesus dos Perdões e Nazaré Paulista, refletindo a importância dos trechos de jusante, do entorno do reservatório e das áreas de maior interação entre uso do solo, captações e rede de drenagem. A predominância de outorgas superficiais evidencia a dependência direta dos cursos d'água e do reservatório, enquanto as outorgas subterrâneas indicam usos complementares associados ao abastecimento local e rural. Assim, a análise municipal não apenas caracteriza a inserção territorial da sub-bacia, mas também permite relacionar ocupação, demanda hídrica, disponibilidade superficial e pressão sobre os mananciais no contexto das Bacias PCJ.

Figura 22 - Composição municipal da Sub Bacia.

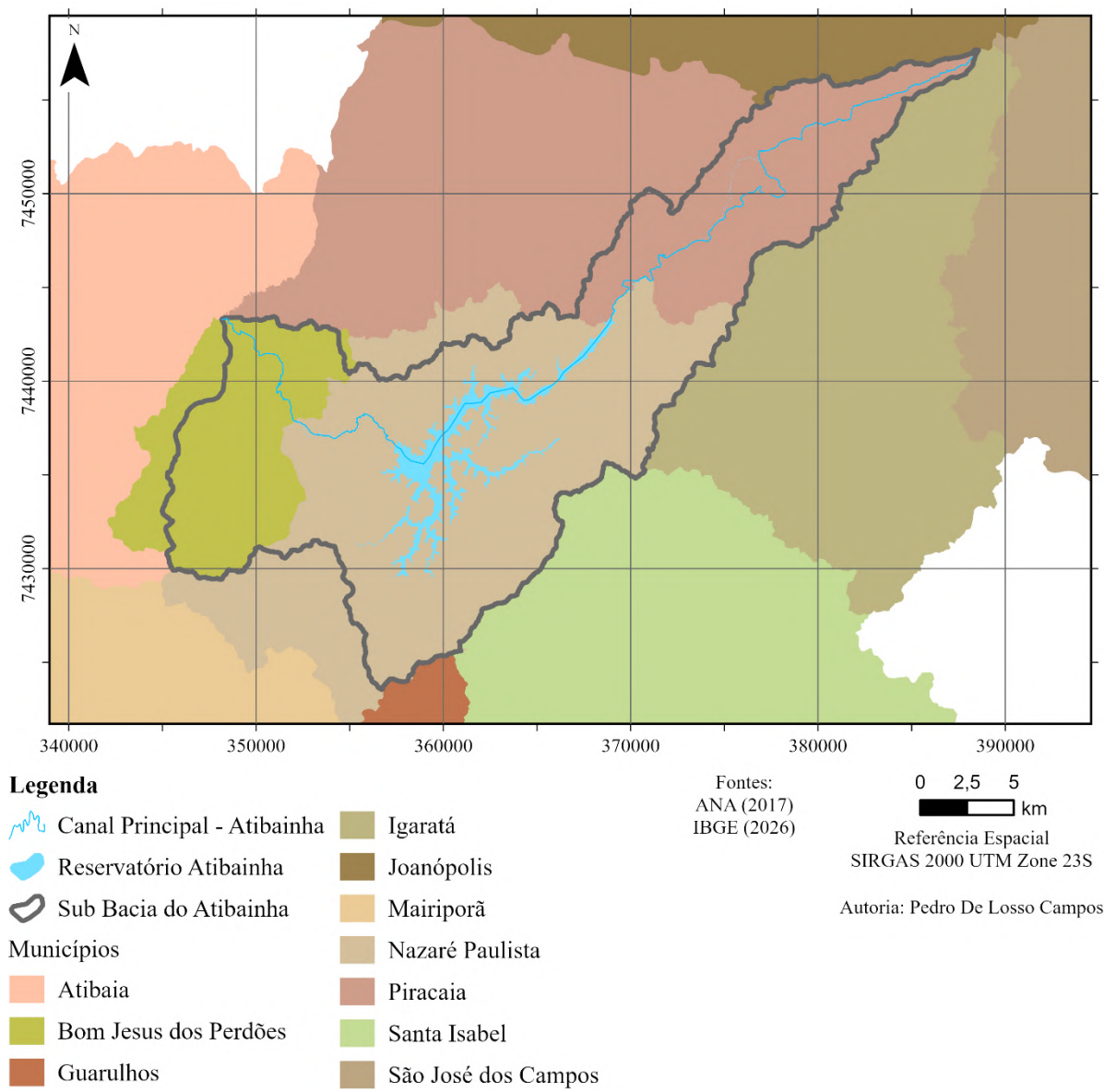
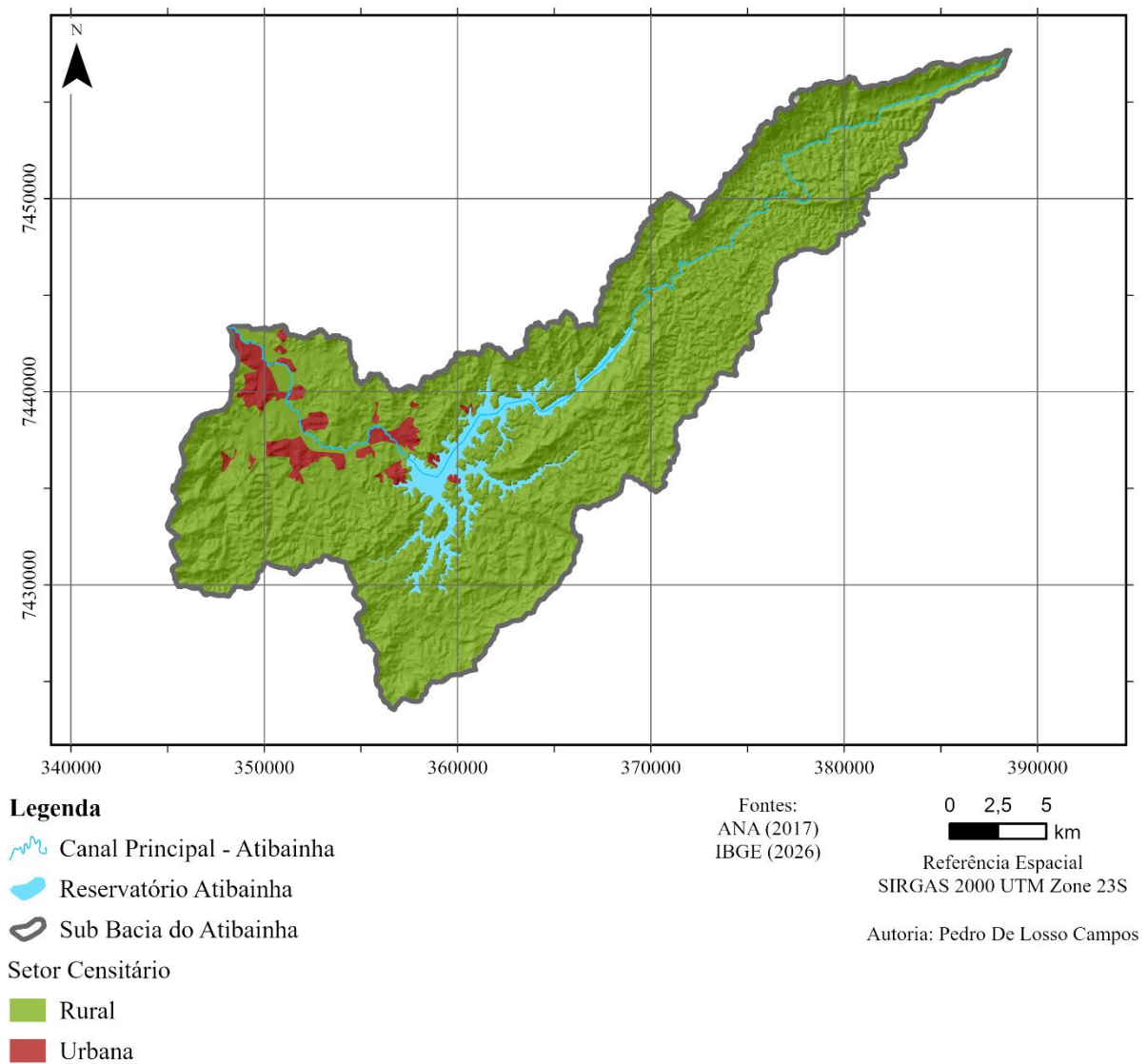


Figura 23 - Divisão municipal.



Na Figura 24 tem-se a representação pontual das outorgas estaduais que evidencia a distribuição dos pontos de captação superficial e subterrânea na sub-bacia do Atibainha, totalizando 356 registros, dos quais 314 correspondem a outorgas superficiais (88,20%) e 42 a outorgas subterrâneas (11,80%) (Tabela 1). A maior concentração ocorre em Bom Jesus dos Perdões, com 155 outorgas, seguido por Nazaré Paulista, com 145, e Piracaia, com 56 registros. A predominância das captações superficiais reforça a dependência direta da rede de drenagem, do reservatório, das APPs e da conservação das margens para a manutenção da disponibilidade hídrica.

Figura 24 - Outorgas superficiais e subterrâneas.

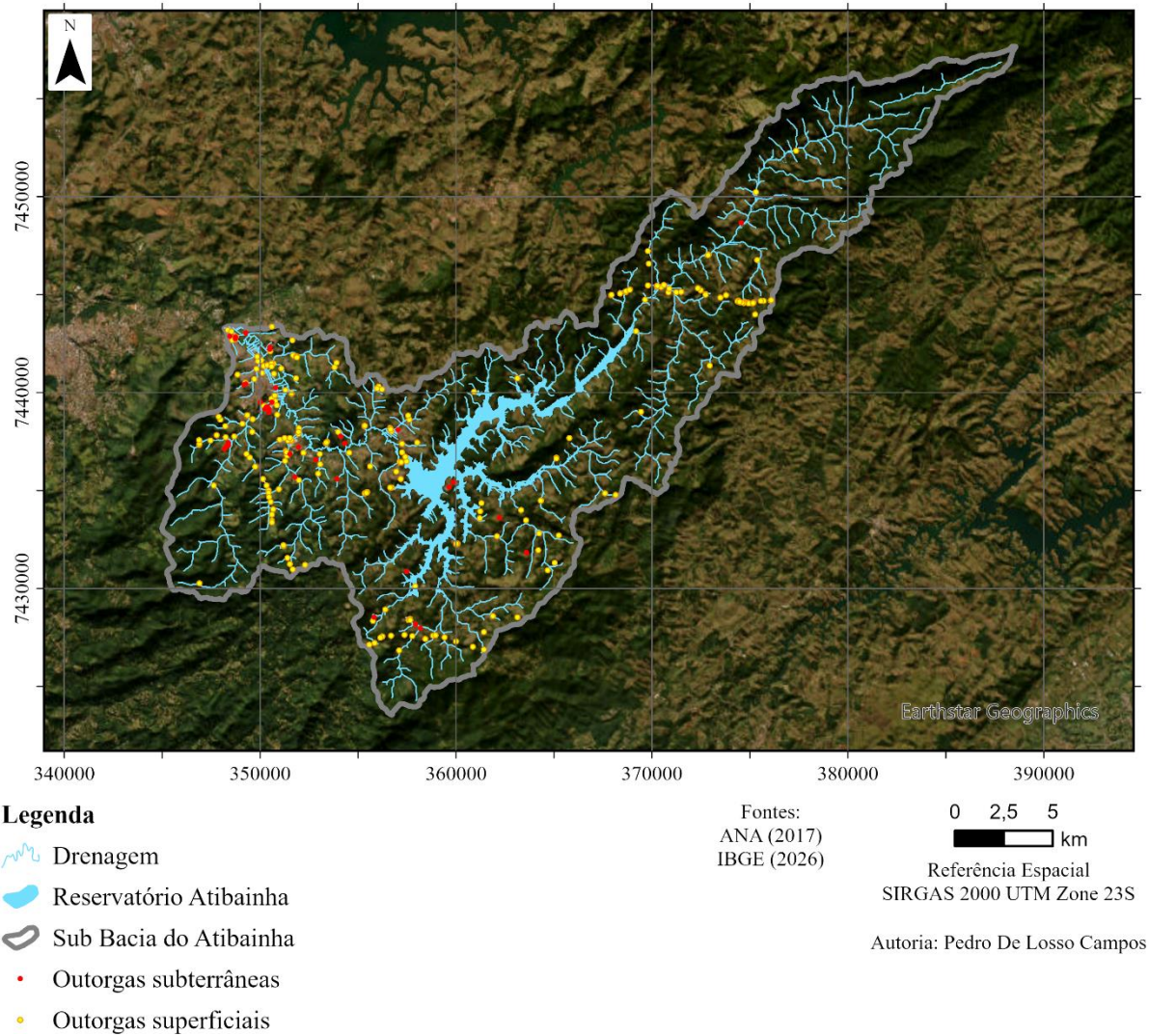


Tabela 1- Outorgas superficiais e subterrâneas na Sub Bacia através de dados oficiais da ANA.

Município	Outorgas superficiais	Outorgas subterrâneas	Total	Participação
Bom Jesus dos Perdões	131	24	155	43,54%
Nazaré Paulista	128	17	145	40,73%
Piracaia	55	1	56	15,73%
Total	314	42	356	100%

Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Considerando apenas as outorgas de captação com vazão informada, a sub-bacia do Atibainha apresenta 112 registros, com vazão média geral de 21,89 L/s e soma de aproximadamente 2.451,42 L/s, equivalente a 2,45 m³/s. As captações superficiais concentram a maior parte da vazão, com média de 29,13 L/s, enquanto as subterrâneas apresentam média de 7,22 L/s. Entre os municípios, Bom Jesus dos Perdões possui a maior soma de vazões outorgadas, seguido por Nazaré Paulista e Piracaia, indicando maior pressão de uso hídrico nos setores oeste e central da sub-bacia (Tabela 2).

Tabela 2- Resumo Médio das Vazões outorgadas e disponíveis.

Município	Média superficial	Média subterrânea	Média geral	Soma das vazões
Bom Jesus dos Perdões	36,48 L/s	6,70 L/s	26,38 L/s	1.477,05 L/s
Nazaré Paulista	27,48 L/s	7,37 L/s	20,20 L/s	949,55 L/s
Piracaia	1,30 L/s	14,40 L/s	2,76 L/s	24,82 L/s
Total	29,13 L/s	7,22 L/s	21,89 L/s	2.451,42 L/s

Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborados pelo autor.

Dessa forma, a análise das outorgas permite identificar a pressão hídrica formal atualmente registrada na sub-bacia do Atibainha, destacando a predominância das captações superficiais e a maior concentração de usos em Bom Jesus dos Perdões e Nazaré Paulista. No entanto, para compreender a evolução da demanda hídrica em escala municipal, é necessário complementar essa leitura pontual das outorgas com os dados históricos e projetados de vazão retirada disponibilizados pela ANA. Essa integração permite avaliar não apenas onde a água é captada, mas também como a demanda dos municípios associados à sub-bacia variou entre 1980 e 2020 e qual tendência é prevista para 2040, contribuindo para uma análise mais completa da pressão sobre os recursos hídricos no contexto das Bacias PCJ.

A análise da vazão retirada municipal indica aumento da demanda hídrica nos municípios associados à sub-bacia do Atibainha entre 1980, 2020 e 2040. Em 1980, a soma das retiradas era de aproximadamente 0,211 m³/s; em 2020, passou para 0,308 m³/s, crescimento de 46,03%; e, para 2040, a previsão da ANA indica 0,337 m³/s, aumento adicional de 9,45% em relação a

2020. Em termos municipais, Piracaia mantém a maior demanda absoluta, com 0,130 m³/s em 2020 e previsão de 0,140 m³/s em 2040, enquanto Bom Jesus dos Perdões apresentou o maior crescimento histórico, passando de 0,036 m³/s em 1980 para 0,099 m³/s em 2020. Esse comportamento demonstra que a pressão hídrica municipal aumentou ao longo do tempo e deve ser analisada em conjunto com uso do solo, massas d'água, APPs, pedologia, disponibilidade hídrica e conservação dos mananciais (Tabela 3).

Tabela 3- Uso da Água por Município de composição da sub bacia.

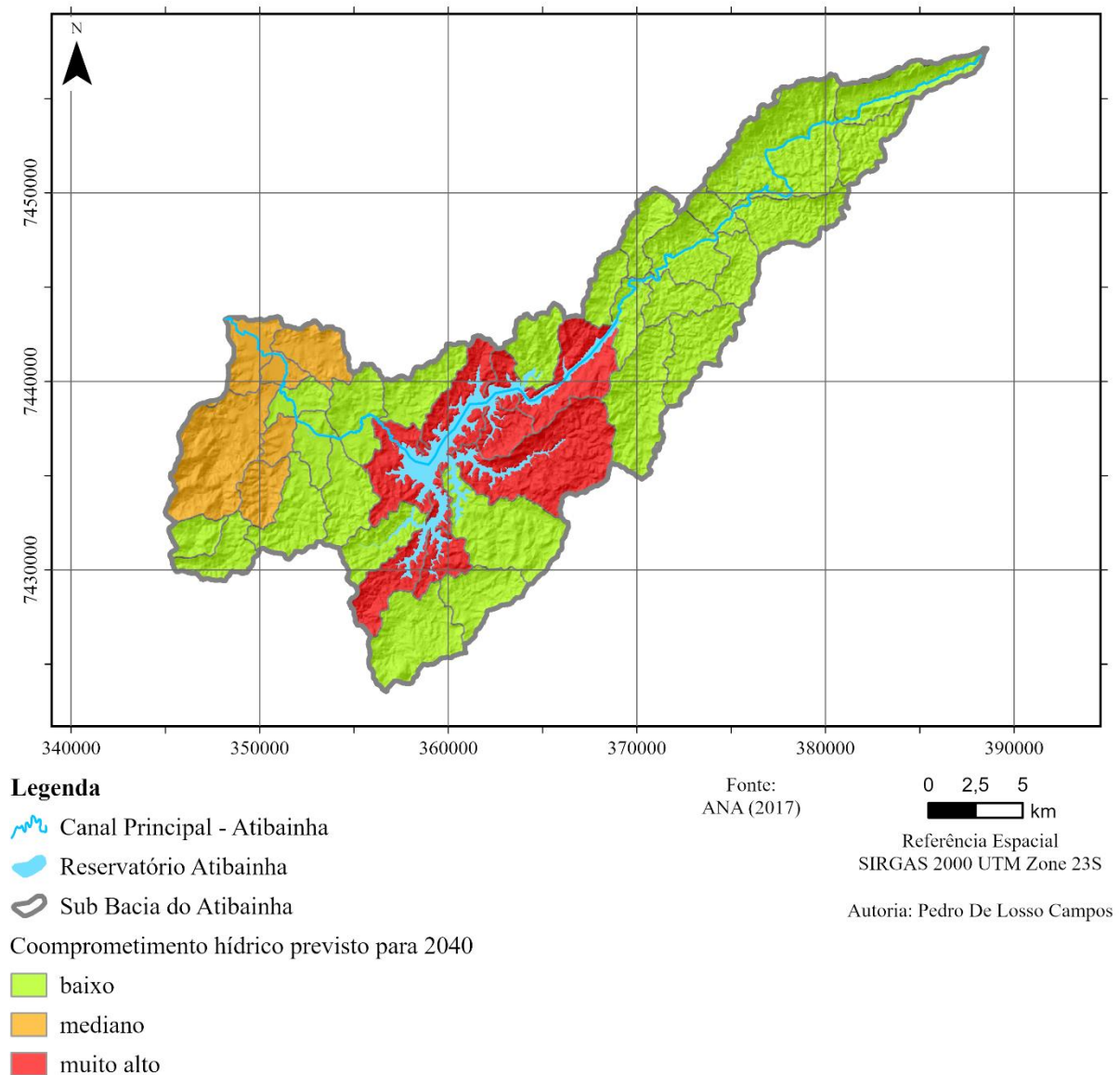
Município	1980	2020 atual	2040 previsto	Variação 1980– 2020	Variação 2020– 2040
Bom Jesus dos Perdões	0,036 m ³ /s	0,099 m ³ /s	0,111 m ³ /s	+174,05%	+12,67%
Nazaré Paulista	0,036 m ³ /s	0,079 m ³ /s	0,085 m ³ /s	+117,75%	+8,57%
Piracaia	0,139 m ³ /s	0,130 m ³ /s	0,140 m ³ /s	-5,93%	+7,54%
Total	0,211 m ³ /s	0,308 m ³ /s	0,337 m ³ /s	+46,03%	+9,45%

Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborados pelo autor.

O mapa de balanço hídrico quantitativo por microbacia para 2040, Figura 25, indica predomínio de áreas com baixo comprometimento hídrico, que ocupam aproximadamente 286,03 km² (64,16% da área analisada), especialmente nos setores de montante e porções menos pressionadas da sub-bacia. As áreas de comprometimento mediano somam cerca de 57,41 km² (12,88%), enquanto as áreas de comprometimento muito alto representam aproximadamente 102,34 km² (22,96%), concentrando-se principalmente no setor central e em trechos associados ao eixo do reservatório e da drenagem principal. Esse resultado evidencia que, embora grande parte da sub-bacia apresente condição favorável no cenário de 2040, existem setores críticos onde a demanda projetada se aproxima de forma mais intensa da disponibilidade de referência,

reforçando a necessidade de integrar o balanço hídrico com uso do solo, outorgas, APPs, qualidade da água e conservação das áreas de contribuição.

Figura 25 - Previsão da ANA quanto a disponibilidade hídrica em m³/s em 2040.



A caracterização integrada da área de estudo demonstra que a sub-bacia do Atibainha apresenta elevada relevância hidroambiental para as Bacias PCJ, pois combina relevo ondulado, forte presença de áreas legalmente protegidas, expressiva cobertura florestal, predomínio de áreas rurais, presença de reservatório estratégico e concentração de usos outorgados da água. A interação entre declividade elevada, solos suscetíveis à erosão, APPs, massas d'água, uso do solo e demanda municipal evidencia que a disponibilidade hídrica não depende apenas da

precipitação e da vazão, mas também da conservação das vertentes, das margens, das áreas de recarga e da gestão territorial. Assim, a sub-bacia do Atibainha constitui uma unidade adequada para avaliar, de forma integrada, os condicionantes físicos, ambientais e antrópicos que influenciam a disponibilidade e a demanda hídrica no contexto da UGRHI-05/PCJ.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A base científica utilizada direta e indiretamente neste trabalho foi organizada a partir de levantamento bibliográfico sistematizado em planilha própria, contemplando artigos científicos, livros, documentos técnicos, legislação e fontes institucionais. A busca foi realizada principalmente nas plataformas Scopus e Springer Nature, sendo complementada por pesquisa dirigida em documentos oficiais da ANA, DAEE/SP-Águas, CETESB, IBGE, MapBiomias, Comitês PCJ, Agência das Bacias PCJ, SEMIL, MMA e demais órgãos públicos relacionados à gestão hídrica e ambiental. Foram utilizadas palavras-chave em português e inglês associadas a disponibilidade hídrica, vazão, precipitação, uso e cobertura da terra, retenção de água no solo, sensoriamento remoto, bacias hidrográficas, reservatórios, UGRHI-05, Bacias PCJ e Sistema Cantareira. As referências foram classificadas conforme aderência ao tema, contexto de aplicação, função no TCC e grau de relevância, distinguindo fontes de uso direto — empregadas na fundamentação teórica, metodologia e discussão — e fontes de apoio indireto, utilizadas para contextualização, comparação metodológica e suporte conceitual.

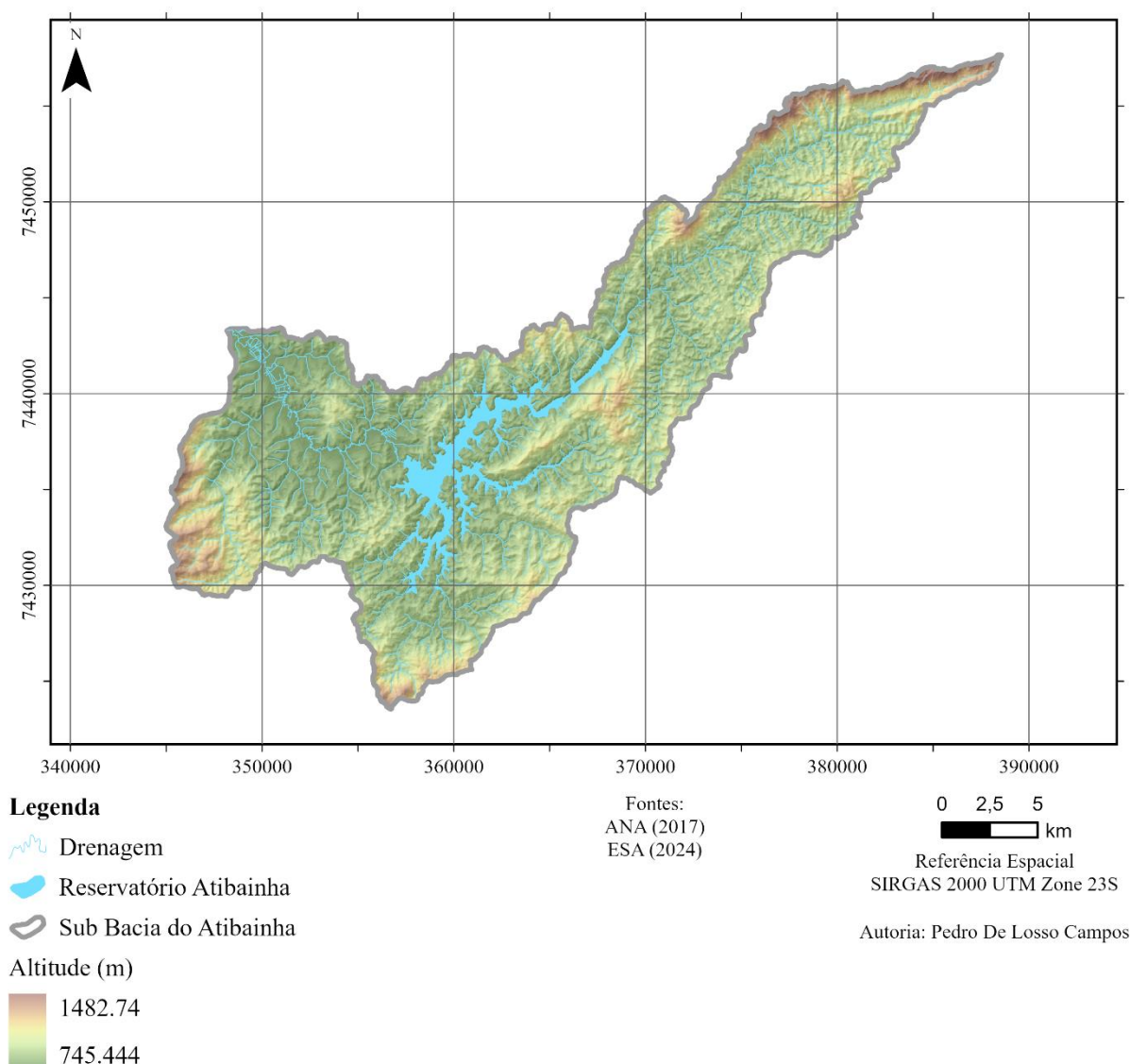
A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada a partir de uma abordagem integrada entre geotecnologias, análise de séries históricas hidrológicas, dados operacionais de reservatório, informações de demanda hídrica, qualidade da água e caracterização ambiental da paisagem. O recorte espacial corresponde à sub-bacia do Atibainha, inserida na UGRHI-05 — Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, considerando sua importância para a disponibilidade hídrica regional e sua relação com o sistema Atibainha–Atibaia.

O procedimento metodológico foi organizado em etapas complementares: delimitação da sub-bacia em ambiente SIG; padronização das bases cartográficas; levantamento e tratamento de dados pluviométricos, fluviométricos, telemétricos e operacionais; análise da qualidade da água; processamento de uso e cobertura da terra; extração de variáveis fisiográficas; cálculo de parâmetros de disponibilidade hídrica; estimativa de demanda e evaporação líquida; cruzamentos espaciais; e elaboração de mapas, tabelas, gráficos e sínteses interpretativas.

5.1.Delimitação da sub-bacia em ambiente SIG

A delimitação da sub-bacia do Atibainha foi realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, utilizando o ArcGIS Pro como plataforma principal de processamento espacial. O recorte foi definido a partir de bases hidrográficas oficiais, Modelo Digital de Elevação, limite da UGRHI-05, Figura 26, rede de drenagem, reservatório Atibainha e canal principal do rio Atibainha.

Figura 26 - Modelo Digital de Elevação.



O processamento considerou a lógica hidrográfica de contribuição, distinguindo setores de montante, área do reservatório e trecho de jusante. Foram utilizados procedimentos de correção hidrológica do Modelo Digital de Elevação, geração de direção de fluxo, fluxo

acumulado, extração da drenagem, identificação do canal principal e delimitação da área de contribuição. A área consolidada da sub-bacia adotada como referência foi de aproximadamente 449,56 km².

As bases cartográficas foram organizadas em banco de dados geográfico, com padronização de nomes, atributos, projeções, unidades de medida e recortes espaciais. Todos os dados vetoriais e matriciais foram conferidos e projetados para SIRGAS 2000 / UTM, fuso 23S, adequado à localização da área de estudo no Estado de São Paulo. Essa padronização foi necessária para garantir consistência nos cálculos de área, distância, comprimento de drenagem, densidade, porcentagem e cruzamentos espaciais.

5.2.Bases cartográficas e sistema de referência

Foram utilizadas bases cartográficas e ambientais provenientes de instituições oficiais, incluindo Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), DAEE/SP-Águas, CETESB, SEMIL, MapBiomas, Ministério do Meio Ambiente, Sistema Nacional de Unidades de Conservação e demais bases geoespaciais públicas.

As bases incluíram limites de bacias, sub-bacias, municípios, setores censitários, rede hidrográfica, massas d'água, reservatórios, outorgas superficiais e subterrâneas, unidades de conservação, áreas de aplicação da Lei da Mata Atlântica, Cadastro Nacional de Florestas Públicas, APPs, pedologia, domínios de superfície, uso e cobertura da terra, imagens orbitais e Modelo Digital de Elevação.

As camadas foram recortadas para o limite da sub-bacia do Atibainha e, quando necessário, tiveram seus atributos reorganizados para permitir a quantificação por área, classe temática, município ou categoria hidrológica.

Para garantir a compatibilidade espacial dos dados, todos os arquivos vetoriais e matriciais foram conferidos quanto ao sistema de referência de coordenadas. O projeto foi padronizado no sistema SIRGAS 2000, com projeção UTM, fuso 23S, adequado à localização da área de estudo no Estado de São Paulo. Bases originalmente disponibilizadas em coordenadas geográficas foram reprojctadas para esse sistema antes dos cálculos de área, distância, comprimento de drenagem e cruzamentos espaciais.

5.3.Caracterização fisiográfica da sub-bacia

A caracterização fisiográfica foi realizada a partir de Modelo Digital de Elevação e bases temáticas oficiais. Foram derivados mapas de hipsometria, declividade, curvatura, orientação de vertentes, drenagem, perfil longitudinal do canal principal, domínios de superfície e capacidade de água disponível no solo.

A amplitude altimétrica foi calculada pela diferença entre a maior e a menor cota da sub-bacia:

$$\text{Equação 1} \quad \Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}$$

A densidade de drenagem foi calculada pela razão entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da sub-bacia:

$$\text{Equação 2} \quad D_d = \frac{L_t}{A}$$

em que D_d corresponde à densidade de drenagem, L_t ao comprimento total da drenagem e A à área da sub-bacia. Para o Atibainha, foi considerado comprimento total de drenagem de aproximadamente 242,49 km e área de 449,56 km².

A declividade foi calculada em porcentagem e agrupada em classes interpretativas. As áreas com declividade superior a 20% foram consideradas de maior sensibilidade ao escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos. A hipsometria foi utilizada para identificar a distribuição altimétrica da bacia, distinguindo setores de cabeceira, vertentes intermediárias, vales e áreas associadas ao reservatório.

A curvatura foi classificada em formas côncavas, convexas e retilíneas. As formas côncavas foram interpretadas como áreas de maior convergência de fluxo e concentração de umidade, enquanto as formas convexas foram associadas à dispersão do escoamento. A orientação de vertentes foi utilizada para analisar a exposição solar, agrupando as direções em maior insolação, menor insolação e condição intermediária.

