

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Igor José de Lima Silva

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE USOS IRREGULARES DE
RECURSOS HÍDRICOS COMO SUBSÍDIO A GESTÃO DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Belo Horizonte

2025

Igor José de Lima Silva

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE USOS IRREGULARES DE
RECURSOS HÍDRICOS COMO SUBSÍDIO A GESTÃO DE BACIAS
HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Diego Rodrigues Macedo

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega

Belo Horizonte

2025

S586i
2025

Silva, Igor José de Lima.

Identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos como subsídio a gestão de bacias hidrográficas [manuscrito] / Igor José de Lima Silva. – 2025.

120 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Diego Rodrigues Macedo.

Coorientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 84-93.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Recursos hídricos Desenvolvimento – Minas Gerais – Teses. 3. Água – Consumo – Teses. 4. Geotecnologia ambiental – Teses. I. Macedo, Diego Rodrigues. II. Nóbrega, Rodrigo Affonso de Albuquerque. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE USOS IRREGULARES DE RECURSOS HÍDRICOS COMO SUBSÍDIO A GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

IGOR JOSÉ DE LIMA SILVA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia **treze de agosto de dois mil e vinte cinco**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega

Universidade de Bristol, Reino Unido

Prof^a. Dr^a. Adriana Monteiro da Costa

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega - Coorientador

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Diego Rodrigues Macedo - Orientador

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 14 de agosto de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Diego Rodrigues Macedo, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 13:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega, Usuário Externo**,



em 16/08/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega, Professor do Magistério Superior**, em 19/08/2025, às 06:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Monteiro da Costa, Professora do Magistério Superior**, em 27/08/2025, às 21:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4462128** e o código CRC **4D0A7689**.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho contou com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (Edital Nº 003/2022, processo: APQ-00261-22), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES; código de financiamento 001) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

O controle racional dos usos da água em uma bacia hidrográfica é um dos princípios para o planejamento de recursos hídricos. No entanto, muitos usuários utilizam a água sem a devida autorização, o que pode provocar conflitos pela utilização do recurso, provocando a intervenção do poder público. Neste sentido, o objetivo geral desta dissertação é elaborar um modelo conceitual que integre geotecnologias à análise de dados estatísticos e cadastrais que permita identificar e monitorar possíveis usos irregulares de água em bacias hidrográficas, proporcionando subsídios que auxiliem no planejamento de recursos hídricos. Este trabalho foi elaborado a partir de duas etapas principais, revisão bibliográfica e o desenvolvimento de um modelo conceitual aplicado ao objetivo proposto e que compreende 4 passos sequenciais: 1º cálculo da demanda hídrica legal; 2º estimativa da demanda hídrica através do levantamento do uso do solo; 3º priorização de bacias hidrográficas na análise de áreas potenciais de usos irregulares; 4º identificação de áreas potenciais de usos irregulares. O modelo elaborado foi eficiente na priorização e mapeamento de áreas em que existam possíveis usos irregulares de água, permitindo a racionalização de recursos destinados a fiscalização através da identificação de incoerências entre os usos do solo e a existência, ou não, de captações de água legalmente autorizadas. Nesta direção, a utilização do modelo permitiu que, das 3945 propriedades rurais - que são as unidades de análise do modelo - presentes em alguma das bacias hidrográficas da área de estudo, fossem selecionados para análise 271 propriedades, sendo 13 destas caracterizadas como áreas com usos potencialmente irregulares. Neste sentido, a integração de dados estatísticos, cadastrais e geotecnologias permitiu a produção de insumos que direcionem o processo fiscalizatório, como no mapeamento de áreas provavelmente irrigadas. Visto isso, o modelo conceitual elaborado tem potencial de ser aprimorado, refinado e escalonado para a utilização dos órgãos de gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: modelagem; recursos hídricos; fiscalização ambiental, geotecnologias.

ABSTRACT

Rational control of water use in a river basin is a key principle for water resource planning. However, many users use water without proper authorization, which can lead to conflicts over resource use and trigger government intervention. Therefore, the overall objective of this dissertation is to develop a conceptual model that integrates geospatial tools with the analysis of statistical and cadastral data. This model enables the identification and monitoring of potential irregular water uses in river basins, providing valuable insights that support water resource planning. This work was developed based on two main stages: a literature review and the development of a conceptual model applied to the proposed objective, comprising four sequential steps: 1º calculation of legal water demand; 2º estimation of water demand through land use surveys; 3º prioritization of river basins in the analysis of potential areas of irregular use; and 4º identification of potential areas of irregular use. The model developed was effective in prioritizing and mapping areas where potential irregular water uses may occur, enabling the rationalization of resources allocated to oversight through the identification of inconsistencies between land use and the existence, or absence, of legally authorized water withdrawals. In this regard, the application of the model allowed for the selection of 271 rural properties - out of the 3945 that constitute the analytical units of the model and are located within the study area watersheds - for further analysis, 13 of which were characterized as areas with potentially irregular uses. In this sense, the integration of statistical and cadastral data with geospatial technologies enabled the production of inputs that support the oversight process, such as the mapping of likely irrigated areas. Therefore, the conceptual model developed has the potential to be improved, refined, and scaled for use by water resource management agencies.

Keywords: modeling; water resources; environmental enforcement; geospatial tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Usos da água.....	17
Quadro 2 - Abordagens do conceito de segurança hídrica.....	18
Quadro 3 - Fórmulas usadas para calcular o NDVI, NDWI e SAVI.....	22
Figura 1 - Mapa de localização da Bacias Hidrográficas.....	24
Figura 2 - Mapa de localização da BHRP.....	25
Figura 3 - Mapa de localização da BHRB.....	26
Figura 4 - Mapa de localização da BHRPI.....	27
Figura 5 - Diagrama do modelo para identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos.....	28
Figura 6 - Diagrama do cálculo da demanda hídrica legal.....	31
Figura 7 - Parte do código python utilizado no cálculo da demanda hídrica legal.....	31
Figura 8 - Ottobacias nível 07 na BHRP.....	32
Figura 9 - Ottobacias nível 07 na BHRB.....	33
Figura 10 - Ottobacias nível 07 na BHRPI.....	34
Figura 11 - Parte do código utilizado no GEE para mapear áreas provavelmente irrigadas.....	35
Figura 12 - Amostras de áreas irrigadas e não irrigadas.....	37
Figura 13 - Diagrama do procedimento de mapeamento de áreas provavelmente irrigadas.....	39
Figura 14 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica da agricultura.....	40
Figura 15 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica da pecuária.....	42
Figura 16 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica voltada ao abastecimento humano.....	43
Figura 17 - Parte do código python utilizado no processo de identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos.....	47
Figura 18 - Diagrama do protocolo de análise para identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos.....	48
Figura 19 - Demanda hídrica legal na BHRP.....	52
Figura 20 - Demanda hídrica legal na BHRB.....	53
Figura 21 - Demanda hídrica legal na BHRPI.....	54
Figura 22 - Local (Ponto 1) visitado na BHRP mapeado como provavelmente irrigado.....	57

Figura 23 - Local (Ponto 2) visitado na BHRB mapeado como provavelmente irrigado.....	58
Figura 24 - Local (Ponto 1) visitado na BHRP mapeado como provavelmente irrigado.....	59
Figura 25 - Local (Ponto 2) visitado na BHRB mapeado como provavelmente irrigado.....	59
Figura 26 - Demanda hídrica estimada na BHRP.....	63
Figura 27 - Demanda hídrica estimada na BHRB.....	64
Figura 28 - Demanda hídrica estimada na BHRPI.....	65
Figura 29 - Grau de prioridade de análise atribuído as ottobacias nível 7 que compõe a BHRP.....	67
Figura 30 - Grau de prioridade de análise atribuído a ottbacia nível 7 BHRB.....	68
Figura 31 - Grau de prioridade de análise atribuído as ottbacias nível 7 que compõe a BHRPI.....	69
Figura 32 - Áreas potenciais de usos irregulares na BHRP.....	73
Figura 33 - Área potencial de uso irregular na BHRP.....	74
Figura 34 - Aspersor em área identificada como potencial de uso irregular na BHRP.....	75
Figura 35 - Áreas potenciais de usos irregulares na BHRPI.....	76
Figura 36 - Área potencial de uso irregular na BHRPI.....	77
Figura 37 - Área potencial de uso irregular na BHRPI.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Necessidade de irrigação por município.....	41
Tabela 2 - Coeficientes médios de consumo por rebanho.....	41
Tabela 3 - Valores médios de consumo per capita de água da população urbana e percentual de perdas na distribuição de água por município.....	42
Tabela 4 - Taxa média geométrica de crescimento dos municípios.....	43
Tabela 5 - Relação de pesos atribuídos aos valores da demanda hídrica legal e demanda hídrica estimada.....	45
Tabela 6 - Classificação final das prioridades.....	45
Tabela 7 - Demanda hídrica legal nas ottobacias nível 7 da BHRP.....	49
Tabela 8 - Demanda hídrica legal nas ottobacias nível 7 da BHRPI.....	49
Tabela 9 - Matriz de confusão do processo de classificação supervisionada.....	55
Tabela 10 - Demanda hídrica da agricultura, pecuária e abastecimento humano nas ottobacias nível 7 da BHRP, BHRB e BHRPI.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BHRP	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paciência
BHRB	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ribeiro Bonito
BHRPI	Bacia Hidrográfica do Rio Picão
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CNEFE	Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos
DAC	Declaração de Área de Conflito
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PAM	Produção Agrícola Municipal
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPM	Pesquisa da Pecuária Municipal
RF	<i>Random Forest</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Recursos Hídricos: Conflitos, relação disponibilidade e demanda e fiscalização	16
2.2 Geotecnologias e sensoriamento remoto na gestão ambiental e de recursos hídricos	20
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	23
3.1 Área de estudo	23
3.1.1 Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paciência	25
3.1.2 Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ribeiro Bonito	25
3.1.3 Bacia Hidrográfica do Rio Picão	26
3.2 Metodologia	27
3.2.1 Considerações sobre os dados estatísticos, cadastrais e ambientais utilizados	28
3.2.2 Cálculo da demanda hídrica legal	30
3.2.3 Estimativa da demanda hídrica para bacias hidrográficas	35
3.2.3.1 Estimativa da demanda hídrica da agricultura	35
3.2.3.2 Estimativa da demanda hídrica da pecuária	41
3.2.3.3 Estimativa da demanda hídrica para o abastecimento humano	42
3.2.4 Definição de bacias hidrográficas prioritárias na análise de áreas potenciais de usos irregulares	44
3.2.5 Identificação de possíveis usos irregulares de água	45
4 RESULTADOS	49
4.1 Demanda hídrica legal	49
4.2 Estimativa da demanda hídrica para bacias hidrográficas	55
4.2.1 Mapeamento de áreas provavelmente irrigadas	55
4.2.2 Estimativa da demanda hídrica da agricultura, pecuária e abastecimento humano	60
4.3 Bacias hidrográficas prioritárias na análise de áreas potenciais de usos irregulares	66
4.4 Áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos	70
5 DISCUSSÃO	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A - Código utilizado no cálculo da demanda hídrica legal	94
APÊNDICE B - Código utilizado na identificação de áreas irrigadas	97

APÊNDICE C - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica da agricultura	102
APÊNDICE D - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica da pecuária	107
APÊNDICE E - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica para o abastecimento humano	110
APÊNDICE F - Código utilizado na definição de bacias prioritárias para análise	114
APÊNDICE G - Código utilizado no protocolo de identificação de áreas potenciais de usos irregulares	117

1 INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos é um tema cercado de desafios e por isso é alvo de inúmeros trabalhos voltados a identificar experiências, positivas e negativas, relacionadas a manutenção da segurança hídrica e a gestão sustentável da água, como os de Marques; Veras; Rodriguez (2022) que abordam como políticas públicas tem contribuído na gestão de recursos hídricos, o de Teixeira; Ribeiro (2025) que propõe um modelo que auxilia o aprimoramento de instrumentos de gestão hídrica e o de Castro (2022) que realiza uma análise aprofundada sobre o Plano Nacional de Segurança Hídrica. A segurança hídrica consiste na garantia da disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficiente visando atender as necessidades das populações humanas, o equilíbrio dos ecossistemas e a plena realização de atividades econômicas (ANA, 2019c). A garantia de acesso a água norteia o 6º dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), que versa sobre assegurar a gestão sustentável e disponibilidade de água para todos (ONU, 2015). Neste sentido, o planejamento ambiental e dos recursos hídricos no território da bacia hidrográfica é essencial, como forma de assegurar o controle sobre os usos da água, garantindo a utilização sustentável e o enfrentamento a momentos de escassez. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, é o documento norteador em relação a gestão de recurso hídricos em território brasileiro. A PNRH prevê a gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos, a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos como instrumento de ordenamento e gestão, assegurando os múltiplos usos da água (BRASIL, 1997). A outorga assegura ao usuário o direito da utilização dos recursos hídricos, entretanto, essa autorização não é considerada uma forma de propriedade sobre a água, representando apenas o direito temporário ao seu uso (IGAM, 2010).

A utilização da água, para diversos fins sem a devida autorização, pode ocasionar situações de insegurança hídrica, escassez e conflito em bacias hidrográficas. A escassez hídrica ocorre do desequilíbrio existente entre demanda e disponibilidade de água e pode ser tratada da perspectiva física, relacionada ao quantitativo do volume de água disponível, da perspectiva de qualidade do recurso hídrico e de acordo com a dificuldade de acesso da população a este recurso (FAO, 2012). Já os conflitos pelo uso da água ocorrem quando a realização de certas

atividades compromete a qualidade ou quantidade de água, não permitindo que outros usuários usufruam deste bem (Soares; Moreira Barbosa, 2024) ou tornando a demanda hídrica comprovadamente superior a disponibilidade do recurso (MINAS GERAIS, 2019). Neste contexto é necessária a intervenção do poder público, como por exemplo na Declaração de Área de Conflito (DAC), instrumento de gestão que é empregado em situações de indisponibilidade hídrica, onde está previsto o planejamento das demandas hídricas futuras e a alocação negociada de recursos por meio da concessão de outorgas coletivas (IGAM, 2006; MINAS GERAIS, 2019). Visto isso, a situação ideal no processo de gestão de bacias hidrográficas seria o cadastro abrangente e efetivo de todos os usuários de recursos hídricos, entretanto, esta não é uma realidade no contexto brasileiro, pois os órgãos gestores possuem poucas ferramentas para planejar e fiscalizar a relação entre demanda e disponibilidade hídrica (Moreira et al., 2012), assim como, identificar usos irregulares de água.

A mensuração da demanda hídrica, no território de uma bacia hidrográfica, considera os usos consultivos da água - aqueles nos quais a água retirada é consumida, seja de maneira parcial ou total, no processo a que se destina. Os principais usos consultivos no contexto brasileiro são a irrigação, o abastecimento humano e dessedentação animal, as indústrias de transformação, e a mineração (ANA, 2019b). Dentre estes, a agricultura irrigada é o maior setor usuário de recursos hídricos em termos de quantidade demandada (ANA, 2019a), o que torna o entendimento da distribuição espacial de áreas irrigadas extremamente relevante na gestão de recursos hídricos (Bendini et al., 2023). O emprego de geotecnologias tem potencial de auxiliar a gestão e fiscalização em bacias hidrográficas através da integração de dados quantitativos e qualitativos, espaciais ou não, possibilitando a produção de estimativas sobre consumo de água, o monitoramento dos níveis de corpos hídricos e a análise de mudanças no uso e ocupação da terra em bacias hidrográficas, consolidando conhecimento que é essencial na tomada de decisões (Macedo; Lima, 2022). Neste sentido, cada vez mais se popularizam plataformas de alta performance e de acesso aberto que permitem processar dados e imagens, oriundas de sensoriamento remoto, através de computação em nuvem (De Carvalho Júnior, 2018). Estas plataformas permitem o desenvolvimento de soluções relacionadas ao combate a secas, desmatamento e desastres, além de realizar

análises voltadas à gestão de água, monitoramento climático e proteção ambiental, sendo ferramentas poderosas de análise geoespacial (Gorelick et al., 2017).

Sendo assim, a hipótese aqui considerada é que a integração de modelagem geográfica ao processo de gestão e fiscalização de usos de recursos hídricos contribui na resolução de desafios voltados à garantia da segurança hídrica, essa constituindo uma questão atual e futura, podendo este conceito ser utilizado como instrumento de análise, diagnóstico e monitoramento de metas e resultados para o poder público (Penã, 2016). O trabalho também contribui com estudos que podem subsidiar o cumprimento das metas dos ODS, principalmente no que se relaciona ao ODS 6, item 6.4, que visa até 2030 aumentar de maneira substancial a eficiência do uso da água em todos os setores, garantindo retiradas de maneira sustentável e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez hídrica (ONU, 2015). Portanto, assume-se a premissa que a modelagem geográfica deve ser incorporada a gestão de recursos hídricos, subsidiando novas soluções no processo fiscalizatório de usos de recursos hídricos, auxiliando a manutenção da segurança hídrica.

Levando em conta a relevância do tema e a necessidade de ações em direção a sustentabilidade ambiental, propõe-se a construção de um modelo multiescalar, que contribua na fiscalização, voltada a gestão de recursos hídricos, realizada pelos órgãos competentes, como o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho é elaborar um modelo conceitual que integre, geotecnologias à análise de dados estatísticos e cadastrais que permita identificar e monitorar possíveis usos irregulares de água em bacias hidrográficas, proporcionando subsídios que auxiliem no planejamento de recursos hídricos. Além disso, dentre os objetivos específicos estão: 1º mapear áreas provavelmente irrigadas em bacias hidrográficas; 2º propor uma matriz de priorização de bacias hidrográficas na análise de áreas potenciais de usos irregulares; 3º elaborar um protocolo de análise que permita identificar possíveis usos irregulares de água que tenham como finalidade a irrigação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Recursos Hídricos: Conflitos, relação disponibilidade e demanda e fiscalização

As discussões sobre o direito inalienável a água foram superadas nos últimos anos, apesar de este não ser tratado de forma clara na Carta Internacional de Direitos Humanos ou no Pacto Internacional de Direitos Civis e Políticos. No entanto as garantias existentes nestes documentos no que diz respeito à saúde, bem-estar humano e direito à vida, abarcam o acesso a água como algo a ser tratado de forma prioritária na sociedade (Villar; Ribeiro, 2012). Entretanto, conflitos relacionados a água ocorrem há séculos, em diversas regiões do mundo e com características diversas, sendo o acesso a água usado até como arma em guerras (Gleick; Heberger, 2014). Neste sentido, conflitos pelo uso dos recursos hídricos acontecem de diversas maneiras, como na disputa pelo acesso a água e pelo controle de sistemas hídricos, e neste contexto é importante ressaltar que disputas de qualquer natureza não são atribuídas a causas únicas sendo os conflitos pelo uso da água ocasionados por uma multiplicidade de relações complexas e fatores contribuintes (Gleick, 2014).

A água é considerada, de acordo com a legislação brasileira, um bem de domínio público e um recurso natural finito, escasso e dotado de valor econômico (BRASIL, 1997). Quando há abundância de água, esta pode ser tratada como bem livre, ou seja, sem considerar algum valor econômico (Setti et al., 2001). Entretanto, com o crescimento da demanda dos diversos setores usuários, surgem conflitos, tornando a água um bem escasso que deve ser gerido de maneira diferente, atribuindo-lhe justo valor (Setti et al., 2001). Quando a disponibilidade de água não é suficiente para atender as demandas e isso ocasiona situações de escassez, fazem-se necessárias políticas de gestão e planejamento, a fim de atenuar possíveis conflitos entre os usos e usuários dos recursos hídricos (Ribeiro; Pruski; Ramos, 2018).

No Brasil, os setores usuários de recursos hídricos são os mais diversos e cada um destes com inúmeras finalidades para água (Quadro 1). O uso das águas pode ser consultivo, que ocorre quando a água é captada do seu curso natural e somente parte retorna ao curso normal do trecho d'água, ou não consultivo, quando a totalidade da água captada retorna ao curso d'água de origem (Setti et al., 2001). Cada um destes usos exige parâmetros de qualidade próprios, assim como, geram impactos específicos nas águas (Setti et al., 2001).

Quadro 1 - Usos da água

Forma	Finalidade	Tipo de Uso	Uso Consultivo	Requisitos de qualidade	Efeitos nas águas
Com derivação de águas	Abastecimento urbano	Abastecimento doméstico industrial comercial e público	Baixo, de 10%, sem contar as perdas nas redes	Altos ou médios, influenciando no custo do tratamento	Poluição orgânica e bacteriológica
	Abastecimento industrial	Sanitário, de processo, incorporação ao produto, refrigeração e geração de vapor	Médio, de 20%, variando com o tipo de uso e de indústria	Médios, variando com o tipo de uso	Poluição orgânica, substâncias tóxicas, elevação de temperatura
	Irrigação	Irrigação artificial de culturas agrícolas segundo diversos métodos	Alto, de 90%	Médios, dependendo do tipo de cultura	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
	Abastecimento	Doméstico ou para dessedentação de animais ¹⁰	Baixo, de 10%	Médios	Alterações na qualidade com efeitos difusos
	Aqüicultura	Estações de piscicultura e outras	Baixo, de 10%	Altos	Carreamento de matéria orgânica
Sem derivação de águas	Geração Hidrelétrica	Acionamento de turbinas hidráulicas	Perdas por evaporação do reservatório	Baixos	Alterações no regime e na qualidade das águas
	Navegação fluvial	Manutenção de calados mínimos e eclusas	Não há	Baixos	Lançamento de óleo e combustíveis
	Recreação, lazer e harmonia paisagística	Natação e outros esportes com contato direto, como iatismo e motonáutica	Lazer contemplativo	Altos, especialmente recreação de contato primário	Não há
	Pesca	Com fins comerciais de espécies naturais ou introduzidas através de estações de piscicultura	Não há	Altos, nos corpos de água, correntes, lagos, ou reservatórios artificiais	Alterações na qualidade após mortandade de peixes
	Assimilação de esgotos	Diluição, autodepuração e transporte de esgotos urbanos e industriais	Não há	Não há	Poluições orgânicas, físicas, químicas e bacteriológicas
	Usos de preservação	Vazões para assegurar o equilíbrio ecológico	Não há	Médios	Melhoria da qualidade da água

Fonte: Setti et al., 2001.

Cabe ao poder público promover a gestão dos recursos hídricos, sempre contando com a participação de usuários e comunidades, além de garantir os múltiplos usos da água, como previsto na PNRH (BRASIL, 1997). Entretanto, a gestão das águas acontece de maneira fragmentada entre os Estados, e os processos de outorga e fiscalização estão centralizados nos órgãos gestores estaduais, que para

avaliar os impactos existentes de diferentes cenários de utilização de água - propiciando uma gestão eficiente que garanta a segurança hídrica - necessitam avançar na sistematização de dados relacionados a usuários e os usos múltiplos, assim como a relação demanda e disponibilidade do recurso (Marques et al., 2009). Nesta direção, conciliar os usos múltiplos da água garantindo a segurança hídrica não é tarefa trivial. De acordo com Beek e Arriens (2014), o conceito de segurança hídrica não deve ser tratado somente como uma questão de quantidade disponível de água, mas também do ponto de vista de escassez, potabilidade, além da mitigação de riscos inerentes a dinâmica da água, como enchentes e secas, e na resolução de conflitos relacionados a recursos hídricos compartilhados entre diversos atores. Além disso, processos de escassez hídrica ocasionam diferentes abordagens no que diz respeito a segurança hídrica sendo este conceito adaptado de acordo com as perspectivas de setores, grupos ou locais específicos (Beek e Arriens, 2014) (Quadro 2).

Quadro 2 - Abordagens do conceito de segurança hídrica

Disciplina	Foco do conceito de segurança hídrica
Agricultura	Água como insumo para produção agrícola e como elemento relacionado à segurança alimentar.
Engenharia	Proteção contra riscos relacionados à água (enchentes, secas, contaminação, terrorismo); e segurança da oferta hídrica (como percentual da demanda atendida).
Ciência ambiental	Acesso das funções e dos serviços da água para os seres humanos e para o ambiente.
Saúde pública	Segurança da oferta e acesso à água potável; e prevenção e monitoramento da contaminação da água em sistemas de distribuição.
Recursos pesqueiros, geologia, geociências, hidrologia	Variabilidade hidrológica da água subterrânea; e segurança de todo o ciclo hidrológico.
Antropologia, economia, geografia, história, direito, administração, ciência política	Segurança da infraestrutura da água de beber; insumo para a produção de alimentos e para a saúde e o bem-estar dos seres humanos; conflitos armados (como elemento legitimador de ações militares e como barreira para a cooperação e a paz entre países); e minimização da vulnerabilidade dos domicílios com relação à variabilidade hidrológica.
Política	Elos interdisciplinares (produção de alimentos, clima, energia, economia e segurança humana); desenvolvimento sustentável; proteção contra riscos relacionados à água; proteção dos sistemas hídricos contra enchentes e estiagens; e desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos para garantir o acesso a funções e serviços da água.
Recursos hídricos	Escassez hídrica; segurança da oferta (gerenciamento da demanda); e segurança hídrica "verde" (versus "azul"). ¹

Fonte: Castro, 2022.