O perfil longitudinal do canal principal foi elaborado a partir da extração das cotas ao longo do eixo do rio Atibainha. A declividade média do canal foi calculada por:

Equação 3
$$S = \frac{(H_{inicial} - H_{final})}{L}$$

em que S representa a declividade média do canal, $H_{inicial}$ e H_{final} correspondem às cotas inicial e final, e L ao comprimento do canal.

5.4. Pedologia, domínios de superfície, AWC e massas d'água

A pedologia foi analisada com base em dados do IBGE, com identificação das principais associações de solos presentes na sub-bacia. A análise considerou a influência dos solos sobre infiltração, escoamento superficial, suscetibilidade à erosão, armazenamento hídrico e transporte de sedimentos.

Os domínios de superfície foram utilizados para complementar a interpretação pedológica, permitindo relacionar tipos de solo, formas gerais do relevo e dinâmica hidrológica. Os setores associados a planaltos e serras foram interpretados como áreas de maior energia do relevo, enquanto depressões e tabuleiros foram associados a superfícies de menor energia relativa e maior tendência à acumulação de água e sedimentos.

A capacidade de água disponível no solo, representada pelo indicador AWC, foi utilizada para avaliar a capacidade dos solos de armazenar água disponível para a vegetação. Os valores foram interpretados em conjunto com pedologia, declividade, uso do solo e cobertura vegetal, considerando que áreas com menor AWC tendem a apresentar menor retenção hídrica e maior sensibilidade em períodos secos.

As massas d'água foram extraídas de bases oficiais e quantificadas em quilômetros quadrados. A área mapeada de corpos hídricos foi utilizada para discutir armazenamento superficial, presença do reservatório e perdas por evaporação líquida. A evaporação líquida foi estimada pela relação:

Equação 4
$$E = T_{Evaporação} \cdot A_{Água}$$

em que E corresponde à evaporação estimada, T_{Evap} à taxa de evaporação líquida da UGRHI-05/PCJ, e $A_{Água}$ à área das massas d'água da sub-bacia. Foi adotada a taxa de 3,82 L/s/km² e área de massas d'água de aproximadamente 16,00 km², resultando em perda estimada de cerca de 61,13 L/s, equivalente a 0,061 m³/s ou aproximadamente 1,93 hm³/ano.

5.5.Dados pluviométricos e fluviométricos históricos

Os dados pluviométricos e fluviométricos históricos foram levantados em bases oficiais, especialmente DAEE/SP-Águas e ANA/HidroWeb. Foram priorizadas estações localizadas na sub-bacia do Atibainha ou em seu entorno hidrologicamente relacionado, considerando pontos a montante, próximos ao reservatório e a jusante.

A seleção das estações considerou localização espacial, tipo de dado disponível, extensão temporal da série, continuidade dos registros, falhas, consistência, representatividade hidrológica e possibilidade de associação entre chuva, vazão e comportamento do reservatório. As estações foram espacializadas em SIG e vinculadas às séries temporais por código, nome, município, curso d'água, coordenadas e órgão responsável.

As séries foram organizadas em planilhas com separação entre dados brutos, dados tratados, estatísticas descritivas e períodos hidrológicos. Foram verificadas falhas, duplicidades, valores ausentes, inconsistências e possíveis discontinuidades. Os dados foram reorganizados em escalas diária, mensal, anual e semestral, considerando a distinção entre período seco e período úmido.

Para precipitação, foram calculados totais diários, mensais, anuais e semestrais. Para vazão, foram calculadas médias, mínimas, máximas, curvas de permanência e vazões de referência.

5.6.Dados telemétricos recentes e dados operacionais

Os dados telemétricos recentes foram obtidos a partir do Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo — SAISP, com foco nos pontos de monitoramento relacionados ao rio Atibainha e à bacia do Rio Piracicaba. Essa base foi utilizada para complementar as séries históricas convencionais, permitindo avaliar a resposta hidrológica recente da sub-bacia em maior frequência temporal e relacionar eventos de precipitação, variação de nível, cota e vazão.

A utilização dos dados do SAISP justifica-se pela importância do monitoramento em tempo real para o acompanhamento da disponibilidade hídrica, manutenção de vazões mínimas, orientação da partilha de água em períodos de estiagem, apoio à operação de descargas para jusante de reservatórios e alerta em situações de vazões máximas. Para este trabalho, os registros telemétricos foram organizados por estação, data, horário, variável observada e unidade de medida, considerando principalmente dados de precipitação, nível d'água e vazão, conforme a disponibilidade de cada ponto.

As séries foram submetidas à conferência de consistência, remoção de duplicidades, padronização temporal e agregação em escalas compatíveis com as demais análises do TCC. Os registros em alta frequência foram convertidos em sínteses diárias, mensais e semestrais, considerando os períodos hidrológicos adotados no estudo. A partir desses dados, foram calculadas estatísticas descritivas, médias de vazão, totais de precipitação, variações de nível e relações entre chuva e resposta hidrológica.

Também foram considerados, de forma complementar, os produtos de radar meteorológico disponibilizados pelo SAISP, especialmente os campos de precipitação em tempo real, como CAPPI e chuva acumulada. Esses produtos não substituíram as séries pluviométricas e fluviométricas medidas em estações, mas auxiliaram na interpretação da distribuição espacial e temporal dos eventos de chuva, contribuindo para contextualizar a resposta da sub-bacia do Atibainha em eventos recentes.

Dessa forma, os dados telemétricos do SAISP foram integrados às séries históricas DAEE/SP-Águas, aos dados operacionais do reservatório e às informações espaciais da sub-bacia, permitindo uma leitura mais detalhada da dinâmica hidrológica recente. Essa integração foi essencial para relacionar precipitação, vazão, nível d'água, operação hidráulica e disponibilidade hídrica no contexto da UGRHI-05/Bacias PCJ.

5.7. Qualidade da água e disponibilidade quali-quantitativa

A qualidade da água foi avaliada a partir de dados da CETESB/INFOÁGUAS, com foco nos pontos de monitoramento associados ao rio Atibainha e ao reservatório. Foram analisados parâmetros físico-químicos, microbiológicos e indicadores de qualidade, conforme disponibilidade das séries.

Entre os principais parâmetros considerados estão oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, turbidez, condutividade elétrica, pH, sólidos, nutrientes, fósforo total, ferro, manganês, alumínio, cor verdadeira, coliformes e *Escherichia coli*.

Os dados foram organizados por ponto, data de coleta, parâmetro, unidade, valor observado e limite de referência aplicável. A interpretação considerou a Resolução CONAMA nº 357/2005 e o enquadramento dos corpos d'água, quando aplicável. Para parâmetros com limite máximo, o desvio percentual foi calculado por:

Equação 5
$$Desvio\ acima\ (\%) = \left[\frac{(X - Limite)}{Limite} \right] \times 100$$

Para parâmetros com limite mínimo, como oxigênio dissolvido, o desvio foi calculado por:

Equação 6
$$Desvio\ abaixo\ (\%) = \left[\frac{(Limite - X)}{Limite} \right] \times 100$$

Para resultados censurados com sinal “<”, foi adotado critério exploratório de metade do limite de quantificação:

Equação 7
$$Valor\ tratado = \frac{LQ}{2}$$

Essa abordagem permitiu avaliar a disponibilidade hídrica em termos quali-quantitativos, reconhecendo que a água disponível em volume pode apresentar restrições de uso quando sua qualidade está comprometida.

5.8. Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra foram analisados com base no MapBiomias, principalmente a partir da Coleção 10.1 para a série histórica de 1985 a 2024. Quando pertinente, também foram considerados produtos de maior resolução espacial, como a Coleção 10.3, com o objetivo de apoiar análises mais detalhadas em anos recentes.

Para padronizar a classificação do uso e cobertura da terra, foi utilizada como referência a base oficial de uso e ocupação do solo da SEMIL, referente ao ano de 2013, por apresentar classes compatíveis com a escala de análise da sub-bacia e com a interpretação territorial adotada no trabalho. Essa base foi comparada aos valores de pixel retornados pelo raster do MapBiomias Coleção 10.1 para o mesmo ano, permitindo verificar a correspondência entre os códigos originais do MapBiomias e as classes temáticas utilizadas na análise. A partir dessa comparação, os valores de pixel foram reclassificados em categorias sintéticas — formação florestal, silvicultura, área antropizada, área edificada e água — de modo a garantir maior coerência entre a base oficial estadual, a série histórica MapBiomias e os objetivos do TCC. Esse procedimento permitiu aplicar a mesma legenda interpretativa aos demais anos da série, favorecendo a comparação temporal do uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha.

Os rasters foram recortados para o limite da sub-bacia do Atibainha e processados em ambiente SIG. As classes originais foram mantidas ou reagrupadas conforme a necessidade analítica do trabalho, considerando categorias como formação florestal, silvicultura, área antropizada, área edificada e água.

A área de cada classe foi calculada a partir da contagem de pixels:

Equação 8
$$A_i = Count_i \times A_{pixel}$$

Em que A_i representa a área da classe, $Count_i$ corresponde ao número de pixels da classe e A_{pixel} corresponde à área de cada pixel. O percentual de cada classe foi calculado por:

Equação 9
$$P_i = \left(\frac{A_i}{A_{total}} \right) \times 100$$

A variação temporal foi calculada por:

Equação 10
$$\Delta A = A_{ano\ final} - A_{ano\ inicial}$$

A análise multitemporal buscou identificar transformações relevantes para a disponibilidade hídrica, especialmente alterações na cobertura florestal, expansão de silvicultura, áreas antropizadas, áreas edificadas e variação da classe água.

5.9. Sensoriamento remoto e índices espectrais

Foram utilizados produtos de sensoriamento remoto para complementar a análise espacial da sub-bacia, com imagens do sensor SENTINEL- 2^a, descrita por S2A_MSIL2A_20240614T131251_N0510_R138_T23KMQ_20240614T195152, selecionadas conforme disponibilidade, cobertura de nuvens, qualidade visual e adequação ao recorte espacial.

As imagens foram recortadas para a sub-bacia, reprojatadas quando necessário e processadas por composição de bandas e cálculo de índices espectrais. Foram utilizados três índices principais: NDVI, NDWI e NDTI.

O NDVI foi utilizado para avaliar vigor e densidade da vegetação:

Equação 11
$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

O NDWI foi utilizado para realçar água superficial e umidade:

Equação 12
$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)}$$

O NDTI foi utilizado como indicador espectral de turbidez relativa:

Equação 13
$$NDTI = \frac{(RED - GREEN)}{(RED + GREEN)}$$

Os resultados foram interpretados como apoio espacial à análise ambiental. O NDVI foi relacionado à proteção do solo, cobertura vegetal e regulação do escoamento. O NDWI foi utilizado para identificar água superficial e comparar com a classe água do MapBiomas e massas d'água oficiais. O NDTI foi utilizado como indicativo de turbidez relativa, devendo ser interpretado em conjunto com dados laboratoriais da CETESB, especialmente turbidez, sólidos, fósforo, ferro, manganês e cor verdadeira.

5.10. Cálculo dos parâmetros hidrológicos

Os parâmetros hidrológicos foram calculados a partir das séries pluviométricas, fluviométricas, telemétricas e operacionais disponíveis. Inicialmente, foram realizadas estatísticas descritivas, incluindo média, mediana, máximos, mínimos, amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação.

Para as séries de vazão, foram construídas curvas de permanência por meio da ordenação decrescente dos valores e cálculo da probabilidade de excedência:

Equação 14
$$P(\%) = \left[\frac{m}{(n+1)} \right] \times 100$$

em que m corresponde à posição da vazão na série ordenada e n ao número total de registros. A partir da curva de permanência foram obtidas as vazões Q95, Q90 e Q50.

A Q95 foi adotada como parâmetro central de disponibilidade hídrica superficial, por representar uma condição conservadora, igualada ou superada em 95% do tempo. A Q90 e a Q50 foram utilizadas como parâmetros complementares para representar condições de maior permanência e condição mediana da série.

A Q7 foi calculada por média móvel de sete dias consecutivos:

$$\text{Equação 15} \quad Q_{7j} = \frac{(Q_j + Q_{j+1} + Q_{j+2} + Q_{j+3} + Q_{j+4} + Q_{j+5} + Q_{j+6})}{7}$$

A Q7,10 foi estimada a partir dos menores valores anuais de Q7, com ajuste estatístico para tempo de retorno de dez anos, quando a extensão e consistência das séries permitiram. Os resultados de Q7,10 foram interpretados como estimativas de condição crítica recente, especialmente para séries curtas, não substituindo estudos hidrológicos oficiais de longo prazo.

Para complementar a análise fluviométrica, foram avaliadas as seções transversais associadas aos pontos 3E-089 Mascate e 3E-121 Atibainha Montante. Inicialmente, os perfis transversais observados em diferentes campanhas foram organizados e padronizados, de modo a permitir a comparação entre levantamentos realizados em datas distintas. Para isso, as distâncias transversais foram normalizadas e, posteriormente, foi calculado um perfil médio representativo de cada seção, utilizado como referência geométrica para a estimativa da área da calha e da área molhada.

A área da seção foi estimada por integração numérica, utilizando o método dos segmentos trapezoidais. Para cada intervalo entre dois pontos consecutivos do perfil transversal, calculou-se a profundidade relativa em relação a uma cota de referência, definida pelo nível médio d'água ou pela cota superior adotada para representar a seção total. A profundidade em cada ponto foi obtida por:

$$\text{Equação 16} \quad d_i = H - z_i$$

em que d_i corresponde à profundidade relativa no ponto i , H representa a cota de referência do nível d'água ou da seção total, e z_i corresponde à cota do leito no ponto analisado.

A área parcial entre dois pontos consecutivos foi calculada por:

Equação 17
$$A_i = \left[\frac{(d_i + d_{i+1})}{2} \right] \cdot \Delta x_i$$

em que A_i representa a área parcial do segmento, d_i e d_{i+1} são as profundidades nos pontos consecutivos, e Δx_i é a distância horizontal entre eles.

A área total da seção ou a área molhada foi obtida pela soma das áreas parciais:

Equação 18
$$A = \sum A_i$$

Além da área, foram calculados parâmetros geométricos auxiliares, como largura superficial da seção, perímetro molhado, raio hidráulico e altura hidráulica. O raio hidráulico foi obtido por:

Equação 19
$$Rh = \frac{A}{P}$$

em que Rh é o raio hidráulico, A é a área molhada e P é o perímetro molhado.

A altura hidráulica média foi calculada por:

Equação 20
$$Hm = \frac{A}{B}$$

em que Hm corresponde à altura hidráulica média e B representa a largura superficial da lâmina d'água. Esses parâmetros foram utilizados para caracterizar a geometria das seções, comparar os pontos de montante e jusante e apoiar a interpretação das curvas-chave e da relação entre nível d'água, vazão e capacidade de escoamento.

5.11. Relação entre chuva, vazão, nível e armazenamento

A relação entre chuva, vazão, nível e armazenamento foi avaliada por meio de correlação de Pearson, regressão linear simples e análise de janelas de chuva acumulada. Foram testadas janelas de precipitação acumulada de 1, 3, 7, 15 e 30 dias, com defasagens temporais, de modo a avaliar a resposta hidrológica da sub-bacia.

A chuva acumulada foi calculada por:

$$\text{Equação 21} \quad P_{\text{acum},k(t)} = \sum P(t - i)$$

em que k corresponde ao número de dias acumulados e $P(t - i)$ à precipitação observada nos dias anteriores.

A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a associação linear entre variáveis:

$$\text{Equação 22} \quad r = \frac{\sum[(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{[\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2]}}$$

A regressão linear simples foi representada por:

$$\text{Equação 23} \quad Y = a + bX$$

O coeficiente de determinação foi utilizado para avaliar a proporção da variação explicada pelo modelo:

$$\text{Equação 24} \quad R^2 = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right)$$

onde o R^2 indica quanto da variação da variável analisada é explicado pelo modelo de regressão, podendo ser usado para avaliar quanto a chuva explica a variação da vazão, do nível ou do armazenamento.

SSE é a Soma dos Quadrados dos Erros (Sum of Squared Errors). Mede o quanto os valores estimados pelo modelo se afastam dos valores observados.

$$\text{Equação 25} \quad SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Em que:

Y_i = valor observado, por exemplo, vazão real

$\hat{Y}_i$ = valor estimado pela regressão.

Quanto menor o SSE, melhor o modelo, pois os valores estimados estão mais próximos dos observados.

SST é a Soma Total dos Quadrados (Total Sum of Squares). Mede a variação total dos dados observados em relação à média.

Equação 26
$$SST = \sum (Y_i - \hat{Y})^2$$

Em que:

Y_i = valor observado;

$\hat{Y}$ = média dos valores observados.

O SST representa a variação total existente na série, antes de aplicar o modelo.

As relações foram interpretadas considerando que o reservatório Atibainha é influenciado por operação hidráulica, armazenamento antecedente, vazões afluentes, defluências e regras operacionais, de modo que a chuva isolada não explica integralmente a variação do nível e do volume armazenado.

5.12. Demanda hídrica, outorgas e consumo municipal

A demanda hídrica foi analisada a partir de dados de uso da água por município disponibilizados pela ANA, considerando os municípios de Nazaré Paulista, Piracaia e Bom Jesus dos Perdões. Foram comparadas vazões retiradas em 1980, 2020 e projeção para 2040, permitindo avaliar a evolução histórica e a tendência futura da pressão hídrica municipal.

A variação absoluta foi calculada por:

Equação 27
$$\Delta Q = Q_{final} - Q_{inicial}$$

A variação percentual foi calculada por:

Equação 28
$$\Delta Q(\%) = \left[\frac{(Q_{final} - Q_{inicial})}{Q_{inicial}} \right] \times 100$$

Também foram analisadas outorgas estaduais superficiais e subterrâneas, com classificação por município, tipo de captação, número de registros, vazão média e soma das vazões informadas. Para cálculo da vazão média outorgada, foram considerados apenas registros de captação com vazão informada maior que zero, evitando distorções por registros sem vazão ou usos não relacionados diretamente à retirada.

Essa etapa permitiu relacionar distribuição municipal, setores rurais e urbanos, outorgas superficiais, outorgas subterrâneas, demanda hídrica atual e previsão de aumento da retirada.

5.13. Cruzamentos espaciais e vulnerabilidade hidrológica

Os cruzamentos espaciais foram realizados em ambiente SIG, integrando uso e cobertura da terra, declividade, TWI, curvatura, orientação de vertentes, APPs, proximidade da drenagem, massas d'água, reservatório, outorgas e municípios.

Entre os principais cruzamentos realizados estão: uso do solo com declividade, uso do solo com TWI, uso do solo com curvatura, uso do solo em APPs, áreas antropizadas próximas à drenagem, massas d'água e evaporação, outorgas por município, e relação entre áreas sensíveis, cobertura vegetal e drenagem.

O Índice Topográfico de Umidade foi calculado por:

Equação 29
$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{tg\beta} \right)$$

em que α representa a área de contribuição específica e β corresponde à declividade local em radianos. As classes alto e muito alto foram interpretadas como áreas com maior tendência à concentração de umidade e fluxo superficial.

A vulnerabilidade hidrológica foi sintetizada por reclassificação temática e sobreposição ponderada. Cada variável foi convertida para escala ordinal de 1 a 5, em que 1 representa menor vulnerabilidade e 5 maior vulnerabilidade. As variáveis consideradas incluíram uso e cobertura da terra, declividade, TWI, curvatura, APPs, proximidade da drenagem e NDVI.

O índice final foi calculado por:

Equação 30
$$V = \frac{\sum(w_i \cdot c_i)}{\sum w_i}$$

em que V representa o índice de vulnerabilidade, w_i o peso atribuído a cada variável e c_i a classe padronizada. O raster final foi reclassificado em cinco classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade.

As classes mais elevadas foram interpretadas como setores prioritários para conservação, recomposição vegetal, controle de erosão, proteção de APPs e monitoramento da qualidade da água, especialmente quando associadas a uso antrópico, declividade elevada, TWI alto, formas côncavas e proximidade da drenagem.

5.14. Elaboração dos mapas, gráficos e síntese integrada

Os mapas foram elaborados com padronização cartográfica, contendo título, legenda, escala gráfica, norte, sistema de coordenadas, fonte dos dados e identificação da área de estudo. As figuras foram organizadas para permitir leitura comparativa entre relevo, hidrografia, uso do solo, áreas protegidas, variáveis fisiográficas, demanda, outorgas e vulnerabilidade.

A Figura 27 sintetiza as etapas metodológicas aplicadas aos dados geoespaciais utilizados no trabalho, desde a conferência dos dados brutos quanto à origem, escala, resolução e data, até a importação para o geodatabase, padronização no sistema SIRGAS 2000 UTM 23S, recorte pelo limite da sub-bacia, ajustes de resolução, extensão e máscara, geração de produtos intermediários, reclassificação temática e elaboração dos mapas finais.

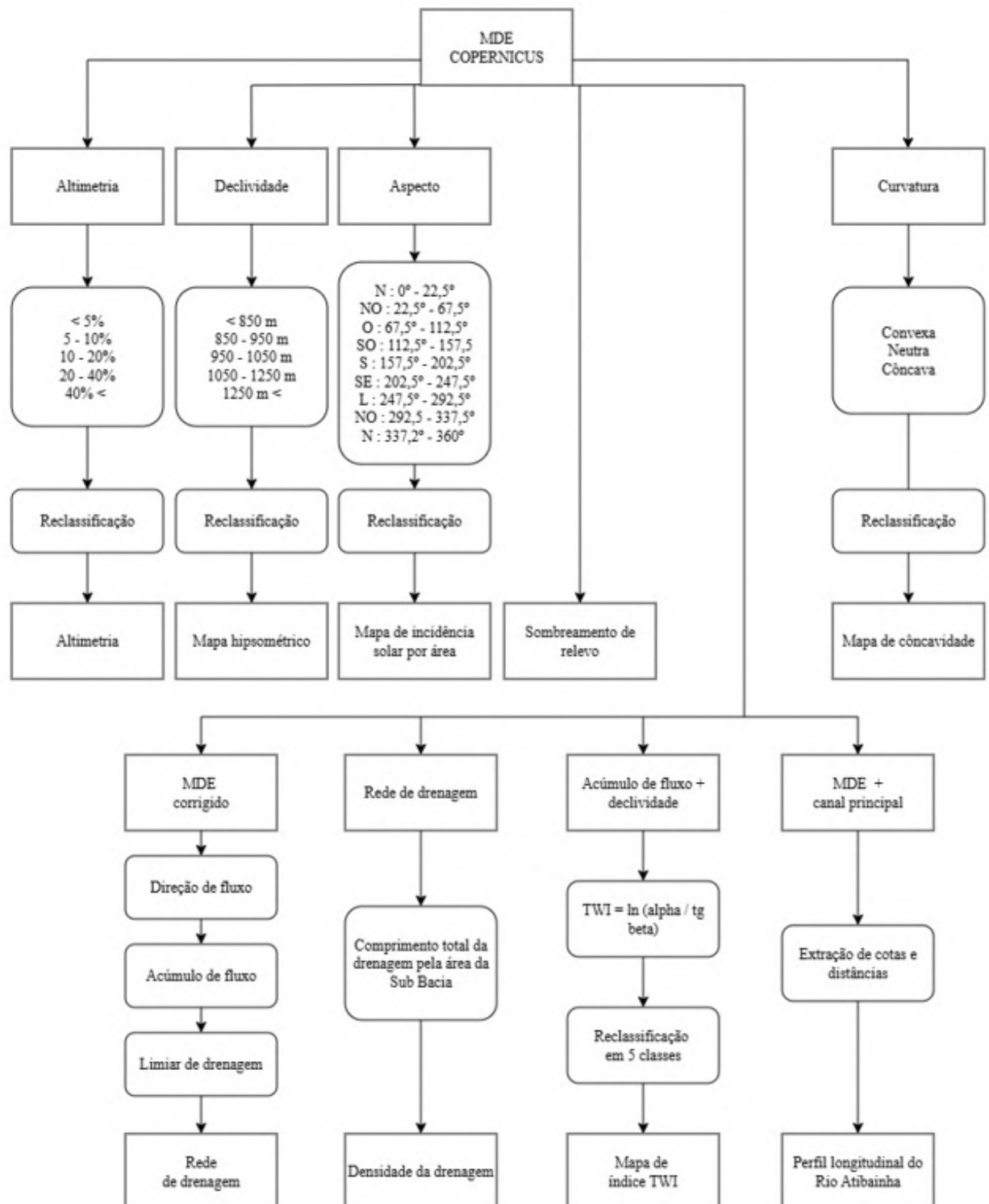
Figura 27 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.



Fonte: Autoria própria.

As etapas de processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus utilizadas para a caracterização fisiográfica da sub-bacia do Atibainha estão representadas na Figura 28. A partir do MDE foram derivados os produtos de altimetria, declividade, aspecto, sombreamento de relevo e curvatura, posteriormente reclassificados conforme critérios temáticos. Também foram gerados produtos hidrológicos, como direção e acúmulo de fluxo, rede de drenagem, densidade de drenagem, índice topográfico de umidade (TWI) e perfil longitudinal do rio Atibainha, permitindo integrar relevo, drenagem e suscetibilidade hidrológica na análise espacial.

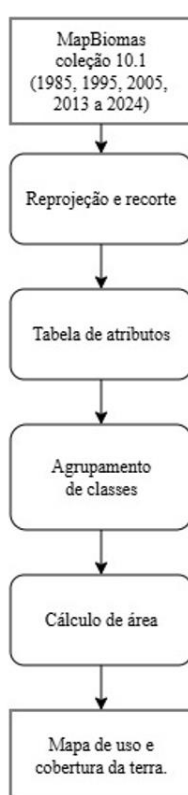
Figura 28 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 demonstra o procedimento metodológico aplicado aos dados do MapBiomias Coleção 10.1, referentes aos anos de 1985, 1995, 2005, 2013 e 2024. As etapas compreenderam a reprojeção e o recorte dos rasters pelo limite da sub-bacia do Atibainha, a conferência e organização da tabela de atributos, o agrupamento das classes de uso e cobertura da terra, o cálculo das áreas por classe e a elaboração dos mapas finais utilizados na análise temporal da paisagem.

Figura 29 - Procedimento geral de tratamento, padronização e reclassificação dos dados geoespaciais.

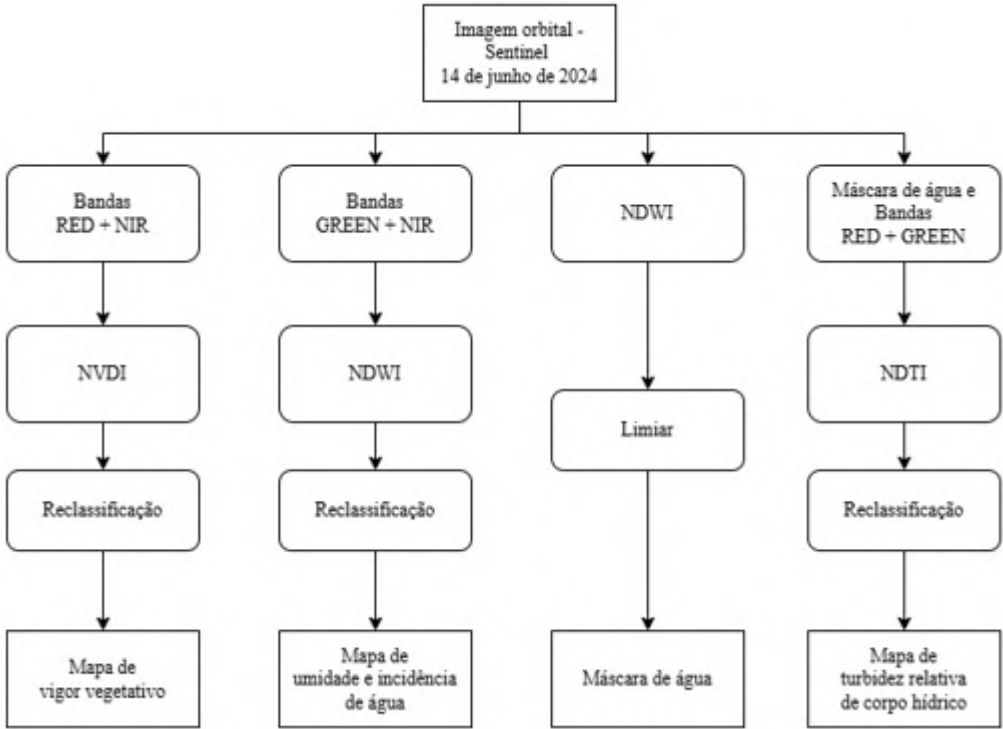


Fonte: Autoria própria.

O fluxograma apresentado na Figura 30 traz etapas de processamento da imagem orbital Sentinel de 14 de junho de 2024, utilizada para a geração de índices espectrais aplicados à análise ambiental da sub-bacia do Atibainha. A partir das bandas do vermelho, verde e infravermelho próximo foram calculados o NDVI, empregado na avaliação do vigor vegetativo, o NDWI, utilizado para identificação de umidade e presença de água, e o NDTI, aplicado à análise da turbidez relativa em corpos hídricos. Também foi gerada uma máscara de água por

meio da aplicação de limiar ao NDWI, permitindo restringir a interpretação da turbidez às áreas efetivamente classificadas como corpo hídrico.

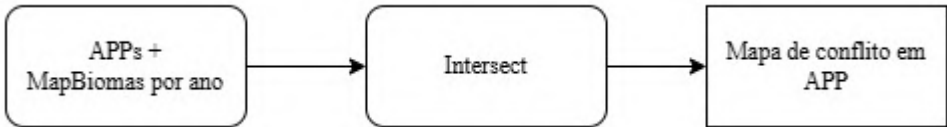
Figura 30 - Processamento da imagem Sentinel para geração dos índices espectrais e produtos hídricos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 apresenta o procedimento utilizado para identificar conflitos de uso e cobertura da terra em Áreas de Preservação Permanente (APPs) na sub-bacia do Atibainha. Para cada ano analisado, as camadas de APP foram cruzadas com os dados de uso e cobertura da terra do MapBiomias por meio da ferramenta Intersect, permitindo delimitar as classes incidentes sobre áreas protegidas e gerar os mapas de conflito em APP.

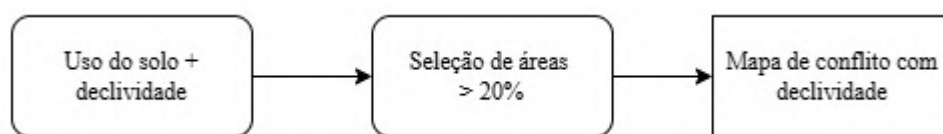
Figura 31 - Cruzamento espacial entre APPs e MapBiomias para identificação de conflitos de uso.



Fonte: Autoria própria.

O fluxograma apresentado na Figura 32 demonstra o procedimento utilizado para identificar áreas de conflito associadas ao uso e cobertura da terra em setores com declividade superior a 20% na sub-bacia do Atibainha. A partir do cruzamento entre o mapa de uso do solo e o mapa de declividade, foram selecionadas as áreas mais inclinadas, permitindo reconhecer usos antrópicos, áreas expostas ou ocupações em terrenos com maior suscetibilidade a escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos.

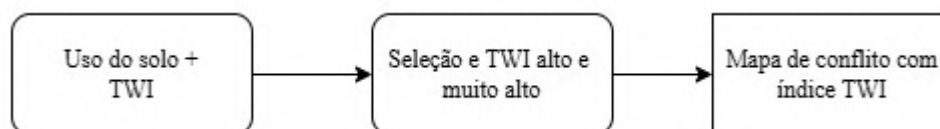
Figura 32 - Cruzamento espacial entre uso do solo e declividade para identificação de áreas críticas.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 apresenta o procedimento utilizado para identificar áreas de conflito entre uso e cobertura da terra e setores com TWI alto e muito alto na sub-bacia do Atibainha. A partir do cruzamento entre o mapa de uso do solo e o índice topográfico de umidade, foram selecionadas áreas com maior tendência à concentração de fluxo e acúmulo de umidade, permitindo reconhecer usos antrópicos, áreas expostas ou ocupações em setores hidrologicamente sensíveis.

Figura 33 - Cruzamento espacial entre uso do solo e TWI para identificação de áreas.

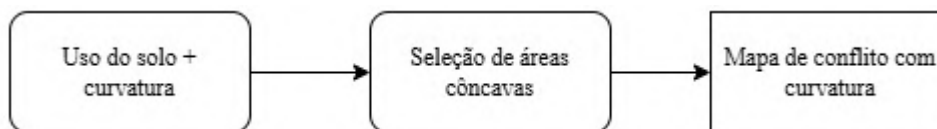


Fonte: Autoria própria.

O procedimento utilizado para identificar conflitos entre uso e cobertura da terra e áreas de curvatura côncava na sub-bacia do Atibainha está representado no fluxograma da Figura 34. A partir do cruzamento entre o mapa de uso do solo e o mapa de curvatura, foram selecionados os setores côncavos, geralmente associados à convergência de fluxo, maior acúmulo de umidade e potencial concentração de sedimentos. Essa etapa permitiu reconhecer usos

antrópicos, áreas expostas ou ocupações em posições geomorfológicas mais sensíveis à dinâmica hidrológica e erosiva.

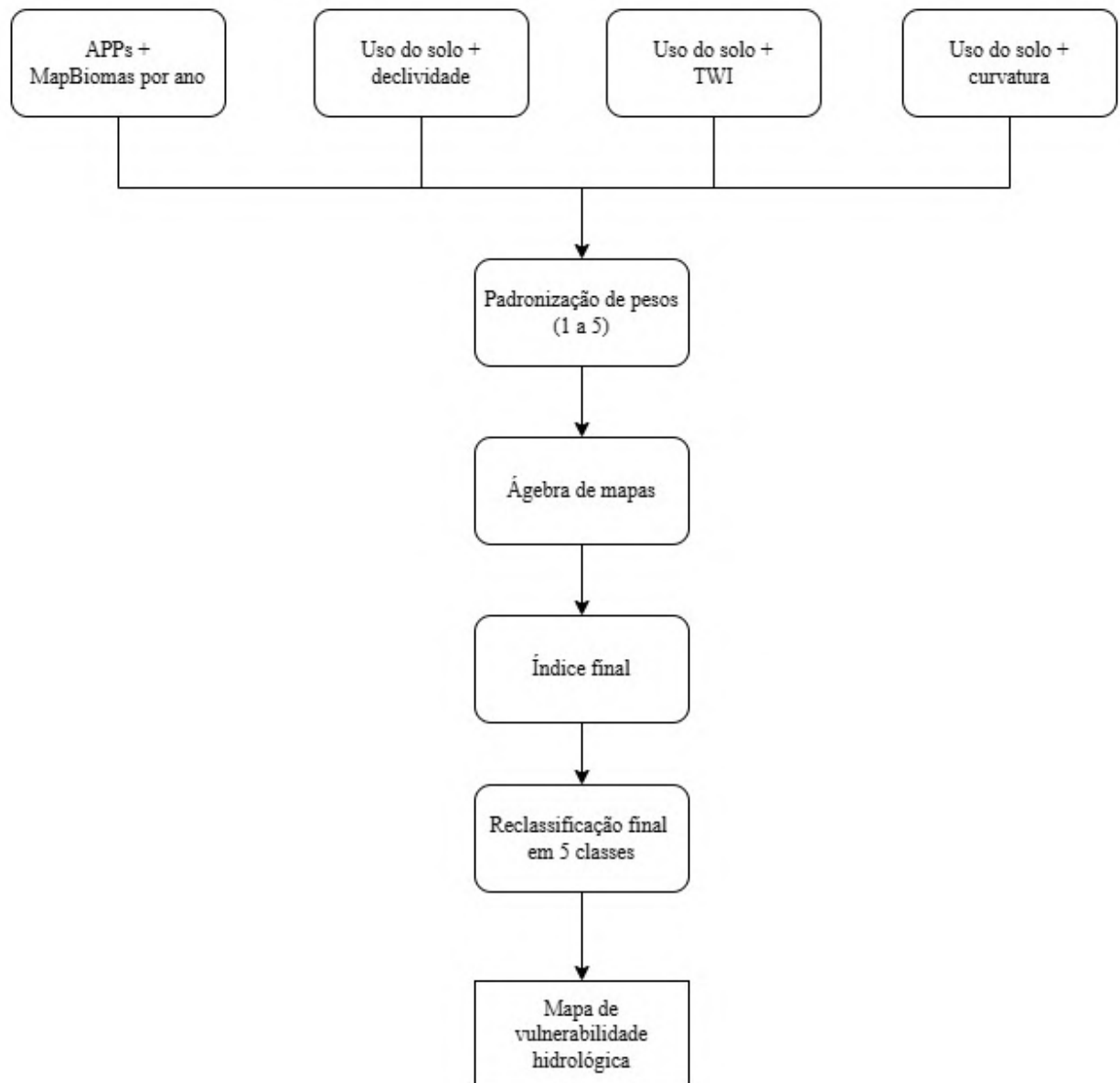
Figura 34 - Cruzamento espacial entre uso do solo e curvatura para identificação de áreas côncavas sensíveis.



Fonte: Autoria própria.

O fluxograma apresentado em Figura 35 representa a etapa final de integração dos cruzamentos espaciais utilizados na identificação da vulnerabilidade hidrológica da sub-bacia do Atibainha. Foram considerados os conflitos em APPs, o uso do solo associado à declividade, o uso do solo em áreas com TWI elevado e o uso do solo em setores de curvatura côncava. Após a padronização dos pesos em escala de 1 a 5, os planos de informação foram integrados por álgebra de mapas, resultando em um índice final, posteriormente reclassificado em cinco classes de vulnerabilidade hidrológica.

Figura 35 - Integração dos cruzamentos espaciais para elaboração do mapa de vulnerabilidade hidrológica.



Fonte: Autoria própria.

Os dados tabulares foram organizados em planilhas eletrônicas, com separação entre dados brutos, dados tratados, estatísticas descritivas, gráficos e sínteses interpretativas. A partir dessa organização, foram elaborados gráficos de séries temporais, gráficos de barras, comparações entre períodos seco e úmido, curvas de permanência, relações chuva–vazão e chuva–nível, além de análises de volume útil, vazões de referência, qualidade da água e uso e cobertura da terra.

A interpretação final foi conduzida de forma integrada, relacionando disponibilidade hídrica, demanda, qualidade da água, operação do reservatório, relevo, drenagem, pedologia, capacidade de água disponível no solo (AWC), massas d'água, uso e cobertura da terra, Áreas de Preservação Permanente (APPs) e vulnerabilidade hidrológica. Essa abordagem permitiu compreender a sub-bacia do Atibainha como uma unidade hidroterritorial estratégica das Bacias PCJ, na qual a disponibilidade hídrica resulta da interação entre condicionantes naturais, pressões antrópicas, infraestrutura hidráulica e gestão territorial.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise integrada da sub-bacia do Atibainha foi estruturada a partir da combinação de dados fisiográficos, geoespaciais, hidrológicos, operacionais, telemétricos, de demanda hídrica e de qualidade da água. Essa abordagem permitiu avaliar a disponibilidade hídrica de forma ampliada, considerando não apenas as vazões observadas, mas também a influência do relevo, da drenagem, dos solos, do uso e cobertura da terra, da operação do reservatório Atibainha, das demandas consuntivas e das condições qualitativas dos corpos hídricos.

Os resultados foram organizados em três eixos principais. O primeiro corresponde à caracterização físico-territorial da sub-bacia, incluindo área, hipsometria, declividade, drenagem, curvatura, orientação de vertentes, pedologia, AWC, massas d'água e uso e cobertura da terra. O segundo envolve a análise hidrológica e operacional, com dados históricos DAEE/SP-Águas, dados telemétricos recentes SAISP, dados operacionais do reservatório e registros ANA. O terceiro corresponde à análise quali-quantitativa e territorial, incorporando dados de qualidade da água, demanda hídrica, outorgas, APPs, índices espectrais e vulnerabilidade hidrológica.

6.1. Caracterização fisiográfica da sub-bacia do Atibainha

A sub-bacia do Atibainha apresenta área aproximada de 449,56 km², inserida no setor leste da UGRHI-05/Bacias PCJ. Sua configuração fisiográfica é marcada por relevo ondulado a montanhoso, amplitude altimétrica expressiva, setores declivosos, presença de reservatório e rede de drenagem organizada em direção ao eixo principal do rio Atibainha. A amplitude altimétrica foi calculada pela diferença entre a maior e a menor cota da sub-bacia, resultando em $\Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}} = 1472,20 - 754,13 = 718,07 \text{ m}$

Esse desnível indica a presença de setores de cabeceira com elevada energia do relevo, além de áreas mais baixas associadas ao vale principal, ao reservatório e aos trechos de jusante. A distribuição hipsométrica mostra maior concentração de área nas classes altimétricas inferiores e intermediárias, especialmente até 950 m, o que evidencia a importância dos vales e compartimentos de menor altitude na organização da drenagem (Tabela 4).

Tabela 4- Distribuição hipsométrica da sub-bacia do Atibainha

Classe altimétrica	Área (km ²)	Percentual (%)
≤ 850 m	159,88	35,23
850–950 m	138,90	30,60
950–1050 m	96,28	21,21
1050–1200 m	42,28	9,31
> 1200 m	16,54	3,64

A rede de drenagem totalizou aproximadamente 242,49 km, resultando em densidade de drenagem de $Dd = Lt / A = 242,49 / 449,56 = 0,54 \text{ km/km}^2$

Esse valor indica densidade de drenagem baixa a moderada, compatível com uma bacia em que a resposta hidrológica é fortemente condicionada pelo relevo, cobertura vegetal, estrutura dos vales e presença do reservatório. Embora a densidade de drenagem não seja elevada, a grande proporção de áreas declivosas favorece respostas rápidas em eventos de chuva, sobretudo quando associada a usos antrópicos ou solos menos protegidos.

A declividade foi uma das variáveis mais relevantes da caracterização fisiográfica. Conforme evidenciado na Tabela 5, áreas com declividade entre 20% e 40% ocupam 201,13 km², enquanto as áreas superiores a 40% ocupam 41,56 km². Assim, a área total com declividade superior a 20% corresponde a:

$$A > 20\% = 201,13 + 41,56 = 242,69 \text{ km}^2$$

$$P > 20\% = 242,69 / 449,56 \times 100 = 53,98\%$$

Tabela 5- Declividade agrupada da sub-bacia do Atibainha

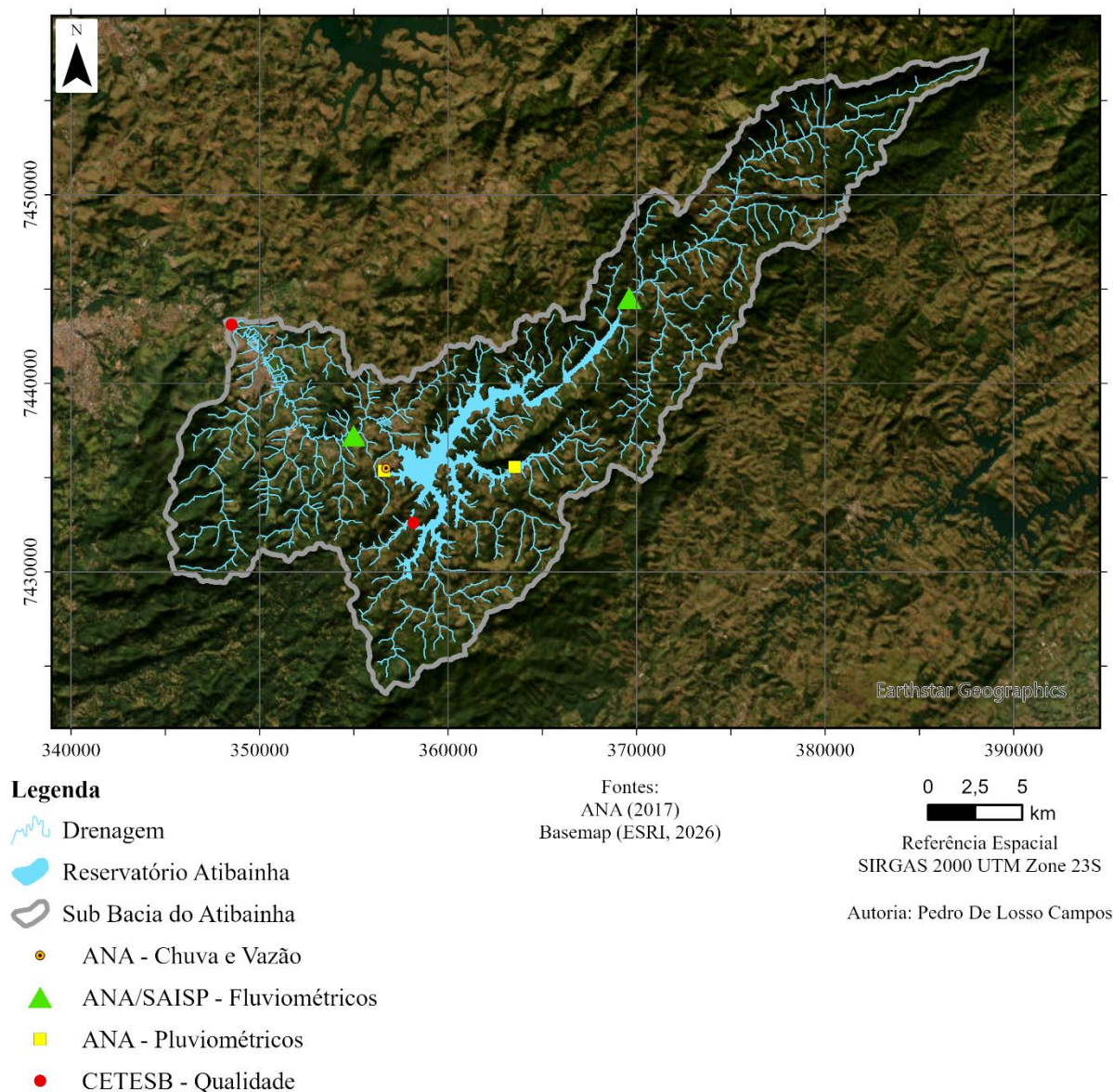
Classe de declividade	Área (km ²)	Percentual (%)
Até 10%	95,30	21,20
10–20%	111,57	24,82
20–40%	201,13	44,74
> 40%	41,56	9,24
Total > 20%	242,69	53,98

O perfil longitudinal calculado do canal principal do rio Atibainha apresenta extensão aproximada de 66 km, com cotas variando de cerca de 1290 m nas cabeceiras para aproximadamente 800 m a jusante. O trecho superior concentra maior perda altimétrica e maior energia do relevo, enquanto os trechos médio e inferior apresentam declividade mais suave, favorecendo menor velocidade de escoamento, maior regularização hidráulica e maior tendência à deposição de sedimentos. Essa configuração reforça a importância de avaliar a sub-bacia de forma integrada, pois a disponibilidade hídrica depende da relação entre relevo, drenagem, reservatório, solos, cobertura vegetal e uso do território.

6.2. Rede de monitoramento hidrológico e qualidade da água

A rede de dados utilizada no trabalho reuniu informações de diferentes fontes e escalas temporais. Foram incorporados registros históricos de chuva e vazão do DAEE/SP-Águas, dados telemétricos recentes do SAISP, dados operacionais do reservatório, informações pontuais da ANA/Sistema Cantareira e dados de qualidade da água da CETESB/INFOÁGUAS, distribuídos conforme **Figura 36**.

Figura 36 - Pontos de Análise quali-quantitativos da Sub Bacia do Atibainha.



A distribuição espacial dos pontos de monitoramento evidencia que a análise da sub-bacia do Atibainha foi apoiada por uma rede composta por estações pluviométricas, fluviométricas e pontos de qualidade da água, distribuídos principalmente no entorno do reservatório, no setor de montante e no trecho de jusante do sistema Atibainha–Atibaia. Os pontos pluviométricos permitem caracterizar a entrada de precipitação na área de contribuição, enquanto os pontos fluviométricos ANA/SAISP possibilitam avaliar a resposta da drenagem em termos de nível e vazão. Já os pontos da CETESB complementam a análise ao permitir a avaliação da disponibilidade hídrica sob o aspecto qualitativo. Observa-se, entretanto, que a rede apresenta maior concentração no entorno do reservatório e em trechos de acesso

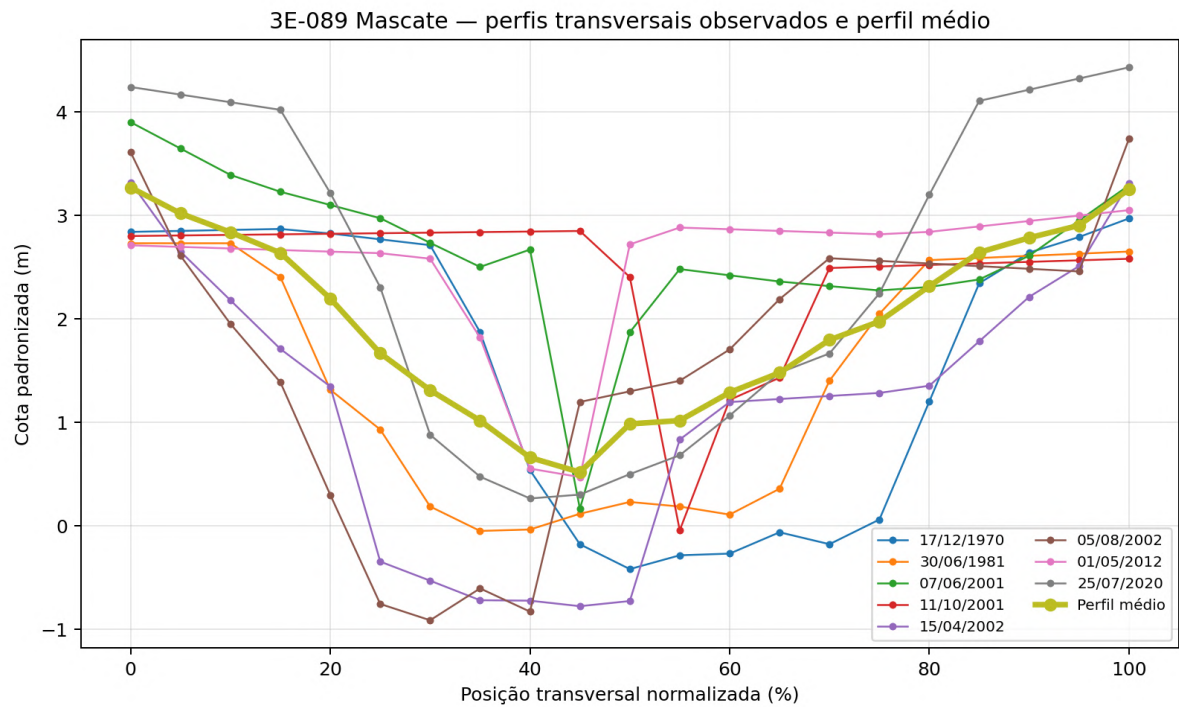
operacional, havendo menor cobertura direta nas cabeceiras e nos setores mais orientais da sub-bacia. Essa distribuição reforça a necessidade de integração entre dados pontuais, séries históricas, telemetria e produtos espaciais, de modo a representar de forma mais completa a dinâmica hidrológica e ambiental da sub-bacia no contexto das Bacias PCJ.

As seções transversais dos pontos 3E-121 Atibainha Montante e 3E-089 Mascate (Figura 37, Figura 38 e Figura 399) evidenciam diferenças importantes na morfologia da calha fluvial.

Figura 37 - Localização do ponto fluviométrico 3E-089 Mascate, no trecho de jusante do Atibainha.

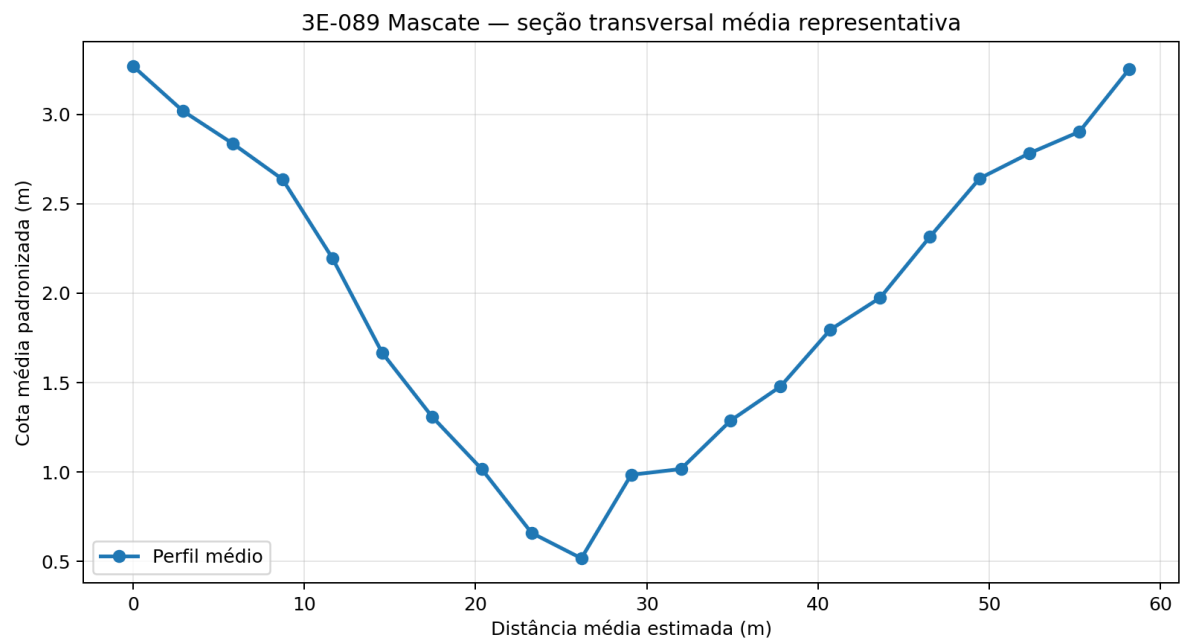


Figura 38 - Perfis transversais observados e perfil médio do ponto 3E-089 Mascate.



Fonte: ANA , Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Figura 39 - Seção transversal média representativa do ponto 3E-089 Mascate

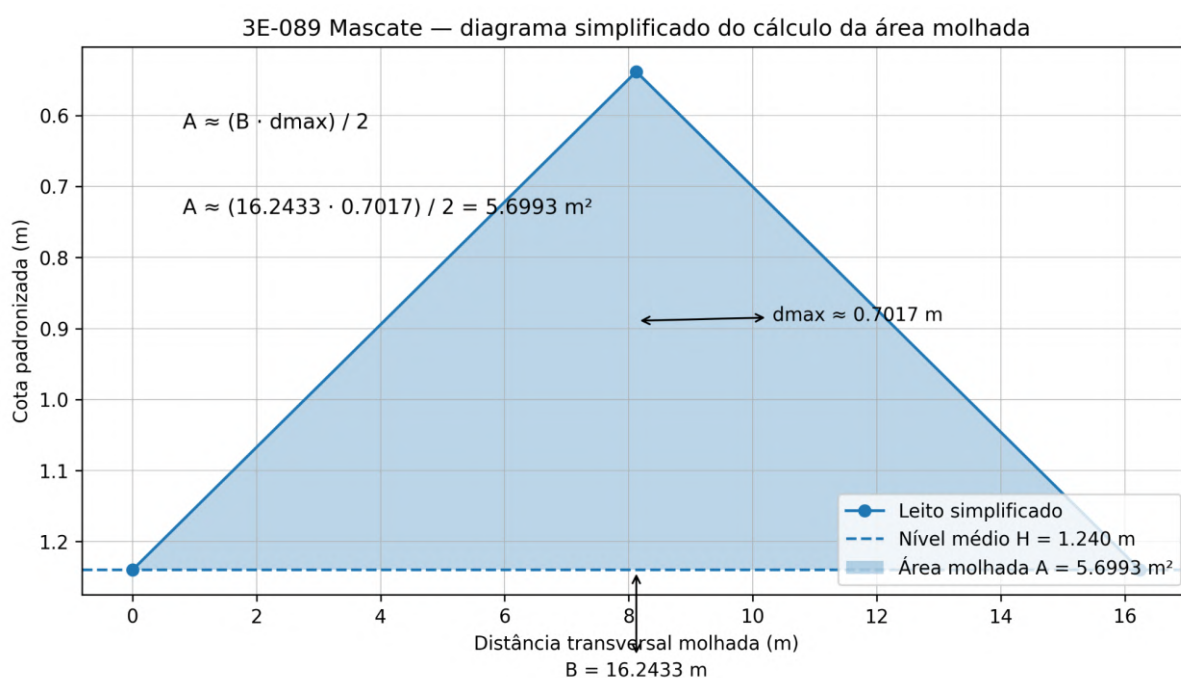


Fonte: ANA , Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Nota-se uma seção ampla, fundo mais aberto e maior variação entre perfis observados, com maior capacidade de acomodação de vazões e maior dispersão na relação nível-vazão.

No ponto 3E-089 Mascate, localizado em trecho de jusante, os perfis observados apresentam maior variação entre campanhas e uma seção média mais ampla, com largura estimada de aproximadamente 58 m e talvegue mais aberto a variações, indicando maior capacidade de acomodação de vazões, maior influência de processos de deposição/erosão lateral e possível efeito da regularização hidráulica a jusante do reservatório. A seção apresenta área total disponível de 77,8111 m², porém a área ocupada pelo nível médio d'água é de apenas 5,6993 m², equivalente a 7,32% da seção total, Figura 40.

Figura 40 - Cálculo de área transversal a montante.



Fonte: Autoria própria.

Já o ponto 3E-121 Atibainha Montante, Figura 41, apresenta seção transversal mais estreita, Figura 42 e Figura 43, com cerca de 20 m de largura estimada, talvegue mais encaixado e perfis observados mais próximos entre si, indicando maior controle geométrico da calha e resposta hidráulica mais concentrada. Essa diferença ajuda a interpretar os resultados

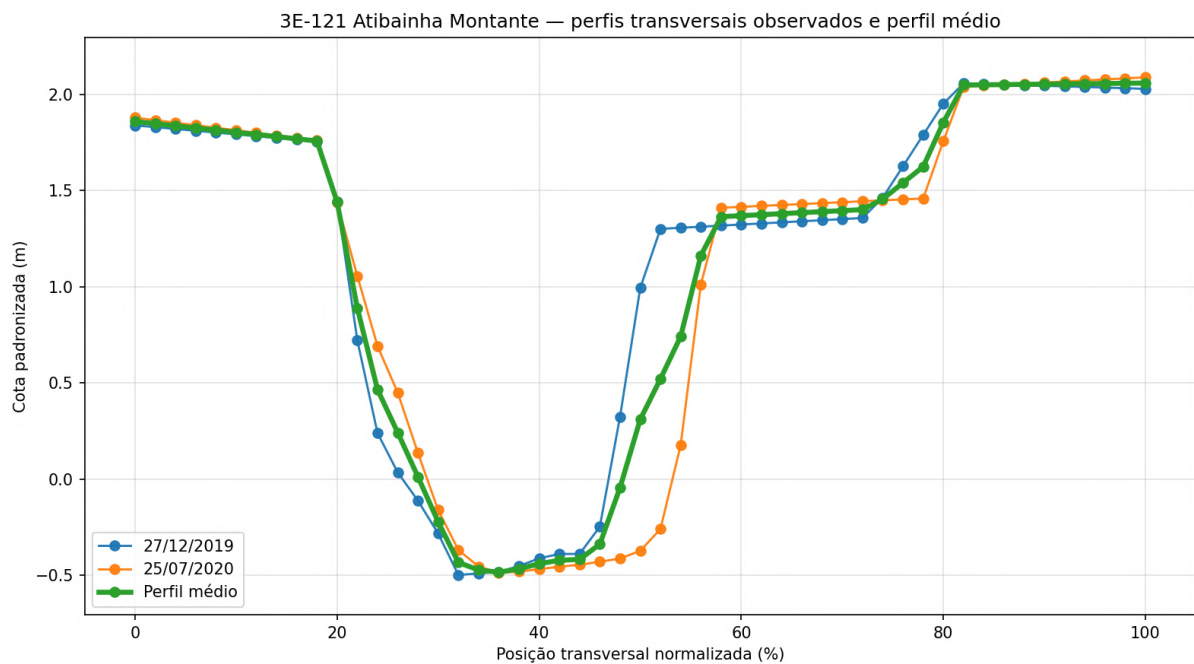
fluviométricos e de curva-chave, uma vez que seções mais encaixadas tendem a apresentar relação nível-vazão mais estável, enquanto seções mais amplas e sujeitas a variações morfológicas podem apresentar maior dispersão na relação entre cota e vazão.

Figura 41 - Localização do ponto fluviométrico 3E-121 Atibainha Montante.



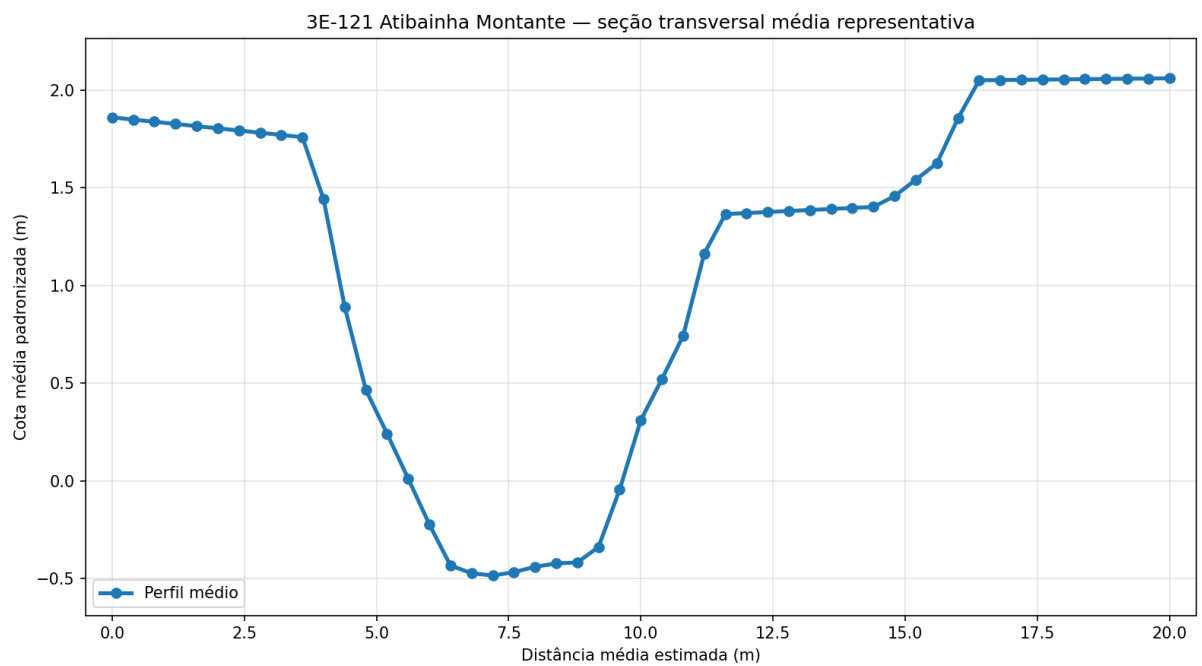
Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Figura 42 - Perfis transversais observados e perfil médio do ponto 3E-121 Atibainha Montante.



Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Figura 43 - Seção transversal média representativa do ponto 3E-121 Atibainha Montante.