Estudos relacionados as vazões demandadas pelos usuários da água permitem determinar a disponibilidade do recurso além de identificar áreas em que a água já se encontra ou pode vir a se tornar escassa, sendo então primordiais para subsidiar a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos (Teixeira et al., 2006). Neste

sentido, são importantes os estudos que permitam estimar a quantidade de água necessária para os diferentes usos, possibilitando o planejamento e gestão de recursos hídricos e mantendo a qualidade e as quantidades adequadas para as necessidades humanas e ecossistêmicas (Maupin et al., 2014). Metodologias que calculem o uso da água de maneira indireta, por meio de coeficientes técnicos, surgem como alternativas que possibilitam a associação de dados inventariados, como população ou rebanhos, a uma necessidade média de água (ANA, 2019b). Os coeficientes técnicos são, de maneira geral, resultados de medições e estudos, com elevado grau de precisão e amplamente empregados em estudos nacionais e internacionais, já que permitem uma extrapolação espacial e temporal, permitindo a realização de projeções que levem a prognósticos de utilização dos recursos hídricos (SEMAD, 2010; ANA, 2019b). Nesta direção, destacam-se estudos que compilaram dados e permitem estimar o uso de água em diferentes setores, como o Uso estimado de água nos Estados Unidos em 2010 (Maupin et al., 2014), a Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do sistema interligado nacional (ONS, 2005) e o Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil (ANA, 2019b).

O gerenciamento dos usos de água e do território da bacia hidrográfica, para além da quantificação da demanda hídrica, envolve também o processo de fiscalização, de responsabilidade do órgão gestor de recursos hídricos (Brasil, 1997). A fiscalização de usos de recursos hídricos compreende um conjunto de ações com o objetivo de promover a regularização de usos e usuários de água, por meio do atendimento a regras e limites de uso da água (ANA, 2021). A fiscalização envolve o mapeamento e identificação de irregularidades, o monitoramento e controle do uso da água e a emissão de notificações e aplicação de sanções quando necessário, além de outras ações que incentivem a mudança de conduta dos usuários (ANA, 2021). Desta forma, a fiscalização deve exercer tanto um papel educativo e preventivo, quanto corretivo e repressivo, visando promover o cumprimento da legislação por parte dos usuários de recursos hídricos, ao mesmo tempo que busca esclarecer os fundamentos legais e os procedimentos administrativos exigidos para a regularização dos usos (ANA, 2021). Nesta direção, visto que a obtenção de dados em campo requer uma logística que apresenta alto custo, o sensoriamento remoto e as geotecnologias são ferramentas de grande potencial para fiscalização do uso dos recursos hídricos, principalmente na agricultura irrigada (ANA, 2021).

2.2 Geotecnologias e sensoriamento remoto na gestão ambiental e de recursos hídricos

Geotecnologias são o conjunto de tecnologias e ferramentas para tomada de decisão - que englobam *hardware* e *software* - que permitem a coleta, processamento e análise de informações dotadas de referência geográfica, destacando-se os sistemas de informação geográfica, o sensoriamento remoto e o sistema de posicionamento global (Rosa, 2005). O sensoriamento remoto é uma forma de obter informações, sem necessidade de contato, sobre um objeto, utilizando a radiação eletromagnética refletida e/ou emitida pelos alvos (Macedo; Lima, 2022). Esta técnica permite, a compreensão dos sistemas naturais e antrópicos, assim como a aquisição sistemática de informações sobre a superfície terrestre (De Carvalho Júnior, 2018). Nos estudos ambientais toda ação voltada ao planejamento, ordenamento e monitoramento do espaço deve abranger a análise dos diferentes componentes do ambiente e neste sentido o uso de geotecnologias é essencial no Mapeamento Temático, na Avaliação de Impacto Ambiental, no Diagnóstico Ambiental e no Ordenamento Territorial (Medeiros; Câmara, 2001).

Com o objetivo de aprimorar a capacidade de realização de estudos ambientais, vem se tornando populares ferramentas que auxiliam na análise de grandes montantes de dados. Plataformas de computação em nuvem, como o *Google Earth Engine* (GEE), assim como, a utilização de inteligência artificial e computação profunda, conhecida como *deep learning* vem sendo empregados em processos de aprendizagem de máquina, conhecidos com *machine learning* e estão sendo essenciais no reconhecimento de padrões em imagens, permitindo alcançar exatidão superior a 90% durante um processo de classificação (Gorelick et al., 2017; Neves et al., 2020; Oliveira et al., 2020). Nesta direção, projetos como o MapBiomas (Souza et al., 2020) vem se tornando primordiais no processo de gestão ambiental, já que propiciam, por exemplo, o acesso a mais de 30 anos de mapeamento sobre a cobertura e uso da terra para todos os biomas brasileiros, por meio da utilização de processamento em nuvem, em específico a plataforma do GEE (Oliveira et al., 2020).

As geotecnologias, o sensoriamento remoto e computação em nuvem estão sendo amplamente utilizados em diversos estudos relacionados a gestão ambiental e de recursos hídricos. O GEE foi utilizado para comparar e medir a eficácia de

algoritmos de aprendizagem de máquina e composições entre séries temporais de imagens no resultado de classificações de uso e cobertura da terra (Phan; Kuch; Lehnert, 2020; Zhao et al., 2024). Esta plataforma também foi utilizada no tratamento de bandas espectrais de imagens Landsat 8 voltada a identificação de grandes áreas agrícolas por meio de aprendizagem de máquina (Lee et al., 2016). Já no que se relaciona ao gerenciamento de recursos hídricos, destacam-se plataformas como a SGeoL, que permite a integração e utilização de dados geográficos relacionados a gestão das águas no Brasil (Silva et al., 2023), enquanto sistemas de apoio à decisão baseados em Sistemas de Informação Geográfica via *internet*, mostraram-se eficientes na gestão de reservatórios de água e no controle de índices como o de qualidade da água (Saravani; Saadatpour; Shahvaran, 2024).

Além disso, tem-se utilizado geotecnologias para estudar a relação entre paisagem, uso do solo e disponibilidade hídrica. Como na associação verificada entre a estrutura da paisagem com a disponibilidade de serviços ecossistêmicos voltados a água, sendo que a composição e configuração espacial da paisagem estão completamente associados a qualidade e a disponibilidade de recursos hídricos (Shen et al., 2015). Além disso, por meio das geotecnologias pode-se observar que uma grande conectividade entre áreas residenciais e agrícolas podem diminuir a qualidade da água, enquanto o aumento da coesão de áreas florestais tende a ter efeito contrário (Clément et al, 2017), neste sentido, a configuração do uso e ocupação da terra deve ser considerado como fator na regulação do serviço ecossistêmico local de produção de água (Zhang et al, 2021) e incorporado ao processo de gestão de bacias hidrográficas.

O uso de sensoriamento remoto, por meio do GEE, também vem sendo utilizado em trabalhos voltados ao mapeamento de agricultura irrigada. O *Google Earth Engine* tem se mostrado eficiente para realizar classificações de imagens com o intuito de identificar áreas que recebem irrigação (Silva, 2020; Zurqani et al., 2021; Bendini et al., 2023). Com essa finalidade, é comum o emprego de índices de vegetação - úteis em diversos campos como conservação da biodiversidade, agricultura, monitoramento ambiental e silvicultura - que são calculados por meio de operações entre bandas espectrais em imagens de sensoriamento remoto, indicando o crescimento, vigor e a dinâmica da vegetação (Xue; Su, 2017). Dentre estes índices destacam-se o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação

de Diferença Normalizado) (Rouse et al., 1974) que realça as áreas verdes e mensura o valor de biomassa, variando de -1 a 1, sendo que, quanto maior o valor do índice, mais sadia se encontra a vegetação (Meneses; Almeida, 2012). Assim como o NDWI (*Normalized Difference Water Index* - Índice de Água de Diferença Normalizado) (Gao, 1996), que mensura o teor de umidade presente na vegetação e solo e o SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) (Huete, 1988), que é semelhante ao NDVI, entretanto este índice minimiza o efeito do solo no cálculo (Quadro 3).

Quadro 3 - Fórmulas usadas para calcular o NDVI, NDWI e SAVI

Índice	Fórmula
NDVI (<i>Normalized difference vegetation index</i>)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$
NDWI (<i>Normalized difference water index</i>)	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$
SAVI (<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L) \times (1 + L)$

Fonte: Adaptado de Xue; Su, 2017.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

Foram definidas 3 bacias hidrográficas como área de estudo, todas em situação declarada de conflito pelo uso de recursos hídricos superficiais, no estado de Minas Gerais, sendo elas: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paciência (municípios de Florestal, Pará de Minas e Onça de Pitangui); Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ribeiro Bonito (município de Caeté) e Bacia Hidrográfica do Rio do Picão (municípios de Bom Despacho e Martinho Campos) (Figura 1).

Todas as bacias se encontram na região do Alto São Francisco, sendo que, de forma geral a vegetação nativa nesta região é constituída predominantemente pelo cerrado, com também presença de floresta subcaducifólica tropical, assim como campos de altitude, localizados nas áreas de altitude superior a 900m (CPRM, 2001). A região apresenta temperatura média anual variando entre 19 e 23°C, no geral, e com relação às precipitações, os valores totais pluviométricos anuais para a região do Alto São Francisco variam entre 1700mm nas cabeceiras das bacias que compõe essa área diminuindo com as latitudes, até 1.000, 1150mm (CPRM, 2001).

Figura 1 - Mapa de localização da Bacias Hidrográficas

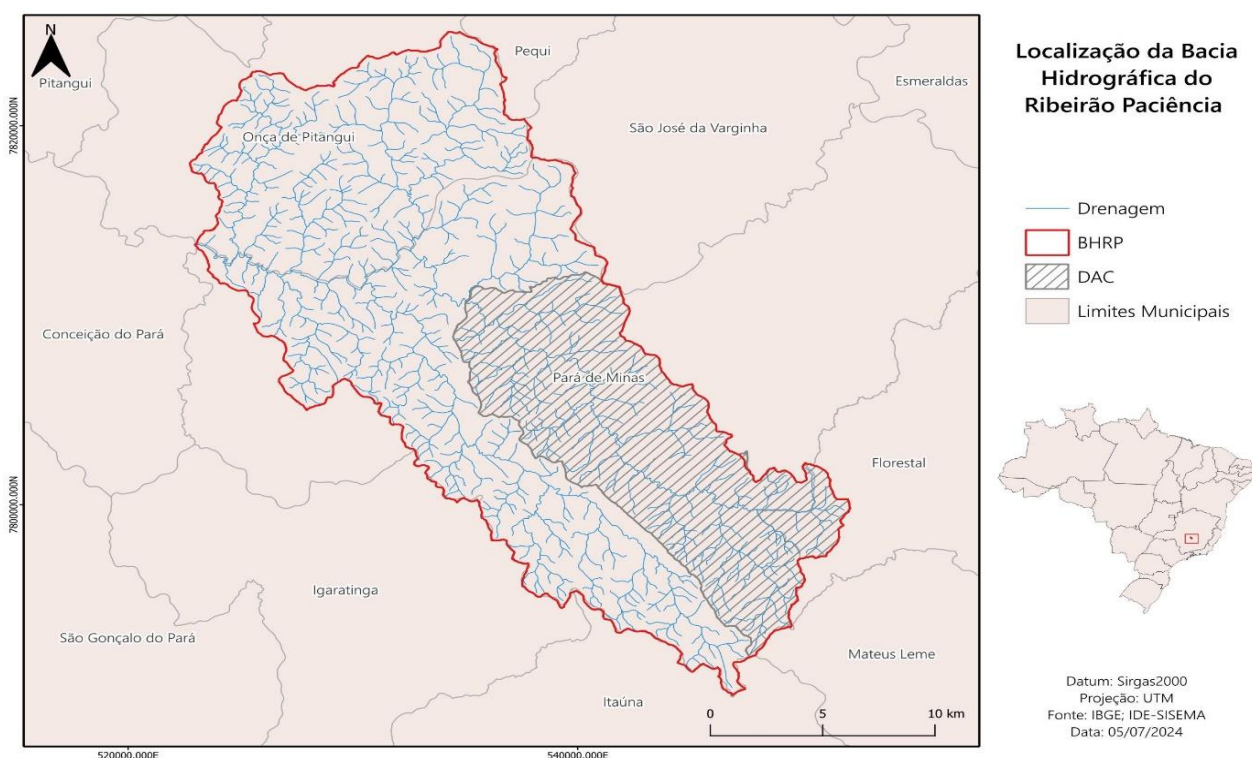


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paciência

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paciência (BHRP) estende-se pelos municípios de Florestal, Pará de Minas e Onça de Pitangui, ocupando uma área de aproximadamente 45.378,882 hectares, apresentado situação de DAC desde fevereiro de 2009 (Figura 2). O Ribeirão Paciência é afluente do Rio São João, pertencendo à Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Rio Pará - UPGRH SF2 (Ferreira et al., 2022). Dentre as captações destinadas ao abastecimento público na cidade de Pará de Minas uma está localizada no Ribeirão Paciência, nas proximidades da área urbana do município (Duarte; Miola, 2016).

Figura 2 - Mapa de localização da BHRP



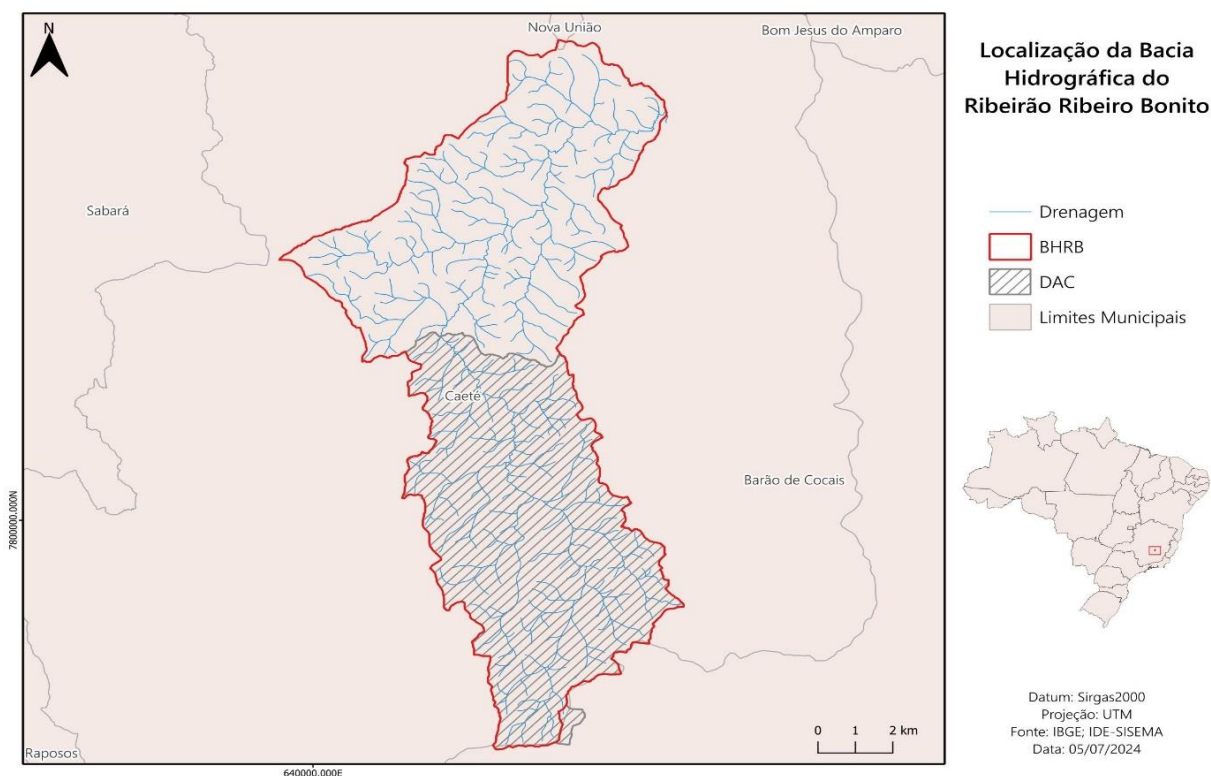
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Bacia Hidrográfica do Ribeirão Ribeiro Bonito

A Bacia hidrográfica do Ribeirão Ribeiro Bonito (BHRB) também está em situação de DAC, essa sendo publicada em novembro de 2007. Esta bacia abrange uma área de aproximadamente 10.331,366 hectares estando inserida na Região Metropolitana de Belo Horizonte, no município de Caeté (Figura 3). A BHRB faz parte da bacia do Rio Taquaraçu, que apresenta variados usos do solo e o conflito pelo uso

de recursos hídricos é causado devido a demanda superficial intensa de água e a diversos usos irregulares (Lemos; Junior, 2015).

Figura 3 - Mapa de localização da BHRB

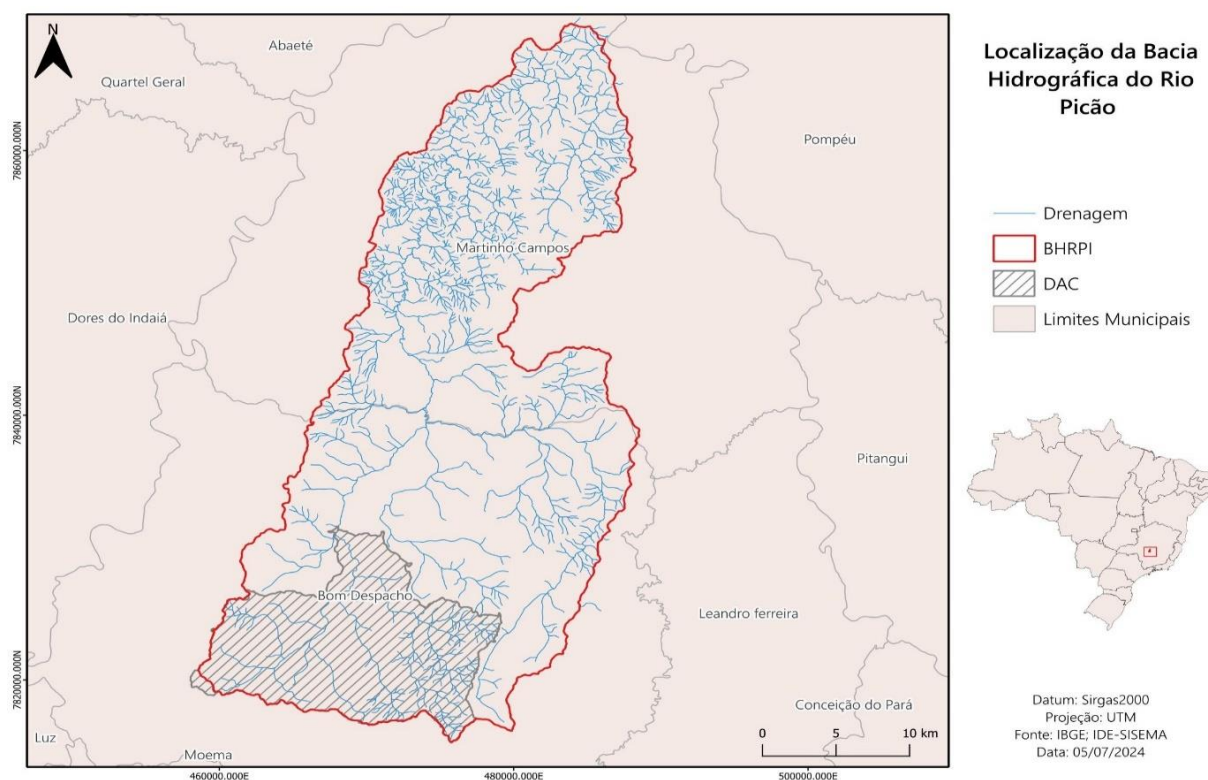


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Bacia Hidrográfica do Rio Picão

A Bacia Hidrográfica do Rio Picão (BHRPI), que abrange uma área de aproximadamente 89.487,533 hectares, estende-se pelos municípios de Bom Despacho e Martinho Campos (Figura 4) e está em situação de DAC desde o ano de 2015. A cobertura do solo na bacia, principalmente em sua porção central, é composta majoritariamente por áreas de agricultura e pastagem (CBH DO RIO PARÁ, 2008) e este é afluente do Rio Pará, um dos principais tributários da margem direita do Rio São Francisco (Araújo et al., 2023).

Figura 4 - Mapa de localização da BHRPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

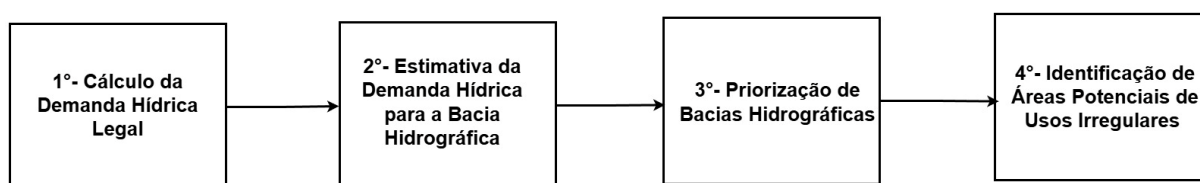
3.2 Metodologia

O modelo para identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos, foi elaborado a partir de duas etapas principais: revisão bibliográfica sobre temas correlatos e o desenvolvimento de um modelo conceitual aplicado aos objetivos propostos.

Na primeira etapa, ocorreu revisão de literatura sobre gestão de recursos hídricos, legislações pertinentes, sensoriamento remoto, análise de dados e geotecnologias. Enquanto na segunda etapa foi elaborado um modelo conceitual, detalhando a sequência metodológica a ser seguida, as fontes de dados propostas, as ferramentas utilizadas, os pressupostos teóricos associados, assim como, a justificativa e os resultados obtidos em cada etapa do modelo. Adicionalmente a essas duas etapas, foi realizado trabalho de campo a fim de validar algumas informações obtidas através da utilização do modelo proposto, assim como, foram realizadas reuniões com servidores do IGAM, com o objetivo de adequar o modelo elaborado as demandas e necessidades do órgão.

Neste sentido, este trabalho tem como público-alvo servidores e agentes dos órgãos gestores de recursos hídricos, no caso de Minas Gerais, o IGAM. Portanto, considera-se como usuários deste modelo os agentes públicos responsáveis pela fiscalização de usos de recursos hídricos em bacias hidrográficas. Visto isso, o modelo (Figura 5) foi concebido para utilizar a Base Hidrográfica Ottocodificada e as propriedades rurais registradas no Cadastro Ambiental Rural (CAR), como unidade de análise - sendo o usuário responsável por definir o nível de bacia a ser utilizado - e dividido em 4 etapas sequenciais, realizadas utilizando principalmente ferramentas como o *Google Earth Engine* e *Python*: 1ª cálculo da demanda hídrica legal; 2ª estimativa da demanda hídrica através do levantamento do uso do solo; 3ª priorização de bacias hidrográficas na análise de áreas potenciais de usos irregulares; 4ª identificação de áreas potenciais de usos irregulares.

Figura 5 - Diagrama do modelo para identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Considerações sobre os dados estatísticos, cadastrais e ambientais utilizados

Neste trabalho foram utilizados diversos dados públicos, produzidos por diferentes instituições, durante etapas distintas da metodologia. Destacam-se dados produzidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) responsável pela Pesquisa da Produção Agrícola Municipal (PAM), Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), Pesquisa Pecuária Municipal (PPM) e a Grade Estatística. Além disso, foram utilizados dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e a Base Hidrográfica Ottocodificada.

A Pesquisa da Produção Agrícola Municipal apresenta uma série de informações relevantes para o planejamento público e privado, assim como, para a comunidade acadêmica (IBGE, 2023c). A PAM é uma das principais fontes a respeito dos produtos da agricultura nacional, levantando informações à nível municipal, sobre 64 produtos, como soja, milho, leguminosas, no que diz respeito a quantidade

produzida, rendimento médio, área plantada, colhida e destinada a colheita (IBGE, 2023c). Já a Pesquisa da Pecuária Municipal acontece por meio de consulta a órgãos, entidades e atores relacionados a agropecuária, fornecendo informações, também a nível municipal, sobre os efetivos de pecuária e a produção de origem animal, caracterizando-se como a principal fonte estatística deste tema (IBGE, 2023b). O Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos é um compilado de informações oriundas do censo demográfico, de abrangência nacional, que contempla a localização de endereços, sejam estes domicílios ou estabelecimentos, que estão distribuídos por todo o país, tanto nas áreas urbanas quanto nas áreas rurais (IBGE, 2023a). Por fim, a Grade Estatística parte do pressuposto da disponibilização de um sistema de células regulares, no formato de grade, que permita a disseminação de dados e análises independente de divisões territoriais (IBGE, 2016). As grades contêm dados numéricos provenientes de microdados do Censo Demográfico, assim como, dados do CNEFE e dentre as vantagens de sua utilização destacam-se a adaptação a recortes espaciais, estabilidade temporal e a versatilidade (IBGE, 2016).