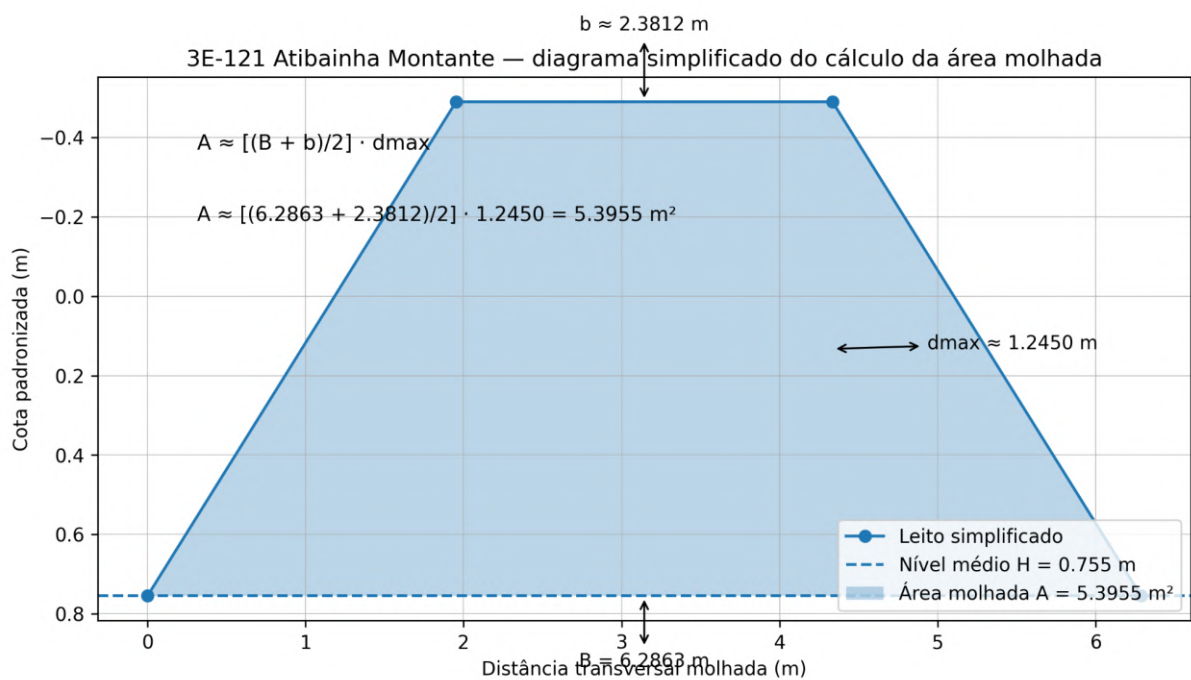


Fonte: ANA, Agência Nacional das Águas, dados abertos e elaborado pelo autor.

Canal mais estreito, encaixado e com perfis mais consistentes. Maior controle hidráulico da calha e resposta mais concentrada da vazão. Já a seção 3E-121 Atibainha Montante apresenta área total menor, de 15,4356 m², mas área molhada média de 5,3955 m², equivalente a 34,95% da seção total, Figura 44 Isso indica canal mais encaixado e maior ocupação proporcional da seção pela lâmina d'água média, o que ajuda a explicar maior estabilidade da relação nível-vazão nesse ponto.

Uma comparação entre as duas seções pode ser observada na Tabela 6.

Figura 44 - Cálculo de área transversal a montante.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6- Comparação das áreas transversais de montante e jusante.

Posto	Referência	Cota H (m)	Área A (m²)	Perímetro P (m)	Largura B (m)	Rh (m)	Hm (m)	Área molhada / área total
3E-089 Mascate	Área total disponível	3,2525	77,8111	58,2942	57,9848	1,3348	1,3419	—
3E-089 Mascate	Nível médio d'água	1,2400	5,6993	16,3276	16,2433	0,3491	0,3509	7,32%
3E-121 Atibainha Montante	Área total disponível	1,8600	15,4356	17,4869	16,0090	0,8827	0,9642	—
3E-121 Atibainha Montante	Nível médio d'água	0,7550	5,3955	7,0049	6,2863	0,7702	0,8583	34,95%

A integração dessas bases foi necessária porque cada fonte representa uma dimensão distinta da dinâmica hídrica. Os dados DAEE/SP-Águas fornecem maior profundidade histórica; o SAISP permite avaliar a resposta hidrológica recente em alta frequência; os dados operacionais registram a dinâmica diária do reservatório; a ANA permite contextualizar o sistema em datas-chave; e a CETESB contribui para avaliar a disponibilidade hídrica do ponto de vista qualitativo (Tabela 7).

Tabela 7- Síntese das bases integradas

Base	Tipo de dado	Quantidade consolidada	Uso principal no TCC
DAEE/SP-Águas	Chuva diária	54.699 registros	Análise pluviométrica histórica
DAEE/SP-Águas	Vazão diária	17.688 registros	Análise fluviométrica histórica
SAISP	Dados 10-minutais	522.295 registros	Dinâmica recente e telemetria
ANA	Dados operacionais	3.653 dias e 20 observações pontuais	Dinâmica operacional do reservatório
CETESB/INFOÁGUAS	Qualidade da água	8.928 registros	Análise quali-quantitativa

A rede de qualidade da água foi representada principalmente pelos pontos BAIN02950 - Ponte sobre o Rio Atibainha na estrada que liga a Rod. D. Pedro a Piracaia e RAIN008800 - Em frente às obras de colocação da bomba para captação do volume morto. Em frente ao muro da Estrada que liga Nazaré-Guarulhos.

O primeiro está associado ao rio Atibainha e apresentou maior número de desvios confirmados, enquanto o segundo está relacionado ao reservatório, com interpretação mais restritiva por estar associado à Classe Especial. Essa distinção é importante porque rios e reservatórios apresentam dinâmicas distintas de diluição, retenção, sedimentação, mistura e resposta a cargas poluentes.

6.3. Análise qualitativa

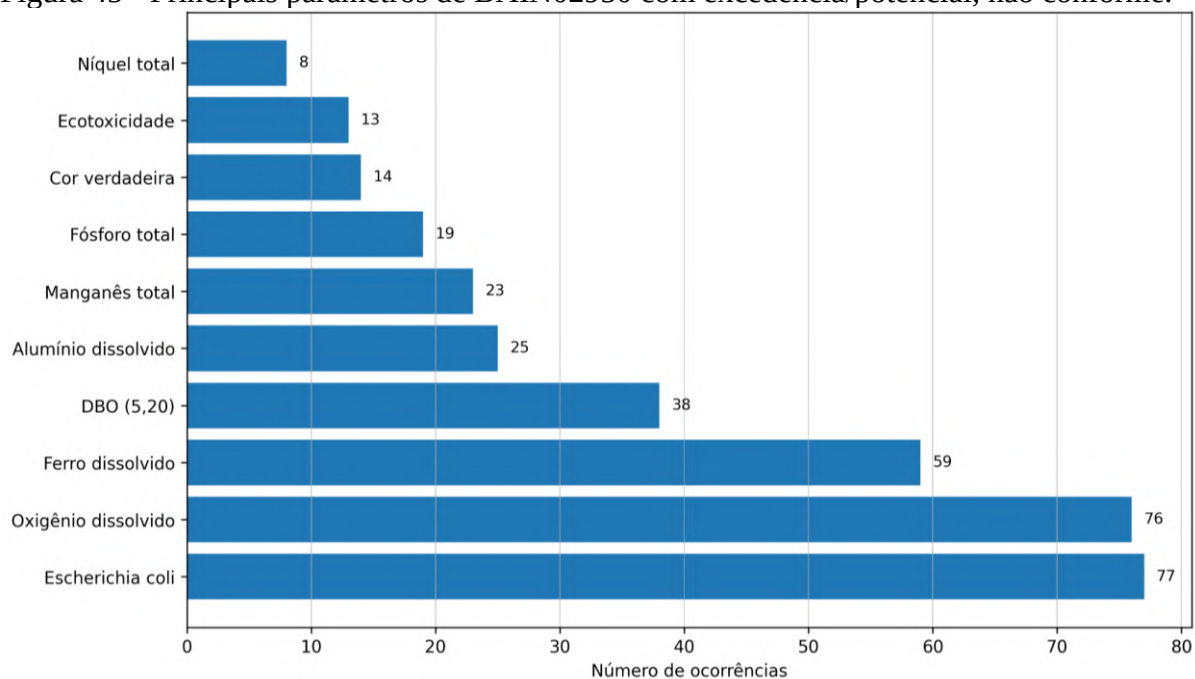
A análise deve ser apresentada com uma ressalva central: BAIN02950 é ponto Classe 2, portanto permite comparação direta com os padrões legais; já RAIN008800 é Classe Especial, então os valores Classe 1/2 devem ser tratados apenas como alertas técnicos auxiliares, pois a exigência principal é a manutenção das condições naturais (Tabela 8, Figura 45, Figura 46 e Figura 47)

Nos dois pontos, os agrotóxicos e pesticidas não apresentaram excedências confirmadas em relação aos padrões adotados. Entretanto, essa leitura não significa ausência absoluta desses compostos, pois muitos resultados foram registrados como menores que o limite de quantificação.

Tabela 8- Excedências e Alertas quanto a qualidade da água.

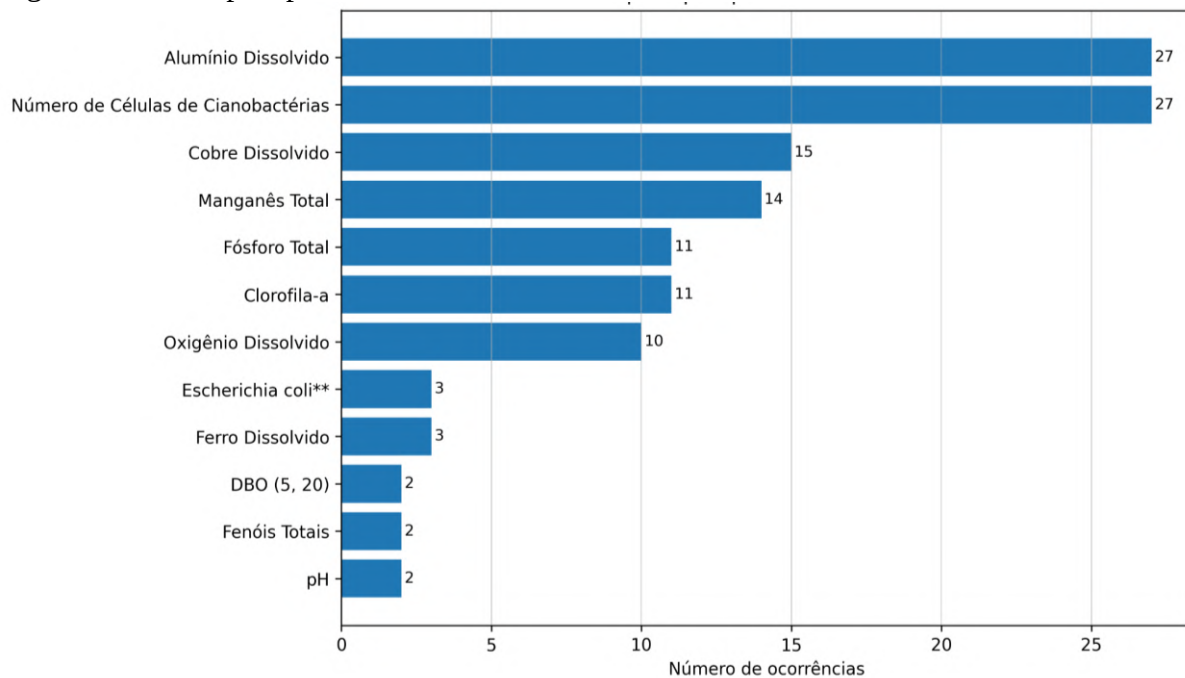
Grupo	BAIN02950 — Classe 2	RAIN00880 0 — Classe Especial	Observação.
Microbiológico/ sanitário	81 excedências/potenciais	1 alerta auxiliar	Alta criticidade no rio Atibainha, principalmente por E. coli/coliformes, sugerindo influência de esgoto, criação animal ou drenagem de áreas ocupadas.
Carga orgânica/OD	114 excedências/potenciais	5 alertas auxiliares	Destaque para OD baixo e DBO elevada, indicando pressão por matéria orgânica e redução da autodepuração no trecho fluvial.
Metais/metaloide s	120 excedências/potenciais	21 alertas auxiliares	Grupo mais relevante nos dois pontos; destaque para ferro, alumínio, manganês e níquel no rio e manganês no reservatório.
Nutrientes/eutro fização	20 excedências/potenciais	16 alertas auxiliares	Fósforo total e cianobactérias indicam risco de eutrofização, especialmente no ambiente lântico do reservatório.
Sólidos/cor/turbi dez	16 excedências/potenciais	0 alertas auxiliares	No rio, cor verdadeira e turbidez indicam possível aporte de sedimentos, matéria orgânica dissolvida e escoamento superficial.
Ecotoxicidade/m utagenicidade	13 ocorrências	0 alertas auxiliares	Ensaio ecotoxicológico no rio indicam possível efeito combinado de contaminantes, mesmo quando compostos isolados não excedem limites.
Orgânicos/solve ntes/HPAs/fenóis	5 excedências/potenciais	2 alertas auxiliares	Ocorrências menores, mas importantes por indicarem potenciais fontes urbanas, industriais, combustíveis ou efluentes.
Agrotóxicos/pes tidas	0 excedência confirmada	0 alerta auxiliar	Não houve excedência confirmada; porém, muitos resultados aparecem censurados por limite de quantificação, exigindo interpretação cautelosa.

Figura 45 - Principais parâmetros de BAIN02950 com excedência/potencial, não conforme.



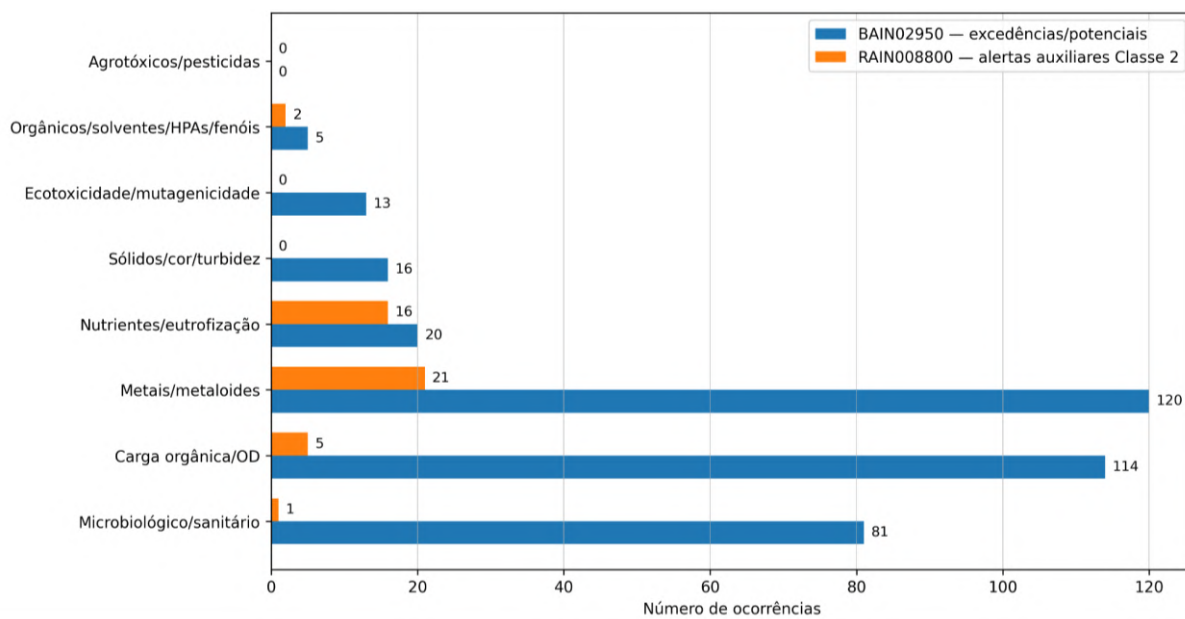
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Principais parâmetros de RAIN008800 com alertas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Comparação de alteração observada entre os pontos de amostragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos padrões de qualidade da água indica maior criticidade no ponto BAIN02950, enquadrado como Classe 2, onde se concentram excedências associadas principalmente a carga orgânica, oxigenação, indicadores microbiológicos e metais. O ponto RAIN008800, associado ao reservatório Atibainha e classificado como Classe Especial, apresentou menor número de alertas, devendo ser interpretado com cautela, pois a comparação com limites Classe 1 ou Classe 2 foi utilizada apenas como referência auxiliar. Os resultados mais relevantes envolvem metais/metaloídes, fósforo total, cianobactérias, DBO, OD e E. coli, indicando que a disponibilidade hídrica da sub-bacia deve ser avaliada não apenas pela quantidade de água, mas também por sua qualidade e pelos usos existentes nas áreas de contribuição.

6.4. Análise pluviométrica histórica e recente

Os resultados mostram que a precipitação média anual nos postos analisados varia aproximadamente entre 1403,90 mm e 1625,51 mm, indicando regime pluviométrico expressivo, mas com forte variabilidade interanual. O posto E3-250 apresentou a maior média anual, enquanto o posto E3-099 possui a série mais longa, sendo importante para a caracterização histórica da chuva regional (Tabela 9).

Tabela 9- Síntese pluviométrica histórica DAEE/SP-Águas

Código	Posto	Anos válidos	Média anual (mm)	Ano mais seco	Total seco (mm)	Ano mais chuvoso	Total chuvoso (mm)
E3-099	Nazaré Paulista	76	1403,90	1968	909,6	1976	2131,0
E3-250	Ribeirão Acima	27	1625,51	1999	860,3	1986	2553,5

Os maiores eventos diários registrados demonstram a ocorrência de chuvas intensas capazes de gerar respostas rápidas na drenagem, especialmente em áreas de maior declividade e menor proteção vegetal (Tabela 10).

Tabela 10- Maiores chuvas diárias registradas

Código	Posto	Data	Maior chuva diária
E3-099	Nazaré Paulista	06/02/2021	157,1 mm
E3-250	Ribeirão Acima	23/12/1980	106,7 mm

A análise recente, com dados operacionais do reservatório entre 20/05/2016 e 20/05/2026, indicou chuva total de aproximadamente 13.813,5 mm, resultando em média anual aproximada de 1381,35 mm/ano. Esse valor é compatível com a faixa histórica observada, embora represente um período menor e diretamente associado ao reservatório. A comparação entre chuva recente e nível do reservatório mostra que a precipitação isolada não explica integralmente a dinâmica do armazenamento, pois o reservatório também é influenciado por afluências, defluências, transferências e regras operacionais.

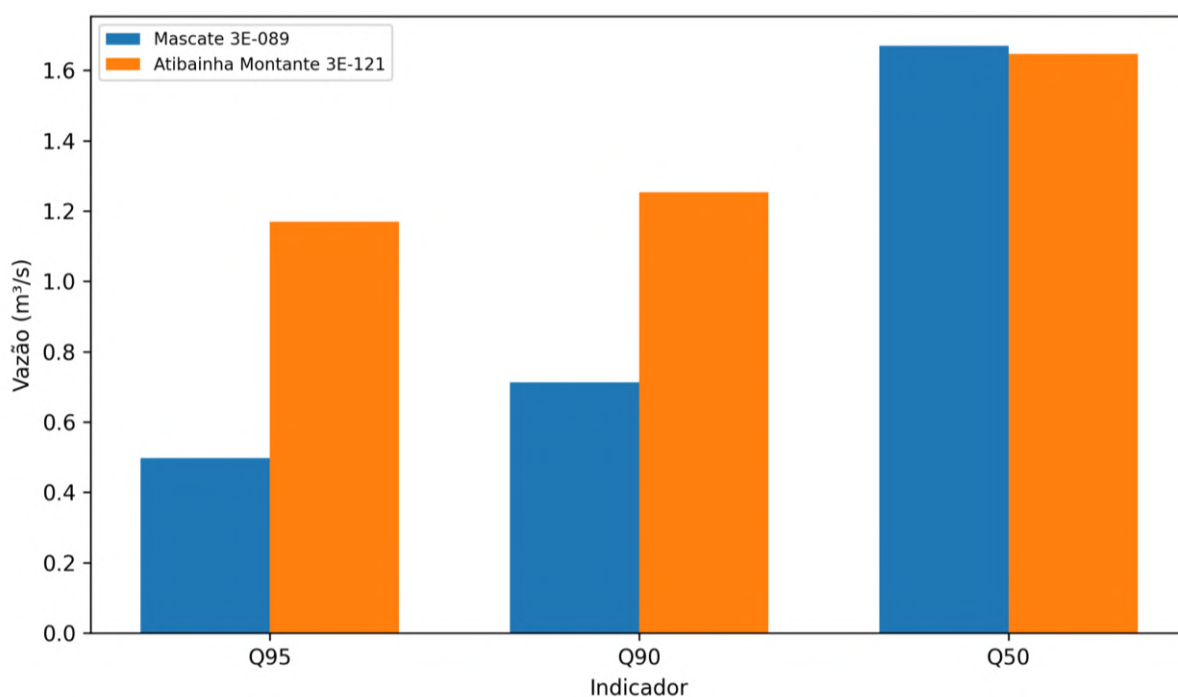
6.5. Análise fluviométrica histórica e recente

A análise fluviométrica histórica foi baseada nos postos 3E-089 Mascate e 3E-121 Atibainha Montante, permitindo comparar condições de jusante e montante associadas ao rio Atibainha e ao reservatório. O posto Mascate possui maior profundidade histórica e representa melhor a variabilidade de longo prazo a jusante, enquanto o posto Atibainha Montante apresenta série mais curta, porém relevante para compreender o comportamento recente de montante (Tabela 11 e Figura 48).

Tabela 11- Síntese fluviométrica histórica DAEE/SP-Águas

Código	Posto	Dias válidos	Período	Q média (m³/s)	Q95 (m³/s)	Q90 (m³/s)	Q50 (m³/s)	Mínima	Máxima
3E-089	Mascate	15.306	1971–2023	2,4829	0,498	0,713	1,670	0,111	16,564
3E-121	Atibainha Montante	2.382	2015–2023	2,0717	1,170	1,254	1,646	0,948	18,023

Figura 48 - Vazões de referência histórica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença entre os valores de Q95 indica regimes distintos de permanência e controle hidráulico. A Q95 mais baixa em Mascate representa uma condição conservadora a jusante e pode refletir maior variabilidade histórica, influência operacional e maior extensão temporal da série. Já o posto Atibainha Montante, com série mais curta, apresenta Q95 mais elevada, devendo ser interpretado com cautela e sempre considerando sua posição hidrológica.

A Q7,10 foi estimada a partir dos menores valores anuais de Q7, com ajuste estatístico para tempo de retorno de 10 anos. Por se tratar de uma série operacional de dez anos, os resultados devem ser interpretados como estimativas recentes e não como substitutos de estudos hidrológicos oficiais de longo prazo (Tabela 12).

Tabela 12- Q7,10 estimada a partir da base operacional

Variável	Q7,10 empírica (m³/s)
Vazão afluente	1,5853
Vazão jusante	0,0050

Os valores indicam que, em condições críticas, a vazão natural e a vazão jusante podem atingir valores muito reduzidos. Essa condição reforça a importância da operação do reservatório, da manutenção de vazões mínimas, da conservação de áreas de contribuição e do monitoramento contínuo da disponibilidade hídrica.

6.6.Relação chuva, vazão, nível e armazenamento

A relação entre chuva, vazão, nível e armazenamento foi avaliada por correlação de Pearson e regressão linear simples. Foram testadas janelas de chuva acumulada de 1, 3, 7, 15 e 30 dias, com diferentes defasagens temporais (Tabela 13).

Tabela 13- Correlações entre chuva e variáveis operacionais

Variável resposta	Chuva acumulada	Defasagem	r	R²	Equação
Nível	7 dias	1 dia	0,0518	0,0027	$Y = 783,567 + 0,000834X$
Δ nível diário	1 dia	0 dia	0,4679	0,2189	$Y = -0,00708 + 0,001769X$
Vazão afluente	15 dias	2 dias	-0,3176	0,1009	$Y = 25,7319 - 0,04239X$

Vazão natural	3 dias	0 dia	0,7420	0,5506	$Y = 1,4617 + 0,160911X$
Vazão jusante	30 dias	0 dia	-0,5567	0,3099	$Y = 3,49278 - 0,00998X$

A vazão natural apresentou a relação mais consistente com a chuva acumulada de curto prazo, com $r = 0,7420$ e $R^2 = 0,5506$, indicando resposta hidrológica direta à precipitação. Por outro lado, o nível do reservatório apresentou correlação muito baixa com a chuva acumulada de sete dias, demonstrando que o armazenamento não responde apenas à chuva recente, mas também às condições antecedentes, às vazões afluentes, às defluências, às transferências e às regras operacionais. A correlação negativa da vazão jusante com a chuva acumulada de 30 dias deve ser interpretada como efeito operacional, e não como relação hidrológica natural simples.

6.7.Dinâmica operacional do reservatório Atibainha

A dinâmica operacional do reservatório Atibainha foi avaliada com base em dados diários e registros pontuais oficiais. A base diária, referente ao período de 20/05/2016 a 20/05/2026, reúne 3.653 dias de dados consolidados, permitindo avaliar chuva, nível, volume útil, vazões afluentes, vazões naturais e vazões liberadas a jusante (Tabela 14).

A análise mostra grande amplitude operacional no período, com volume útil variando entre 15,79% e 100%. A variação do volume demonstra que o reservatório responde não apenas à precipitação local, mas também às afluições, defluências, transferências operacionais.

Os registros pontuais da ANA/Sistema Cantareira, filtrados para o Atibainha, totalizam 20 observações entre 2016 e 2026, geralmente em datas de fechamento de períodos hidrológicos (Tabela 15).

A comparação entre as bases mostra que os dados diários permitem avaliar a dinâmica operacional contínua, enquanto os dados pontuais representam situações sintéticas em datas-chave. Ambas as leituras indicam variações relevantes do armazenamento, com destaque para períodos de menor volume útil, que intensificam a necessidade de gestão integrada da disponibilidade hídrica nas Bacias PCJ.

Tabela 14- Síntese operacional do reservatório Atibainha

Indicador	Valor
Dias consolidados	3.653
Chuva total	13.813,5 mm
Chuva média anual	1.381,35 mm/ano
Nível médio	783,5889 m
Nível mínimo	782,710 m
Nível máximo	785,614 m
Volume útil médio	43,8777%
Volume útil mínimo	15,79%
Vazão afluyente média	23,3028 m ³ /s
Vazão natural média	3,2893 m ³ /s
Vazão jusante média	2,3489 m ³ /s

Tabela 15- Síntese ANA/Sistema Cantareira para o Atibainha

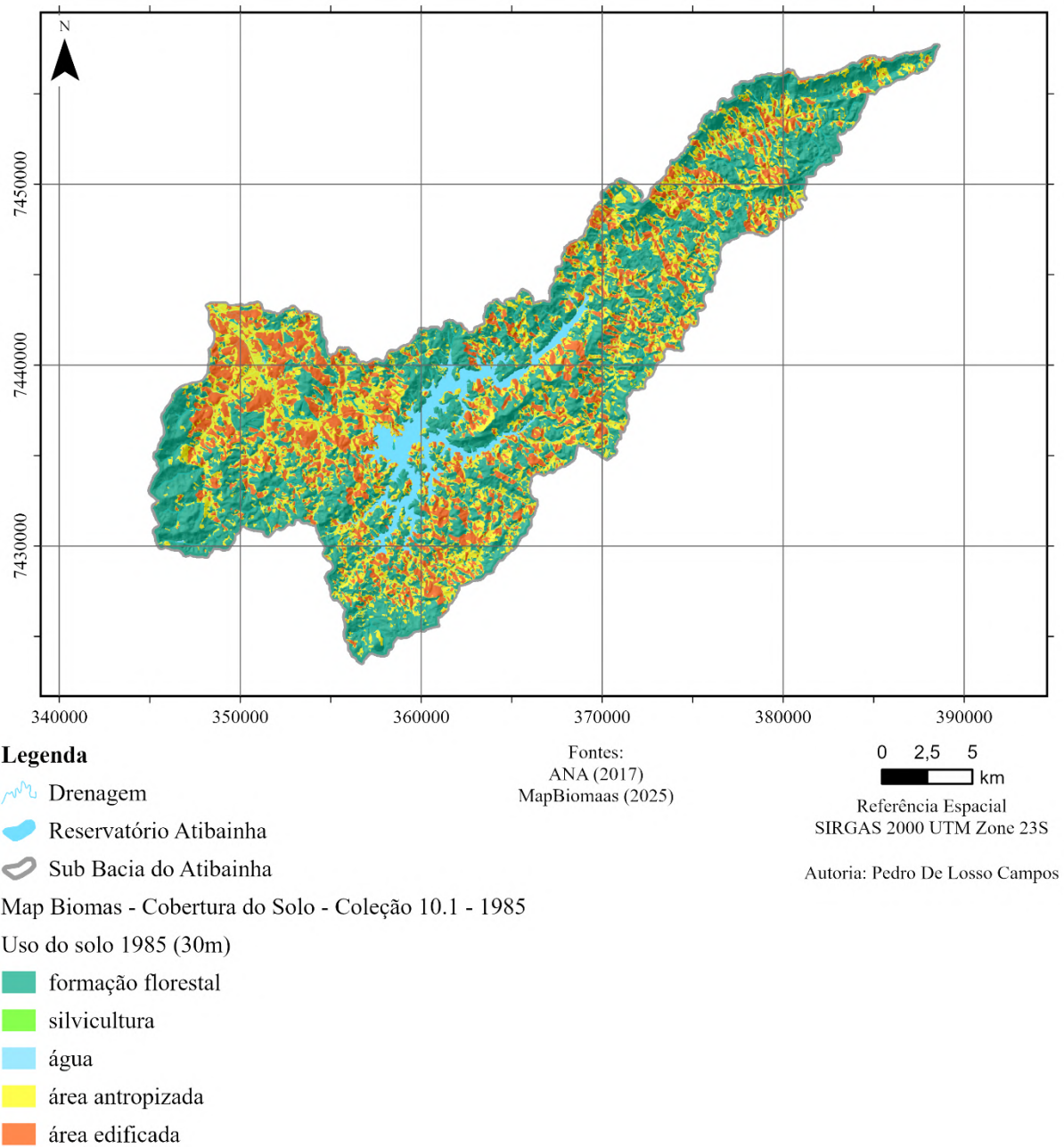
Indicador	Resultado
Observações	20
Período	20/11/2016 a 20/05/2026
Cota média	783,61 m
Cota mínima	782,77 m
Cota máxima	785,48 m
Volume útil médio	33,77%
Volume útil mínimo	16,95%
Volume útil máximo	72,53%
Afluência média	4,10 m ³ /s
Defluência média	2,74 m ³ /s
Saldo médio afluência–defluência	1,35 m ³ /s
Variação total do volume útil	-28,03 p.p.
Variação total do volume	-26,98 hm ³

6.8. Uso e cobertura da terra na sub-bacia

A análise multitemporal do uso e cobertura da terra foi realizada com base no MapBiomas Coleção 10.1, considerando anos representativos entre 1985 e 2024. As classes foram reagrupadas em categorias sintéticas: formação florestal, silvicultura, área antropizada, área edificada e água. O ano de 2013 também foi comparado com a base oficial de uso e ocupação da SEMIL, utilizada como apoio para padronização e validação da legenda interpretativa.

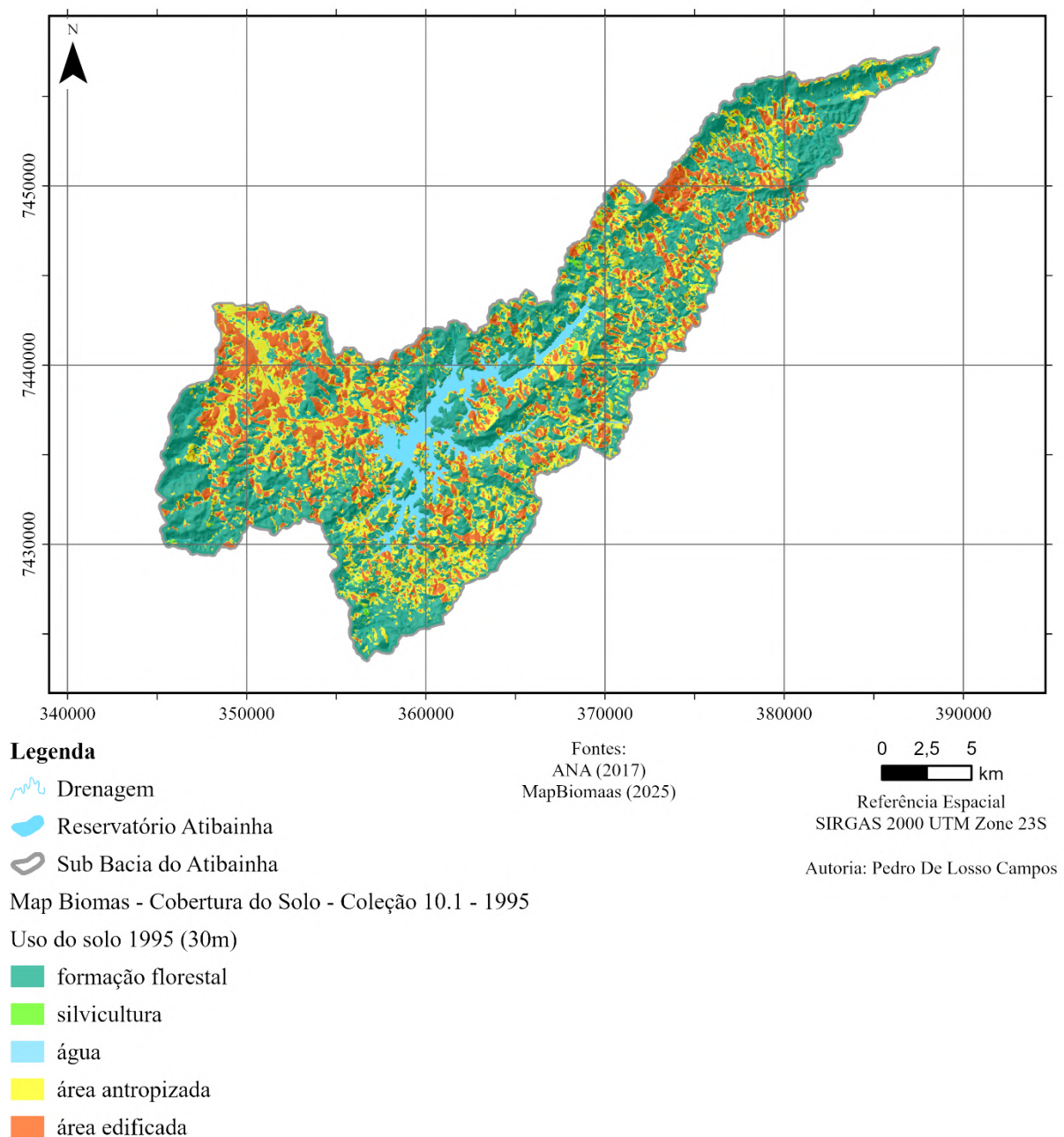
Em 1985, **Figura 49**, o uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha apresentava predomínio de formação florestal (225,36 km²), seguida por áreas antropizadas (115,37 km²) e áreas edificadas (91,97 km²). A classe água ocupava 22,26 km², associada principalmente ao reservatório, enquanto a silvicultura era pouco expressiva (0,23 km²).

Figura 49 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 1985



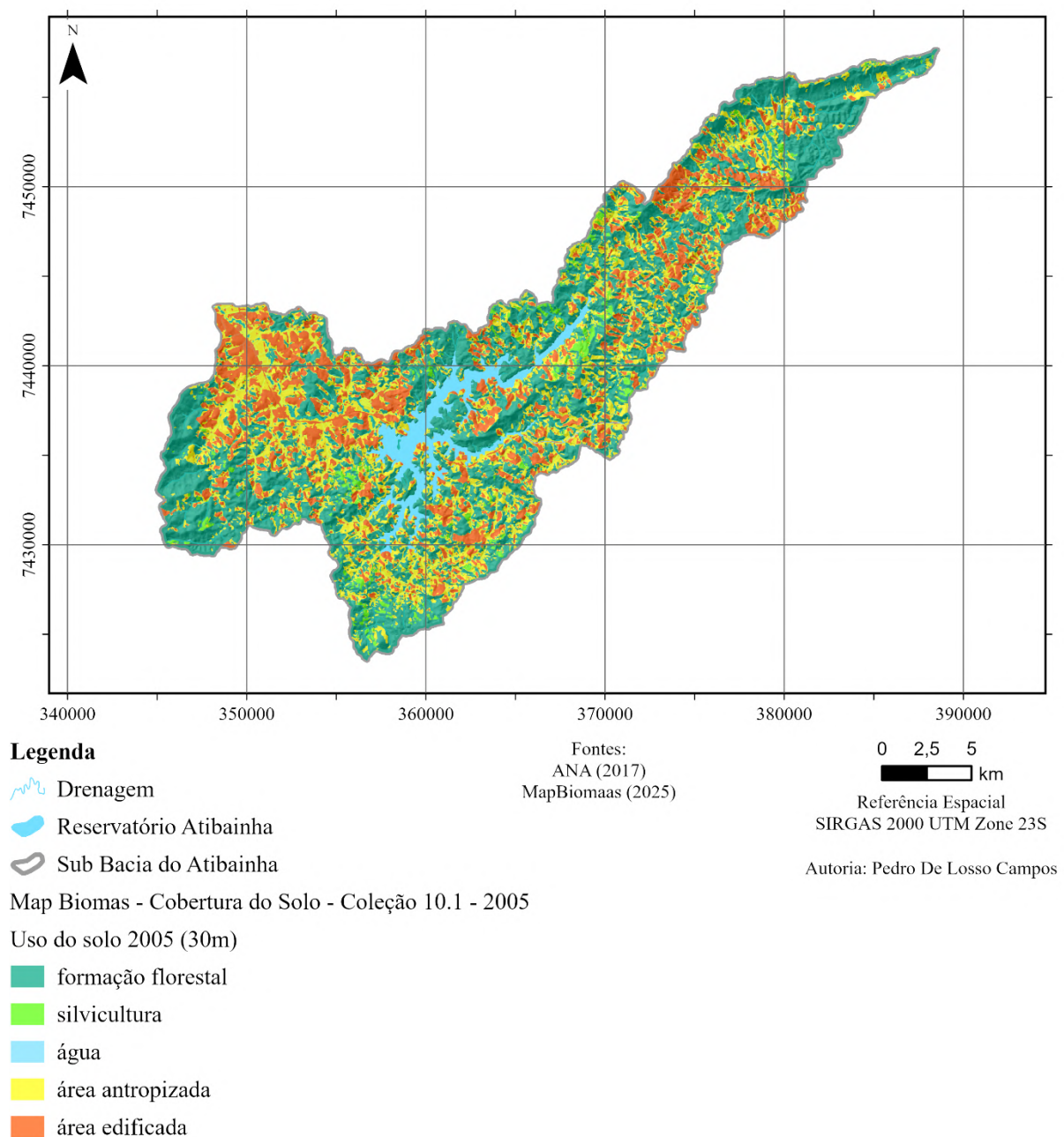
Em 1995, Figura 50, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (232,07 km²), com aumento em relação a 1985. As áreas antropizadas ocupavam 113,22 km² e as áreas edificadas 83,67 km², permanecendo concentradas principalmente no entorno do reservatório e em setores de vale. A classe água representava 23,35 km², enquanto a silvicultura ainda era pouco expressiva, com 2,88 km². Esse ano indica manutenção da cobertura florestal como classe dominante, com início ainda limitado da expansão da silvicultura.

Figura 50 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 1995.



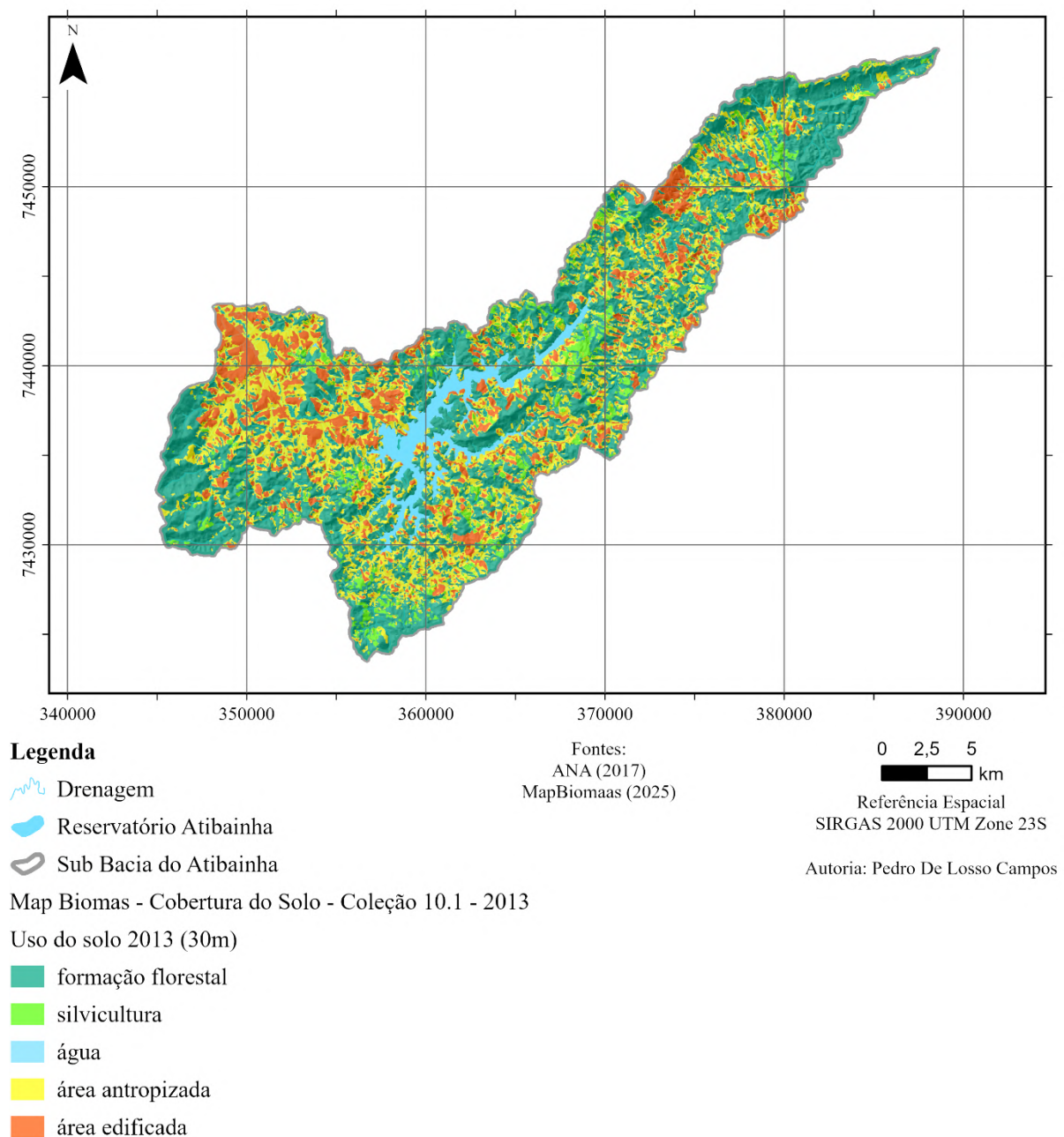
Em 2005, Figura 51, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (219,78 km²), seguida por áreas antropizadas (112,34 km²) e áreas edificadas (89,51 km²). A classe água ocupava 21,04 km², enquanto a silvicultura apresentou crescimento em relação aos anos anteriores, atingindo 12,52 km². Esse período indica redução da formação florestal em relação a 1995 e início mais evidente da expansão da silvicultura na paisagem.

Figura 51 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2005.



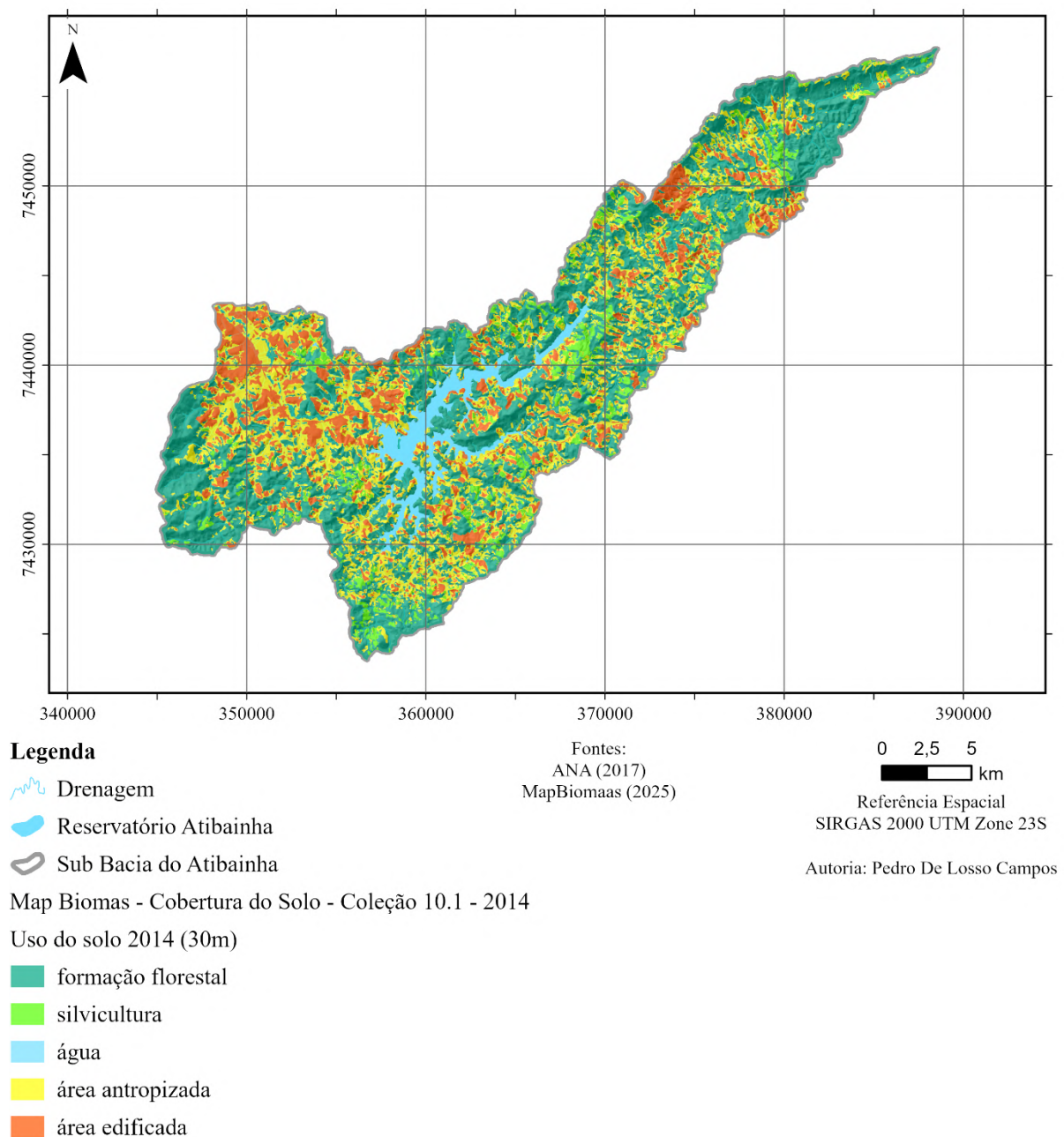
Em 2013, Figura 52, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (218,79 km²), seguida por áreas antropizadas (117,96 km²) e áreas edificadas (65,74 km²). A silvicultura apresentou avanço mais evidente, atingindo 24,23 km², enquanto a classe água ocupava 20,28 km². Esse ano é importante por permitir comparação direta com a base oficial da SEMIL 2013, utilizada como apoio à padronização das classes de uso e cobertura da terra.

Figura 52 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2013.



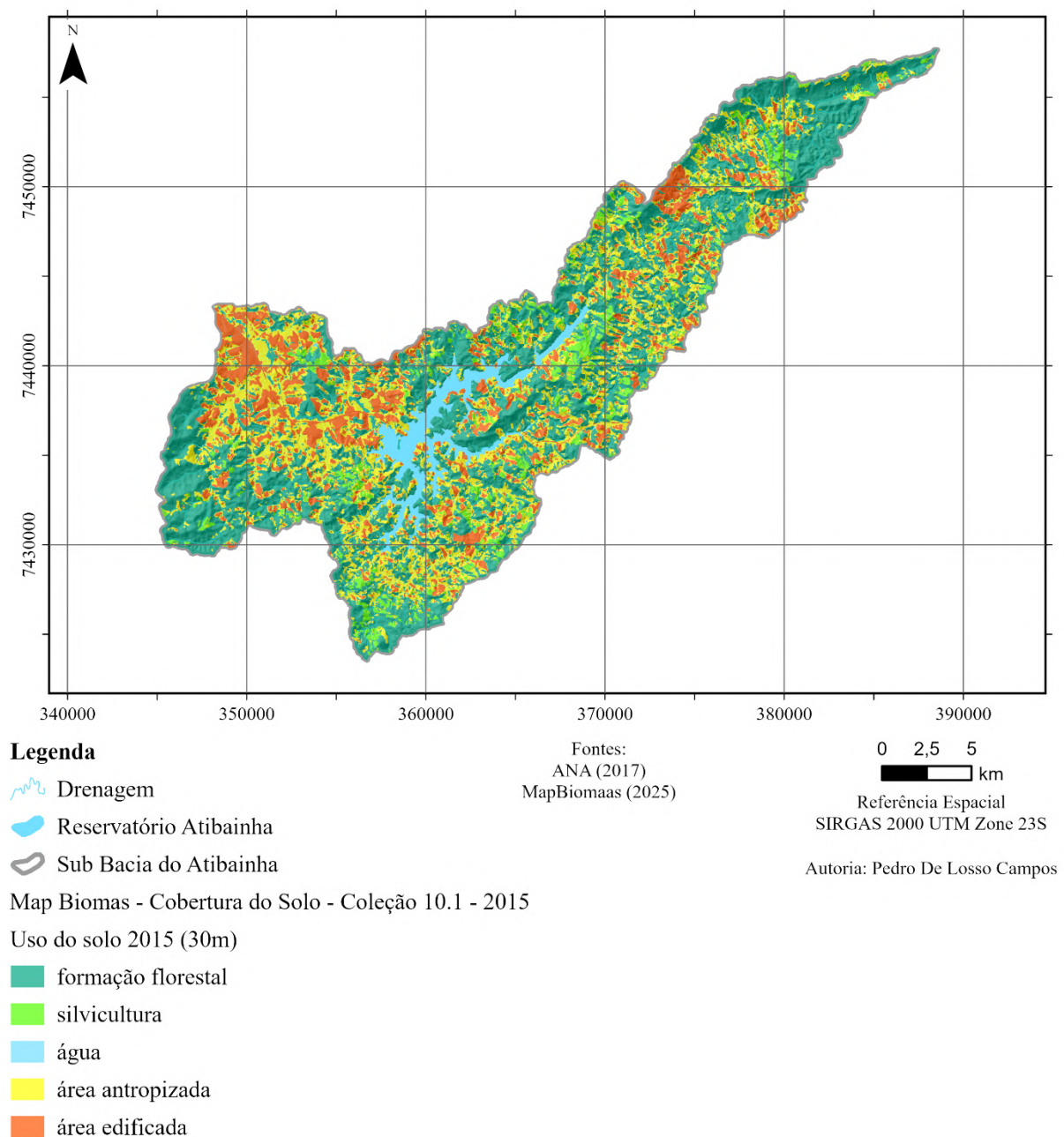
Em 2014, Figura 53, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (222,80 km²), seguida por áreas antropizadas (116,18 km²) e áreas edificadas (68,13 km²). A silvicultura continuou em expansão, alcançando 27,96 km², enquanto a classe água ocupava 20,11 km². Em relação a 2013, observa-se pequena recuperação da formação florestal e aumento da silvicultura, reforçando a tendência de substituição gradual de parte dos usos da paisagem por plantios florestais.

Figura 53 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2014.



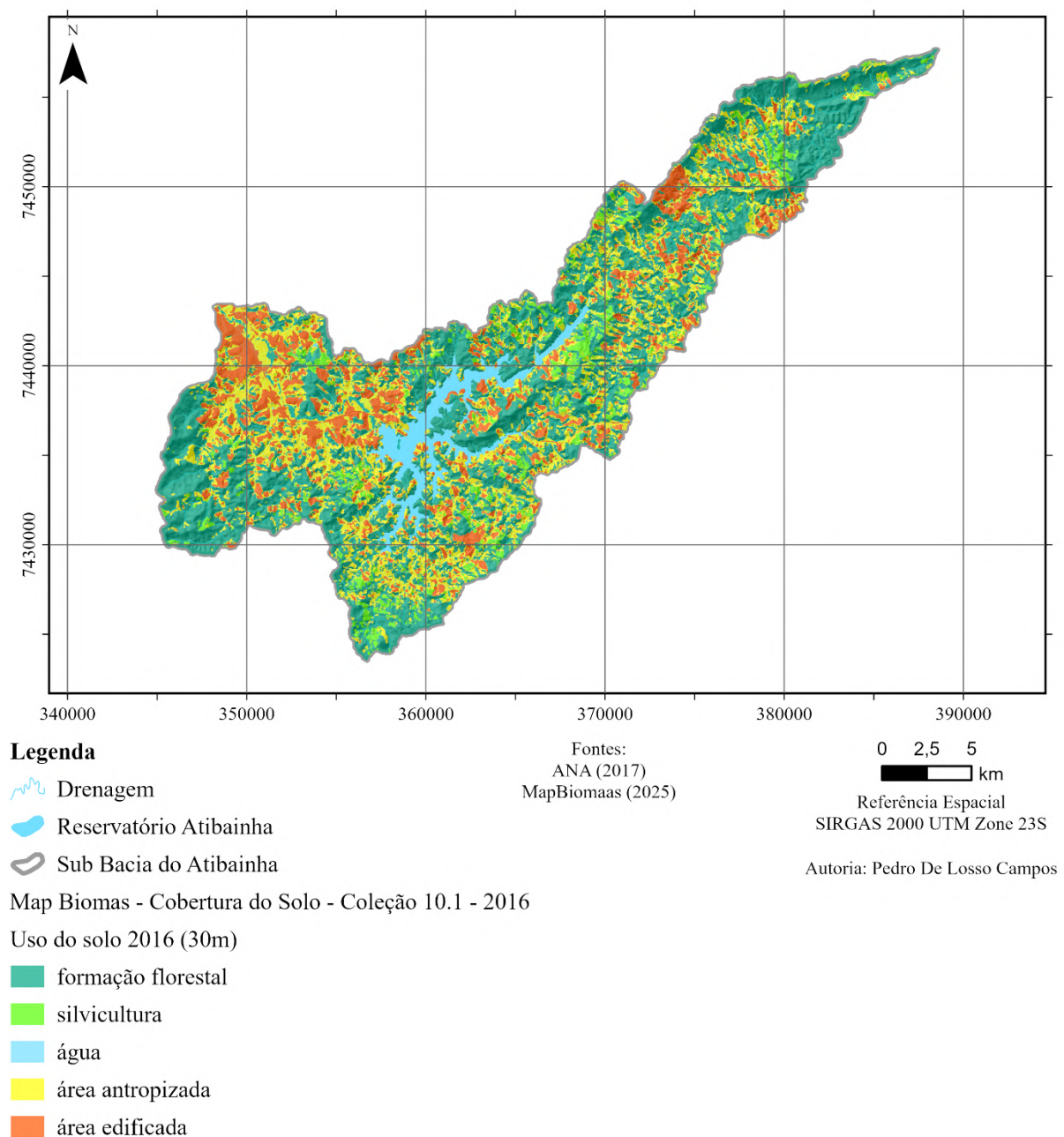
Em 2015, Figura 54, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (222,73 km²), seguida por áreas antropizadas (116,04 km²) e áreas edificadas (68,05 km²). A silvicultura continuou em crescimento, atingindo 28,41 km², enquanto a classe água ocupava 19,97 km². O resultado confirma a permanência da cobertura florestal como classe dominante, mas também evidencia a consolidação da silvicultura como componente relevante da paisagem.

Figura 54 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2015.



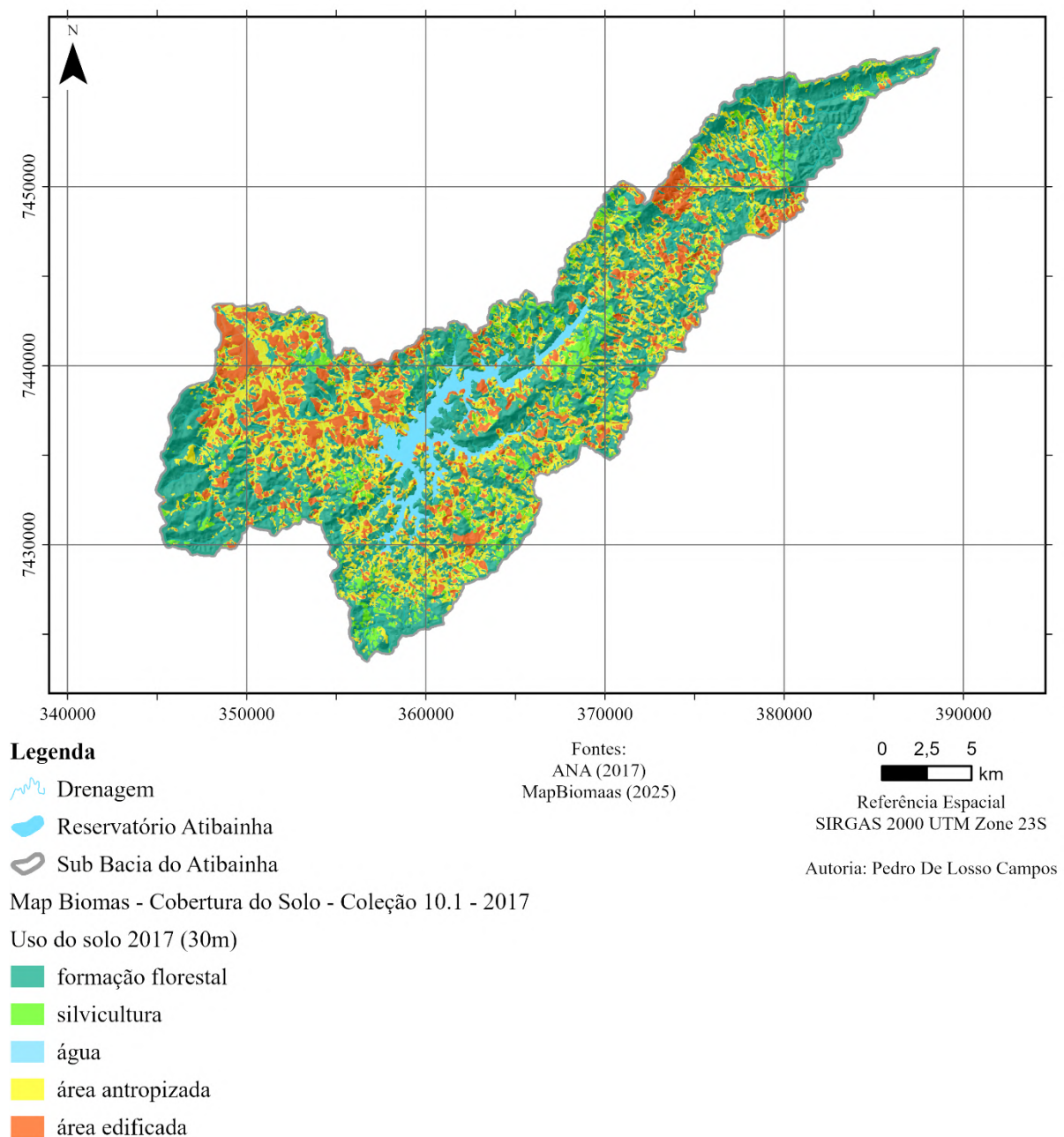
Em 2016, Figura 55, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (223,29 km²), seguida por áreas antropizadas (113,59 km²) e áreas edificadas (69,20 km²). A silvicultura continuou em expansão, ocupando 28,77 km², enquanto a classe água representava 20,34 km². O resultado indica estabilidade geral em relação a 2015, com manutenção da cobertura florestal dominante e consolidação gradual da silvicultura na paisagem.

Figura 55 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2016.



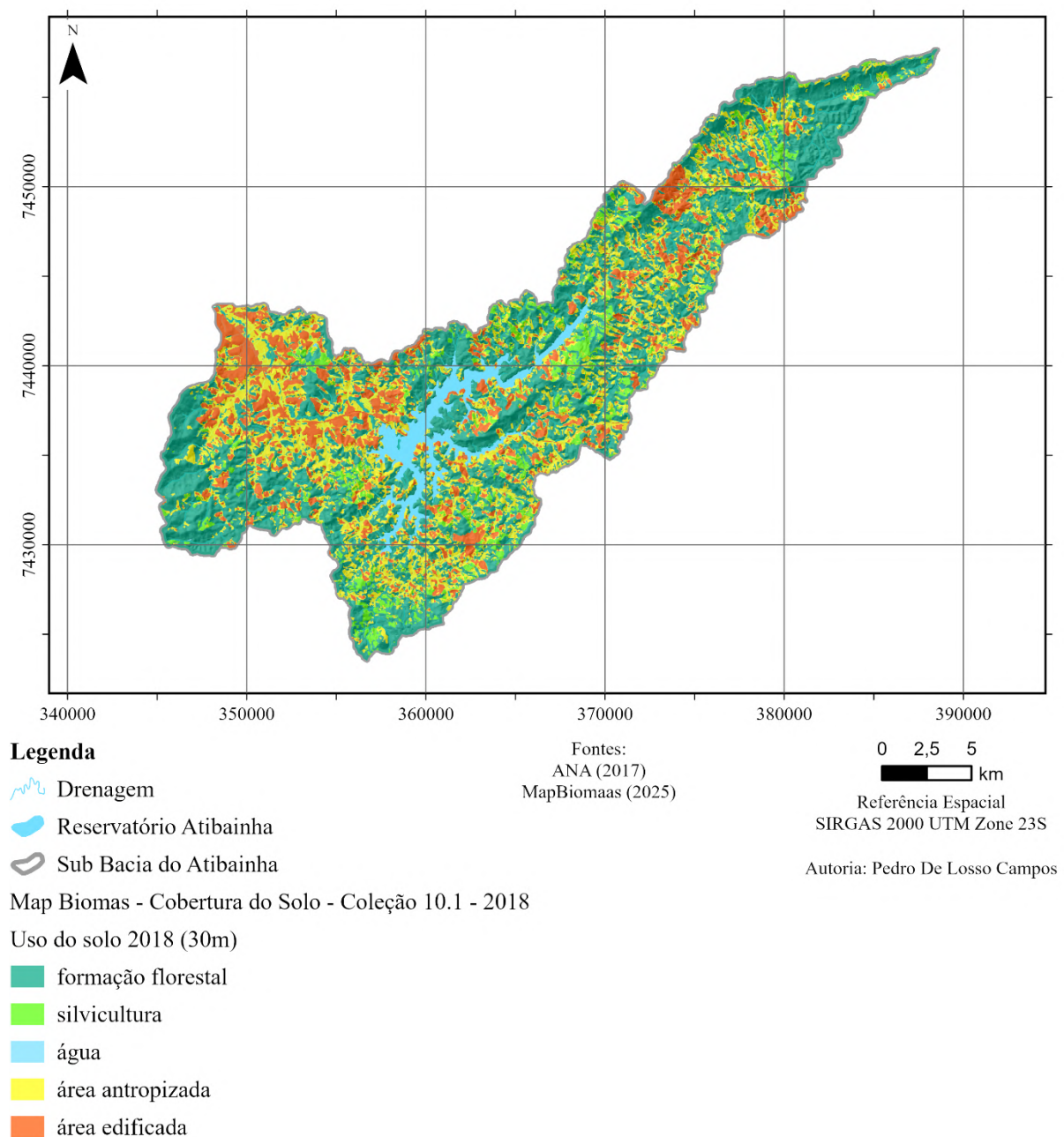
Em 2017, Figura 56, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (223,00 km²), seguida por áreas antropizadas (113,86 km²) e áreas edificadas (69,29 km²). A silvicultura ocupava 28,68 km², enquanto a classe água representava 20,37 km². O resultado indica estabilidade em relação a 2016, com manutenção da cobertura florestal dominante e permanência da silvicultura como uso produtivo relevante na paisagem.

Figura 56 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2017.