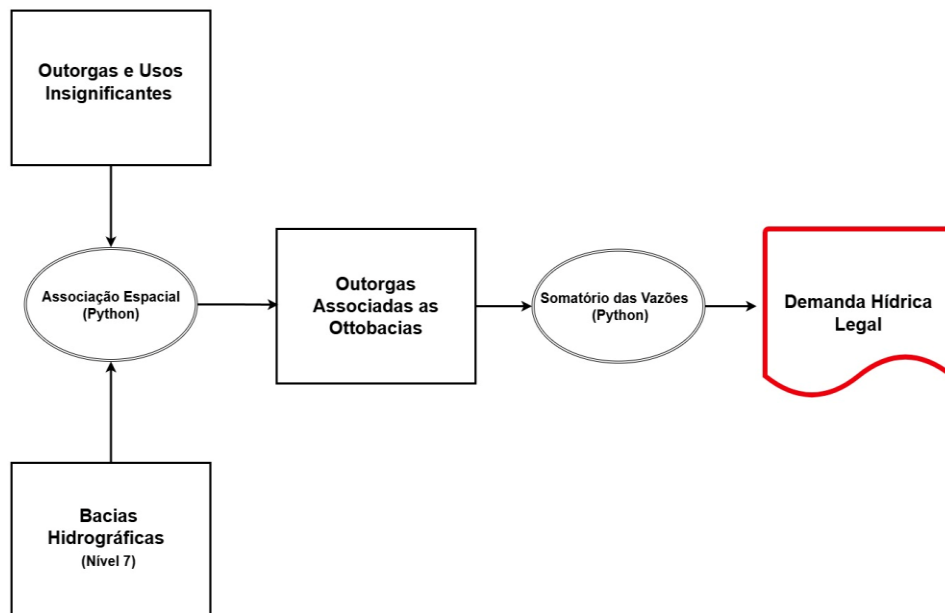
Dentre os dados que não são produzidos pelo IBGE, o Cadastro Ambiental Rural – atualmente sob gestão do Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos (MGI) – foi uma base de dados amplamente utilizada neste trabalho. Este dado tem como origem a Lei nº 12.651 de 2012 e posteriormente foi regulamentado pela Instrução Normativa MMA nº 2, de 5 de maio de 2014. O CAR é um registro realizado de maneira eletrônica obrigatório para todos os imóveis rurais, onde, entre outras informações, são disponibilizados os limites dos imóveis e das áreas de preservação, com o objetivo de consolidar as informações das propriedades e posses rurais, propiciando o controle, monitoramento e planejamento ambiental e fundiário (BRASIL, 2014). Já a Base Hidrográfica Ottocodificada é uma base hidrográfica de referência caracterizada por planos de informação geográfica e dentre estes planos estão contidos os trechos de drenagem e a área de contribuição hidrográfica (ANA, 2015). Os trechos de drenagem representam a hidrografia e estes estão associados a um polígono que corresponde a área de contribuição hidrográfica, denominada ottobacia, que varia do nível 1 a 9, sendo o nível 1 a divisão inicial, as bacias maiores, e os níveis subsequentes representando subdivisões, bacias menores, dentro das bacias maiores (Pfafstetter, 1989; ANA, 2015).

3.2.2 Cálculo da demanda hídrica legal

Outorgas de direito de uso de recursos hídricos e o cadastro de usos insignificantes de recursos hídricos são os modelos de captações disponíveis para a solicitação dos usuários junto ao órgão gestor responsável pela bacia hidrográfica, permitindo ao poder público compatibilizar as demandas, dos diversos usos, às disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas (IGAM, 2010). A principal diferença entre estes relaciona-se a quantidade água captada e o impacto desta captação, sendo a outorga necessária quando os valores de captação superficial e subterrânea alteram o regime, a quantidade ou a qualidade dos recursos hídricos (MINAS GERAIS, 2019).

Na primeira etapa do modelo foi calculada a demanda hídrica legal (Figura 6) para a área de estudo e para isto foram utilizados dados sobre as outorgas e os cadastros de usos insignificantes, superficiais e subterrâneos, registrados nas bacias hidrográficas (MINAS GERAIS, 2024; MINAS GERAIS, 2025). Em primeiro momento, foi realizada a associação espacial das captações registradas na área de estudo (Figura 7) a cada uma das bacias hidrográficas, ottobacias nível 7 (Figuras 8, 9 e 10), correspondentes. Neste sentido, foram selecionadas como unidade de análise neste trabalho as bacias nível 7, devido a este ser o menor nível de ottobacia disponibilizado publicamente pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) no formato vetorial. Após o processo de associação espacial, foi utilizada a vazão outorgada e o tempo de captação diário, como forma de obter a vazão diária de cada captação e a demanda legal diária para cada bacia. Tal processo tem por finalidade discriminar os valores legalmente outorgados, servindo de insumo, juntamente a demanda hídrica estimada pelo modelo, no processo de priorização de bacias hidrográficas na análise de áreas potenciais de usos irregulares.

Figura 6 - Diagrama do cálculo da demanda hídrica legal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Parte do código *python* utilizado no cálculo da demanda hídrica legal

```

[ ] # Cria coluna Demanda_L_Dia com valor nulo inicialmente
gdf_a["Demanda_L_Dia"] = None

# Aplica lógica para valor de vazão em "l/s"
mask_aaa = gdf_a["unvazao_4"] == "l/s"
gdf_a.loc[mask_aaa, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_aaa, "vazjan_4"] * gdf_a.loc[mask_aaa, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/h"
mask_bbb = gdf_a["unvazao_4"] == "m³/h"
gdf_a.loc[mask_bbb, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_bbb, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_a.loc[mask_bbb, "tcapjan_4"]
).round(3)

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/s"
mask_ccc = gdf_a["unvazao_4"] == "m³/s"
gdf_a.loc[mask_ccc, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_ccc, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_a.loc[mask_ccc, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Visualizar resultados
display(gdf_a[["unvazao_4", "vazjan_4", "Demanda_L_Dia"]].head())

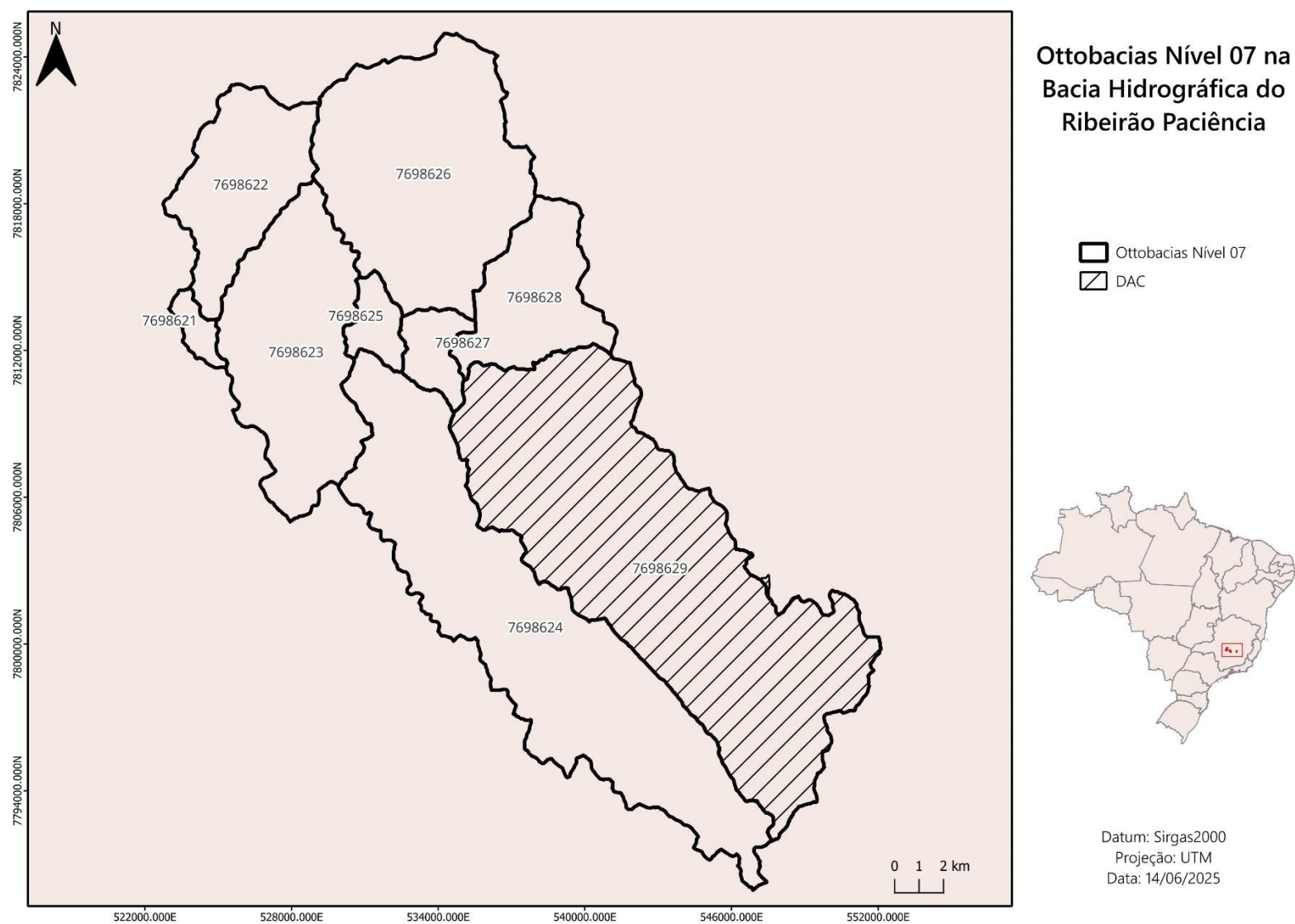
# Exportar resultado
gdf_a.to_file("Outorgas_Demanda_L_Dia.gpkg", driver="GPKG")

```

	unvazao_4	vazjan_4	Demanda_L_Dia
0	m³/h	7.00	98000.0
1	m³/h	1.00	3000.0
2	m³/h	1.00	3000.0
3	m³/h	3.21	38520.0

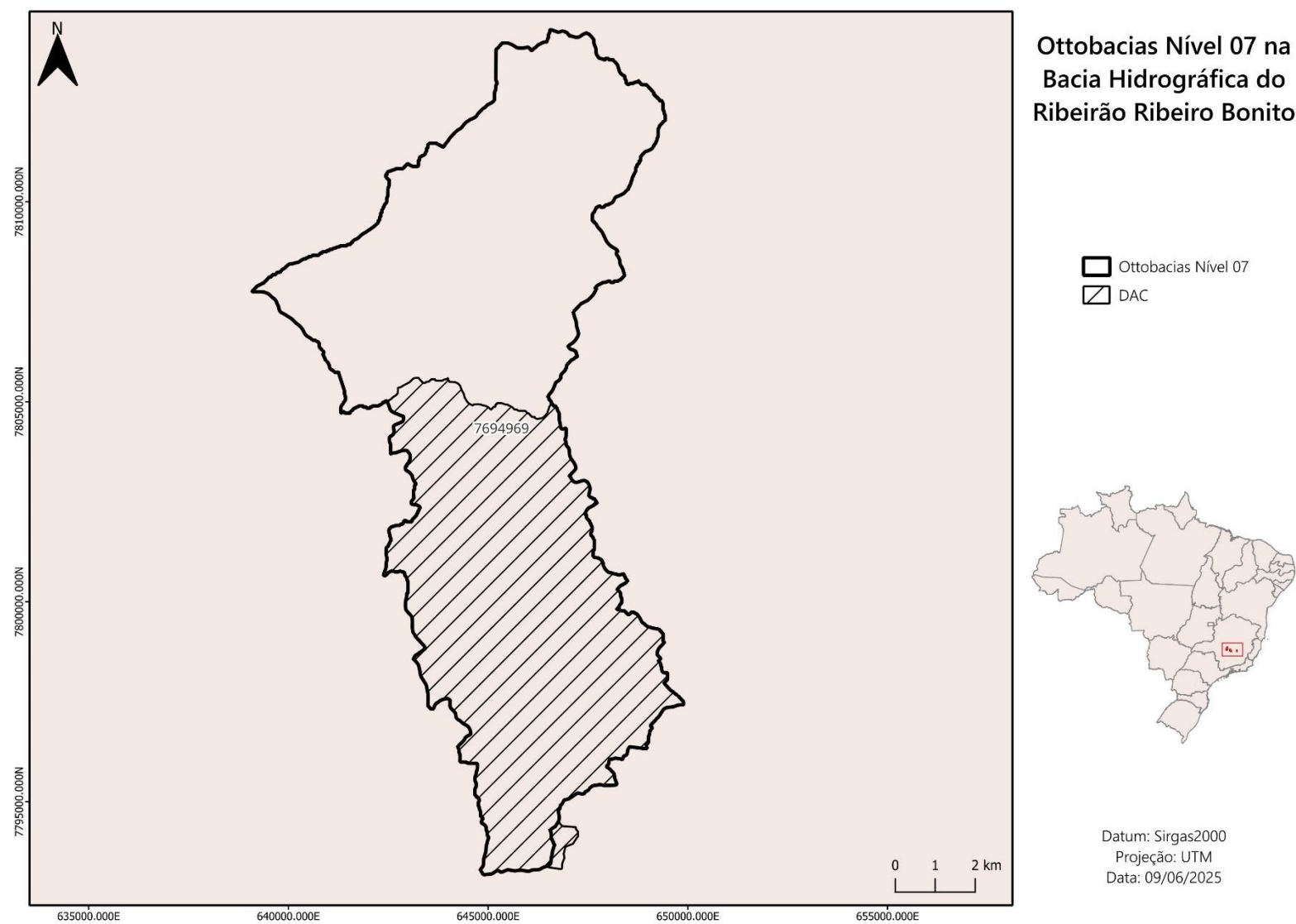
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Ottobacias nível 07 na BHRP



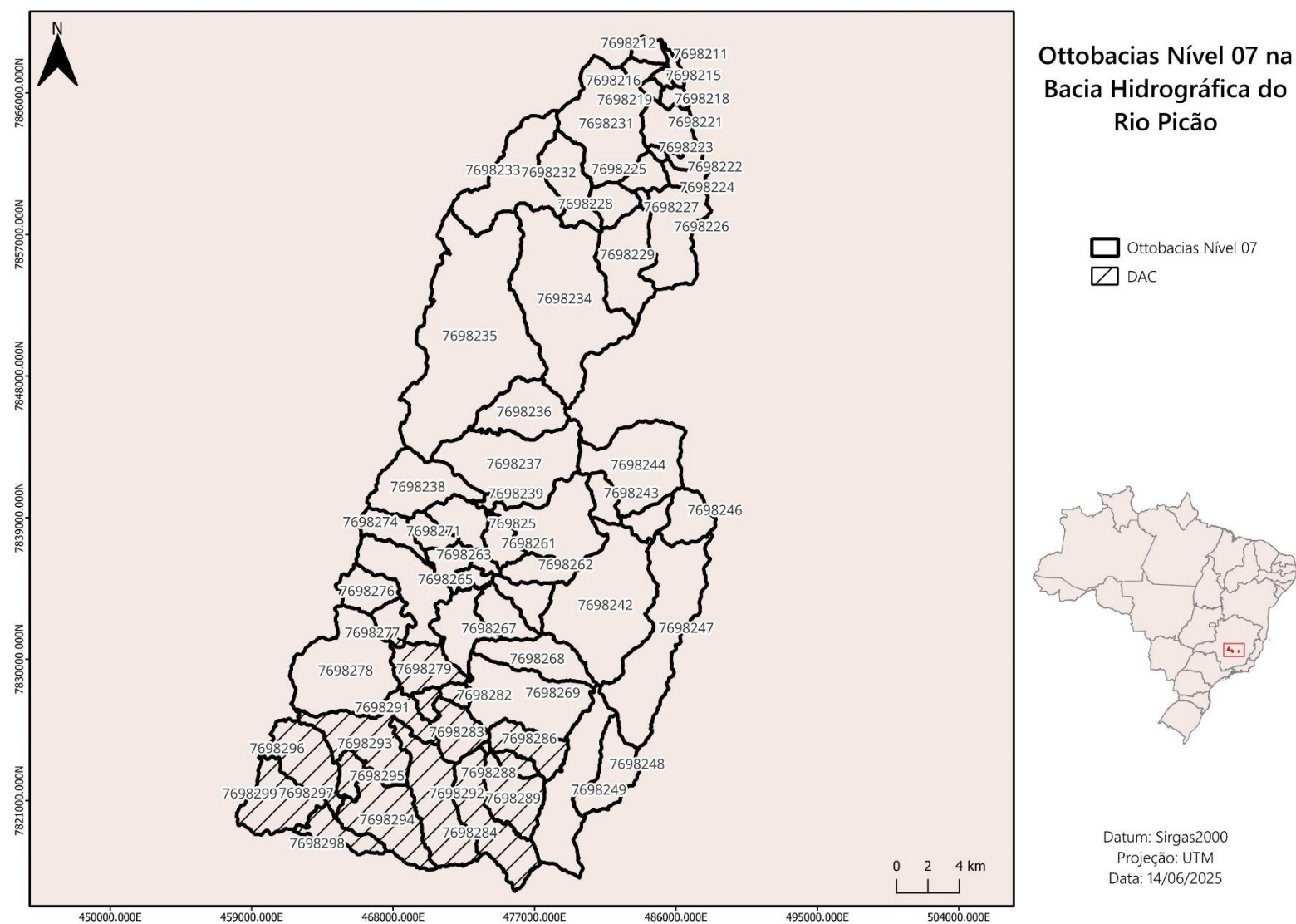
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Ottobacias nível 07 na BHRB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Ottobacias nível 07 na BHRPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

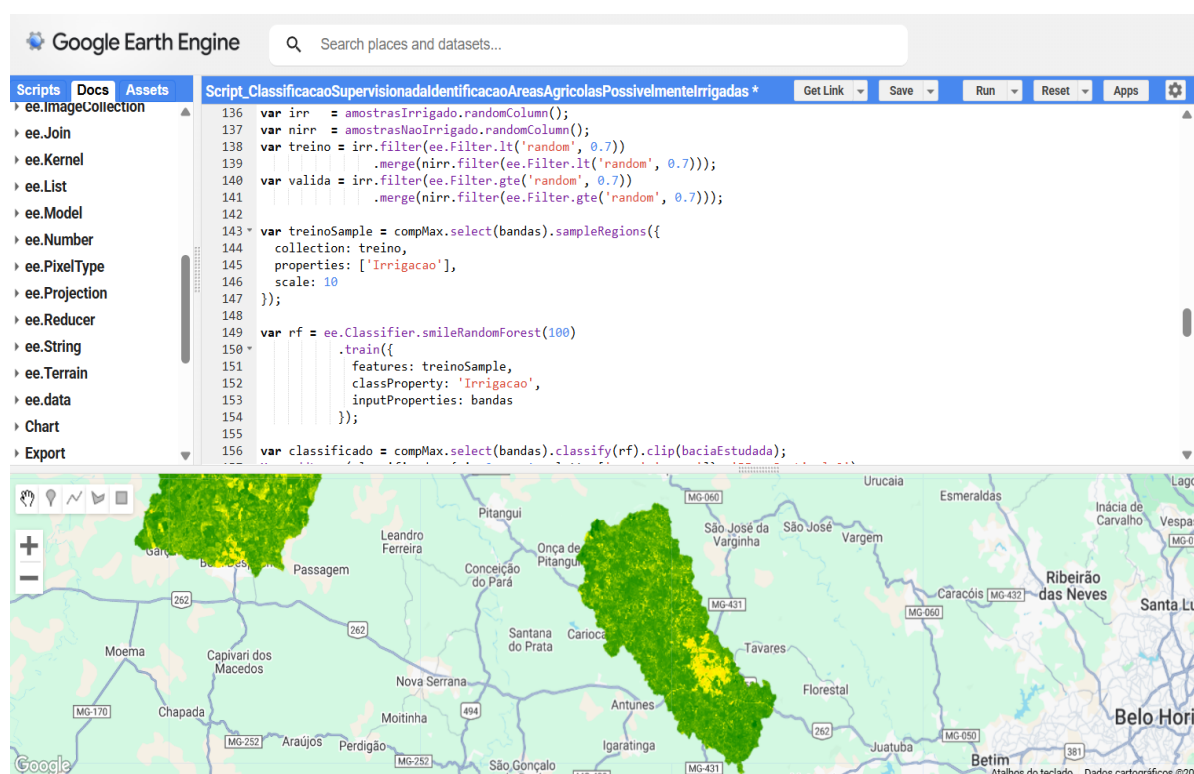
3.2.3 Estimativa da demanda hídrica para bacias hidrográficas

A segunda etapa do modelo consiste em estimar a demanda hídrica para bacias hidrográficas de forma independente em relação às solicitações de outorga para uso da água, como forma de auxiliar o usuário do modelo a identificar bacias prioritárias para análise. Neste sentido, estimou-se a demanda hídrica da agricultura, da pecuária e para o abastecimento humano, somando o resultado das 3 estimativas.

3.2.3.1 Estimativa da demanda hídrica da agricultura

A estimativa da demanda hídrica para a agricultura visa mapear áreas provavelmente irrigadas, já que, a agricultura irrigada corresponde ao principal consumidor de água em território brasileiro (ANA, 2019b). Logo, usos irregulares que tenham a irrigação como finalidade são os mais críticos no que diz respeito a quantidade de água utilizada, assim como, consistem em um dos principais focos de fiscalização para órgãos gestores (ANA, 2021). Para identificar estas áreas foi escolhida a plataforma *Google Earth Engine* (Gorelick et al., 2017) com o intuito de analisar séries temporais de imagens de satélite, por meio de classificação supervisionada (Figura 11).

Figura 11 - Parte do código utilizado no GEE para mapear áreas provavelmente irrigadas



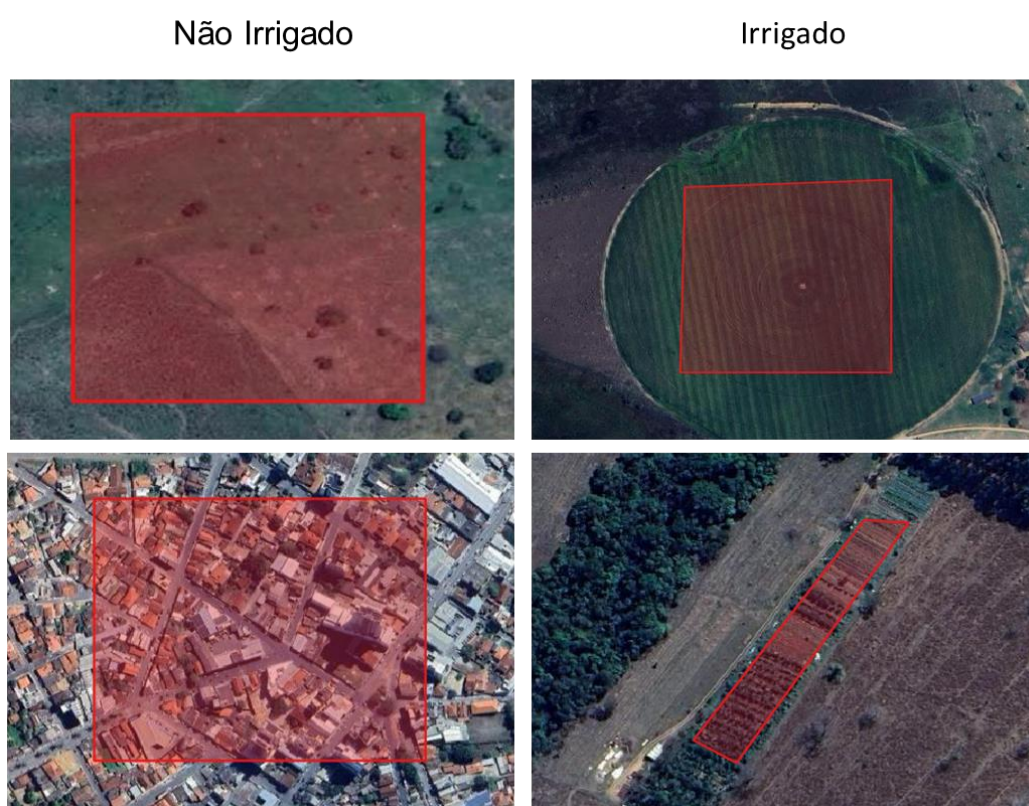
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para isto, dentre as fontes disponíveis no GEE, optou-se por utilizar imagens procedentes do satélite Sentinel-2, devido a sua ampla resolução temporal e espectral e pelo tamanho de pixel ser o mesmo dos produtos do Projeto MapBiomass (Souza et al., 2020). Foram selecionadas imagens que apresentassem o máximo de 5% de cobertura de nuvens entre janeiro e dezembro de 2024, totalizando 132 imagens. Esse intervalo foi definido buscando obter dados que representassem os meses secos e úmidos do ano, assim como, captassem de maneira geral o ciclo fenológico de todas as culturas cultivadas nas bacias hidrográficas. Após selecionadas, as imagens passaram por um processo de remoção de nuvens e posteriormente foi calculado o NDVI (Rouse et al., 1974). O resultado do índice aponta as vegetações mais saudias, que menos passam por estresse hídrico (Liu et al., 2023), indicando as áreas com provável existência de irrigação. O índice foi adicionado como uma banda nas imagens, gerando um cubo de dados, que pode ser entendido como um conjunto de séries temporais de imagens nos qual os pixels são espacialmente alinhados e cada elemento presente no cubo apresenta uma dimensão temporal e duas dimensões espaciais que estão associadas a um conjunto de valores (Ferreira et al., 2020). De posse da coleção de 132 imagens, associada ao índice de vegetação, foi gerada uma única imagem, por meio de um redutor de máximo valor de pixel (Filgueiras; Nobrega; Farias, 2014). Este redutor identifica o maior valor de pixel presente na pilha de imagens da coleção, levando em conta todas as bandas presentes. A redução pelo valor máximo de pixel tem como finalidade realçar as áreas de interesse, ou seja, às áreas com maiores valores de NDVI, assim como as bandas do infravermelho e visível, explicitando similaridades espectrais entre imagens obtidas em diferentes datas (Meneses; Almeida, 2012). A construção do classificador - que associa um algoritmo de aprendizagem de máquina e a imagem resultante do redutor de máxima - utilizou, dentre os algoritmos disponíveis na plataforma GEE, o *random forest* (RF), já que, classificadores que utilizaram RF e imagens resultantes de operador de máxima obtiveram bons resultados na identificação de áreas irrigadas (Silva et al., 2025). O random forest é um modelo de previsão que utiliza uma combinação de árvores de decisão, particionando recursivamente um conjunto de dados e ajustando um modelo para cada partição (Breiman, 2001; Loh, 2011).