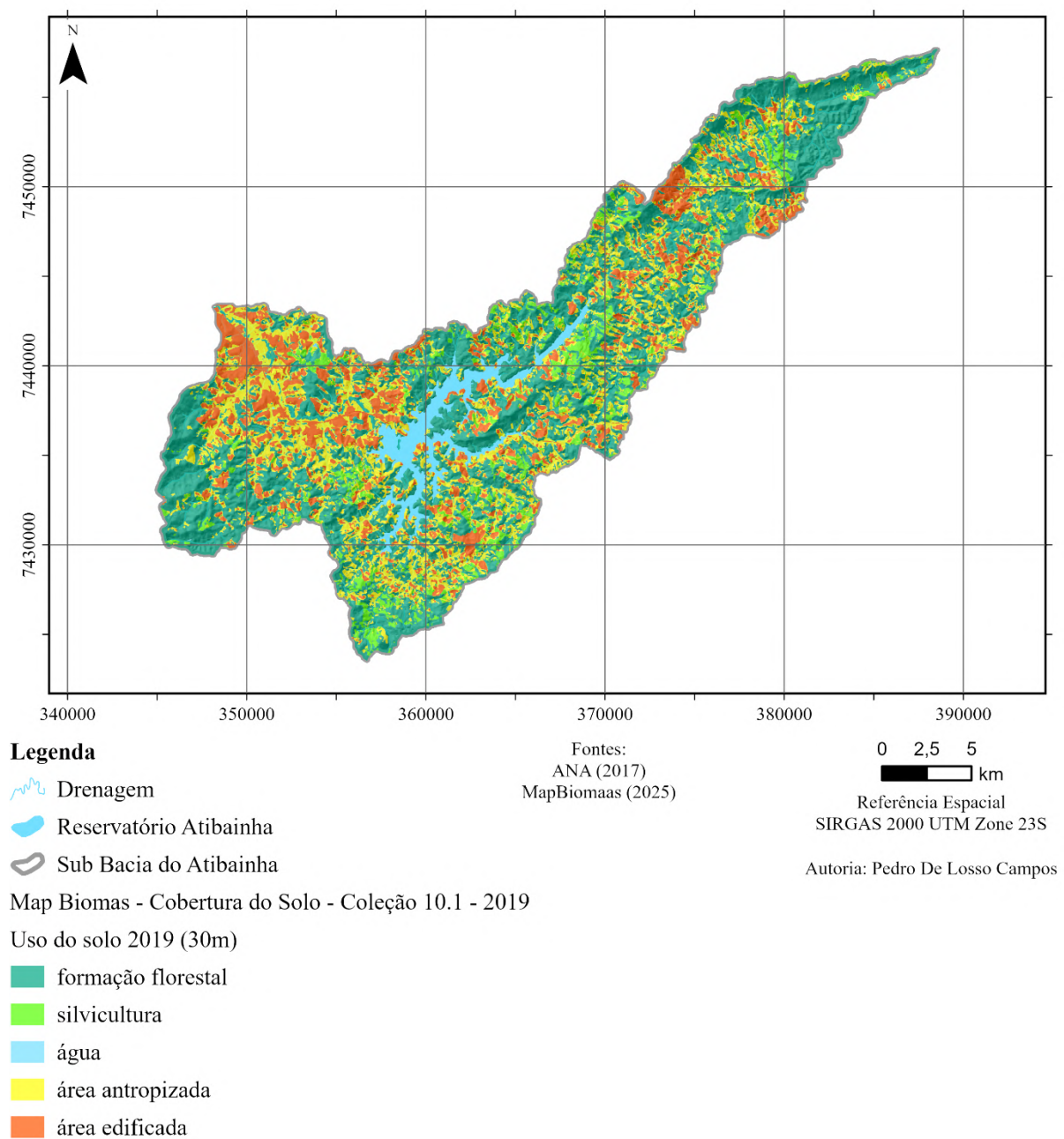
Em 2018, Figura 57, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (224,30 km²), seguida por áreas antropizadas (110,62 km²) e áreas edificadas (70,46 km²). A silvicultura atingiu 29,50 km², enquanto a classe água ocupava 20,31 km². O resultado indica estabilidade da cobertura florestal em relação aos anos anteriores, com manutenção da silvicultura como uso produtivo já consolidado na paisagem.

Figura 57 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2018.



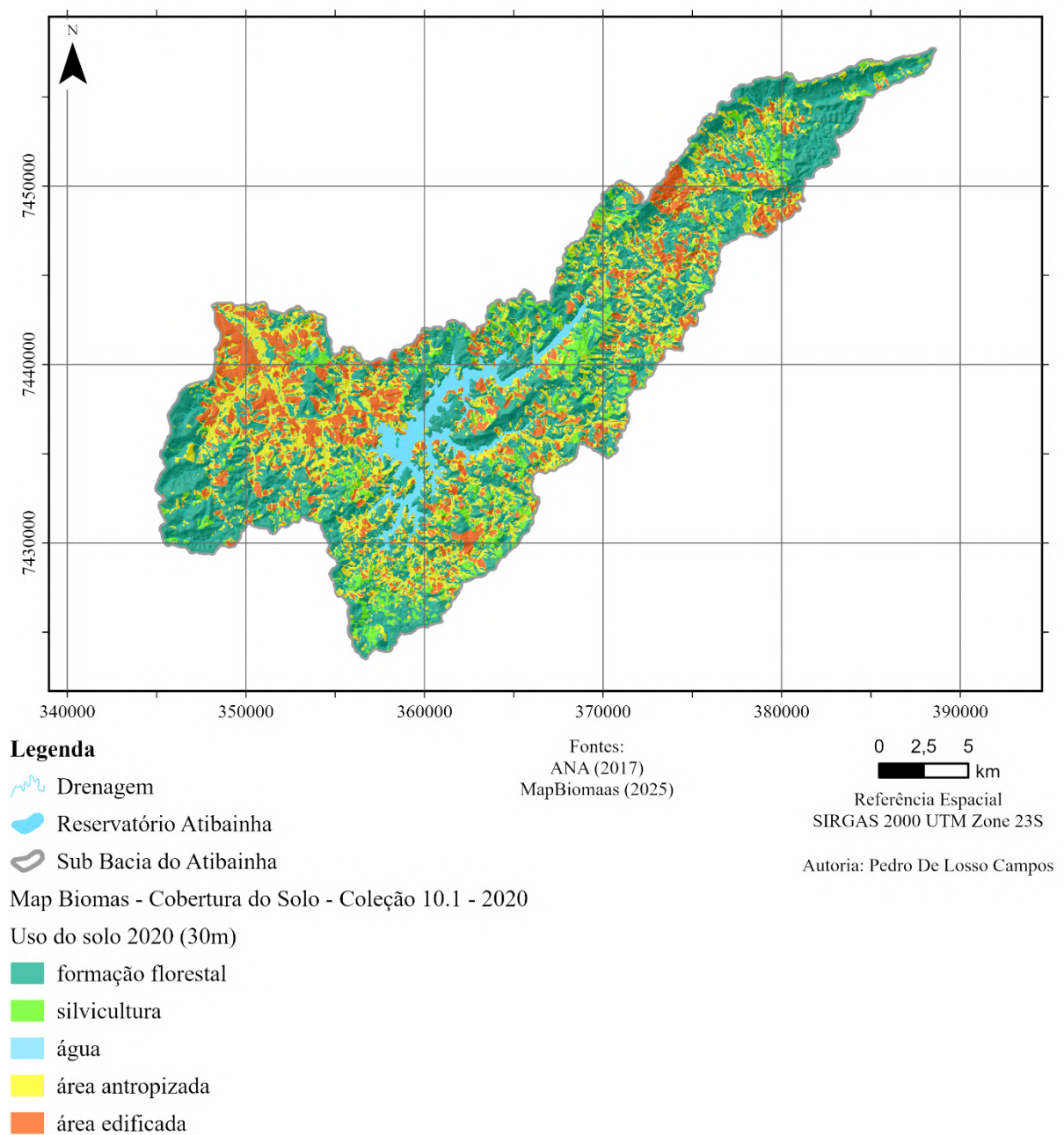
Em 2019, Figura 58, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (222,98 km²), seguida por áreas antropizadas (106,19 km²) e áreas edificadas (71,95 km²). A silvicultura atingiu 33,79 km², enquanto a classe água ocupava 20,28 km². O resultado indica manutenção da cobertura florestal como classe dominante, com aumento da silvicultura em relação a 2018 e redução relativa das áreas antropizadas.

Figura 58 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2019.



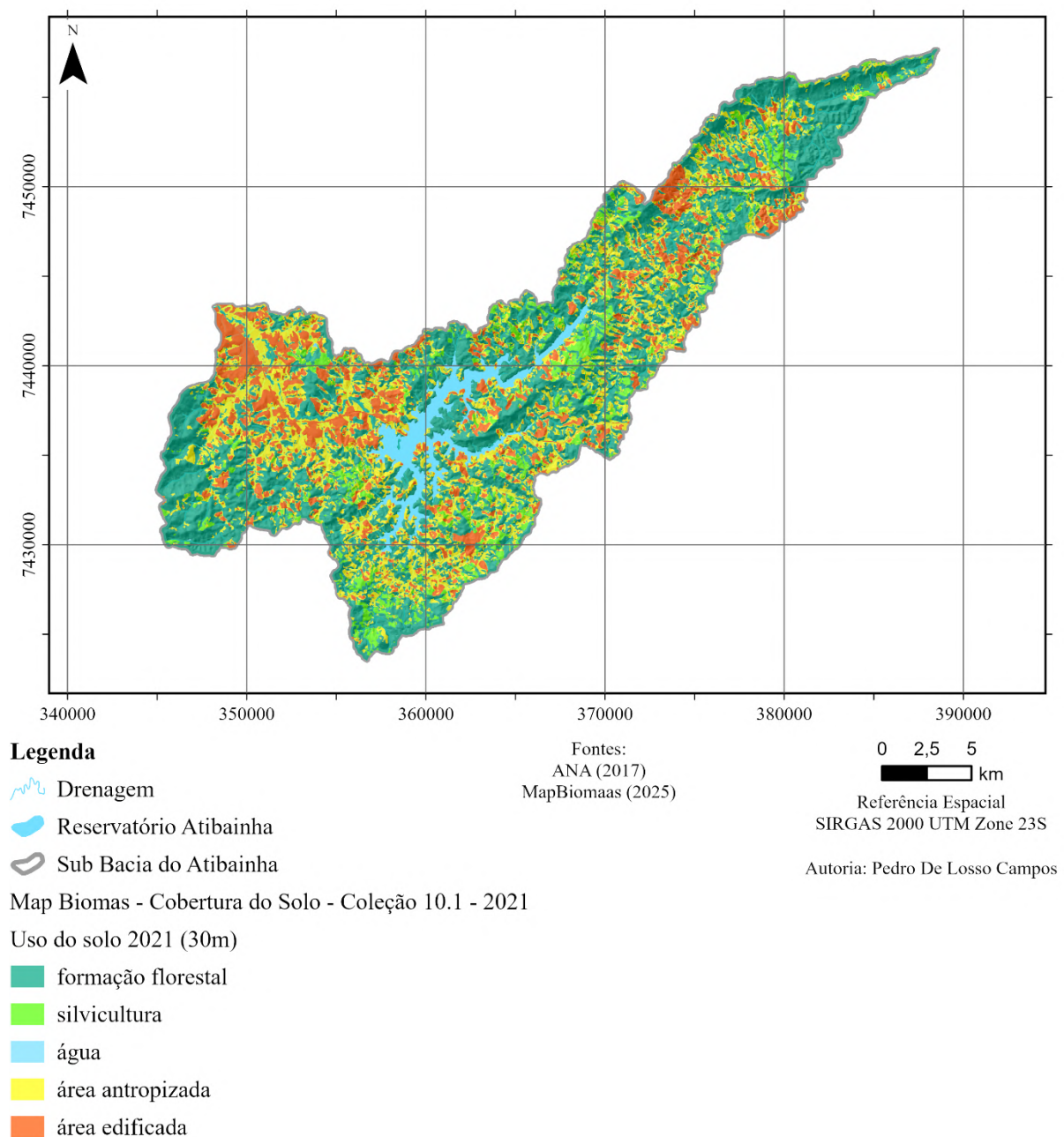
Em 2020, Figura 59, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (222,17 km²), seguida por áreas antropizadas (106,86 km²) e áreas edificadas (71,08 km²). A silvicultura ocupava 34,80 km², enquanto a classe água representava 20,27 km². O resultado indica estabilidade da cobertura florestal e continuidade da expansão da silvicultura, com manutenção das áreas antropizadas e edificadas como usos relevantes na paisagem.

Figura 59 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2020.



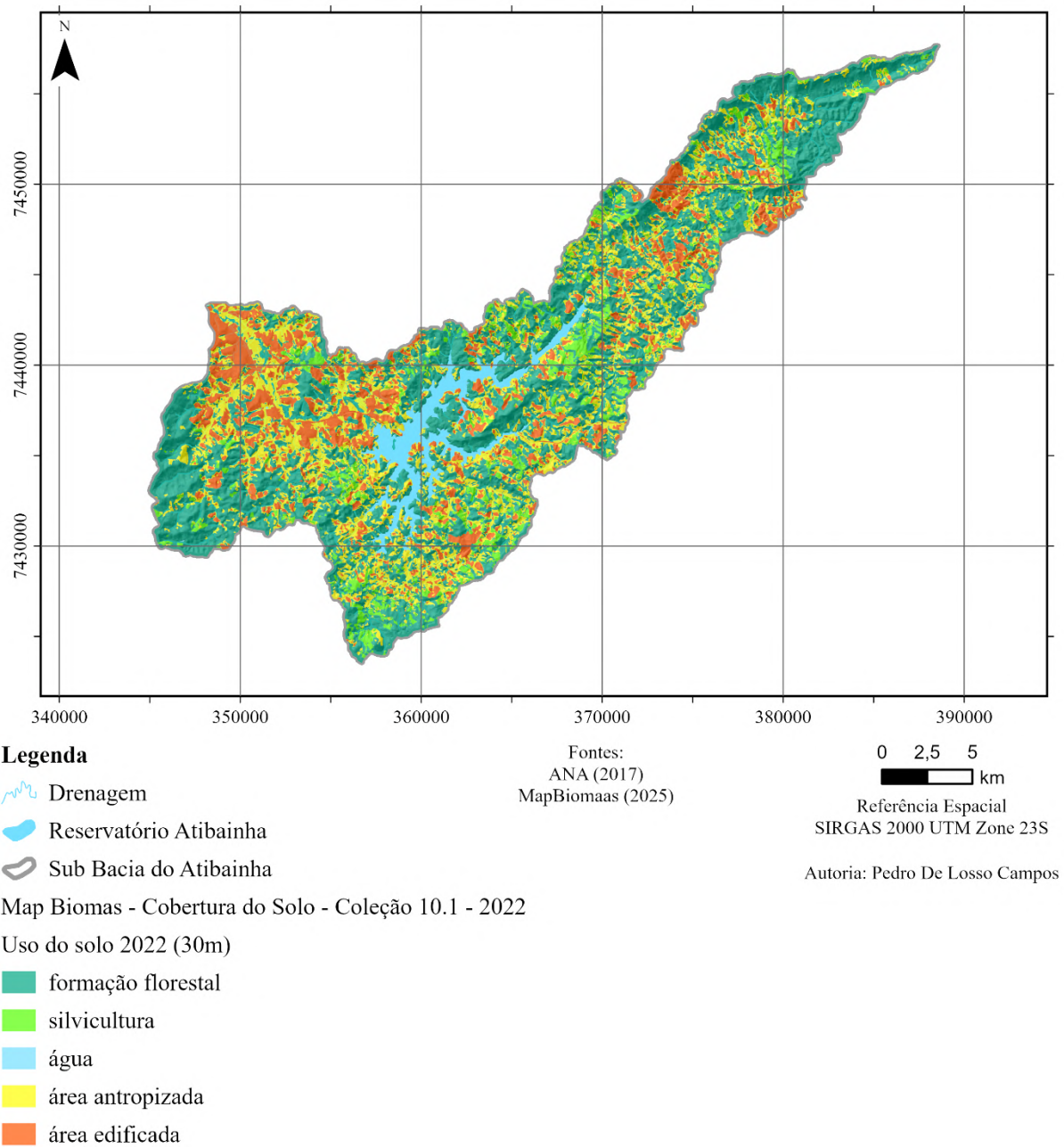
Em 2021, Figura 60, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (221,47 km²), seguida por áreas antropizadas (108,30 km²) e áreas edificadas (70,29 km²). A silvicultura ocupava 34,93 km², enquanto a classe água representava 20,21 km². O resultado indica estabilidade geral da paisagem em relação a 2020, com cobertura florestal dominante e silvicultura já consolidada como uso relevante.

Figura 60 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2021.



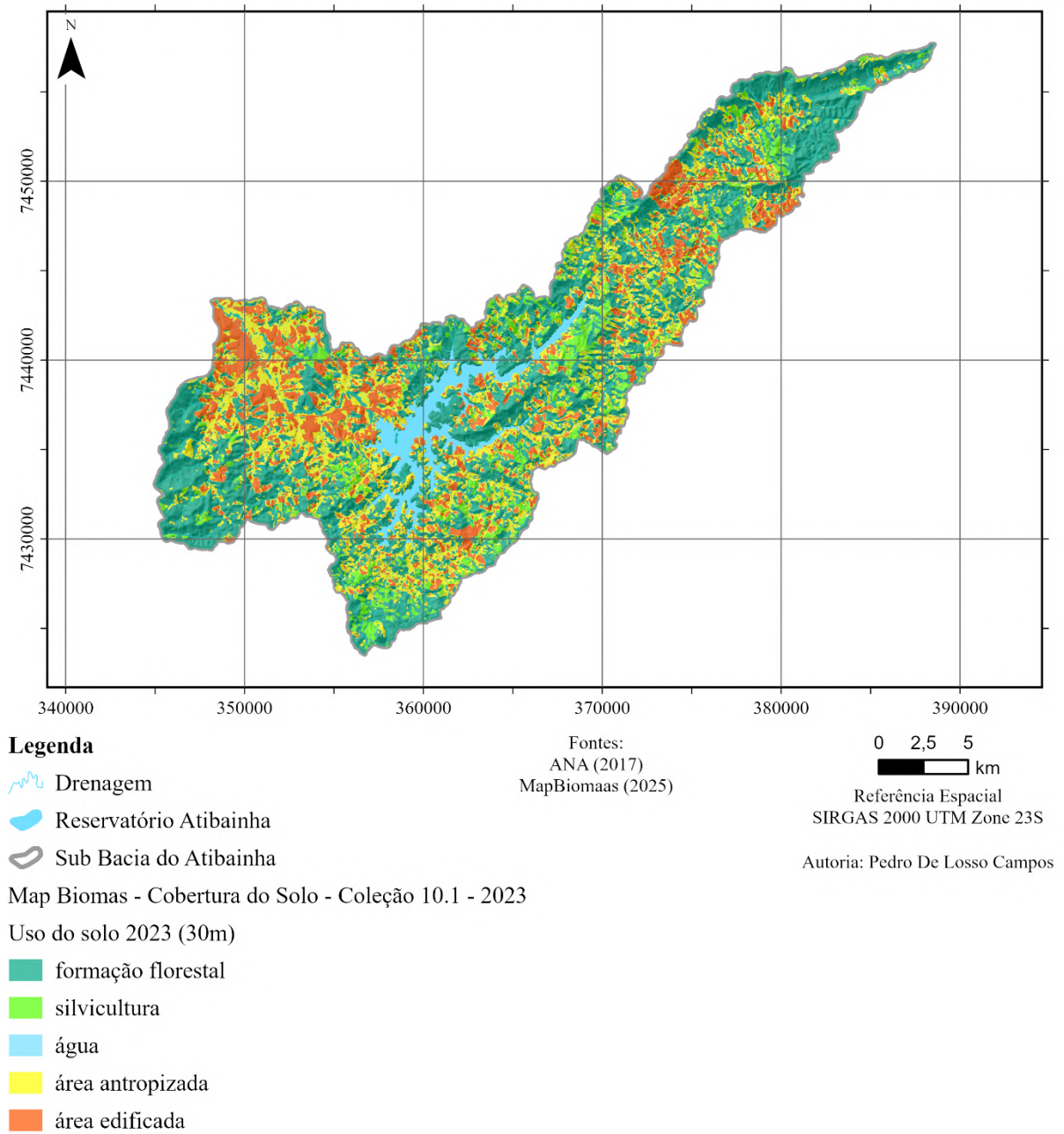
Em 2022, Figura 61, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (219,87 km²), seguida por áreas antropizadas (108,51 km²) e áreas edificadas (71,30 km²). A silvicultura ocupava 35,09 km², enquanto a classe água representava 20,43 km². O resultado indica leve redução da formação florestal em relação a 2021 e manutenção da silvicultura como uso consolidado na paisagem.

Figura 61 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2022.



Em 2023, Figura 62, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (219,13 km²), seguida por áreas antropizadas (109,54 km²) e áreas edificadas (70,84 km²). A silvicultura ocupava 35,14 km², enquanto a classe água representava 20,54 km². O resultado indica manutenção da estrutura geral observada nos anos anteriores, com cobertura florestal dominante, silvicultura consolidada e permanência de usos antrópicos expressivos no entorno do reservatório e em setores de vale.

Figura 62 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2023.



Em 2024, Figura 63, a sub-bacia do Atibainha manteve predomínio de formação florestal (217,57 km²), seguida por áreas antropizadas (110,75 km²) e áreas edificadas (70,49 km²). A silvicultura atingiu 35,97 km², enquanto a classe água ocupava 20,41 km². Em relação ao início da série, o resultado evidencia pequena redução da formação florestal e forte expansão da silvicultura, que passou a compor uma parcela relevante da paisagem em 2024.

A evolução total da área pode ser comparada pela Tabela 16.

Figura 63 - Uso e cobertura da terra na sub-bacia do Atibainha em 2024.

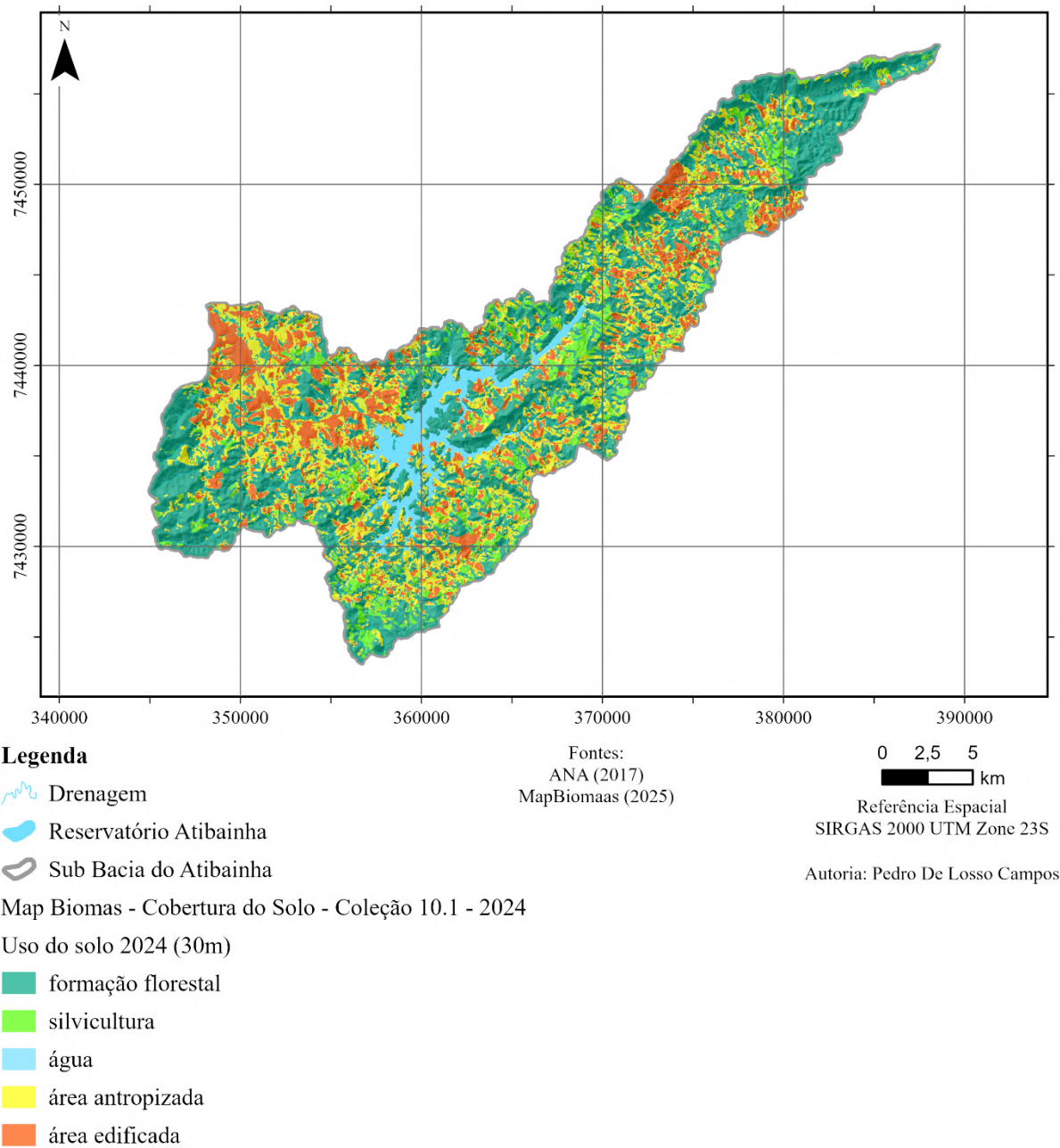
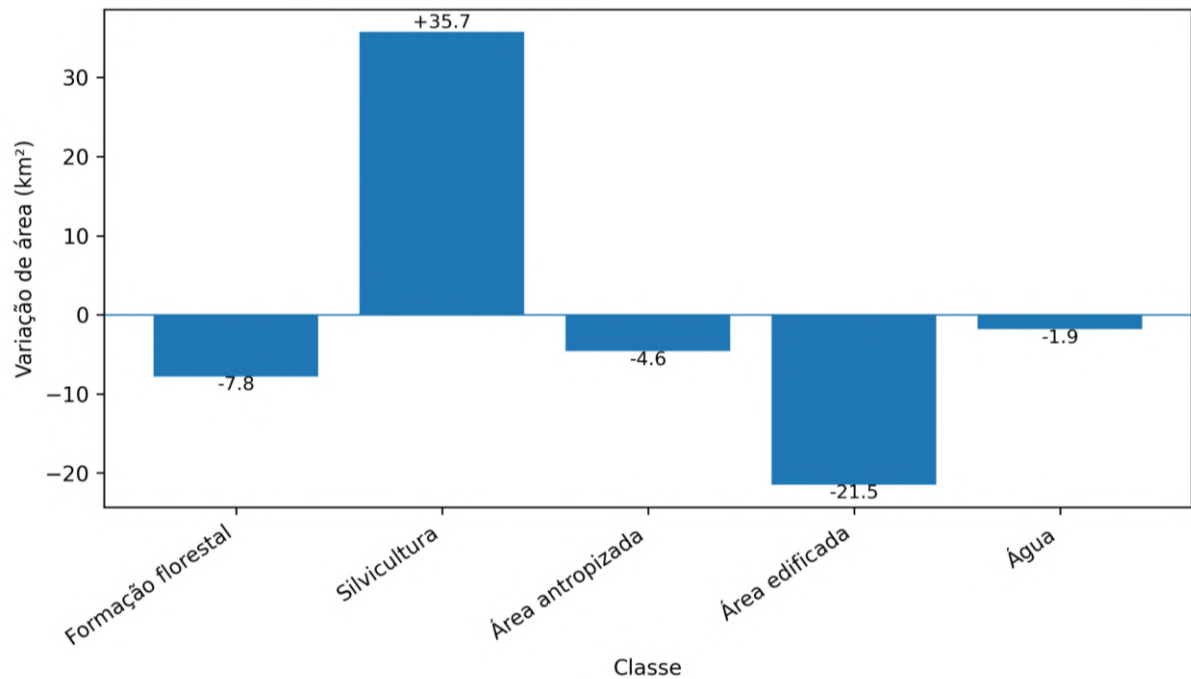


Tabela 16- Variação do uso e cobertura da terra – MapBiomias Coleção 10.1

Classe	1985 (km²)	1995 (km²)	2005 (km²)	2013 (km²)	2024 (km²)	Variação 1985– 2024
Formação florestal	225,36	232,07	219,78	218,79	217,57	-7,79
Silvicultura	0,23	2,88	12,52	24,23	35,97	+35,74
Área antropizada	115,37	113,22	112,34	117,96	110,75	-4,62
Área edificada	91,97	83,67	89,51	65,74	70,49	-21,48
Água	22,26	23,35	21,04	20,28	20,41	-1,85

Os resultados indicam que a sub-bacia manteve predomínio de formação florestal ao longo da série, embora com pequena redução entre 1985 e 2024. A principal alteração foi o avanço da silvicultura, que passou de 0,23 km² para 35,97 km², representando acréscimo de 35,74 km², Figura 64. Esse aumento é relevante porque a silvicultura pode alterar interceptação da chuva, evapotranspiração, infiltração e resposta hidrológica, dependendo do manejo, idade do plantio, espécie, densidade e posição no relevo.

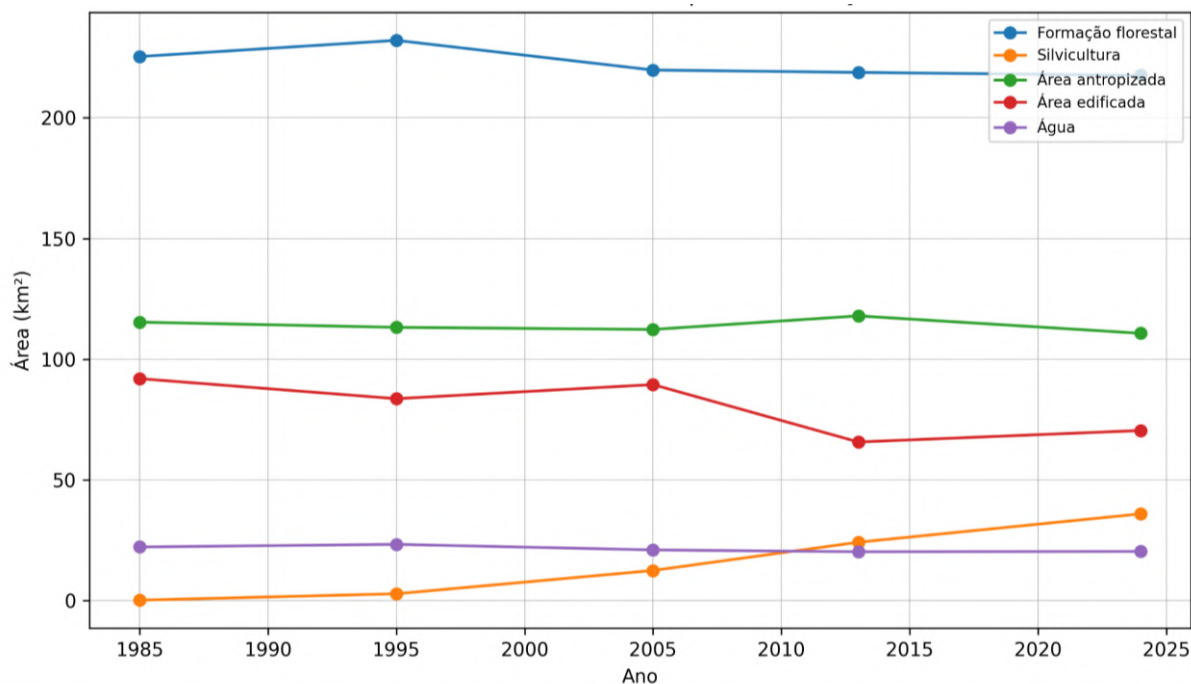
Figura 64 - Variação do uso e ocupação do solo entre 1985 e 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A classe água apresentou leve redução, de 22,26 km² para 20,41 km², Figura 65, variação que deve ser interpretada com cautela, pois pode refletir diferenças de nível do reservatório, sazonalidade, bordas de corpos hídricos, pixels mistos e critérios de classificação espectral. A permanência de áreas antropizadas e edificadas indica pressões territoriais contínuas sobre a sub-bacia, especialmente quando essas classes se localizam em APPs, áreas declivosas, setores de TWI elevado ou proximidades da drenagem.