Para realizar o processo de classificação supervisionada foi utilizado o índice NDVI mais as bandas B2, B3, B4, B8 e B11 presentes na imagem resultante do

reduzidor. Foram utilizados 445 polígonos como amostras para alimentar os classificadores, sendo destes 194 de áreas irrigadas e 251 de áreas não irrigadas (Figura 12). A definição das amostras utilizou como base o mapeamento de uso e cobertura do solo do Projeto MapBiomas (Coleção 2 beta, 10 metros) para o ano de 2023, confirmando os dados, por meio de inspeção visual, em imagens de resolução fina ($< 1\text{m}$) da plataforma *Google Earth*. Estas amostras foram divididas de tal modo a considerar 70% para o treinamento dos algoritmos de aprendizagem de máquina e 30% para validação da precisão da classificação.

Figura 12 - Amostras de áreas irrigadas e não irrigadas



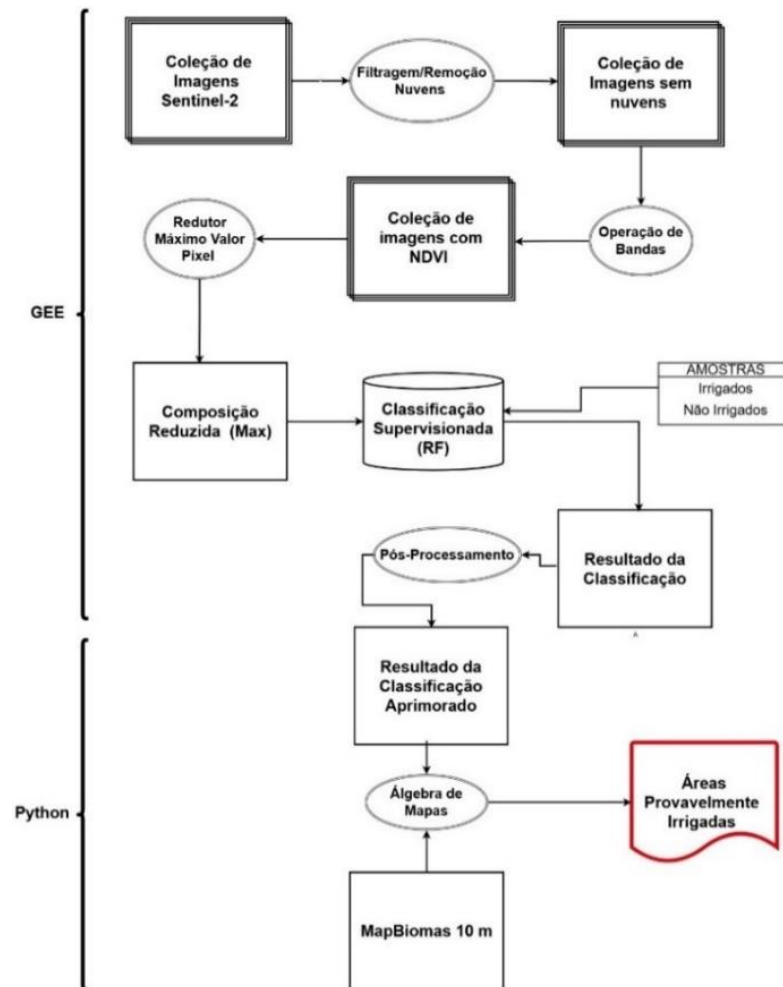
Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação da eficiência da classificação foi obtida através do cálculo da acurácia geral e do índice Kappa. Ambos os métodos podem ser entendidos como medidas de concordância e precisão, sendo a acurácia obtida através da divisão do total de pixels classificados corretamente pelo número total de pixels em uma matriz de erro, enquanto o Kappa determina se os resultados apresentados em uma matriz de erro são significativamente melhores que um resultado aleatório (Congalton, 1991). Nesta direção, foram utilizados os 30% das amostras selecionadas como dados de validação para a definição das matrizes de erro utilizadas no cálculo dos valores de

acurácia geral e Kappa, obtendo a precisão dos dados de validação em relação aos classificadores.

O produto da classificação supervisionada passou por pós-processamento, suavizando os resultados através da remoção de pixels isolados e do preenchimento de espaços vazios entre os pixels classificados como irrigados, propiciando a obtenção de áreas mais homogêneas como resultado da classificação (Medina et al., 2024). Na sequência, foi realizada uma álgebra de mapas, multiplicando o produto da classificação após o pós-processamento pelo mapeamento de uso e cobertura do solo de 2023, com resolução espacial de 10 metros, disponibilizado pelo MapBiomas (Coleção 2 beta, 10 metros), no qual foram filtradas as áreas integrantes do nível 1 do mapeamento correspondente às classes relacionadas à agropecuária. Das classes integrantes deste nível foi excluída aquela identificada como silvicultura, restando as áreas mapeadas como: pastagem, mosaico de usos, lavouras temporárias e lavouras perenes. O mapa resultante desta filtragem multiplicado pelo resultado da classificação retornou as áreas mapeadas como irrigadas pela classificação supervisionada que estão em áreas agrícolas, de acordo com os dados oriundos do MapBiomas (Figura 13).

Figura 13 - Diagrama do procedimento de mapeamento de áreas provavelmente irrigadas

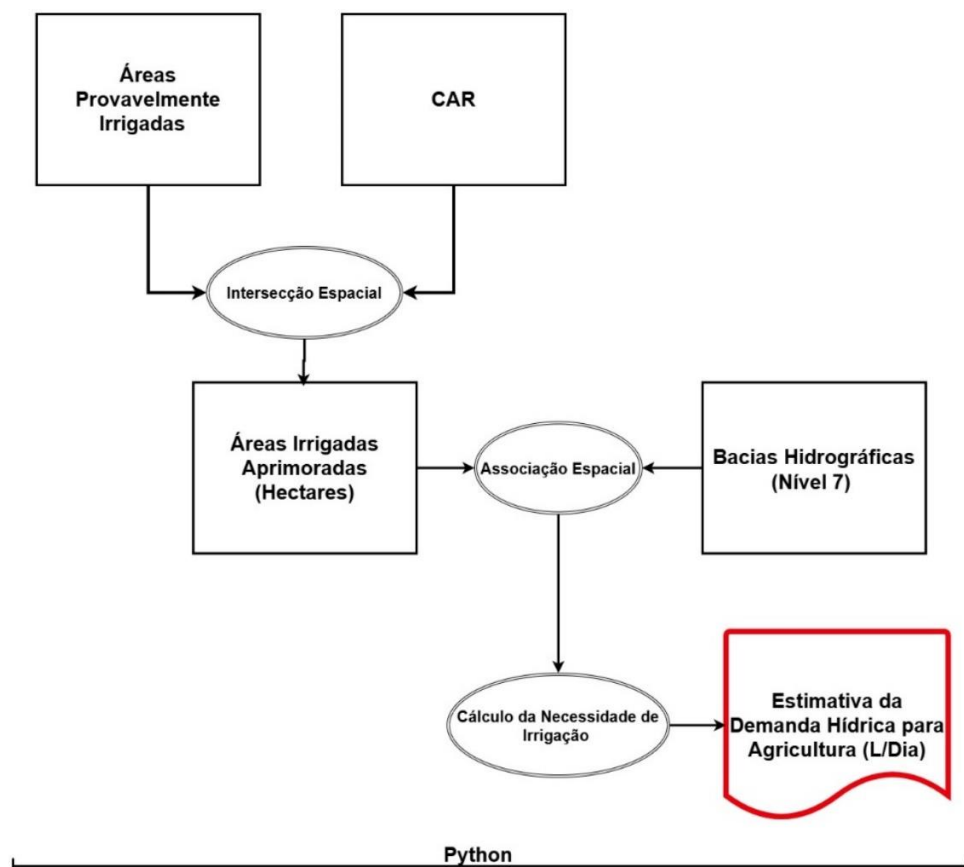


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos foram convertidos para o formato vetorial e passaram por uma operação de intersecção espacial com as propriedades cadastradas no CAR, restando apenas aquelas áreas mapeadas como provavelmente irrigadas, e que se encontrem dentro de alguma propriedade. Após isso, cada área foi associada, de acordo com sua localização, a uma ottobacia nível 7 permitindo o cálculo da dimensão, em hectares, das áreas provavelmente irrigadas em cada bacia hidrográfica. Tal dado permitiu estimar a demanda hídrica em L/dia para agricultura (Figura 14), sendo os hectares multiplicados pela necessidade de irrigação - dada em litro(s) por segundo por hectare (L/s/ha) - das culturas (ANA, 2019a). Adicionalmente, para melhor caracterizar a necessidade de irrigação de cada área, foram utilizados os dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) (IBGE, 2023c), identificando as principais culturas existentes em cada um dos municípios em que as bacias estão inseridas. Com base nessa informação foi realizada uma média da necessidade de irrigação, que

representa a necessidade de água para a cultura acrescida de perdas do sistema de irrigação, ou seja, a necessidade total de captação de água (ANA, 2019a), das 3 maiores culturas, em hectares de área plantada (Quadro 4). Para isto, considerou-se, como medidas conservadoras, com o objetivo de não superestimar a necessidade de irrigação, a precipitação efetiva esperada de 100% da média mensal, que corresponde a demanda de água das culturas que pode ser atendida pela precipitação, e a eficiência do uso da água no processo de irrigação de 80%, uma vez que não se tem informações disponíveis sobre os métodos de irrigação utilizados nestas bacias e, de maneira geral, a irrigação por pivôs centrais apresenta eficiência entre 80% e 95%, enquanto sistemas de aspersão convencional de média pressão estão entre 60 e 75% e os de gotejamento ultrapassam os 90% de eficiência (Coelho; Silva, 2013; ANA, 2019a).

Figura 14 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica da agricultura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Necessidade de irrigação por município

Município	Culturas	Necessidade Irrigação Média (L/s/ha)
Bom Despacho	Cana-de-açúcar, Milho (em grão) e Soja (em grão)	0,117
Caeté	Cana-de-açúcar, Milho (em grão) e Banana (cacho)	0,18
Florestal	Milho (em grão), Cana-de-açúcar e Mandioca	0,109
Martinho Campos	Feijão (em grão), Milho (em grão) e Soja (em grão)	0,123
Onça de Pitangui	Soja (em grão), Tomate e Milho (em grão)	0,133
Pará de Minas	Tomate, Borracha (látex coagulado) e Milho (em grão)	0,136

Fonte: IBGE, 2023c; ANA, 2019a.

3.2.3.2 Estimativa da demanda hídrica da pecuária

Após estimar a demanda hídrica da agricultura é necessária a quantificação da demanda hídrica para a pecuária. Para este fim, foram utilizados os coeficientes médios de consumo, por tipo de rebanho (ANA, 2019b), multiplicados pelo número de rebanhos em cada bacia hidrográfica.

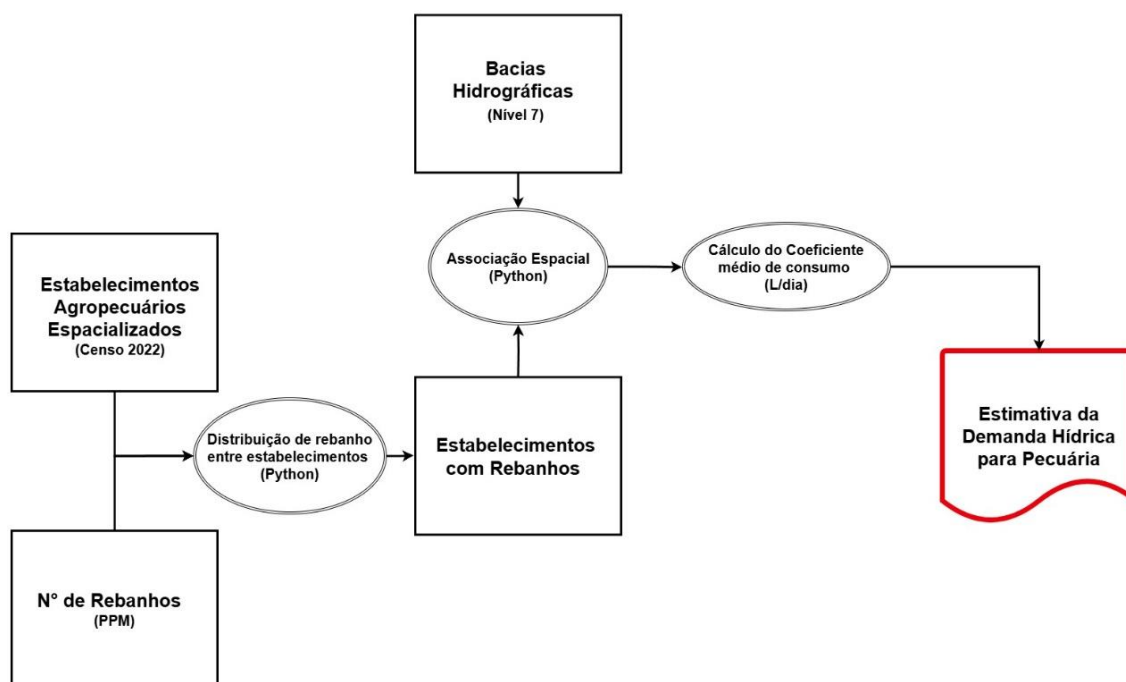
As informações dos rebanhos são obtidas da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) (IBGE, 2023b), com a data base de 2022, por município. Deste dado foram considerados os rebanhos bovinos, equinos, suínos e galináceos (Quadro 5). Por tratar-se de um dado municipal, as estimativas de distribuição dos rebanhos foram relativizadas para refinar os dados no território da bacia. Neste sentido, a quantidade de rebanhos de cada município foi distribuída proporcionalmente entre os estabelecimentos agropecuários cadastrados no Censo 2022, respeitando os limites municipais (IBGE, 2023a). Após isso, os estabelecimentos e seus respectivos rebanhos foram associados as bacias hidrográficas nível 7 em que se encontram permitindo o cálculo da demanda hídrica, em litros por dia (L/dia), para pecuária (Figura 15).

Tabela 2 - Coeficientes médios de consumo por rebanho

Rebanho	Retirada (L/cabeça/dia)	Percentual de Consumo (%)
Bovinos	127,5	60
Equinos	40	80
Suínos	18,7	60
Galináceos	0,22	69

Fonte: ANA, 2019b.

Figura 15 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica da pecuária



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.3 Estimativa da demanda hídrica para o abastecimento humano

A estimativa da demanda hídrica para o abastecimento humano foi realizada com base nos valores de consumo médio per capita de água para área rural e urbana multiplicados pelo contingente populacional em cada trecho das bacias hidrográficas. O valor de consumo médio por habitante na zona rural do Estado de Minas Gerais é de 125 L/hab/dia (ANA, 2019b), enquanto os valores de consumo da população urbana (Quadro 6), assim como, o percentual de perdas na distribuição de água utilizados nos cálculos variam entre os municípios (BRASIL, 2024).

Tabela 3 - Valores médios de consumo per capita de água da população urbana e percentual de perdas na distribuição de água por município

Município	Consumo médio percapita de água (L/hab/dia)	Índice de perdas na distribuição (%)
Bom Despacho	154,1	28,94
Caeté	115,3	54
Florestal	185,4	25,57
Martinho Campos	172,3	24,81
Onça de Pitangui	108,4	39,88
Pará de Minas	144,3	17,05

Fonte: BRASIL, 2024.

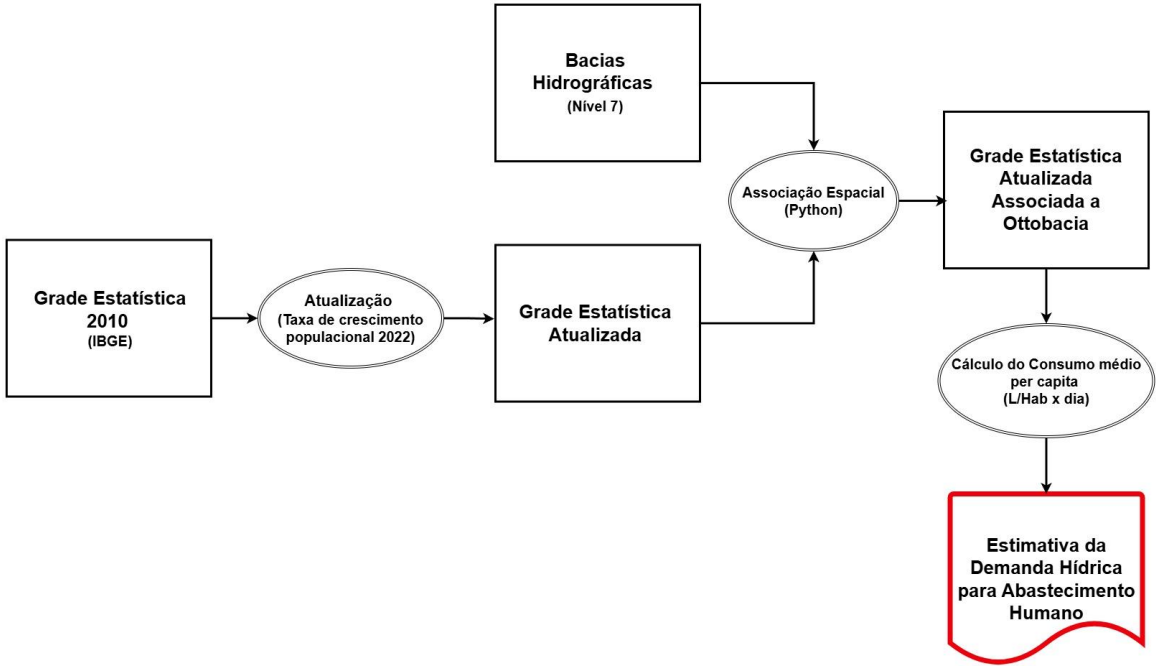
A população foi obtida através da atualização da Grade Estatística (IBGE, 2016) - que contém informações sobre população, rural e urbana, com base no Censo Demográfico de 2010 - utilizando a taxa média geométrica de crescimento anual da população, fornecida para cada município no Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023a) (Quadro 7). A grade estatística foi escolhida no cálculo da estimativa populacional por poder ser utilizada em diversos recortes espaciais, como áreas específicas das bacias hidrográficas, permitindo agregar dados independentemente das divisões político-administrativas, o que aumenta a assertividade das análises. Com base na grade estatística atualizada, o contingente populacional foi associado as bacias em que se encontram, permitindo calcular a demanda hídrica voltada ao abastecimento humano (Figura 16).

Tabela 4 - Taxa média geométrica de crescimento dos municípios

Município	Taxa de crescimento geométrico (%)
Bom Despacho	1,05
Caeté	-0,41
Florestal	1,62
Martinho Campos	0,88
Onça de Pitangui	-0,24
Pará de Minas	1,2

Fonte: IBGE, 2023a.

Figura 16 - Diagrama da estimativa da demanda hídrica voltada ao abastecimento humano



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Definição de bacias hidrográficas prioritárias na análise de áreas potenciais de usos irregulares

A terceira etapa do modelo consiste em priorizar bacias hidrográficas, direcionando à análise do usuário durante o processo de identificação de áreas potenciais de usos irregulares. Esse processo levou em consideração a pressão hídrica existente nas bacias hidrográficas, sendo que, aquelas bacias que apresentam demanda hídrica elevada, de acordo com os dois dados de demanda obtidos no modelo, serão priorizadas. Esta etapa, baseou-se no Índice de Segurança Hídrica (ANA, 2020) que, apesar de mais complexo, fundamenta-se no princípio de combinar diferentes variáveis, onde os valores de cada uma são classificados em faixas com atribuição de pesos, somando-os, como em uma análise multicritérios. O Índice de Segurança Hídrica considera quatro dimensões relacionadas à segurança hídrica, sendo elas a dimensão humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência sendo essas dimensões divididas em indicadores que têm seus valores classificados em faixas de gradação, que são normalizadas por meio da atribuição dos números naturais de 1 a 5, em ordem decrescente do nível de segurança hídrica (Castro, 2022).

Nesta direção, foi realizada a integração dos dados obtidos através do cálculo da demanda hídrica legal com a estimativa demanda hídrica, por meio da elaboração de uma matriz de priorização. Nesta matriz, os valores referentes a demanda hídrica, obtidos nas etapas anteriores, foram reclassificados, em faixas de valores, sendo que cada faixa recebeu um peso e estes pesos foram somados, através de uma combinação linear ponderada. A elaboração desta matriz teve como objetivo minimizar eventuais desvios existentes no cálculo da demanda hídrica legal, causados, por exemplo, pela subnotificação de usuários da água ou desatualização de bases de dados disponíveis, assim como, na estimativa da demanda hídrica, onde, devido a indisponibilidade de dados consolidados de maneira ampla para bacias hidrográficas, foram utilizados e analisados dados secundários de diferentes fontes públicas. Ambas as demandas hídricas, anteriormente processadas no modelo, utilizadas em conjunto, geram um fator de redundância, permitindo consolidar de maneira mais assertiva, as bacias prioritárias para serem analisadas.

Nesta direção, foram atribuídos pesos (Quadro 8) as 5 faixas de valores geradas para ambas as demandas hídricas. Esse processo foi realizado com base em

quebras naturais existentes na escala de valores que compõe os conjuntos de dados. Este processo identifica os padrões inerentes aos dados permitindo diferenciar áreas por meio da elaboração de classes de acordo com a distribuição dos dados, identificando pontos de quebra por meio de uma fórmula estatística que minimiza a soma da variância dentro de cada uma das classes criadas (Sallun; Suguio; Filho, 2007). A soma dos pesos atribuídos permitiu a elaboração de uma classificação final (Quadro 9) da prioridade de análise para cada bacia. Dessa forma, foi possível hierarquizar todas as bacias nível 7, mapeando aquelas onde é necessária priorização da análise do usuário.

Tabela 5 - Relação de pesos atribuídos aos valores da demanda hídrica legal e demanda hídrica estimada

Limite Superior em L/dia (Demanda Legal)	Limite Superior em L/dia (Demanda Estimada)	Peso atribuído
86.300	326.000	0
2.130.000	1.120.000	1
3.610.000	2.000.000	2
7.500.000	4.620.000	3
26.300.000	19.220.000	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Classificação final das prioridades

Score (Soma dos Pesos)	Prioridade
0	Muito Baixa
1 a 3	Baixa
4 a 5	Média
6 a 7	Alta
8	Muito Alta

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.5 Identificação de possíveis usos irregulares de água

A quarta, e última etapa do modelo foi a identificação de possíveis usos irregulares de água. Neste sentido, foi elaborado um protocolo de análise, que utiliza os dados coletados e produzidos nas etapas anteriores do modelo, que, ao ser realizado de maneira encadeada permite a identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos. Tal procedimento direciona os esforços do usuário do modelo, sendo que, os produtos resultantes da estimativa de demanda hídrica para a agricultura - como o mapeamento de áreas provavelmente irrigadas - assim como, as outorgas, usos insignificantes e propriedades do CAR são subsídios para apontar locais com possíveis irregularidades.

Nesta etapa do modelo, em primeiro momento, foram selecionadas as bacias hidrográficas definidas como prioritárias e nestas bacias foram escolhidos somente as propriedades cadastradas no CAR com áreas mapeadas como provavelmente irrigadas. Dentre estas propriedades foram analisados grupos específicos, de acordo com a dimensão em hectares que eles ocupam, levando em conta as características fundiárias e agrícolas de cada bacia e seus municípios. Neste sentido os imóveis foram selecionados de acordo com o módulo fiscal padrão de cada município (INCRA, 2025), sendo esse uma unidade de mensuração agrária, que varia entre os municípios e corresponde a área mínima, em hectares, necessária para propriedades rurais serem consideradas viáveis do ponto de vista econômico (Landau et al., 2012).

As propriedades rurais, que foram mantidas após essa combinação de seleções foram divididas de acordo com a presença ou não de captações de água legalmente autorizadas dentro de seus limites, assim como, a principal finalidade desta captação quando existente, irrigação ou outros (Figura 17). Após isso, também foram ranqueadas as propriedades de acordo com o tamanho das áreas mapeadas como provavelmente irrigadas, partindo do pressuposto que quanto maior a área, maior o impacto de um uso possivelmente irregular. Isso diminui drasticamente o número de casos analisados, tornando exequível a realização da inspeção visual de cada caso e a confirmação ou não, pelo usuário do modelo, da existência de uma área potencial de uso irregular de recursos hídricos. Por fim, foi analisada a localização das propriedades em relação a áreas com DAC sendo que, a não existência de uma captação nos imóveis destas áreas, ou a não existências de captação destinada a irrigação, pode estar relacionada a uma alocação negociada dos recursos hídricos por meio de outorgas coletivas. Dessa forma, antes da possível validação pelo usuário de uma área potencial de uso irregular é necessária a consulta sobre a existência ou não e a abrangência da DAC na bacia alvo da análise.

Esse protocolo (Figura 18) fornece os insumos necessários para identificar incoerências existentes entre as propriedades, as captações e o uso do solo, como por exemplo, propriedades em que existam captações solicitadas com a finalidade de consumo humano e que estão presentes em áreas mapeadas pelo modelo como provavelmente irrigadas, assim como, captações voltadas para irrigação onde as vazões solicitadas estão aquém da dimensão, em hectares, de área irrigada direcionando a atuação dos órgãos gestores.