Figura 65 - Variação da cobertura pelo tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

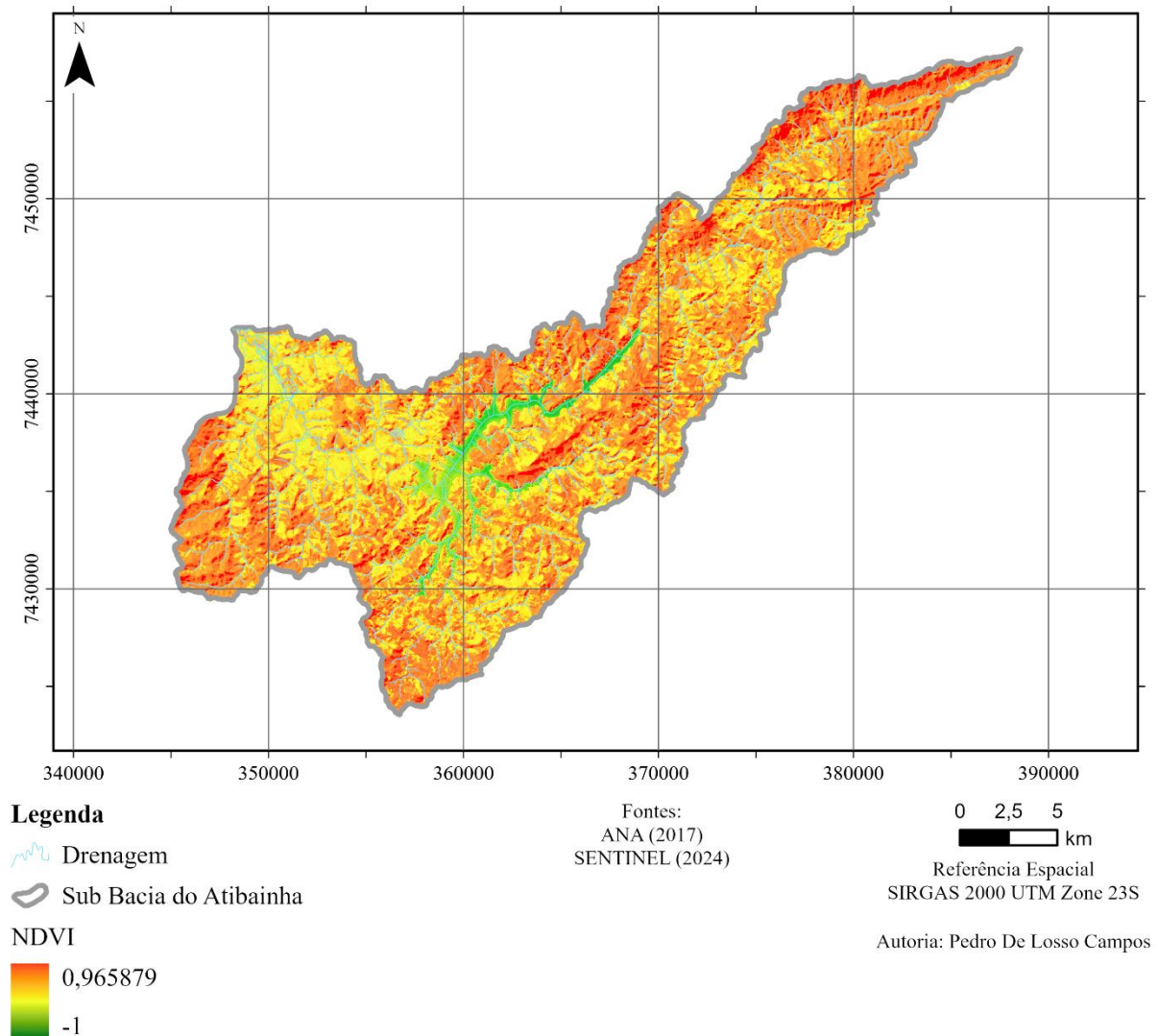
6.9. Índices espectrais: NDVI, NDWI e NDTI

Os índices espectrais foram utilizados como apoio à interpretação do uso do solo, da vegetação, da água superficial e da turbidez relativa. Foram considerados os índices NDVI, NDWI e NDTI.

A Figura 66 representa o índice NDVI obtido evidenciando a existência de vegetação vigorosa na área de estudo com valores próximos de 1 reforçando a importância da cobertura vegetal para a proteção do solo, interceptação da chuva e regulação do escoamento superficial, os valores intermediários ao redor de 0 (zero) evidenciam as áreas antrópicas e edificações e os valores próximos de 1 caracterizam água, em concordância com as variações esperadas para os valores do índice que são:

- -1,0 a -0,1: indicam superfícies sem vegetação;
- 0 a 0,1: solos nus, áreas rochosas ou desertos, com baixa ou nenhuma atividade fotossintética;
- 0,2 a 0,5: vegetação esparsa ou estressada;
- 0,6 a 1,0: vegetação densa e saudável.

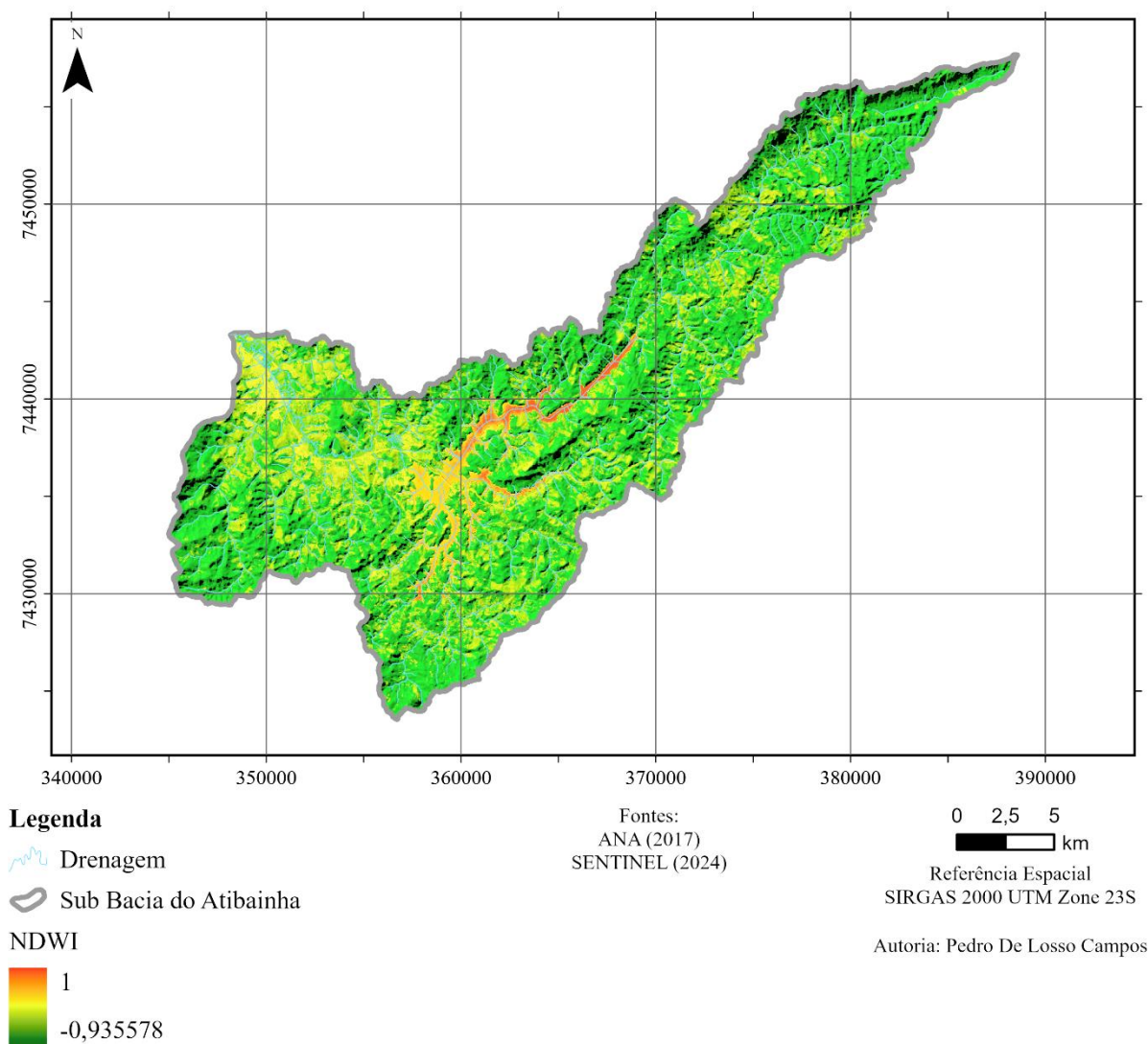
Figura 66 – NDVI.



A Figura 67 ilustra o índice NDWI que tem a característica de destacar as superfícies de água, indicando coerência na detecção de água superficial associada ao reservatório e a corpos hídricos, da área de estudo e que posteriormente serviu para recortar o índice de turbidez da água, o NDTI. Os intervalos do NDWI podem ser caracterizados como:

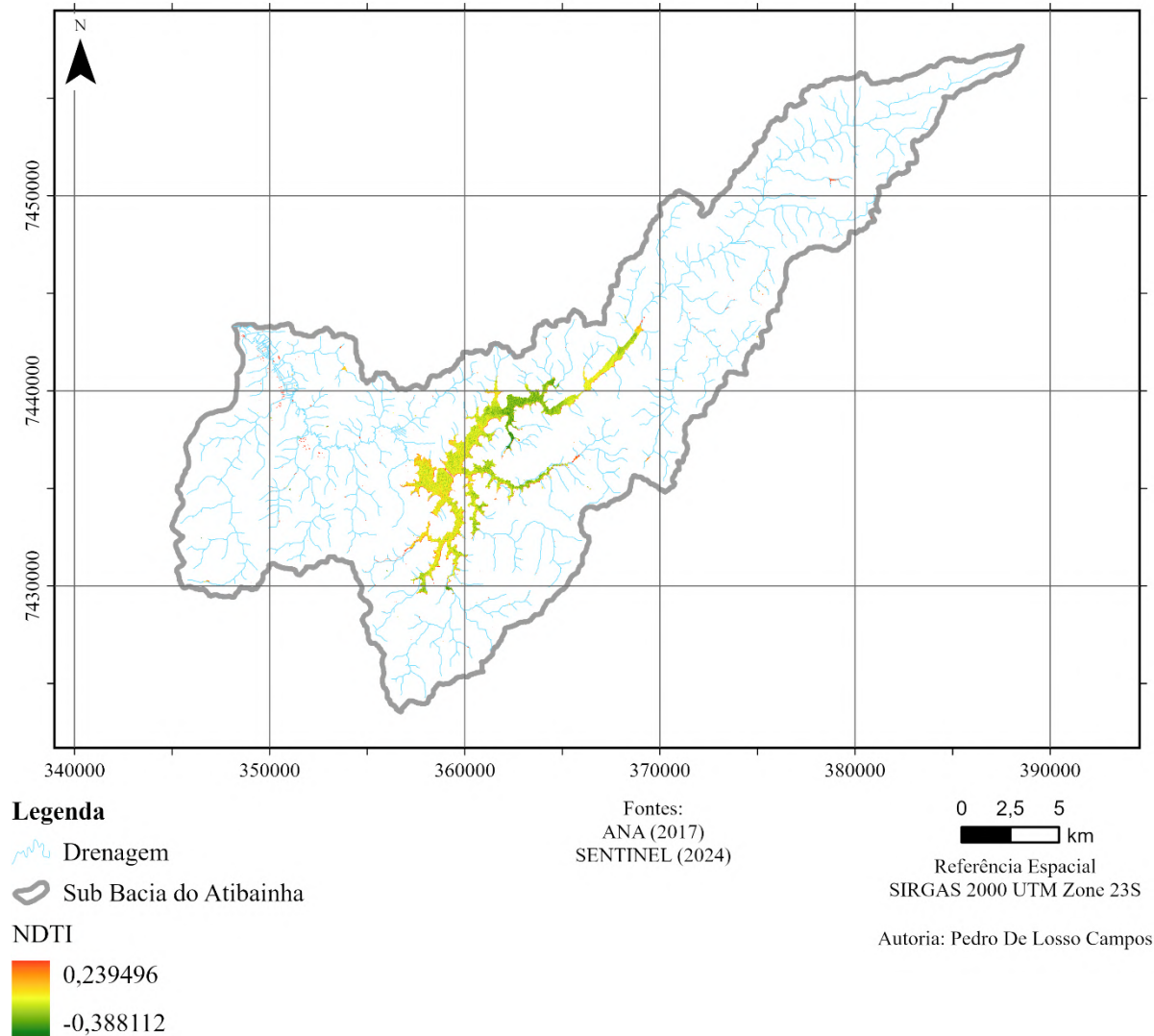
- 0,2 – 1: superfície de água,
- 0,0 – 0,2: áreas húmidas
- -0,3 – 0: seca moderada, superfícies sem água,
- -1 – -0,3: superfícies sem água.

Figura 67 – NDWI.



O NDTI (Figura 68) apresentou diferenças mais expressivas, o que pode estar relacionado à data da imagem, ocorrência recente de chuva, entrada de sedimentos, variação do nível do reservatório, bordas rasas, sombras. Ele mostra que o reservatório possui um trecho mais a jusante com menor turbidez, aumentando em direção ao barramento. Por isso, o NDTI deve ser interpretado em conjunto com os dados de qualidade da água, especialmente turbidez, sólidos, fósforo total, ferro, manganês e cor verdadeira.

Figura 68 – NDTI.



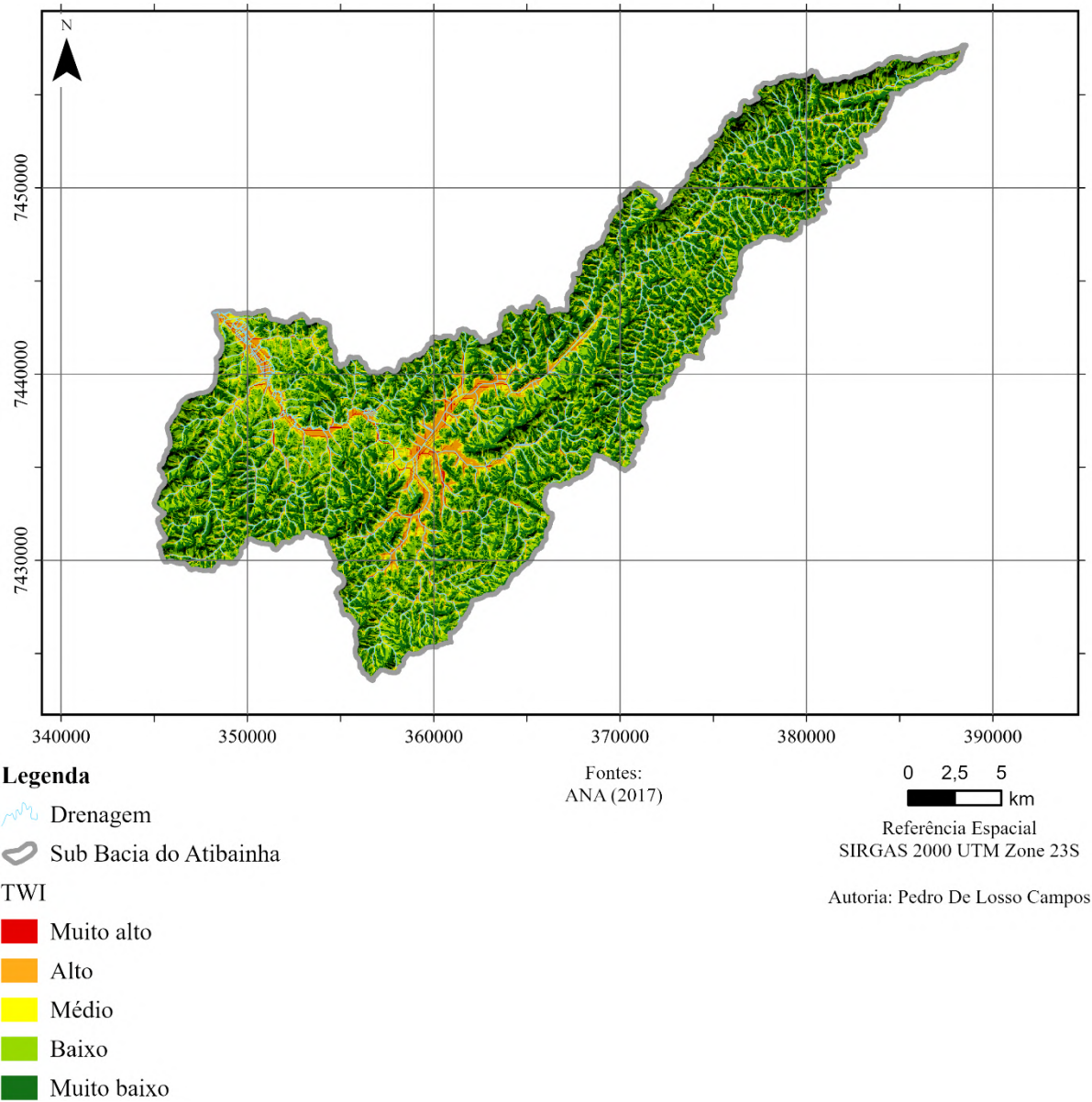
6.10. Declividade, TWI, curvatura e vulnerabilidade hidrológica

A vulnerabilidade hidrológica foi avaliada pela integração entre declividade, TWI, curvatura, uso do solo, APPs.

A Figura 69 refere-se ao índice TWI indicando predomínio das classes muito baixo e baixo, que somam aproximadamente 355,75 km² (79,13% da sub-bacia), demonstrando que grande parte da área apresenta menor tendência ao acúmulo superficial de água. As classes alto

e muito alto totalizam cerca de 38,95 km² (8,66%) e concentram-se principalmente ao longo dos vales, drenagens e margens do reservatório, indicando áreas de maior convergência de fluxo, umidade topográfica e potencial conexão hidrológica. Esses setores são mais sensíveis à ocupação antrópica, erosão e transporte de sedimentos.

Figura 69 - Índice TWI.



As classes de TWI alto e muito alto foram somadas para representar áreas de maior tendência à concentração de umidade (Tabela 17):

Tabela 17- Distribuição das classes de TWI

Classe de TWI	Área (km²)	Percentual (%)
Muito baixo	190,40	42,35
Baixo	165,35	36,78
Médio	54,86	12,20
Alto	31,13	6,92
Muito alto	7,82	1,74
Alto + muito alto	38,95	8,66

O cruzamento entre TWI alto/muito alto e uso do solo, Figura 70, identificou aproximadamente 15,27 km² de usos que exigem maior atenção, incluindo 11,02 km² de área antropizada, 3,85 km² de área edificada e 0,41 km² de silvicultura. Esses setores representam áreas naturalmente favoráveis à concentração de fluxo e umidade, mas com presença de usos que podem ampliar escoamento superficial, erosão, aporte de sedimentos e alteração da qualidade da água.

A curvatura do terreno (Figura 10) foi classificada em côncava, retilínea e convexa. As formas côncavas indicam setores de concentração de fluxo, enquanto as convexas estão associadas à dispersão do escoamento (Tabela 18).

A integração entre declividade superior a 20%, TWI alto/muito alto e curvatura côncava permite identificar setores prioritários para análise de vulnerabilidade. Áreas antropizadas, edificadas ou manejadas nesses compartimentos apresentam maior potencial de geração de escoamento superficial, erosão, transporte de sedimentos e alteração da qualidade da água.

A Figura 71 destaca áreas em que a ocupação antrópica coincide com setores de maior convergência natural do escoamento. As classes de maior atenção correspondem às áreas edificadas, áreas antropizadas e silvicultura sobre formas côncavas, pois esses compartimentos tendem a concentrar água, sedimentos e fluxos superficiais. A presença desses usos em relevo côncavo aumenta a vulnerabilidade hidrológica, especialmente quando associada à

proximidade da drenagem, APPs e declividades elevadas, podendo favorecer erosão, carreamento de sedimentos e alteração da qualidade da água.

Figura 70 - Cruzamento do Índice TWI com Uso e ocupação do Solo 2024.

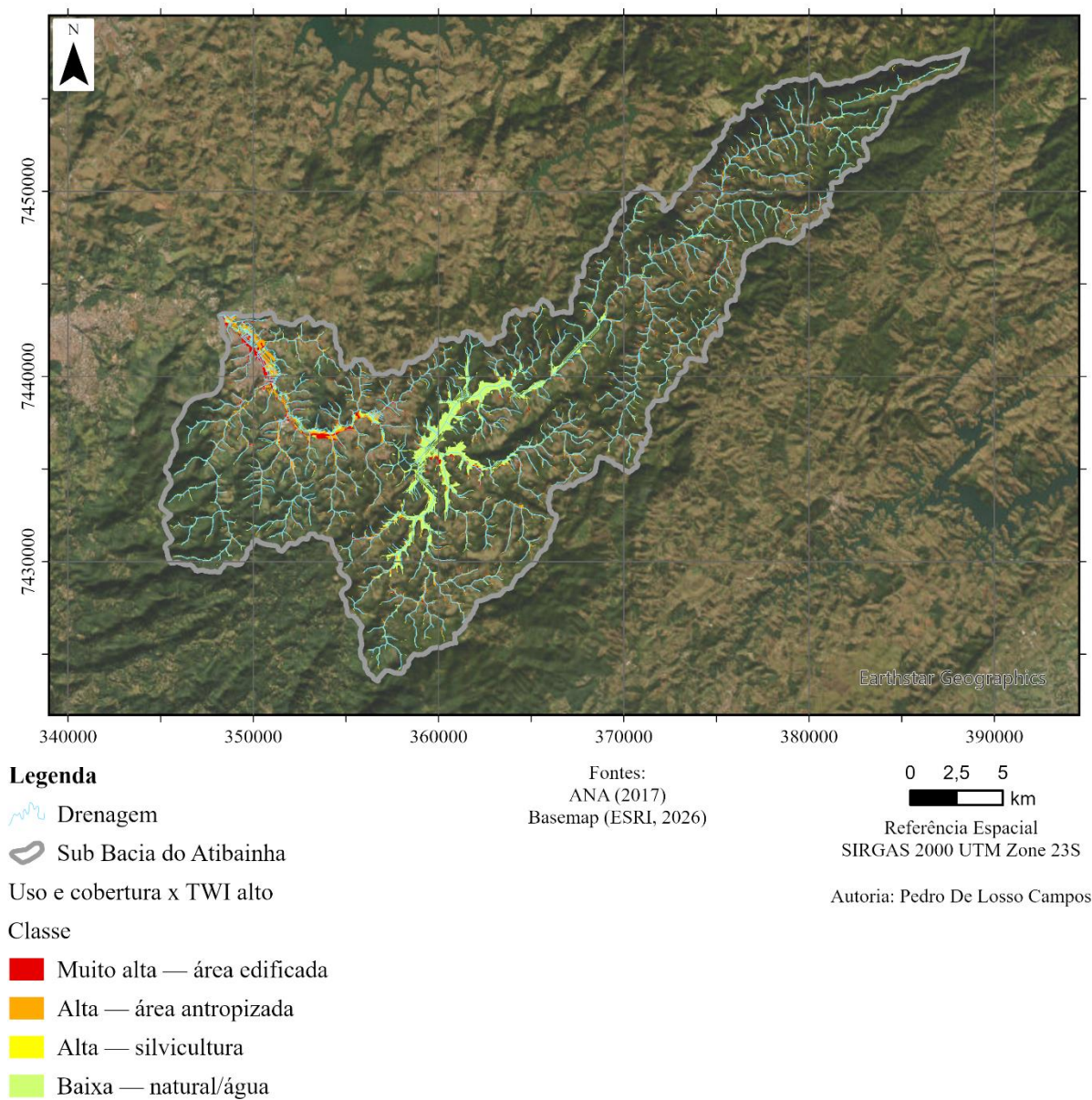


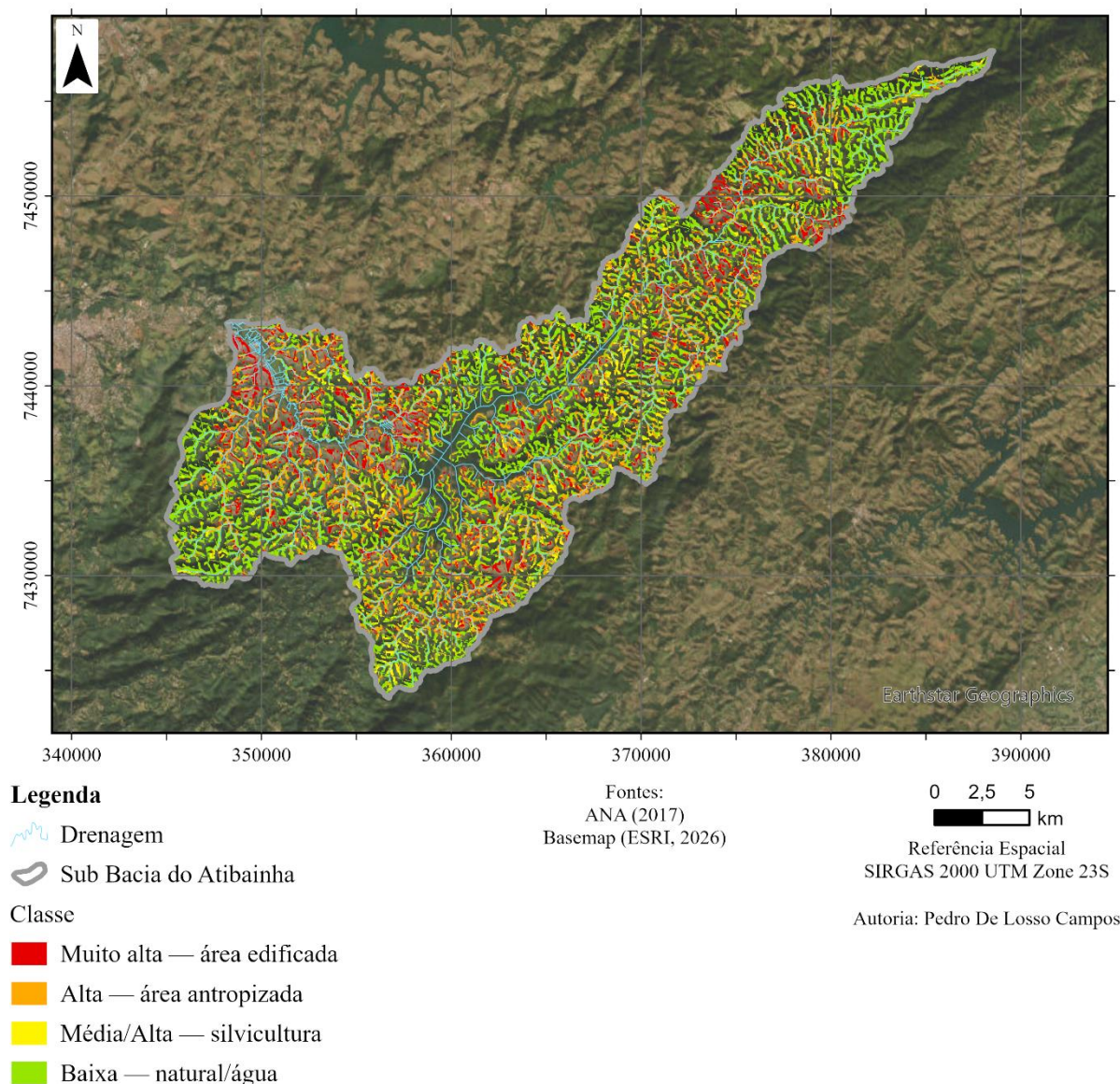
Tabela 18- Distribuição das classes de curvatura

Classe de curvatura	Área (km²)	Percentual (%)
Côncava	192,32	42,37
Retilínea	80,52	17,74

Convexa	181,05	39,89
---------	--------	-------

O mapa apresentado na Figura 73 classifica a vulnerabilidade hidrológica da sub-bacia do Atibainha a partir da integração entre uso e cobertura da terra, rede de drenagem e classes de sensibilidade ambiental. As áreas classificadas como baixa vulnerabilidade correspondem principalmente a setores naturais, vegetados ou associados a corpos d'água, com maior potencial de proteção do solo e regulação do escoamento superficial. As classes média/alta e alta indicam, respectivamente, áreas de silvicultura e áreas antropizadas, onde a alteração da cobertura natural pode aumentar a suscetibilidade a escoamento concentrado, erosão e transporte de sedimentos. Já a classe muito alta representa áreas edificadas ou mais intensamente ocupadas, especialmente relevantes quando próximas à drenagem, por apresentarem maior potencial de impermeabilização, redução da infiltração e pressão sobre os recursos hídricos.

Figura 71 - Cruzamento entre Declividade, TWI, curvatura e vulnerabilidade hidrológica



6.11. Exposição solar e orientação das vertentes

A orientação das vertentes foi utilizada como variável complementar para avaliar a exposição solar e a tendência relativa de conservação ou perda de umidade superficial. No hemisfério sul, vertentes voltadas para Norte, Nordeste e Noroeste tendem a receber maior radiação solar direta, favorecendo maior evaporação potencial e secagem superficial. Vertentes voltadas para Sul, Sudeste e Sudoeste tendem a receber menor radiação direta, favorecendo maior conservação de umidade relativa (Tabela 19).

Tabela 19- Agrupamento da exposição solar das vertentes

Grupo de exposição	Cardinalidades agrupadas	Área (km²)	Área (ha)	Percentual (%)	Peso de vulnerabilidade
Maior insolação	Norte, Nordeste e Noroeste	176,20	17.620,3	39,19	4
Intermediária	Leste e Oeste	117,55	11.754,6	26,15	3
Menor insolação	Sudeste, Sul e Sudoeste	155,81	15.580,8	34,66	2
Total	—	449,56	44.955,8	100,00	—

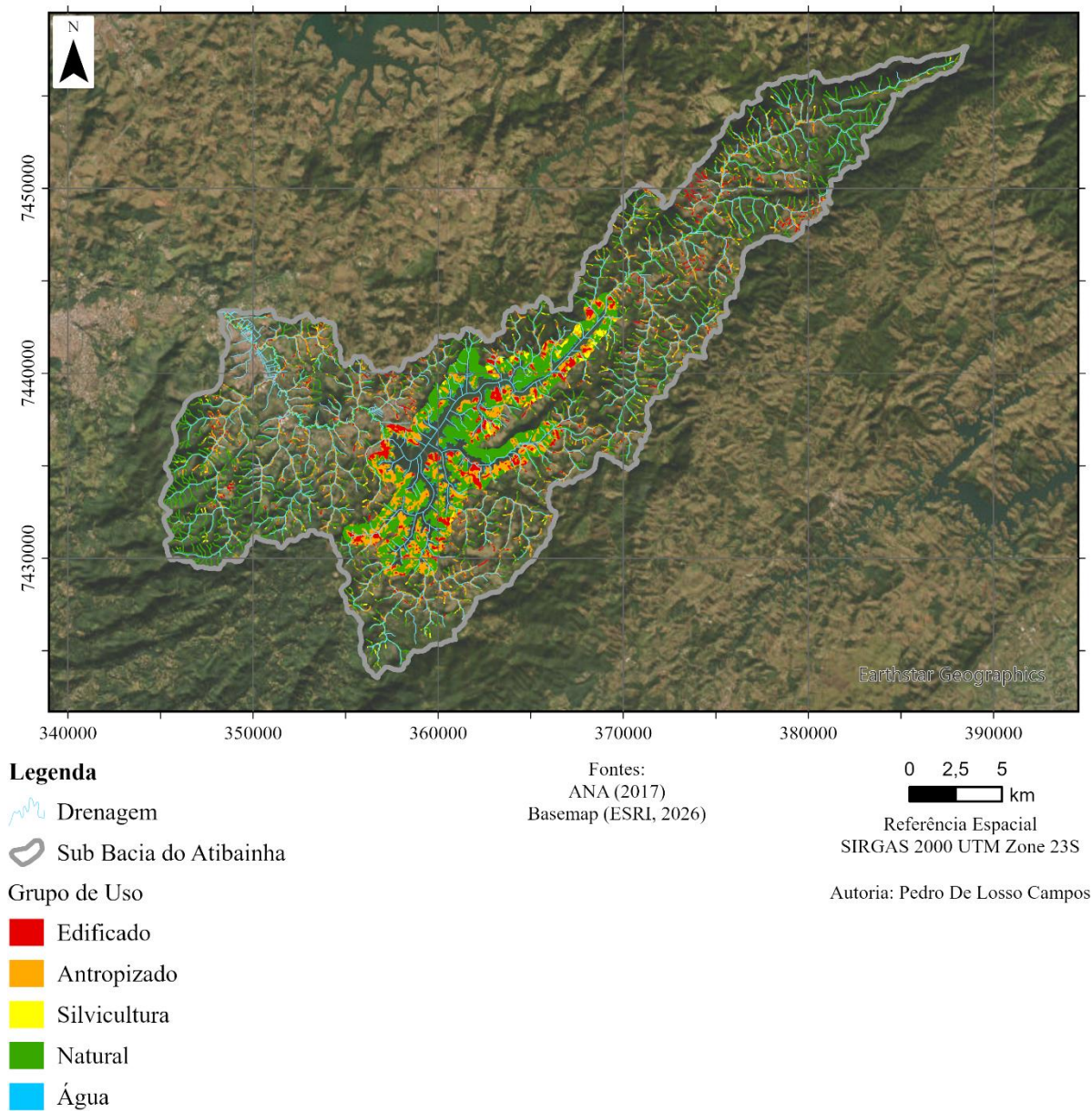
A análise indica que 39,19% da sub-bacia está voltada para direções de maior insolação relativa. Essas áreas tendem a apresentar maior radiação direta, maior evaporação potencial e maior secagem superficial, especialmente quando associadas a solo exposto, baixa cobertura vegetal ou uso antrópico. As vertentes de menor insolação, que representam 34,66% da área, podem conservar mais umidade relativa, sobretudo em áreas com cobertura vegetal e fundos de vale. Assim, a exposição solar contribui para refinar a análise de vulnerabilidade hidrológica, mas deve ser interpretada em conjunto com declividade, TWI, curvatura e uso do solo.