Figura 17 - Parte do código *python* utilizado no processo de identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos

```

else:
    nenhum.append(pol)

# Converte listas em GeoDataFrames
gdf_so_pnta = gpd.GeoDataFrame(so_pnta, crs=pol2expv2.crs)
gdf_so_pntb = gpd.GeoDataFrame(so_pntb, crs=pol2expv2.crs)
gdf_ambos = gpd.GeoDataFrame(ambos, crs=pol2expv2.crs)
gdf_nenhum = gpd.GeoDataFrame(nenhum, crs=pol2expv2.crs)

gdf_so_pnta['classe'] = 'Irrigação'
gdf_so_pntb['classe'] = 'OutrasFinalidades'
gdf_ambos['classe'] = 'IrrigaçãoOutrasFinalidades'
gdf_nenhum['classe'] = 'SemCaptação'

# Criar o ranking dentro de cada camada
for gdf in [gdf_so_pnta, gdf_so_pntb, gdf_ambos, gdf_nenhum]:
    if 'Area_Ha_Irrigada' in gdf.columns and not gdf.empty:
        gdf['Prioridade'] = gdf['Area_Ha_Irrigada'].rank(method='first', ascending=False).astype(int)
    else:
        gdf['Prioridade'] = None # Para caso de camada vazia

# Print
print(f'Irrigação: {len(gdf_so_pnta)}')
print(f'Outras Finalidades: {len(gdf_so_pntb)}')
print(f'IrrigaçãoOutrasFinalidades: {len(gdf_ambos)}')
print(f'SemCaptação: {len(gdf_nenhum)}')

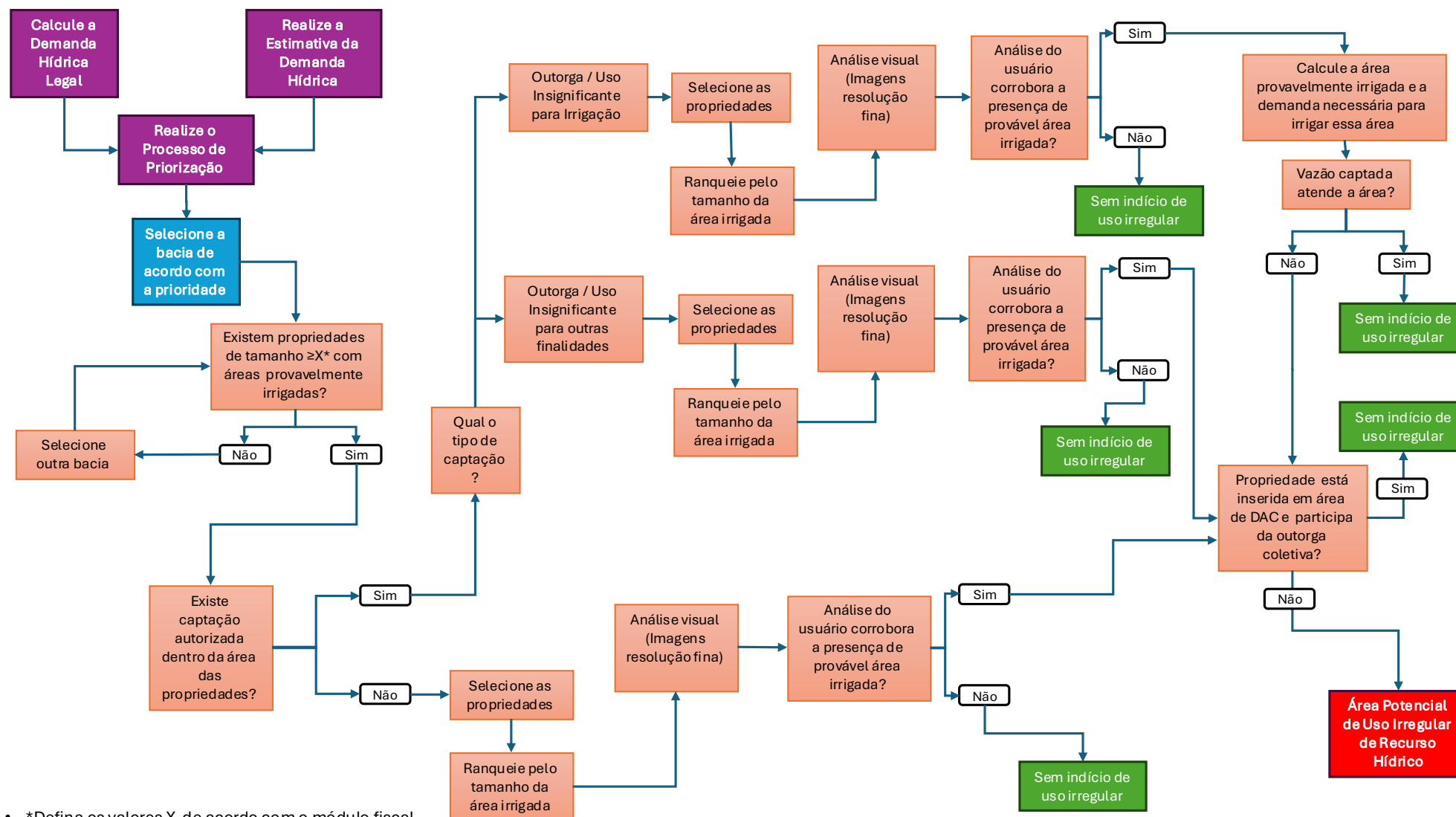
# Exporta
gdf_so_pnta.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg', layer='Irrigacao', driver='GPKG')
gdf_so_pntb.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg', layer='OutrasFinalidades', driver='GPKG')
gdf_ambos.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg', layer='IrrigacaoOutrasFinalidades', driver='GPKG')
gdf_nenhum.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg', layer='SemCaptacao', driver='GPKG')

Irrigação: 2
Outras Finalidades: 38
IrrigaçãoOutrasFinalidades: 15
SemCaptação: 66

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Diagrama do protocolo de análise para identificação de áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

4.1 Demanda hídrica legal

A demanda hídrica legalmente existente na área de estudo compreende a soma das captações superficiais e subterrâneas autorizadas pelo órgão gestor (i.e., IGAM). Na BHRP, estão em vigor, de acordo com os dados consultados, 736 cadastros de usos insignificantes e 284 outorgas. A ottobacia nível 7 com maior demanda diária está localizada ao sul da BHRP (Figura 19), bacia 7698629, compreendendo a área urbana de Pará de Minas e seu entorno, tendo como demanda hídrica legal 26.200.350,57 litros por dia (Tabela 1).

Tabela 7 - Demanda hídrica legal nas ottobacias nível 7 da BHRP

Código da bacia (Nível 7)	Demanda Hídrica Legal (L/dia)
7698621	120.160,00
7698622	290.760,00
7698624	7.416.147,67
7698629	26.200.350,57
7698627	147.500,00
7698623	1.665.252,00
7698625	186.660,00
7698626	2.875.788,00
7698628	1.503.451,60

Fonte: MINAS GERAIS, 2024; MINAS GERAIS, 2025.

Já a BHRB, compreende apenas uma ottobacia nível 7 e nesta a demanda hídrica legal diária é de 4.935.346 litros de água. Nesta bacia, estão registrados 38 cadastros de usos insignificantes e 20 outorgas (Figura 20). Na BHRPI estão localizadas um total de 668 captações, sendo 223 outorgas e 445 cadastros de usos insignificantes (Figura 21). A bacia 7698233, localizada próxima a sede municipal de Martinho Campos, é a que mais se destaca de acordo com a demanda hídrica, totalizando 7.132.605,6 litros por dia (Tabela 2).

Tabela 8 - Demanda hídrica legal nas ottobacias nível 7 da BHRPI

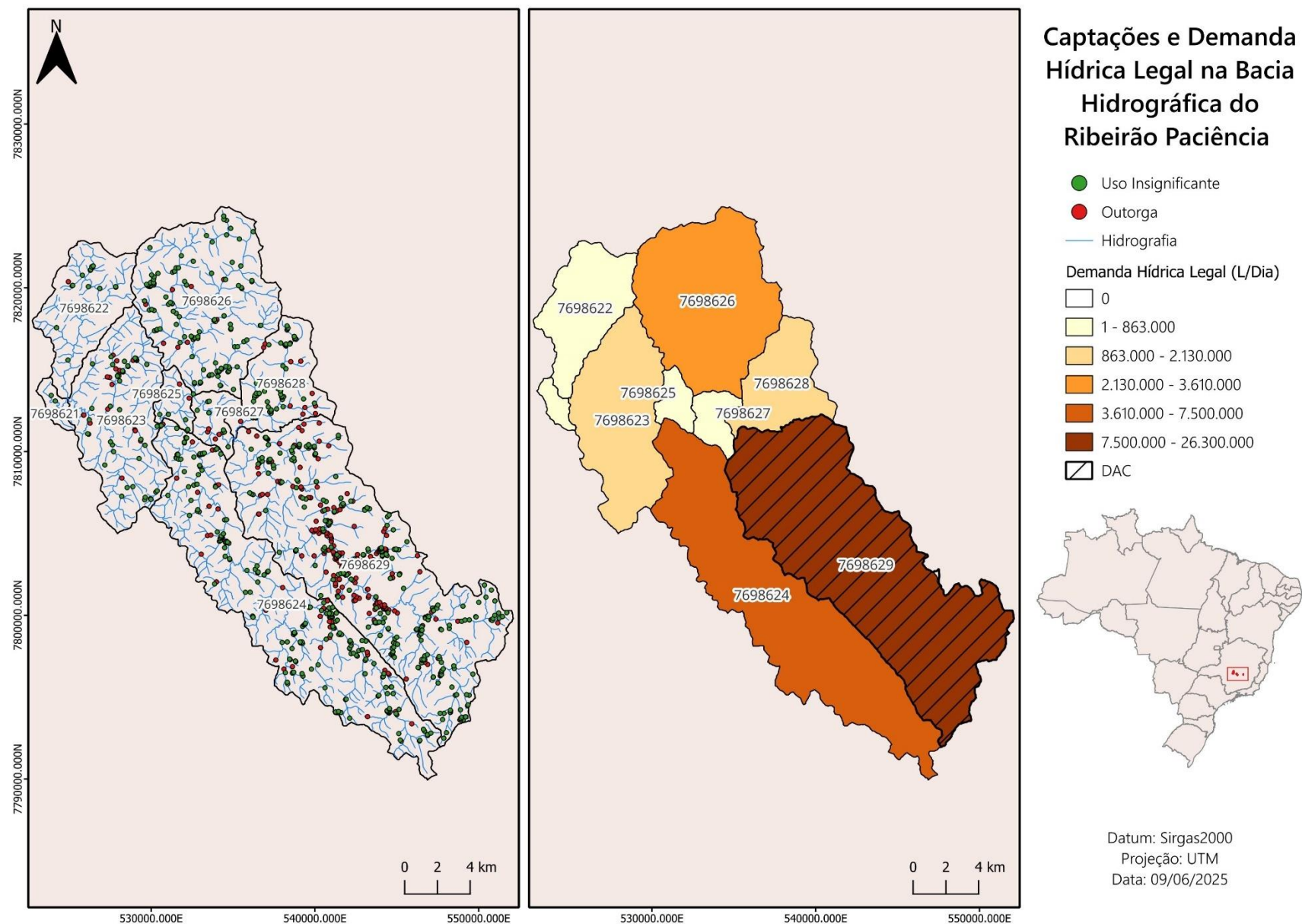
Código da bacia (Nível 7)	Demanda Hídrica Legal (L/dia)
7698249	1.368.472,00
7698235	2.407.900,33
7698266	793.604,00
7698264	43.000,00
7698289	398.585,00
7698284	2.881.900,00
7698241	3.288.273,00
7698221	33.600,00

7698229	1.769.650,00
7698222	1.700,00
7698237	597.480,00
7698276	538.970,00
7698279	2.126.474,40
769825	0,00
7698274	96.200,00
7698269	2.723.938,00
7698286	24.000,00
7698231	6.110.780,00
7698238	199.120,00
7698224	0,00
7698234	6.136.393,33
7698262	81.280,00
7698245	17.200,00
7698296	154.400,00
7698272	69.966,67
7698243	401.520,00
7698267	5.046.878,00
7698216	1.400,00
7698261	32.200,00
7698298	103.800,00
7698278	637.520,00
7698291	11.200,00
7698275	1.980.433,33
7698268	709.640,00
7698271	3.604.740,00
7698273	1.032.736,00
7698225	26.400,00
7698295	20.588,40
7698277	292.872,00
7698226	327.200,00
7698299	502.520,00
7698283	39.240,00
7698247	165.560,00
7698232	610.300,00
7698211	0,00
7698223	0,00
7698214	0,00
7698227	0,00
7698213	0,00
7698242	197.434,00
7698218	0,00
7698263	0,00
7698233	7.132.605,60
7698246	0,00
7698288	9.200,00
7698292	1.716.995,36
7698215	0,00
7698285	0,00
7698244	134.186,67
7698228	16.480,00
7698287	0,00

7698281	10.000,00
7698282	187.020,00
7698265	8.000,00
7698297	0,00
7698219	4.000,00
7698293	2.354.380,00
7698294	1.943.988,00
7698212	3.016,67
7698239	25.920,00
7698236	862.444,67
7698217	112.680,00
7698248	100.400,00

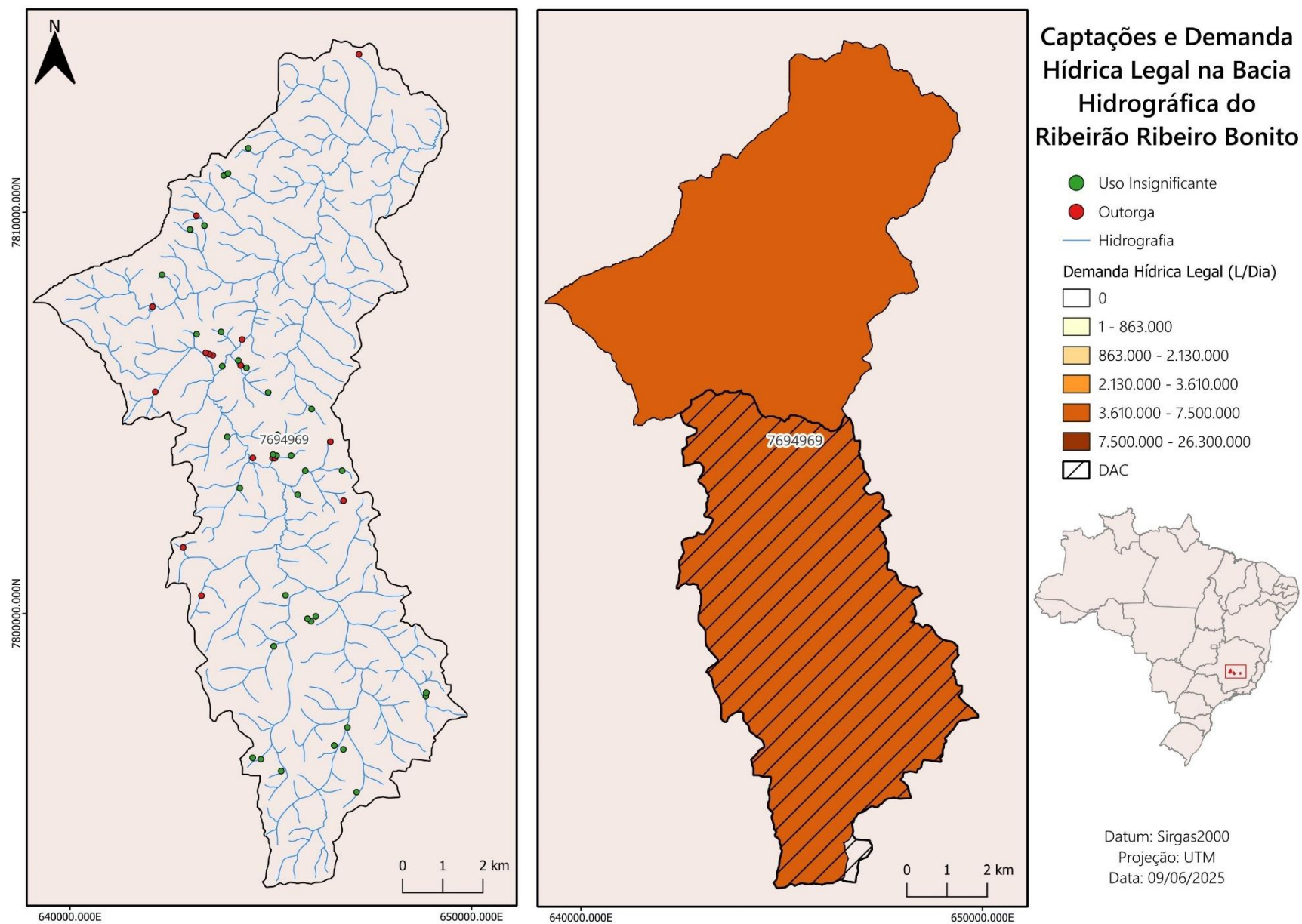
Fonte: MINAS GERAIS, 2024; MINAS GERAIS, 2025.

Figura 19 - Demanda hídrica legal na BHRP



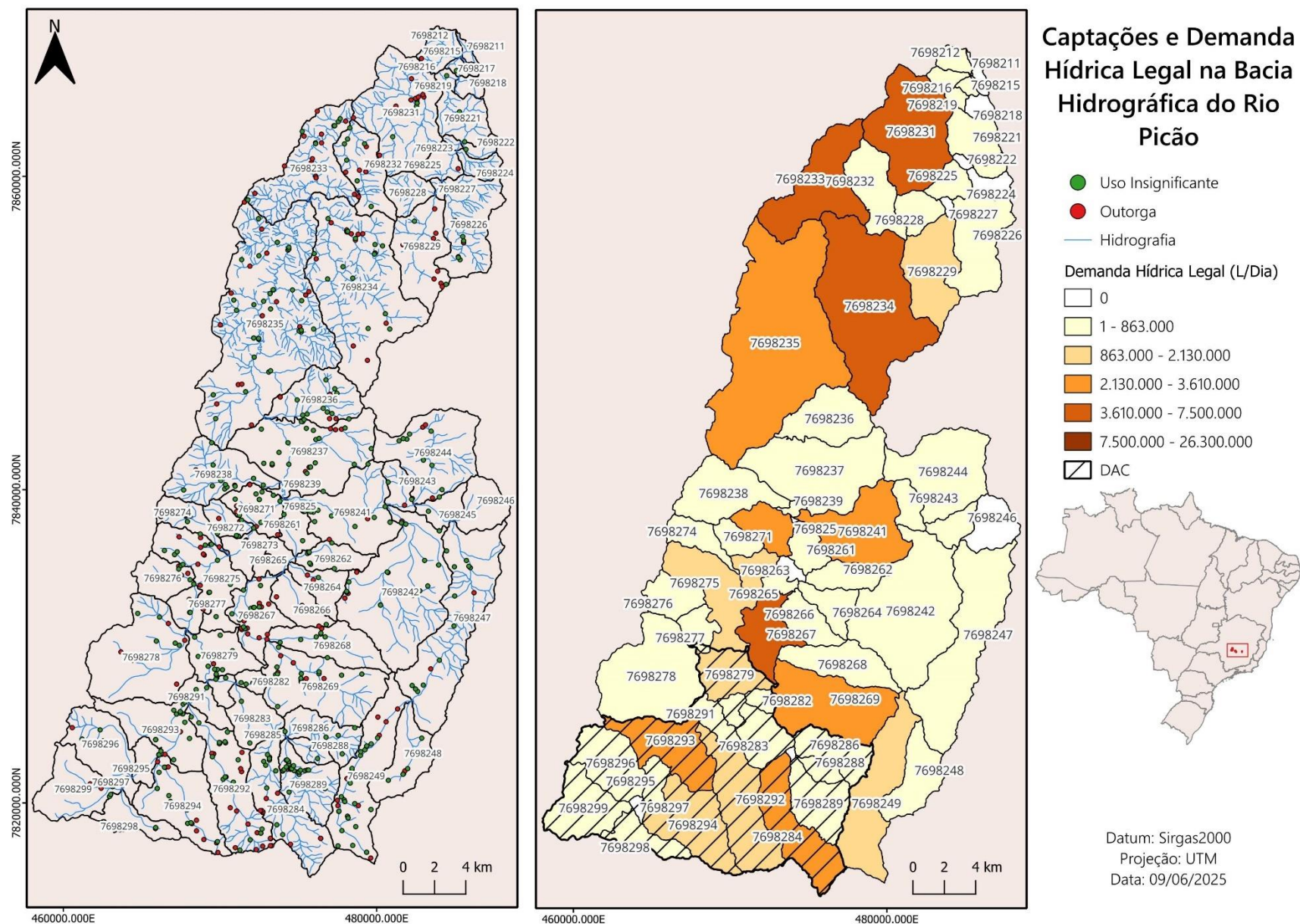
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Demanda hídrica legal na BHRB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Demanda hídrica legal na BHRPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Estimativa da demanda hídrica para bacias hidrográficas

4.2.1 Mapeamento de áreas provavelmente irrigadas

A estimativa da demanda hídrica para as bacias hidrográficas estudadas passa pelo mapeamento e quantificação de prováveis áreas irrigadas. O processo de classificação supervisionada para identificação destas áreas obteve uma acurácia geral de 0,97 ou 97% e um índice KAPPA de 0,83 ou 83%, considerado muito bom, já que valores de KAPPA abaixo de 0,4 são tratados como baixos, enquanto aqueles acima de 0,4 até 0,7 como moderados e bons e acima de 0,7 diversos autores consideram os valores de KAPPA de substanciais a muito bons (Landis; Koch, 1977; Monserud; Leemans, 1992) (Quadro 10).

Tabela 9 - Matriz de confusão do processo de classificação supervisionada

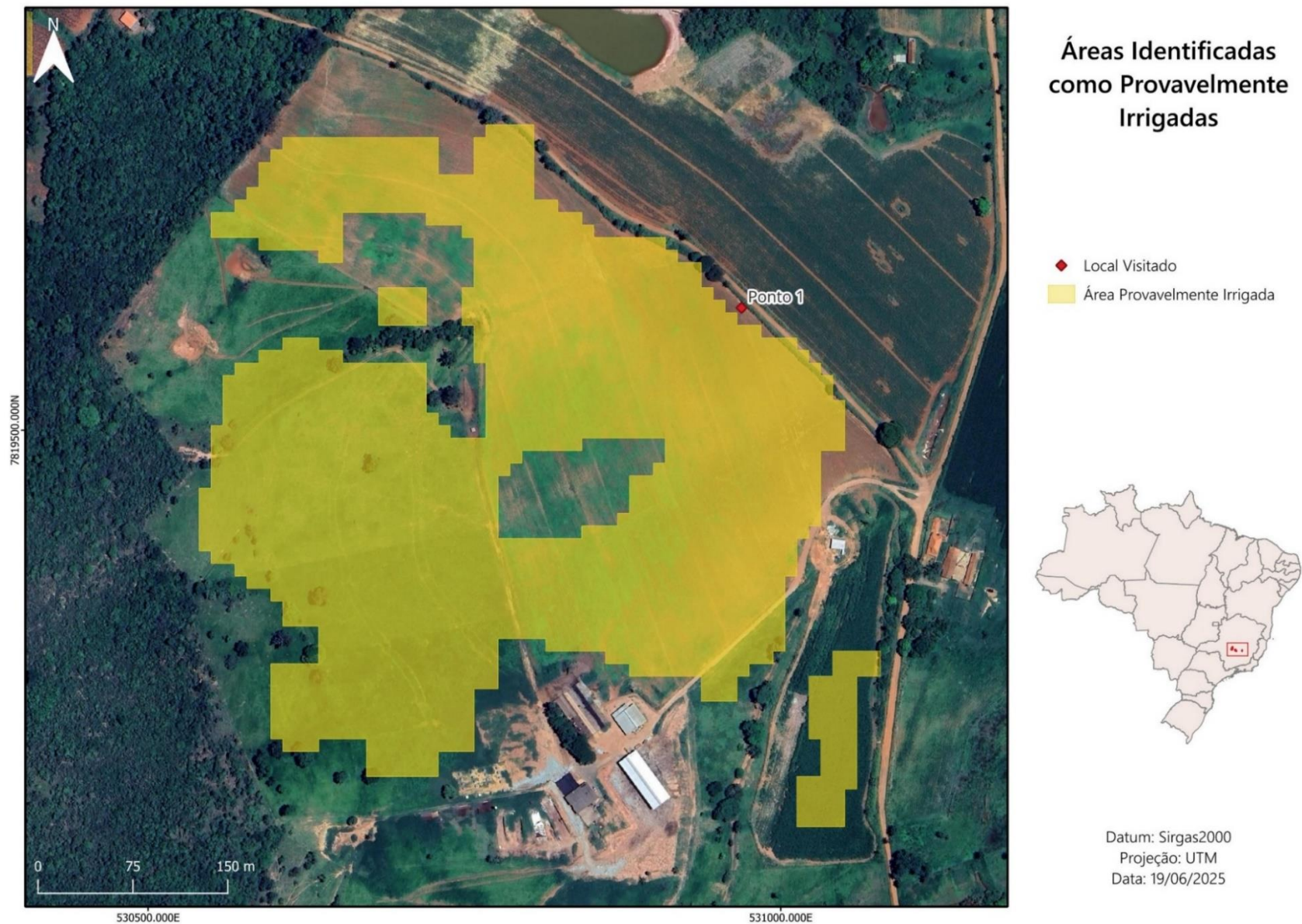
	Pixel classificado como não irrigado	Pixel classificado como irrigado
Pixel de referência não irrigado	56.017	124
Pixel de referência irrigado	1.354	4.272

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado do processo de classificação - após o processamento utilizando dados do Mapbiomas e as áreas dos imóveis cadastrados no CAR - retornou somente aquelas áreas agrícolas, já mapeadas por um projeto amplamente consolidado, que estejam dentro de imóveis rurais, uma vez que, é esperado que a irrigação ocorra somente dentro dos limites de uma propriedade. O processo de mapeamento obteve bons resultados ao identificar as vegetações mais saudias e com maior valor de biomassa, entretanto, esta característica apesar de indicar a presença de irrigação não confirma a existência desta prática. A utilização dos dados do MapBiomas auxiliou na exclusão de áreas de silvicultura e formação florestal do mapeamento de áreas provavelmente irrigadas, permitindo aprimorar os resultados, uma vez que estas classes também têm como características altos valores de biomassa. Por meio de validação em campo, das áreas mapeadas como irrigadas, foi possível perceber que a processo retornou tanto áreas onde não há a confirmação clara da ocorrência de

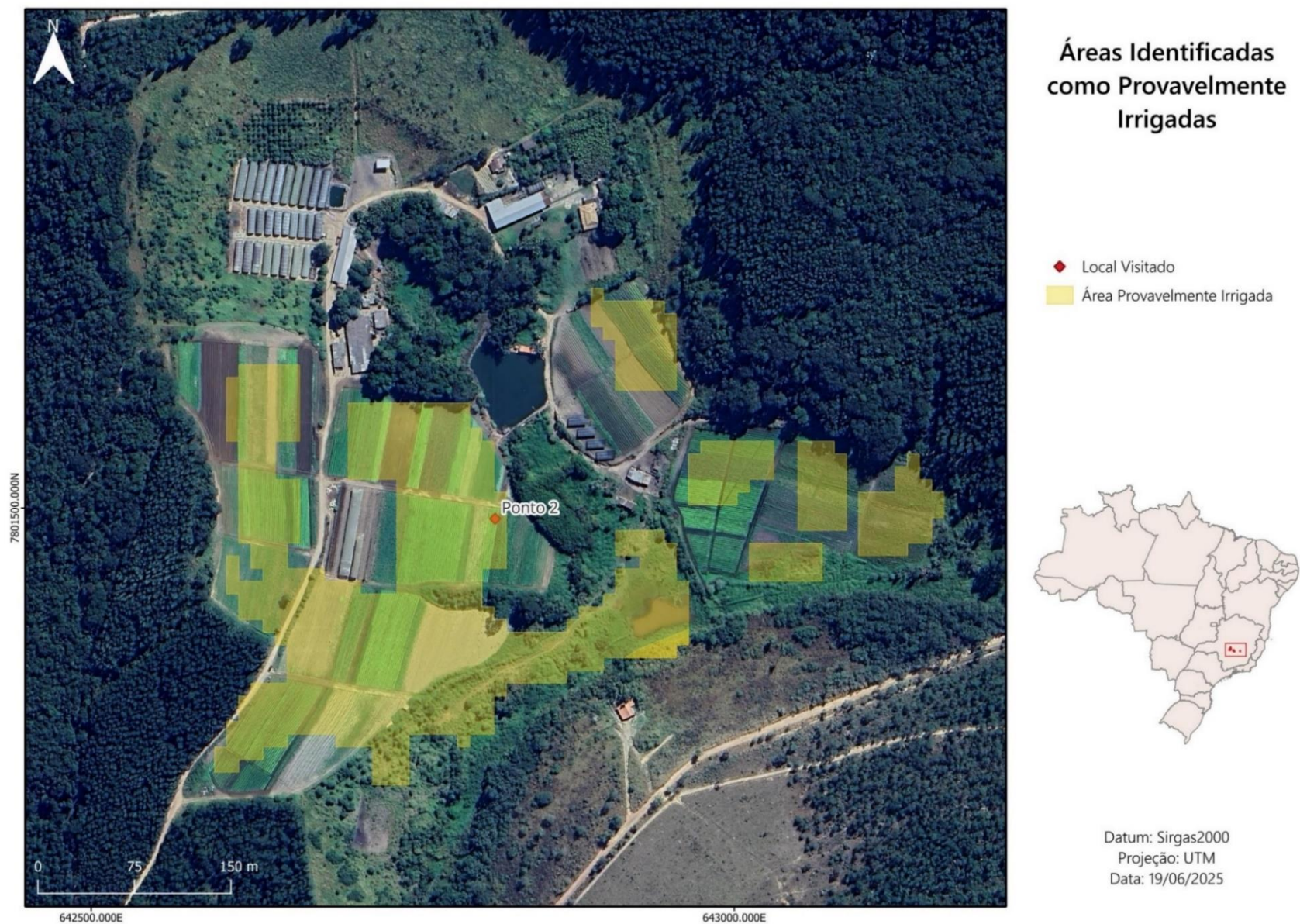
irrigação (Figuras 22 e 24) quanto aquelas que são claramente irrigadas (Figuras 23 e 25). É importante ressaltar que, devido a utilização das imagens Sentinel-2, existem diferenças entre as áreas mapeadas como irrigadas e aquilo que é verificado em mosaico de imagens de resolução mais fina, como aquelas disponíveis no *Google Earth*. Sendo assim, as áreas mapeadas como irrigadas servem primordialmente para indicar propriedades onde possa haver culturas recebendo aportes constantes de água e a validação, em produtos de melhor resolução, se faz necessária, uma vez que pode haver confusões no processo de classificação, ao mesmo tempo que a área irrigada pode ser maior que a mapeada, devido a, por exemplo, a periodicidade de revisita do sensor a uma determinada bacia ocorrer após um período de colheita.

Figura 22 - Local (Ponto 1) visitado na BHRP mapeado como provavelmente irrigado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Local (Ponto 2) visitado na BHRB mapeado como provavelmente irrigado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Local (Ponto 1) visitado na BHRP mapeado como provavelmente irrigado



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Figura 25 - Local (Ponto 2) visitado na BHRB mapeado como provavelmente irrigado



Fonte: Acervo pessoal, 2025.

4.2.2 Estimativa da demanda hídrica da agricultura, pecuária e abastecimento humano

A soma das estimativas da demanda hídrica para agricultura, pecuária e abastecimento humano (Tabela 3) permitiu estimar a demanda hídrica total para as ottobacias nível 7. Os resultados apontaram a priorização de bacias hidrográficas na análise de áreas potenciais de usos irregulares através da integração destes resultados ao cálculo da demanda hídrica. Na BHRP as bacias com maior demanda estimada foram a 7698629 e a 7698624, o que vai de encontro a demanda legalmente existente (Figura 26). Já na BHRB a demanda estimada foi de 2.813.796 litros por dia valor inferior aos 4.935.346 L/dia demandados legalmente (Figura 27), enquanto na BHRPI a bacia 7698292 foi a que mais demanda água diariamente, de acordo com a estimativa, necessitando de um valor de 3.157.274 L/dia (Figura 28).

Os resultados obtidos da estimativa da demanda hídrica apresentaram valores absolutos inferiores aos resultados calculados com base nas captações autorizadas, entretanto, foi possível identificar que, de maneira geral, as bacias com maior demanda hídrica foram as mesmas em ambos os dados, o que demonstra a potencialidade da estimativa da demanda hídrica como insumo a priorização de bacias hidrográficas.

Tabela 10 - Demanda hídrica estimada da agricultura, pecuária e abastecimento humano nas ottobacias nível 7 da BHRP, BHRB e BHRPI

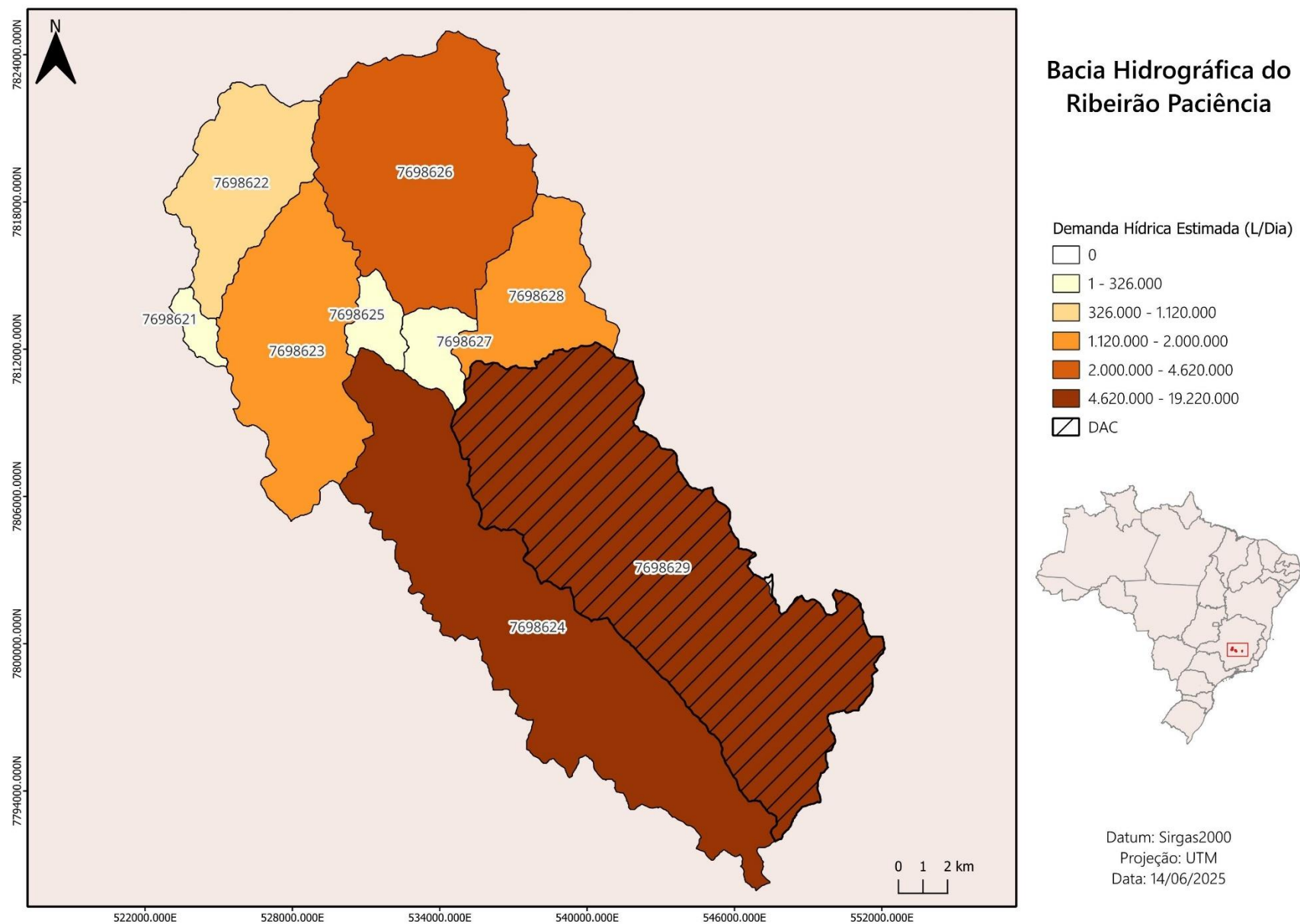
Código da bacia (Nível 7)	Demanda Hídrica da Agricultura (L/dia)	Demanda Hídrica Pecuária (L/dia)	Demanda Hídrica Abastecimento Humano (L/dia)	Demanda Hídrica Estimada (L/dia)
7698249	891.325,91	355.508,39	13.375,00	1.260.209,30
7698235	2.466.696,20	420.152,90	8.250,00	2.895.099,10
7698266	743.850,30	42.178,96	1.375,00	787.404,26
7698264	132.793,63	54.230,09	5.125,00	192.148,72
7698289	49.610,29	186.792,55	10.875,00	247.277,84
7698284	581.650,01	228.971,51	1.926.314,94	2.736.936,46
7698241	1.838.132,76	121.205,10	26.390,44	1.985.728,30
7698221	188.481,35	60.021,84	3.625,00	252.128,19
7698229	198.431,42	248.661,92	347.683,51	794.776,85
7698222	2.411,34	8.574,55	375,00	11.360,88
7698237	1.212.531,27	240.087,37	6.125,00	1.458.743,64
7698276	189.419,55	96.409,06	24.757,38	310.585,99
7698279	1.809.319,86	66.281,23	3.250,00	1.878.851,09
769825	5.711,90	0,00	0,00	5.711,90
7698274	110.477,87	66.281,23	2.750,00	179.509,10
7698269	1.664.026,61	192.818,11	8.125,00	1.864.969,72
7698286	766.697,56	60.255,66	250,00	827.203,22

7698231	683.365,95	128.618,24	4.375,00	816.359,18
7698238	905.647,29	147.622,53	4.750,00	1.058.019,82
7698224	3.343,78	8.574,55	375,00	12.293,33
7698234	560.481,25	222.938,27	6.104,12	789.523,65
7698262	217.228,01	66.281,23	42.029,82	325.539,06
7698245	107.274,38	66.281,23	10.875,00	184.430,61
7698296	31.800,04	78.332,36	875,00	111.007,40
7698272	433.220,99	78.332,36	2.250,00	513.803,35
7698243	241.482,90	23.174,66	0,00	264.657,56
7698267	3.000.998,85	48.204,53	8.375,00	3.057.578,38
7698216	107.889,03	17.149,10	250,00	125.288,13
7698261	523.226,15	66.281,23	1.750,00	591.257,38
7698298	132.637,71	24.102,26	2.875,00	159.614,97
7698278	596.672,35	84.357,92	3.750,00	684.780,27
7698291	133.251,04	18.076,70	1.750,00	153.077,74
7698275	974.714,28	301.278,30	232.491,21	1.508.483,79
7698268	167.434,96	90.383,49	3.625,00	261.443,45
7698271	1.919.642,40	72.306,79	5.875,00	1.997.824,19
7698273	292.294,90	6.025,57	2.250,00	300.570,46
7698225	13.605,00	0,00	125,00	13.730,00
7698295	27.383,27	6.025,57	375,00	33.783,84
7698277	179.028,49	30.127,83	3.000,00	212.156,32
7698226	99.900,69	51.447,29	458,25	151.806,23
7698299	81.522,06	18.076,70	500,00	100.098,75
7698283	424.410,90	30.127,83	5.625,00	460.163,73
7698247	476.961,66	144.613,58	7.250,00	628.825,25
7698232	233.263,72	85.745,49	1.875,00	320.884,21
7698211	12.090,24	0,00	125,00	12.215,24
7698223	16.556,18	8.574,55	375,00	25.505,73
7698214	0,00	0,00	125,00	125,00
7698227	15.332,81	17.149,10	0,00	32.481,91
7698213	8.335,95	0,00	0,00	8.335,95
7698242	992.109,93	331.406,13	24.500,00	1.348.016,06
7698218	0,00	0,00	750,00	750,00
7698263	472.036,50	0,00	0,00	472.036,50
7698233	482.410,01	137.192,78	497.467,15	1.117.069,94
7698246	71.065,55	12.051,13	375,00	83.491,69
7698288	1.988,34	18.076,70	0,00	20.065,04
7698292	104.576,33	283.201,60	2.769.496,41	3.157.274,34
7698215	0,00	0,00	0,00	0,00
7698285	36.751,69	0,00	750,00	37.501,69
7698244	706.768,18	177.516,55	9.750,00	894.034,73
7698228	83.362,03	51.447,29	500,00	135.309,33
7698287	0,00	0,00	0,00	0,00
7698281	9.719,93	18.076,70	1.375,00	29.171,63
7698282	0,00	12.051,13	2.125,00	14.176,13
7698265	256.685,17	0,00	125,00	256.810,17
7698297	429,98	0,00	250,00	679,98
7698219	68.116,61	8.574,55	125,00	76.816,15
7698293	453.910,26	90.383,49	1.625,00	545.918,75
7698294	219.256,52	198.843,68	623.592,58	1.041.692,78
7698212	29.990,98	0,00	0,00	29.990,98
7698239	40.410,35	0,00	375,00	40.785,35

7698236	548.161,18	205.789,18	10.125,00	764.075,35
7698217	166.502,37	17.149,10	375,00	184.026,47
7698248	571.283,61	60.255,66	750,00	632.289,27
7698621	114.542,27	11.106,65	1.875,00	127.523,91
7698622	619.381,04	155.493,03	19.375,00	794.249,07
7698624	2.026.941,25	2.406.671,38	188.032,11	4.621.644,74
7698629	3.212.036,19	979.600,48	15.018.862,17	19.210.498,83
7698627	141.188,41	136.226,68	8.000,00	285.415,10
7698623	732.335,64	351.282,59	123.326,79	1.206.945,02
7698625	180.373,05	52.813,32	3.000,00	236.186,37
7698626	2.711.478,23	650.179,69	97.750,00	3.459.407,92
7698628	1.232.855,90	454.088,94	47.375,00	1.734.319,84
7694969	2.249.080,88	251.262,08	313.453,70	2.813.796,65

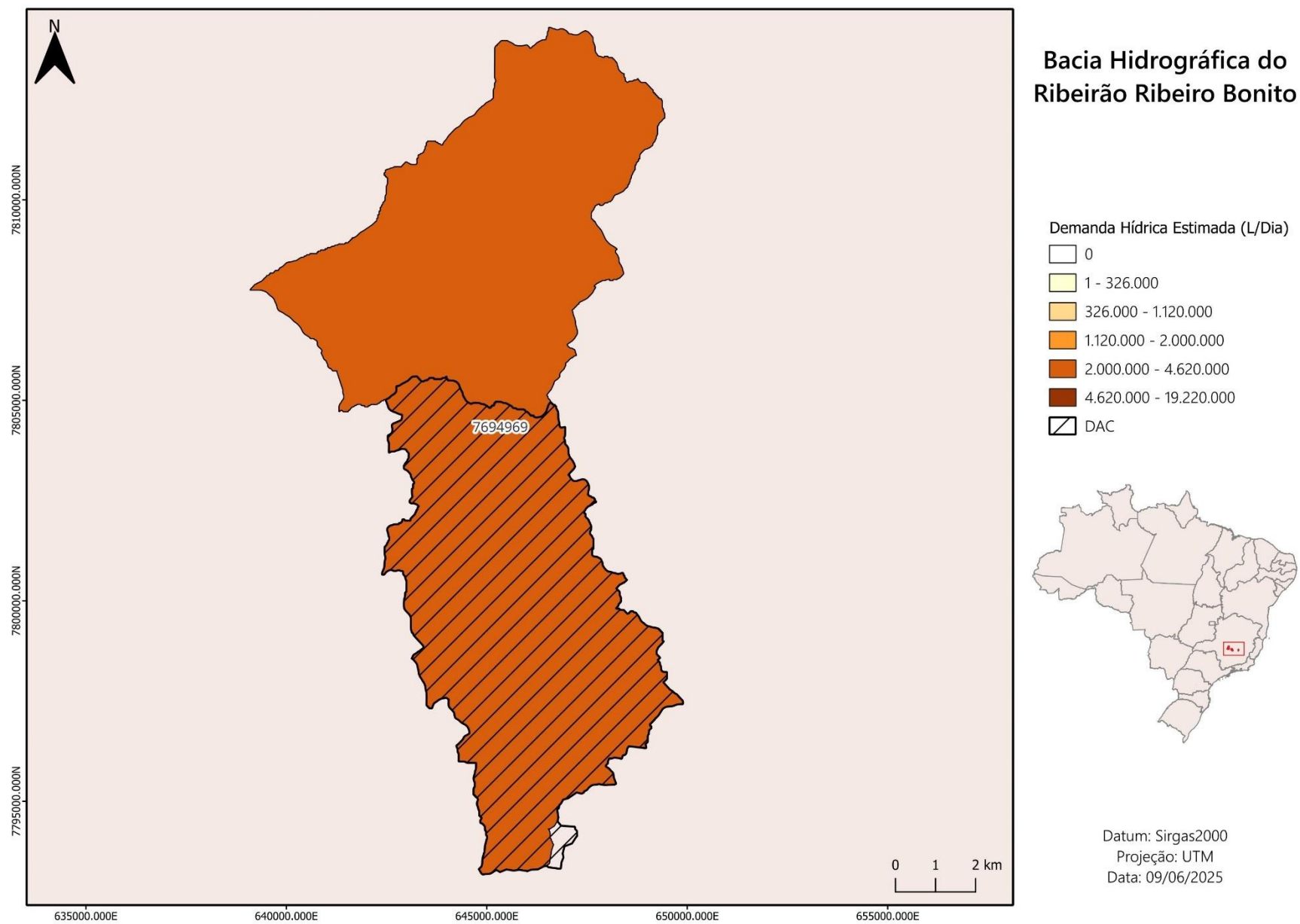
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Demanda hídrica estimada na BHRP



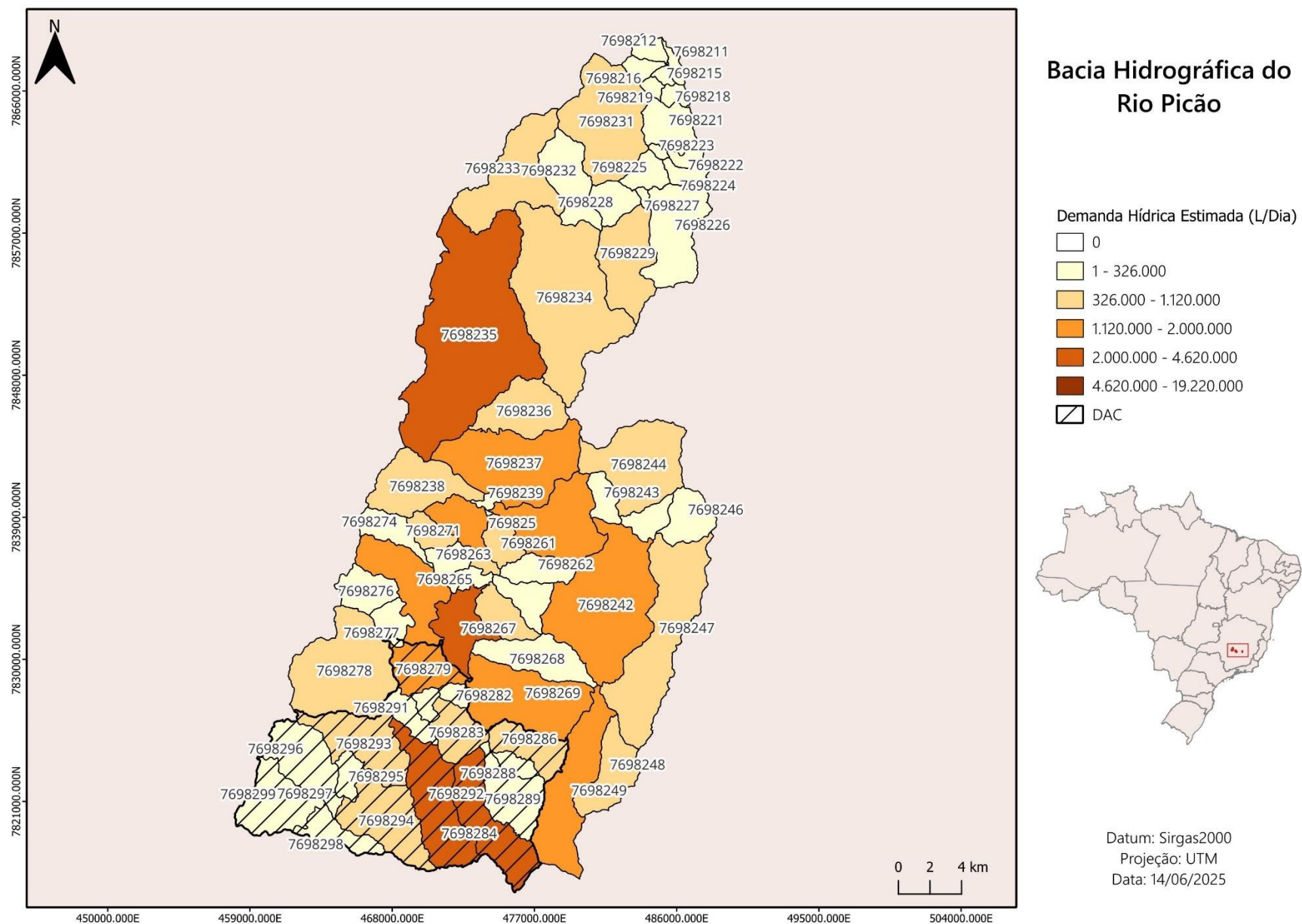
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Demanda hídrica estimada na BHRB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Demanda hídrica estimada na BHRPI



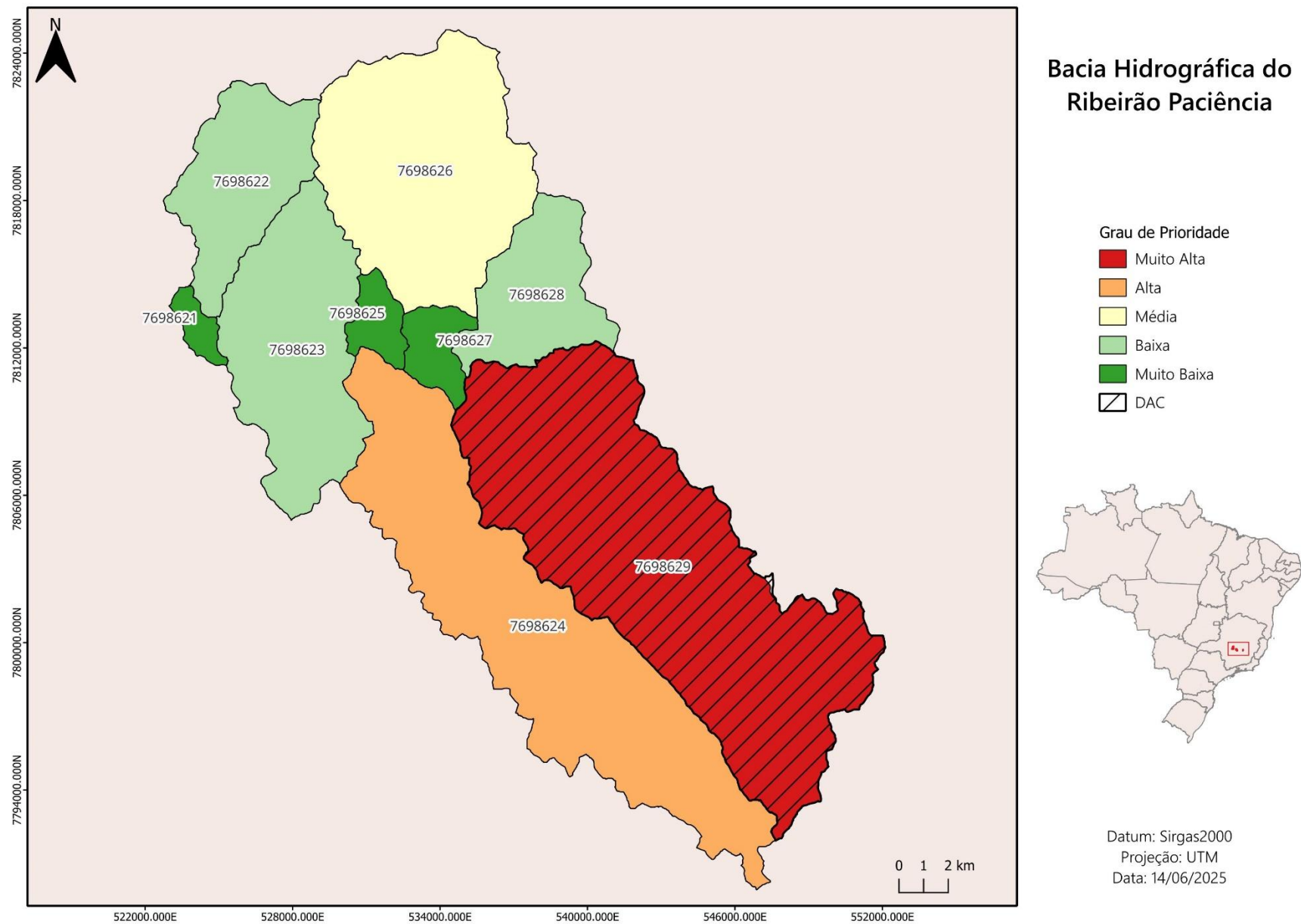
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Bacias hidrográficas prioritárias na análise de áreas potenciais de usos irregulares

Buscando racionalizar os esforços destinados a identificar usos possivelmente irregulares de recursos hídricos é necessário priorizar bacias hidrográficas para serem analisadas pelo usuário do modelo. Levando em conta o contexto em que estão inseridos os órgãos gestores de bacias hidrográficas não é factível uma análise acurada de usos irregulares de água em todas as bacias existentes em um estado. Nesta direção, optou-se por, através da integração dos valores da demanda hídrica calculada e estimada, priorizar aquelas bacias onde a demanda hídrica é maior, uma vez que, a compatibilização de todos os usos de água no território da bacia se torna mais complexo e nesses casos a utilização sem a devida autorização contribui de maneira mais acentuada para possíveis conflitos.

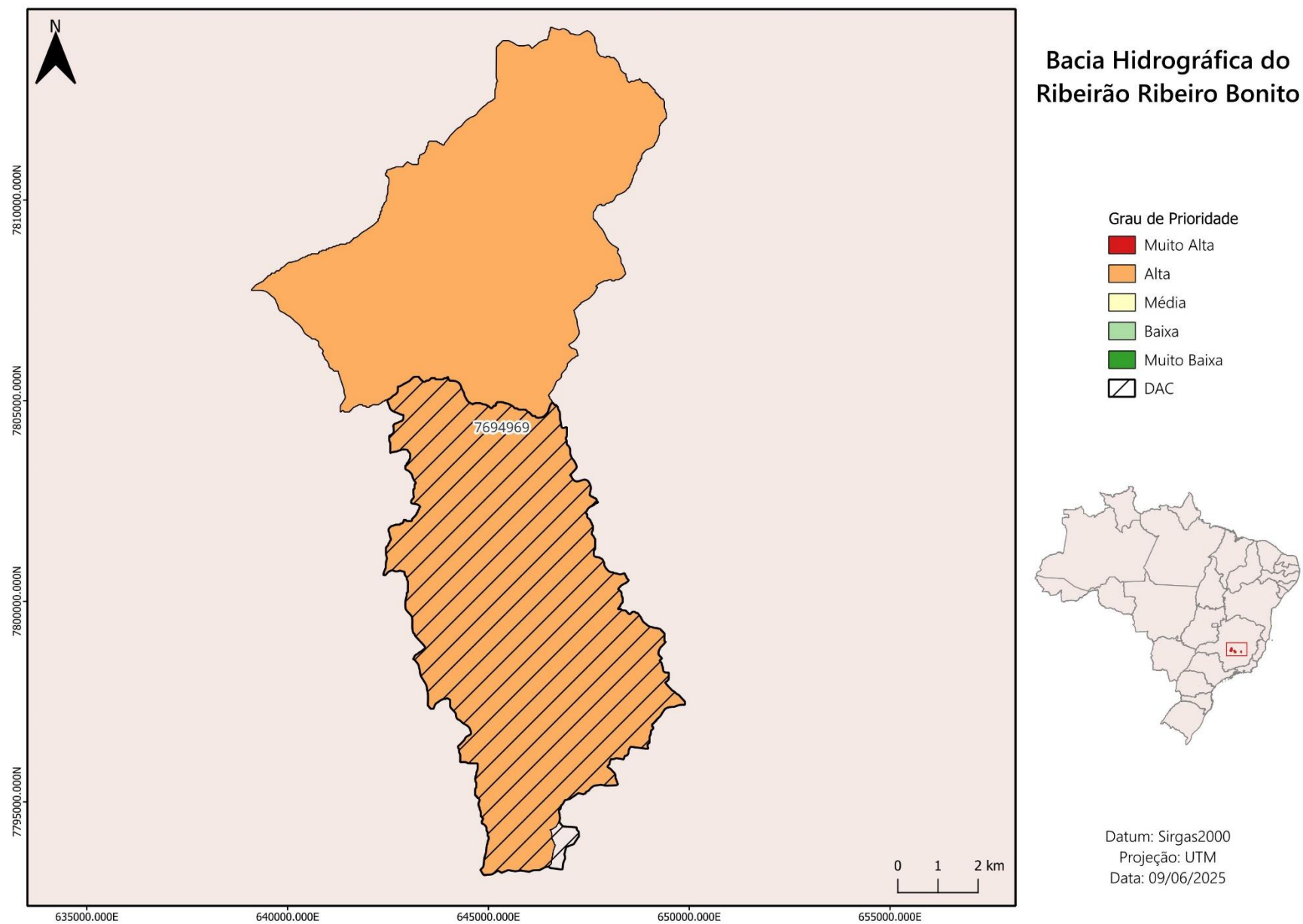
Para realizar esta priorização foram utilizadas as demandas hídricas, calculada e estimada, como forma de minimizar divergências como subnotificação de captações na demanda legal e o uso de dados secundários não aderentes ao recorte territorial da bacia na demanda estimada. A matriz de priorização que foi aplicada, integrando ambos os dados, atribuiu peso igual as duas variáveis, mas esse peso pode ser alterado de acordo com as necessidades do usuário do modelo, concedendo mais relevância a demanda legal ou estimada, de acordo com as características de cada bacia. O processo de priorização permitiu identificar nas 3 bacias hidrográficas que compõe a área de estudo, as bacias nível 7 com maior demanda hídrica e aquelas classificadas como prioridade alta e muito alta foram analisadas na última etapa do modelo. Na BHRP a bacia 7698629 foi elencada como prioridade muito alta, sendo que esta bacia compreende a área mais urbanizada de Pará de Minas e a área de DAC na bacia, além desta, a bacia 7698624 foi categorizada como prioridade alta (Figura 29). A BHRB foi considerada como um todo, por ter sido classificada como prioridade alta (Figura 30) e na BHRPI a bacia 7698267, localizada ao centro da bacia hidrográfica (Figura 31) também foi classificada como prioridade alta.

Figura 29 - Grau de prioridade de análise atribuído as ottobacias nível 7 que compõe a BHRP



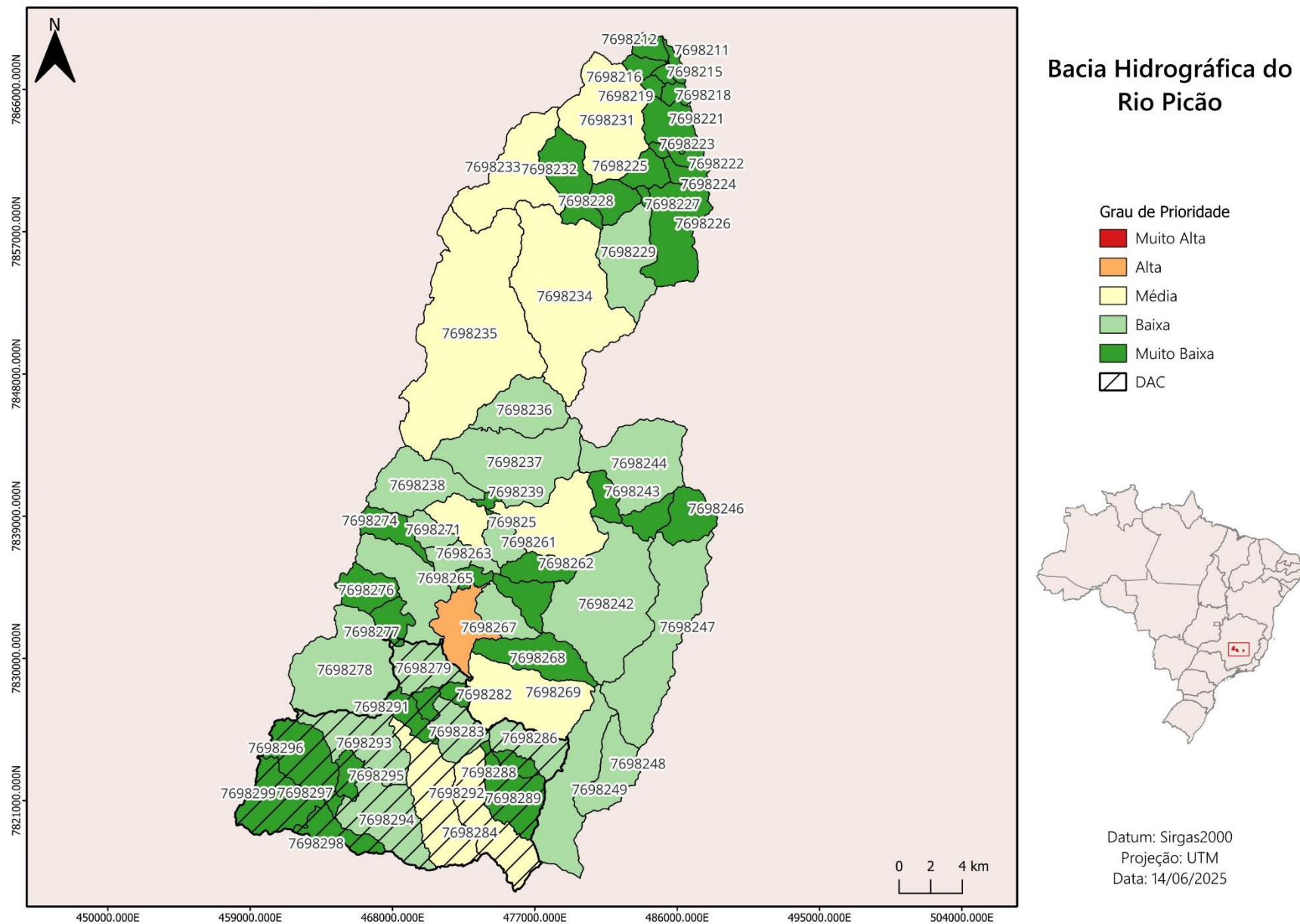
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Grau de prioridade de análise atribuído a ottbacia nível 7 BHRB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Grau de prioridade de análise atribuído as ottbacias nível 7 que compõe a BHRPI



4.4 Áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos

O processo de identificação de usos possivelmente irregulares de recursos hídricos seguiu os passos estipulados no protocolo de análise aqui proposto para este fim. Neste sentido, em primeiro momento foram selecionados como alvo da análise aquelas bacias que, segundo a matriz de priorização, foram classificadas como prioridade alta ou muito alta. Em segundo momento foram selecionadas as propriedades, de acordo com o módulo fiscal, que continham indícios de possível irrigação, com área igual ou superior a 7 hectares para a bacia 7694969, localizada em Caeté, 20 hectares para as bacias 7698629 e 7698624 localizadas em Pará de Minas e 35 hectares para a bacia 7698267 que está situada em Bom Despacho. De posse das informações resultantes, as propriedades foram divididas de acordo com a existência ou não de captações dentro de seus limites, assim como, de acordo com as principais finalidades declaradas para a captação. Nesta direção, como escolha do usuário, uma vez que são bacias com histórico de DAC, optou-se por analisar prioritariamente os casos das propriedades sem captações autorizadas, assim como, aquelas com captações destinadas a outras finalidades, em que foram mapeadas áreas provavelmente irrigadas.

A realização dos passos anteriores, permitiu, que dos 3945 imóveis rurais que intersectam alguma das bacias da área de estudo fossem selecionados para análise 271, que cumprem os requisitos acima listados, o que torna mais factível e racional a utilização de recursos de órgãos gestores durante o processo de fiscalização do uso de recursos hídricos em bacias hidrográficas. Na bacia 7694969 restaram, para etapa final de análise, 73 propriedades sem captação dentro de seus limites e 13 com captações com finalidades outras a irrigação. Nas bacias 7698629 e 7698624 o número de propriedades a serem analisadas foi de cento e uma sem captação e 70 com captações destinadas a outras finalidades, enquanto na 7698267 o número de propriedades para análise foi de 9, sem captação registrada dentro dos limites e 5 com captações voltadas a outras finalidades. A partir desta seleção as propriedades foram ranqueadas de acordo com o tamanho da área mapeada como provavelmente irrigada, de forma que, aquelas com maiores áreas sejam analisadas primeiramente. Propriedades com área provavelmente irrigada irrelevantes - em hectares - levando em conta o tamanho das bacias analisadas, podem ser desconsideradas, com o intuito de alocar recursos de análise naqueles casos em que há realmente a possibilidade

de um montante considerável de água estar sendo utilizado sem a devida autorização. Neste sentido aquelas propriedades com áreas mapeadas como irrigadas inferiores a 2 hectares foram desconsideradas em primeiro momento, apenas para fins de priorização, sendo que, isso não impede uma análise posterior destas propriedades. Visto isso, na bacia 7694969 foram alvo de inspeção visual, com bases em imagens disponibilizadas pelo *Google Earth*, no total, vinte e uma propriedades, enquanto nas bacias 7698629 e 7698624 esse número foi de 47 e na 7698267 esse valor foi de 8 propriedades.

Na bacia 7694969 um total de treze propriedades foram consideradas sem indício de uso irregular enquanto 8 necessitam ser analisadas com relação a DAC existente na bacia e a participação ou não desses usuários na alocação negociada de recursos. O mesmo ocorre com a bacia 7698629 onde 16 propriedades foram caracterizadas como sem indício de uso irregular e 9 propriedades necessitam de validação quanto a estarem inseridas, ou não, na outorga coletiva existente na área de DAC. Estas ponderações necessitam de conhecimento aprofundado sobre o processo de DAC existente, os usuários envolvidos e a localização das propriedades de cada um deles, assim como em alguns casos, meios de comunicação com estes usuários, informações estas que órgão gestores, como o Instituto Mineiro de Gestão das Águas tem acesso. Por esse motivo nestas duas bacias não se chegou a identificar áreas potenciais de usos irregulares de recursos hídricos, entretanto, no contexto de um órgão gestor a identificação torna-se possível e aplicável.

Já na bacia 7698624 um total de 15 propriedades foram consideradas sem indício de uso irregular enquanto 7 (Figura 32) foram identificadas como áreas potenciais com usos irregulares, seja devido à ausência de captação seja pela finalidade primária da captação ser diferente de irrigação. Dentre estas, foi selecionado como exemplo neste trabalho, uma propriedade de 61 hectares (Figura 33), visitada *in loco* (Figura 34), com 2,2 hectares de área mapeada como provavelmente irrigada. Nesta propriedade existe uma captação do tipo uso insignificante com finalidade principal de consumo humano e dessedentação de animais.

Na bacia 7698267 em duas propriedades, após a inspeção visual, não foram encontrados indícios de uso irregular, enquanto seis foram identificadas como áreas com usos potencialmente irregulares (Figura 35), como por exemplo, em uma

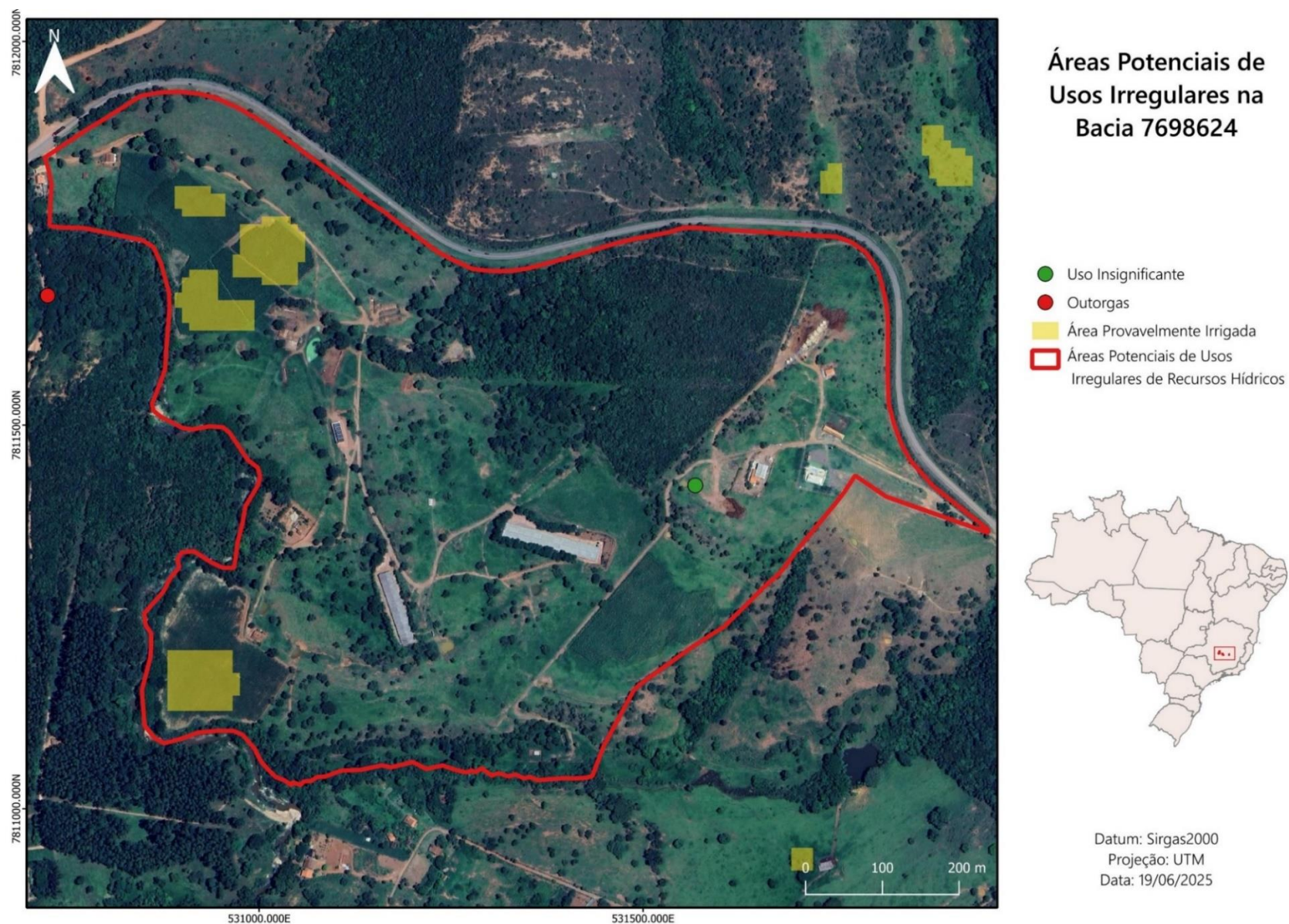
propriedade de 63,75 hectares, localizada no município de Bom Despacho, em que foram mapeados 9,4 hectares de área provavelmente irrigada, em um pivô central, e que dentro de seus limites contém uma captação do tipo uso insignificante destinada a consumo humano e dessedentação de animais (Figura 36). Em outra propriedade, essa de 97 hectares, também no município de Bom Despacho, foram mapeados como provavelmente irrigados 59 hectares, sendo que dentro dos limites da propriedade existe uma captação do tipo uso insignificante com finalidade de consumo humano (Figura 37).

Figura 32 - Áreas potenciais de usos irregulares na BHRP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Área potencial de uso irregular na BHRP



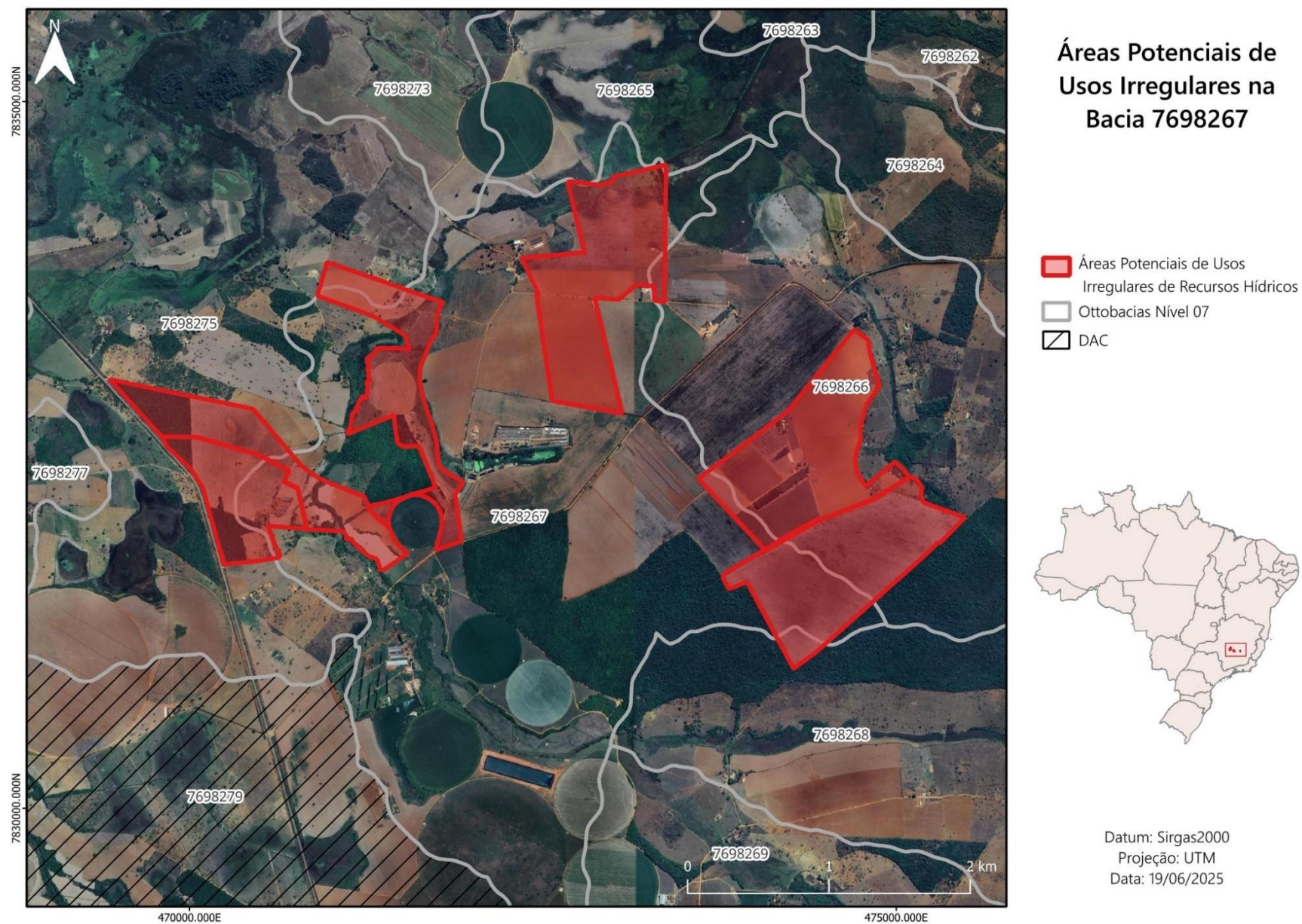
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Aspersor em área identificada como potencial de uso irregular na BHRP



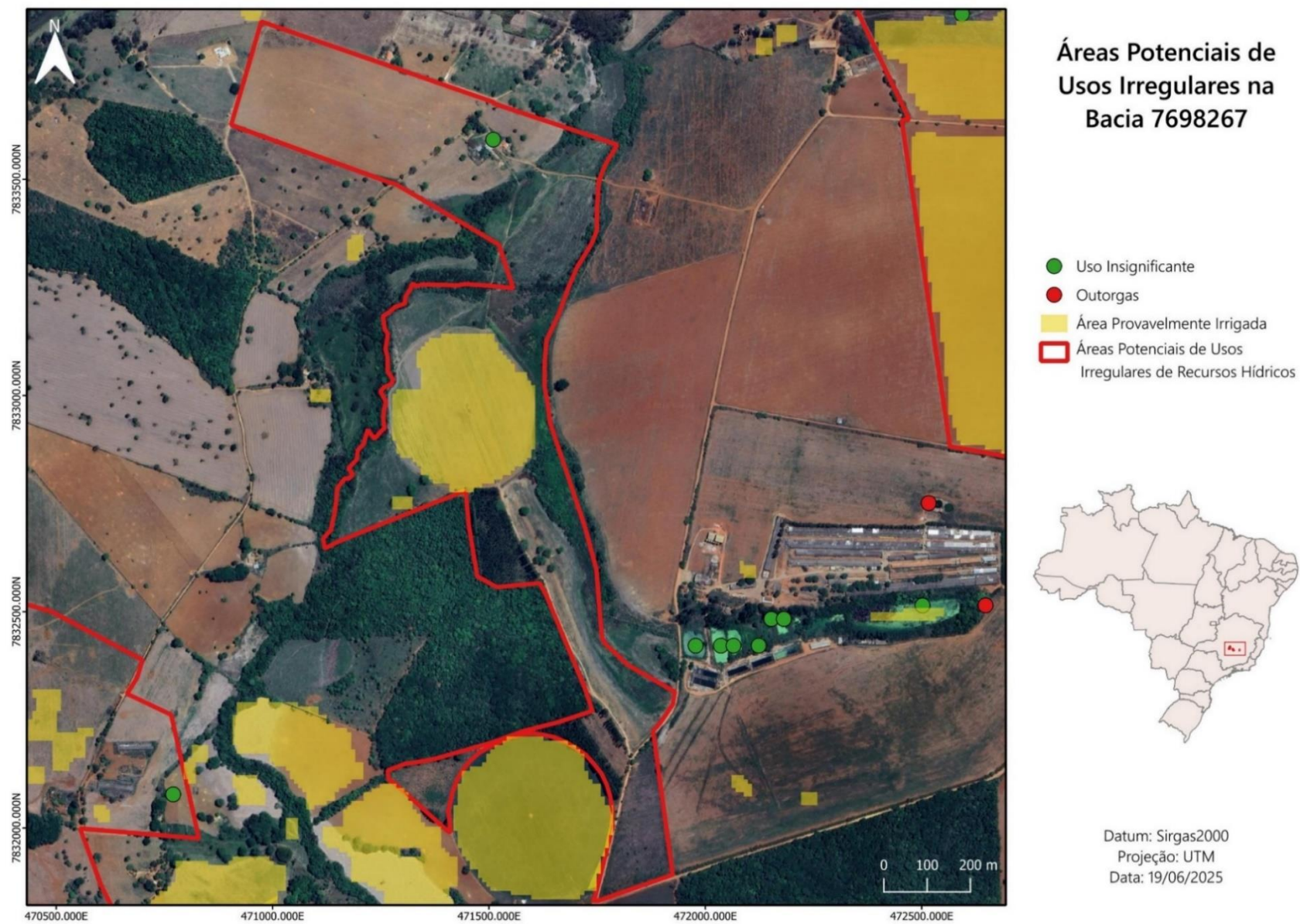
Fonte: Acervo pessoal, 2025.

Figura 35 - Áreas potenciais de usos irregulares na BHRPI



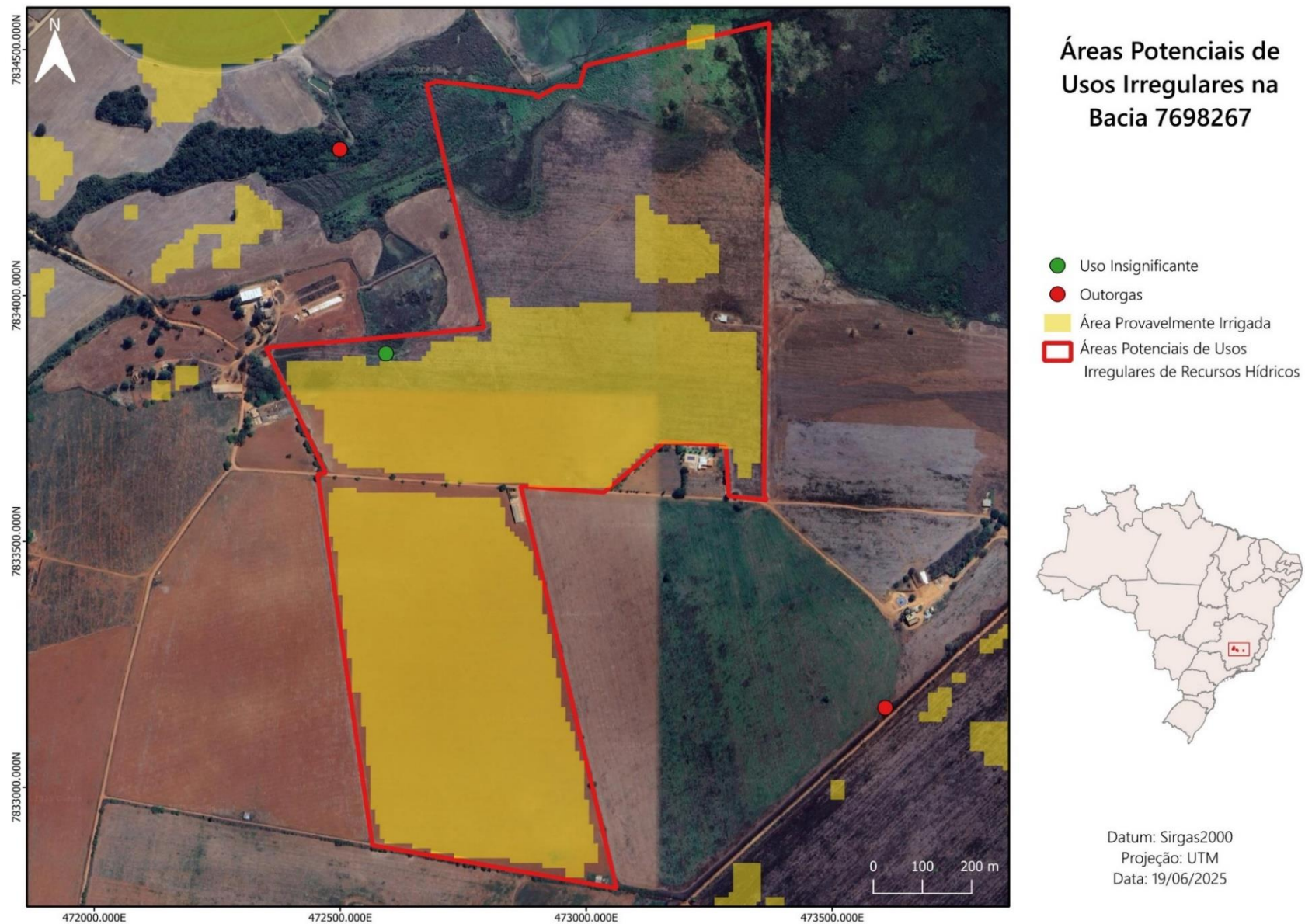
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Área potencial de uso irregular na BHRPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Área potencial de uso irregular na BHRPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 DISCUSSÃO

O eficiente planejamento ambiental e do uso de recursos hídricos perpassa a adoção de novos métodos e tecnologias que possibilitem aperfeiçoar o processo de fiscalização acerca dos usos de água (ANA, 2021). Neste sentido, a integração de geotecnologias à análise de dados estatísticos e cadastrais apresenta uma série de potencialidades, assim como, algumas limitações.

Os resultados obtidos pela utilização do modelo demonstraram que os valores da demanda hídrica legal foram superiores, de maneira geral, aos valores da demanda hídrica estimada, ao mesmo tempo que, as ottobacias nível 7 que apresentaram maior demanda hídrica em ambos os cálculos, foram em grande parte, as mesmas. A diferença nos valores absolutos de demanda se deve as diferentes metodologias utilizadas, sendo que, na estimativa da demanda hídrica foram utilizados diversos dados estatísticos e secundários, além de uma série de análises espaciais para compatibilizar estes dados aos limites das ottobacias nível 7. Nesta direção, a estimativa da demanda hídrica apresenta maior complexidade e incerteza, em comparação ao cálculo da demanda hídrica legal, entretanto, a estimativa da demanda hídrica além de fornecer insumos a outras etapas do modelo, propicia - sendo utilizada junto a demanda hídrica legal - um conjunto de dados mais robustos ao processo de priorização de áreas, passo importante na definição das bacias que apresentam maior pressão hídrica e que são prioritárias para análise do usuário do modelo.

À vista disso, dentre as principais limitações existentes no modelo conceitual proposto, estão a dificuldade de adequar dados secundários, produzidos em escala municipal, ao recorte de uma bacia hidrográfica (Oliveira; Magalhães Junior, 2013) o que pode causar distorções, visto que, por exemplo, a estimativa da demanda hídrica da pecuária teve como princípio uma divisão proporcional dos rebanhos existentes no município. Além disso, destaca-se as incertezas existentes em insumos do modelo devido a qualidade dos dados, como aqueles oriundos do CAR, que é auto declaratório, podendo então existir imprecisões quanto ao registro realizado (Rocha; Santos, 2019). Nesta direção, o cálculo da demanda hídrica legal utiliza dados públicos disponibilizados pelo estado de Minas Gerais. Tais dados apresentam uma série de limitações, devido em alguns órgãos gestores, as análises dos processos de

outorga ainda serem realizadas de forma não automatizada e integrada, tornando os processos demorados e mais suscetíveis a erros (Pessoa; Kayser; Collischonn, 2012). Neste sentido, foram identificadas diferenças entre unidades de medida, além de possível desatualização do número de captações, devido ao processo de análise das outorgas, compilação destas e posterior disponibilização dos dados na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais, envolver diferentes unidades administrativas (MINAS GERAIS, 2022). Além disso, é importante considerar as subnotificações durante o processo de cálculo da demanda hídrica legal, uma vez que é comum o uso da água sem o devido processo de solicitação junto ao órgão gestor (Moreira et al., 2012).