6.12. Conflitos em APPs e áreas sensíveis

A análise de conflitos em Áreas de Preservação Permanente considerou a sobreposição entre APPs de drenagem, reservatório, nascentes e áreas sensíveis com as classes de uso e cobertura da terra (

Figura 72). As classes consideradas de maior conflito foram áreas edificadas, áreas antropizadas e silvicultura, especialmente quando localizadas próximas à drenagem.

Figura 72 - Área de Preservação Permanente *versus* Uso e Ocupação do Solo.



O cruzamento entre uso e cobertura da terra e APPs indica que parte significativa das áreas protegidas mantém cobertura natural, com 66,12 km² de formação florestal e 1,55 km² de água. Entretanto, foram identificados aproximadamente 47,23 km² de usos conflitantes em APPs, correspondentes a 41,10% da área analisada, com destaque para áreas antropizadas (32,24 km²), áreas edificadas (11,93 km²) e silvicultura (3,06 km²) (Tabela 20).

Tabela 20- Conflito entre uso e ocupação do solo *versus* APP.

Classe em APP	Área (km²)	Interpretação
Formação florestal	66,12	Menor conflito; proteção hidrológica
Água	1,55	Área hídrica associada à APP
Área antropizada	32,24	Conflito potencial
Área edificada	11,93	Conflito elevado
Silvicultura	3,06	Conflito condicionado ao manejo
Total de usos conflitantes	47,23	41,10% da APP analisada

Os resultados indicam que parte significativa das APPs apresenta uso conflitante, sobretudo áreas antropizadas e edificadas. Essa condição pode comprometer a função ambiental das APPs, reduzir a proteção das margens, ampliar erosão e assoreamento, aumentar o aporte de sedimentos e poluentes e afetar a qualidade da água.

6.13. Síntese integrada da disponibilidade e demanda hídrica

A síntese integrada demonstra que a disponibilidade hídrica da sub-bacia do Atibainha é condicionada por cinco grupos principais de fatores: regime pluviométrico, resposta fluviométrica, operação do reservatório, uso e cobertura da terra e qualidade da água. Nenhuma dessas variáveis, isoladamente, explica a segurança hídrica da área de estudo.

Do ponto de vista pluviométrico, a sub-bacia está inserida em região com médias anuais expressivas, geralmente superiores a 1400 mm nos postos históricos analisados. Entretanto, a variabilidade interanual e a ocorrência de anos secos demonstram que o volume de chuva não se converte automaticamente em disponibilidade hídrica, especialmente em um sistema influenciado por reservatório, relevo declivoso, solos, cobertura vegetal e demandas a jusante.

Do ponto de vista fluviométrico, a Q95 histórica do posto Mascate foi de 0,498 m³/s, enquanto a Q95 do Atibainha Montante foi de 1,170 m³/s. Nos dados operacionais, a Q95 da vazão natural foi de 0,2914 m³/s, e a Q95 da vazão jusante foi de apenas 0,0500 m³/s. Essa diferença evidencia a influência da operação do reservatório e reforça a necessidade de

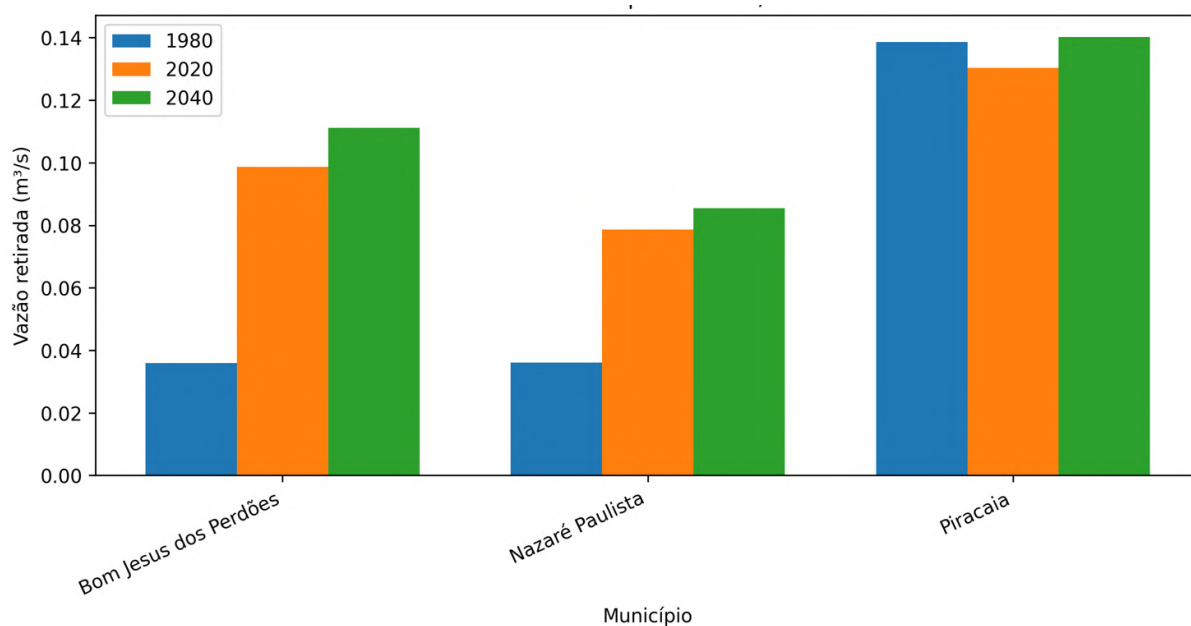
interpretar as vazões de referência conforme a fonte, o período, a posição hidrológica e a variável analisada.

A demanda hídrica municipal dos municípios associados à sub-bacia apresentou aumento entre 1980, 2020 e 2040 (Tabela 21 e Figura 73).

Tabela 21- Uso da água por município associado à sub-bacia

Município	1980	2020 atual	2040 previsto	Variação 1980–2020	Variação 2020–2040
Bom Jesus dos Perdões	0,036 m³/s	0,099 m³/s	0,111 m³/s	+174,05%	+12,67%
Nazaré Paulista	0,036 m³/s	0,079 m³/s	0,085 m³/s	+117,75%	+8,57%
Piracaia	0,139 m³/s	0,130 m³/s	0,140 m³/s	-5,93%	+7,54%
Total	0,211 m³/s	0,308 m³/s	0,337 m³/s	+46,03%	+9,45%

Figura 73 - Vazão retirada municipal 1980, 2020 e 2040 por município.



Fontes: ANA, Agência Nacional das Águas e elaborado pelo autor.

A demanda total passou de 0,211 m³/s em 1980 para 0,308 m³/s em 2020, com previsão de 0,337 m³/s em 2040. Esse crescimento reforça a necessidade de relacionar demanda municipal com disponibilidade, outorgas, uso do solo, APPs, qualidade da água e conservação dos mananciais (Tabela 22).

Tabela 22- Comparação entre demanda municipal e vazões de referência

Referência	Vazão (m³/s)	Demanda 2020 / referência	Demanda 2040 / referência
Q95 Mascate — DAEE	0,498	61,8%	67,6%
Q95 Atibainha Montante — DAEE	1,170	26,3%	28,8%
Q95 vazão natural — operacional	0,2914	105,6%	115,6%
Q95 vazão afluyente — operacional	9,0595	3,4%	3,7%

Essa comparação deve ser interpretada com cautela, pois a demanda municipal não corresponde exatamente à demanda dentro do polígono da sub-bacia, e as vazões de referência pertencem a bases, períodos e conceitos distintos. Ainda assim, os resultados evidenciam que, em cenários de baixa vazão, a pressão da demanda pode se tornar significativa, especialmente quando comparada a vazões naturais ou de permanência conservadora.

O balanço hídrico quantitativo por microbacia para 2040 indica predomínio de áreas com baixo comprometimento hídrico, mas também evidencia setores críticos. As áreas de baixo comprometimento ocupam aproximadamente 286,03 km²; as de comprometimento mediano, 57,41 km²; e as de comprometimento muito alto, 102,34 km² (Tabela 23).

Tabela 23- Comprometimento hídrico por microbacia em 2040

Classe de comprometimento	Área (km²)	Percentual (%)
Baixo	286,03	64,16
Mediano	57,41	12,88
Muito alto	102,34	22,96

6.14. Mapa final de vulnerabilidade hidrológica/ambiental

A partir da integração das variáveis fisiográficas, ambientais e de uso da terra, foi elaborado o mapa final de vulnerabilidade hidrológica/ambiental da sub-bacia do Atibainha, reclassificado em índice ordinal de 1 a 5. O objetivo foi sintetizar, em uma única superfície espacial, os setores com maior ou menor sensibilidade à geração de escoamento superficial, erosão, transporte de sedimentos, alteração da qualidade da água e pressão sobre áreas hidrologicamente sensíveis.

O índice final,

Figura 74, foi estruturado por meio de reclassificação temática e sobreposição ponderada. Cada variável foi convertida para uma escala comum de 1 a 5, em que 1 representa menor vulnerabilidade e 5 representa maior vulnerabilidade. As variáveis consideradas incluíram uso e cobertura da terra, declividade, TWI, curvatura, APPs, proximidade da drenagem e NDVI (Tabela 24 e Tabela 25).

Figura 74 - Índice final de vulnerabilidade.

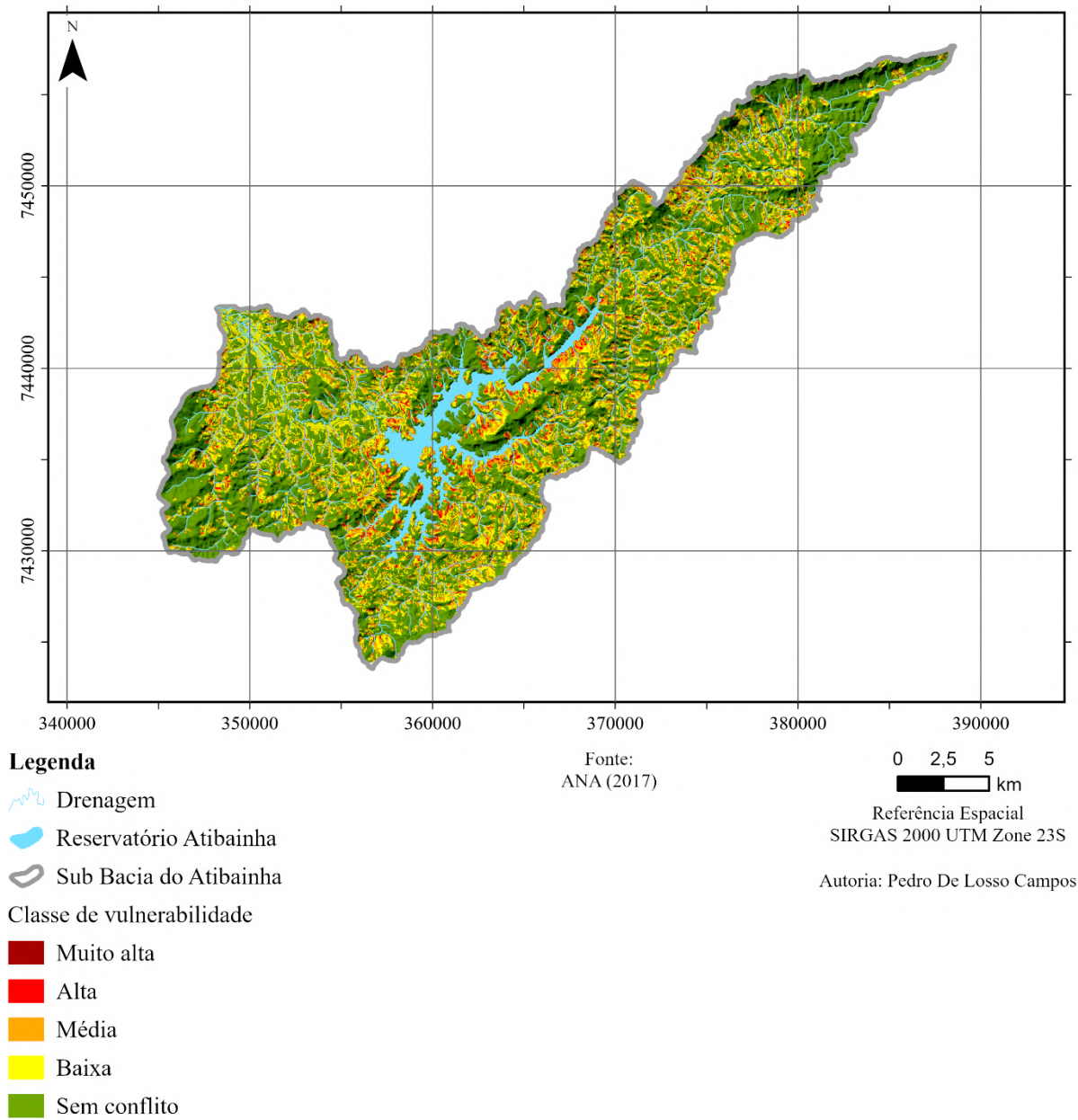


Tabela 24- Classes finais do índice de vulnerabilidade hidrológica/ambiental

Índice final	Classe	Interpretação
1	Muito baixa	Áreas com maior proteção hidrológica, geralmente associadas à vegetação, menor pressão antrópica e menor conectividade com a drenagem.
2	Baixa	Áreas com baixa pressão ambiental, mas com algum fator físico ou territorial que exige atenção localizada.
3	Média	Áreas de transição, com combinação moderada entre uso antrópico, declividade, TWI, curvatura ou proximidade da drenagem.
4	Alta	Áreas sensíveis, associadas a uso antrópico, declividade elevada, proximidade da drenagem, APPs ou formas côncavas.
5	Muito alta	Áreas críticas, onde há sobreposição de uso antrópico ou edificado com fatores físicos de alta sensibilidade hidrológica.

Tabela 25- Síntese espacial da vulnerabilidade hidrológica/ambiental

Classe agregada	Área aproximada (km ²)	Interpretação
Sem conflito ou muito baixa vulnerabilidade	272,76	Áreas com maior proteção ambiental ou baixa pressão direta
Baixa vulnerabilidade	102,22	Áreas com baixo conflito, mas que exigem atenção localizada
Média vulnerabilidade	62,40	Áreas de transição e sensibilidade intermediária
Alta + muito alta vulnerabilidade	11,73	Áreas críticas prioritárias para monitoramento e recuperação

A interpretação do mapa final indica que a vulnerabilidade hidrológica da sub-bacia do Atibainha resulta da combinação entre fatores físicos e antrópicos, e não da influência isolada de uma única variável. Áreas declivosas, por exemplo, não são necessariamente críticas quando mantêm cobertura florestal conservada, pois a vegetação protege o solo, reduz o escoamento superficial, favorece a infiltração e limita processos erosivos. Em contrapartida, setores

antropizados ou edificados sobre declividades elevadas, formas côncavas, TWI alto, proximidade da drenagem ou inserção em APPs tendem a apresentar maior vulnerabilidade.

As classes de muito baixa e baixa vulnerabilidade correspondem a áreas com maior proteção ambiental, geralmente associadas à cobertura vegetal, menor exposição do solo e menor pressão direta sobre a rede hidrográfica. A classe média representa áreas de transição, nas quais fatores físicos e usos territoriais se combinam de forma intermediária. Já as classes alta e muito alta indicam os setores mais sensíveis da sub-bacia, onde a pressão antrópica coincide com condições físicas favoráveis à concentração do escoamento, erosão, carreamento de sedimentos e aporte de poluentes aos cursos d'água.

Em resumo, o índice final de vulnerabilidade funciona como uma síntese espacial das condições hidrológicas e ambientais da sub-bacia do Atibainha. Sua principal contribuição é diferenciar áreas naturalmente frágeis, porém protegidas pela vegetação, de áreas efetivamente críticas, onde a fragilidade física se sobrepõe ao uso antrópico. Essa distinção permite indicar setores prioritários para monitoramento, manejo territorial, recomposição de APPs, controle de erosão e proteção dos cursos d'água que contribuem para a disponibilidade hídrica das Bacias PCJ.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a disponibilidade e a demanda hídrica na UGRHI-05, com foco na sub-bacia do Atibainha, por meio da integração entre geotecnologias, séries históricas hidrológicas, dados telemétricos, dados operacionais do reservatório, qualidade da água, uso e cobertura da terra e variáveis fisiográficas. A abordagem adotada permitiu compreender a sub-bacia como uma unidade hidroterritorial estratégica das Bacias PCJ, cuja disponibilidade hídrica não depende de um único fator isolado, mas da interação entre precipitação, vazão, relevo, cobertura vegetal, uso do solo, qualidade da água, demanda hídrica e operação do Sistema Cantareira.

A caracterização fisiográfica demonstrou que a sub-bacia do Atibainha apresenta relevo fortemente ondulado a montanhoso, elevada amplitude altimétrica, forte presença de áreas declivosas, rede de drenagem organizada em direção ao reservatório e setores hidrológicamente sensíveis associados a vales, APPs, áreas côncavas e zonas de maior convergência de fluxo. A

presença de mais da metade da área com declividade superior a 20% evidencia maior potencial de escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos, especialmente quando esses setores coincidem com áreas antropizadas, edificadas, silvicultura, baixa cobertura vegetal ou proximidade da drenagem. Dessa forma, a conservação das vertentes, margens, nascentes, APPs e áreas vegetadas mostrou-se essencial para a manutenção da disponibilidade hídrica e da qualidade ambiental da sub-bacia.

As análises pluviométricas e fluviométricas indicaram que a área de estudo está inserida em região de precipitação expressiva, mas sujeita à variabilidade temporal, à ocorrência de períodos secos e à influência da operação hidráulica do reservatório. A comparação entre chuva, vazão, nível e armazenamento demonstrou que não é esperado obter, nesse tipo de sistema, um coeficiente de determinação próximo de 1 para todas as variáveis analisadas. A dificuldade de obtenção de R^2 elevado ocorre porque a resposta hidrológica do Atibainha é controlada por múltiplos fatores simultâneos, incluindo chuva antecedente, umidade do solo, armazenamento prévio, vazões afluentes, defluências, transferências entre reservatórios, regras operacionais, liberação para jusante e efeitos de regularização do Sistema Cantareira. Assim, os valores baixos de R^2 , especialmente para o nível do reservatório e para a vazão jusante, não invalidam a análise, mas evidenciam que a chuva isolada não explica integralmente a dinâmica hídrica do sistema.

Nesse sentido, a vazão natural apresentou a relação mais direta com a precipitação, enquanto o nível do reservatório e a vazão liberada a jusante refletiram mais fortemente a influência operacional. Essa condição confirma que a sub-bacia do Atibainha não pode ser interpretada como um sistema exclusivamente natural, pois sua disponibilidade hídrica efetiva resulta da combinação entre processos hidrológicos e decisões de gestão. Portanto, a análise por correlação e regressão linear deve ser compreendida como ferramenta de apoio à interpretação, e não como representação completa da complexidade hidrológica da área.

As vazões de referência, como Q95, Q90, Q50 e Q7,10, também demonstraram diferenças importantes conforme a base de dados, o período analisado, a posição do ponto de monitoramento e a natureza da variável considerada. O posto Mascate, com maior profundidade histórica, apresentou condição mais conservadora de disponibilidade a jusante, enquanto o ponto Atibainha Montante apresentou valores influenciados por série mais curta e posição

hidrológica distinta. Nos dados operacionais, as vazões naturais, afluentes e de jusante indicaram comportamentos diferentes, reforçando a necessidade de cautela na comparação entre séries históricas, dados telemétricos e dados operacionais do reservatório.

A análise de uso e cobertura da terra mostrou que a sub-bacia manteve predomínio de formação florestal ao longo da série MapBiomias 1985–2024, o que representa um fator positivo para a proteção do solo, interceptação da chuva, redução do escoamento superficial e conservação dos mananciais. Entretanto, a série também evidenciou mudanças relevantes, principalmente a expansão da silvicultura, que passou de condição quase inexistente em 1985 para uma classe expressiva em 2024. Essa mudança não deve ser interpretada automaticamente como impacto negativo ou positivo, pois seus efeitos hidrológicos dependem do manejo, espécie, idade dos plantios, densidade, localização no relevo, proximidade da drenagem e relação com APPs. Ainda assim, sua expansão representa uma transformação importante da paisagem e deve ser acompanhada em análises futuras, especialmente quanto aos efeitos sobre evapotranspiração, infiltração, recarga local, produção de sedimentos e vazões de estiagem.

A permanência de áreas antropizadas e edificadas também indica pressão territorial contínua sobre a sub-bacia. Quando essas classes coincidem com declividades elevadas, TWI alto, formas côncavas, APPs ou proximidade dos cursos d'água, aumentam os riscos de erosão, assoreamento, carreamento de sedimentos e alteração da qualidade da água. O mapa final de vulnerabilidade hidrológica/ambiental permitiu sintetizar essa sobreposição de fatores, diferenciando áreas naturalmente frágeis, porém protegidas por vegetação, de áreas efetivamente críticas, onde a fragilidade física coincide com usos antrópicos. Assim, os setores classificados como alta e muito alta vulnerabilidade devem ser considerados prioritários para monitoramento, controle de erosão, recomposição vegetal e recuperação de APPs.

A qualidade da água reforçou a necessidade de interpretar a disponibilidade hídrica de forma quali-quantitativa. No ponto associado ao rio Atibainha, foram observadas maiores ocorrências de desvios ou potenciais não conformidades, especialmente relacionadas a indicadores microbiológicos, carga orgânica, oxigenação e metais. Já no ponto associado ao reservatório, os alertas foram menos numerosos, mas relevantes por envolverem parâmetros como fósforo total, cianobactérias, metais e indicadores de eutrofização. A ausência de excedências confirmadas para agrotóxicos e pesticidas deve ser interpretada com cautela, pois

muitos resultados aparecem abaixo do limite de quantificação, não significando necessariamente ausência absoluta dessas substâncias. Dessa forma, a água disponível em termos de volume pode apresentar restrições ambientais ou operacionais caso sua qualidade esteja comprometida.

A análise da demanda hídrica indicou crescimento das vazões retiradas nos municípios associados à sub-bacia entre 1980 e 2020, com previsão de novo aumento até 2040. Embora a demanda municipal não corresponda exatamente à demanda interna do polígono da sub-bacia, sua comparação com as vazões de referência mostrou que, em cenários de baixa disponibilidade, a pressão sobre os recursos hídricos pode se tornar significativa. Esse resultado reforça a necessidade de compatibilizar crescimento da demanda, outorgas, disponibilidade de referência, operação do reservatório, conservação ambiental e qualidade da água.

Conclui-se que a disponibilidade hídrica da sub-bacia do Atibainha é resultado de uma interação complexa entre fatores naturais, antrópicos e operacionais. A presença do reservatório no Sistema Cantareira amplia a importância estratégica da área, mas também torna sua dinâmica mais dependente de regras de operação, transferências, armazenamento e atendimento de demandas externas e internas às Bacias PCJ. Por isso, a gestão da sub-bacia deve considerar simultaneamente quantidade e qualidade da água, conservação da cobertura vegetal, recuperação de APPs, controle dos usos em áreas sensíveis, monitoramento contínuo das vazões, acompanhamento da expansão da silvicultura e avaliação da demanda atual e futura.

Por fim, o trabalho demonstra que a integração entre geotecnologias, séries históricas, sensoriamento remoto, dados operacionais e qualidade da água constitui uma abordagem adequada para avaliar a disponibilidade e a demanda hídrica em sub-bacias estratégicas. A principal contribuição do estudo está em evidenciar que a segurança hídrica do Atibainha não pode ser explicada por uma única variável ou por um modelo linear simples, mas por uma leitura integrada do território, da hidrologia, da operação hidráulica e das pressões ambientais. Essa abordagem fornece subsídios para o planejamento territorial, a gestão dos recursos hídricos, a conservação de mananciais e a definição de áreas prioritárias para recuperação e monitoramento no contexto da UGRHI-05/Bacias PCJ.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. Limpeza da calha do Atibainha melhora abastecimento de água na região de Campinas. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 15 jun. 2019. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Evaporação líquida de reservatórios artificiais no Brasil. Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília: ANA, 2026. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil: sumário executivo. Brasília: ANA, 2024a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual de usos consuntivos da água no Brasil. 2. ed. Brasília: ANA, 2024b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Nota Técnica nº 4/2022/SPR: Índice de Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ISH-U): Atlas Águas. Brasília: ANA, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos — SNIRH. Brasília: ANA, 2026. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de usos consuntivos da água no Brasil. Brasília: ANA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 925, de 29 de maio de 2017. Dispõe sobre as condições de operação do Sistema Cantareira. Brasília: ANA; São Paulo: DAEE, 2017.

BRASIL. Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002. Regulamenta artigos da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 23 ago. 2002.

BRASIL. Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 24 nov. 2008.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 26 dez. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 28 maio 2012.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 19 jul. 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Cadastro Nacional de Florestas Públicas. Brasília: MMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Brasília: MMA, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

COBRAPE; COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010–2020: relatório síntese. São Paulo: COBRAPE/CBH-PCJ, 2010.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ; AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2025: ano-base 2024: UGRHI 05 — Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí: versão simplificada. Piracicaba: Comitês PCJ; Agência das Bacias PCJ, 2025.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2020–2035: relatório final. Piracicaba: Comitês PCJ, 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. INFOÁGUAS: Sistema de Informações sobre Qualidade das Águas. São Paulo: CETESB, 2026. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 18 mar. 2005.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Banco de dados hidrológicos. São Paulo: DAEE, 2026. Disponível em: <http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

SANTOS, H. G. dos et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

ESRI. ArcGIS Pro: software de sistema de informação geográfica. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2026. Disponível em: <https://www.esri.com/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

EUROPEAN SPACE AGENCY. Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 5 jun. 2026.

FRASCARELI, Daniele et al. O reservatório de Atibainha. In: POMPÊO, Marcelo; MOSCHINI-CARLOS, Viviane (org.). Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2019.

FREITAS, Gabriela Nicoleti de. São Paulo drought: trends in streamflow and their relationship to climate and human-induced change in Cantareira watershed, Southeast Brazil. Hydrology Research, v. 51, n. 4, p. 750-765, 2020. DOI: 10.2166/nh.2020.161.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. Anexo 4 (A4): Caderno de estruturas hidráulicas e fichas técnicas: volume 2. Elaboração do Plano da Bacia

Hidrográfica do Alto Tietê. São Paulo: FABHAT, 2017. Documento 5278-A4, revisão 0, 15 dez. 2017. Elaborado pelo Consórcio COBRAPE/JNS.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. SAISP: Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo. São Paulo: FCTH, 2026. Disponível em: <https://www.saisp.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapeamento de recursos naturais do Brasil: escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Bases cartográficas contínuas. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de biomas do Brasil: escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Amazônia-1: descritivo da missão e do satélite. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de imagens: CBERS-4A/WFI e Amazônia-1/WFI. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: <https://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CBERS-04A: câmeras imageadoras. São José dos Campos: INPE, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

JOHNSON, D. L. GIS in water resources engineering. Boca Raton: CRC Press, 2009.

KELMAN, Jerson. Water supply to the two largest Brazilian metropolitan regions. *Aquatic Procedia*, v. 5, p. 13-21, 2015. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.10.004.

MADEIRA, Camila Leite et al. Uncovering the impact of agricultural activities and urbanization on rivers from the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí basin in São Paulo, Brazil: a survey of pesticides, hormones, pharmaceuticals, industrial chemicals, and PFAS. *Chemosphere*, v. 341, art. 139954, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139954.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6660.htm. Acesso em: 5 jun. 2026.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. Cadastro Nacional de Florestas Públicas 2025 Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/cnfp> Acesso em: 5 jun. 2026.

MAPBIOMAS ÁGUA. Superfície de água no Brasil 1985–2024. São Paulo: MapBiomias, 2024. Infográfico. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

MAPBIOMAS. MapBiomias 10-meters: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): Collection 2 beta. São Paulo: MapBiomias, 2025.

MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil: Coleção 10.1. São Paulo: MapBiomias, 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil: Coleção 10.3. São Paulo: MapBiomias, 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

NASA JET PROPULSION LABORATORY. NASADEM Merged DEM Global 1 arc second. Pasadena: NASA/JPL, 2020. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015.

PRUSKI, F. F.; PRUSKI, P. L.; BRANDÃO, V. S. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2011.

SABESP. Dados dos mananciais: Sistema Cantareira. São Paulo: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2026. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. DataGEO: Sistema Ambiental Paulista. São Paulo: SEMIL, 2026. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Mapa uso 2013. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

SÃO PAULO. SP Águas: portal de dados e informações sobre recursos hídricos do Estado de São Paulo. São Paulo: SP Águas, 2026. Disponível em: <https://www.spaguas.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

SHS CONSULTORIA E PROJETOS. Plano de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2004–2007. São Paulo: SHS, 2006.

SNUC (Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza). Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 5 jun. 2026.

SOUZA JUNIOR, Carlos M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, art. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

SOUZA, José Fernando Vidal de. Responsabilidade ambiental e a ocupação desordenada do solo: um olhar sobre os reservatórios da Região Bragantina. *Revista Sequência*, Florianópolis, n. 54, p. 47-72, jul. 2007.

TOMAZELA, José Maria. Mais de 40 rios correm risco de ficar sem água em SP, aponta estudo; saiba quais são. *Estadão*, São Paulo, 5 jun. 2026. Disponível em:

<https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/mais-de-40-rios-correm-risco-de-ficar-sem-agua-em-sp-aponta-estudo-saiba-quais-sao/>. Acesso em: 5 jun. 2026.

ZUFFO, Antonio Carlos et al. The Cantareira System, the largest South American water supply system: management history, water crisis, and learning. *Hydrology*, v. 10, n. 6, art. 132, 2023. DOI: 10.3390/hydrology10060132.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ARAUJO, L. S. Análise da expansão urbana e implicações nas Áreas de Preservação Permanente e planícies aluviais com auxílio de geotecnologias no município de Indaiatuba (SP). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2015.

BRAGA, P. S. R.; NASCIMENTO, P. S. R. Atualização do mapa de vegetação natural e do uso da terra na sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP) com o auxílio de imagens TM/Landsat-5. Estudos Geográficos, Rio Claro, v. 2, n. 2, p. 31-45, 2004.

BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro Alberto. Estatística básica. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CARMO, R. L. do (org.). Dinâmica demográfica e mudança ambiental: desastres e água. Campinas: Núcleo de Estudos de População “Elza Berquó” — NEPO/UNICAMP, 2016.

KAYSER, R. H. B.; COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. Porto Alegre: UFRGS, 2017.

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica básica. 4. ed. rev. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519 p.

SILVA JÚNIOR, J. C. Análise regional de funções hidrológicas aplicáveis à avaliação de vazões mínimas. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.