Apesar das limitações, as informações sobre as captações legalmente autorizadas são aquelas que subsidiam órgãos gestores na definição da demanda hídrica legal (Moreira et al., 2012), assim como, os dados estatísticos e cadastrais utilizados, produzidos por órgãos como o IBGE, tem potencial de ser empregados em estudos ambientais. Neste sentido, no contexto deste trabalho, por se tratar de um modelo conceitual, a utilização destes dados não invalida o potencial explicativo do modelo já que os cálculos realizados visam demonstrar o procedimento metodológico aqui proposto, sendo que, na existência de dados de melhor qualidade, estes devem ser agregados ao modelo, podendo consequentemente melhorar os resultados obtidos. Nesta direção, a publicação de dados mais aderentes aos limites de uma bacia hidrográfica, podem permitir que a estimativa da demanda hídrica obtenha melhores resultados. Além disso, uma melhor caracterização das culturas agrícolas existentes nas bacias, que permita entender a necessidade de irrigação de cada propriedade em específico, e dos solos também deve proporcionar uma melhora na estimativa de demanda hídrica. Adicionalmente, a utilização de outros índices de vegetação ao processo de classificação supervisionada, como o NDWI (Gao, 1996) e o SAVI (Huete, 1988), pode aprimorar o mapeamento de áreas provavelmente irrigadas (Silva, 2020; Zurqani et al., 2021). A adição destes índices oferece mais informações ao processo de classificação, possibilitando a obtenção de uma acurácia maior na diferenciação entre áreas irrigadas e áreas que apenas apresentam vegetações muito saudáveis e com alto valor de biomassa.

Os insumos produzidos nas duas primeiras etapas do modelo também propiciam uma gama de outras análises, caso seja a necessidade do usuário, como

no caso de outras formas de priorização, em adição ou substituição a matriz de pesos aqui proposta. A utilização de outros formatos de matriz de priorização ou índices, adequando estes ao contexto e realidade de cada bacia ou território analisado aumenta o poder explicativo e de priorização do modelo. Índices, como o Índice de conflito pelo uso da água criado por Moreira et al. (2012) que, a partir do cálculo da demanda hídrica legal, quantifica se as vazões outorgadas a montante de um trecho de drenagem respeitam o limite estabelecido pela legislação, podem ser incorporados ao modelo, assim como, um índice que quantifique a distorção entre demanda legal calculada e demanda estimada, identificando bacias onde essa relação é mais desigual e inconforme.

Outra potencialidade inerente ao modelo é a automatização dos processos realizados em cada etapa. A automatização permite a utilização do modelo de maneira mais simples e intuitiva, sem a necessidade de conhecimento aprofundado prévio em programação ou geotecnologias e nesta direção destaca-se a possibilidade, por exemplo, de criação de um *plugin* no *software QGIS*. O *QGIS* é um programa de código aberto que permite, entre outros, realizar análises espaciais e tratar dados geográficos (Vitalis; Arroyo Otori; Stoter, 2020) enquanto um *plugin* é um módulo, que pode ser baseado em *Python*, que tem como objetivo estender a funcionalidade padrão do programa realizando uma atividade específica por meio da utilização de comandos e conjuntos de dados (Podolskaia, 2022). Nesta direção, o consumo dos dados estatísticos e cadastrais utilizados no modelo, pode ser realizado via API (*Application program interfaces*), que permite a comunicação contínua e automática entre dois programas de *software* (Roller, 2021) - como o *QGIS* e um repositório de dados públicos - sem a necessidade de *download*. Soma-se a isso a utilização encadeada do GEE e de códigos em *Python* (Apêndices A, B, C, D, E, F e G) em cada uma das etapas propostas no modelo, o que permitiria o desenvolvimento de um *plugin* para a identificação de áreas potenciais de usos irregulares, onde o usuário seria responsável apenas por selecionar os dados iniciais da análise e alguns parâmetros, como o código da bacia hidrográfica de interesse, enquanto o *plugin* retornaria as áreas potenciais de usos irregulares para a análise do usuário.

Visto isso, o modelo proposto neste trabalho tem o potencial de auxiliar a gestão do território e dos recursos hídricos em bacias hidrográficas podendo ser utilizado por órgãos públicos na identificação, monitoramento e fiscalização de áreas potenciais de

usos irregulares de recursos hídricos. Entretanto, é importante ressaltar que o modelo conceitual aqui proposto trata-se de um primeiro esboço, uma primeira proposta metodológica que apresenta ferramentas, dados e passos a serem utilizados e que necessita ser aprimorado e refinado, com a inserção de novas fontes de informação que sejam mais atuais e aderentes aos objetivos, assim como, por meio de *feedbacks* de usuários apontando as principais falhas e pontos para melhoria. Neste sentido, o processo de vistoria e fiscalização realizado pelo usuário do modelo é essencial, uma vez que, durante as vistorias, são coletadas diversas informações, como o tipo do sistema de irrigação e quais são as culturas irrigadas (ANA, 2021). Sendo assim, rodadas de atualização dos procedimentos e insumos tornam o modelo cada vez mais eficiente e adequado para a realidade de órgãos que atuam na gestão e fiscalização de bacias hidrográficas. Em adição, a identificação de uma área potencial de uso irregular necessita de confirmação por outros meios, como fiscalização *in loco*. Neste sentido, uma das principais contribuições do modelo elaborado neste trabalho passa pelo direcionamento da fiscalização através da priorização de áreas em escala cada vez maior, iniciando pelas bacias hidrográficas e chegando nos limites de propriedades rurais, possibilitando assim uma melhor alocação dos recursos existentes destinados gestão dos recursos hídricos no território da bacia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a criação de um modelo conceitual para a identificação de usos potencialmente irregulares de recursos hídricos. O modelo foi eficiente na priorização de áreas, permitindo identificar incoerências entre os usos da terra e a existência, ou não, de captações de água legalmente autorizadas, assim como na racionalização de recursos destinados a fiscalização, por meio da priorização de áreas.

A integração de dados estatísticos, cadastrais e geotecnologias permitiu a identificação de bacias hidrográficas com maior pressão hídrica, indicando aquelas prioritárias na fiscalização de usos potencialmente irregulares. Além disso, permitiu a produção de insumos que permitem direcionar o processo fiscalizatório, como é o mapeamento de áreas provavelmente irrigadas. Destaca-se a potencialidade de automatização do procedimento realizado, tornando o modelo mais acessível a diversos públicos. Entretanto, é importante ressaltar que dados resultantes deste modelo, assim como a metodologia empregada, servem como direcionamento, indicando, junto a uma análise de outros fatores, a presença ou não de usos possivelmente irregulares de recursos hídricos.

Dessa forma, este modelo proporciona subsídios que contribuem na eficiência da análise de outorgas, na racionalização de recursos destinados a fiscalização e no processo de gestão sustentável de recursos hídricos, estando assim, diretamente associado a instrumentos de gestão presentes na PNRH, ao Plano Mineiro de Segurança Hídrica e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Base hidrográfica ottocodificada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2015. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/60543. Acesso em: 7 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Coeficientes técnicos de uso da água para a agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2019a. 29 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/81422. Acesso em: 7 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019b. 80 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/78093. Acesso em: 7 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH**. Brasília: ANA, 2019c. 112 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/78469. Acesso em: 5 jun. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Índice de Segurança Hídrica: metodologia**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia_ISH.pdf. Acesso em: 4 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual de fiscalização de usos de recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2021. 71 p. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/91762. Acesso em: 18 jul. 2025.

ARAÚJO, V. *et al.* Particularidades das áreas úmidas na bacia do Alto Rio São Francisco - MG: caracterização e tipificação na bacia do rio Picão. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA*, 14., 2023, Diamantina. **Anais [...]**. Diamantina: UFVJM, 2023. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2023/trabalhos/3/403-12.html>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BEEK, E.; ARRIENS, W. L. Water security: putting the concept into practice. Estocolmo: **Global Water Partnership**, 2014. (TEC Background Paper, n. 20). Disponível em: https://aquadoc.typepad.com/files/gwp_tec20_web.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

BENDINI, H. *et al.* Irrigated agriculture mapping in a semi-arid region in Brazil based on the use of Sentinel-2 data and random forest algorithm. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Göttingen, v. XLVIII-M-1-2023, p. 33–39, 21 abr. 2023. Disponível em: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-M-1-2023/33/2023/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997. p. 470. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 16 mai. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 2, de 06 de maio de 2014. Dispõe sobre os procedimentos para a integração, execução e compatibilização do Sistema de Cadastro Ambiental Rural – SICAR e define os procedimentos gerais do Cadastro Ambiental Rural – CAR. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 06 maio 2014. Disponível em: https://car.gov.br/leis/IN_CAR.pdf. Acesso em: 14 mai. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Série histórica de municípios**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2024. Disponível em: <https://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em: 11 mai. 2025.

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, Boston, v. 45, p. 5–32, out. 2001.

CASTRO, C. N. **Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/items/9509b26c-a85f-4fb0-9c16-3e20beae3a0b>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. da. **Manejo, eficiência e uso da água em sistemas de irrigação**. 2013. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/967585>. Acesso em: 20 jul. 2025.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARÁ. **Plano Diretor de Bacia Hidrográfica do Rio Pará**. [S. l.]: CBH Rio Pará, 2008. Disponível em: <https://cbhriopara.org.br/riopara/plano-diretor/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (Brasil). **Projeto Análise de Consistência de Dados Pluviométricos: Bacia do Rio São Francisco: Sub-bacias 40 e 41: relatório final: volume I - regionalização hidrológica**. Belo Horizonte: CPRM/SGB; DNAEE, 2001. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/20881/1/14_regionalizacao_sb40e41_volume_I.pdf. Acesso em: 4 jul. 2025.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 37, n. 1, p. 35–46, jul. 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442579190048B>. Acesso em: 25 jun. 2024.

DE CARVALHO JÚNIOR, O. Aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas inundáveis. **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, p. 412, 18 set. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/238239/30059>. Acesso em: 25 jun. 2024.

DUARTE, V.; MIOLA, D. Análise de disponibilidade hídrica na microbacia do Ribeirão Paciência: relação entre a oferta e o volume de água outorgado em Pará de Minas. **Revista Synthesis**, v. 7, p. 32–54, dez. 2016.

FERREIRA, K. R. *et al.* Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products. **Remote Sensing**, v. 12, n. 24, p. 4033, jan. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4033>. Acesso em: 20 jul. 2025.

FERREIRA, I. T. R. *et al.* O papel da comissão gestora local em áreas de conflito pelo uso de recursos hídricos: estudo de caso em trecho da bacia hidrográfica do Ribeirão Paciência, na bacia do Rio Pará, Minas Gerais. **Revista Augustus**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 56, p. 174–192, mar. 2022. Disponível em: <https://revistas.unisuam.edu.br/index.php/revistaaugustus/article/view/834>. Acesso em: 5 jul. 2024.

FILGUEIRAS, J. A. R.; NOBREGA, R. A. A.; FARIAS, S. D. A Geospatial Investigation of Irrigation Permits and Agriculture Fields in the Semi-Arid in the State of Minas Gerais, Brazil. *In*: AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING ANNUAL CONFERENCE, 2014, Louisville. **Proceedings [...]**. Bethesda: ASPRS, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security**. Roma: FAO, 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/016/i3015e/i3015e.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 58, n. 3, p. 257–266, dez. 1996.

GLEICK, P. H. **Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria**. 1 jul. 2014. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/6/3/wcas-d-13-00059_1.xml. Acesso em: 9 jun. 2025.

GLEICK, P. H.; HEBERGER, M. Water conflict chronology. *In*: Peter H. Gleick (org). **The World's Water**. Washington, D.C.: Island Press. 2014. p. 173-219.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences**. v. 202, p. 18–27, 1 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>. Acesso em: 7 jun. 2024.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, n. 3, p. 295–309, 1 ago. 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442578890106X>. Acesso em: 21 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Grade Estatística**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Pesquisa da Pecuária Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023b. ISSN 0101-4234.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Produção Agrícola Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023c. ISSN 0101-3963.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (Minas Gerais). **Nota Técnica IGAM n. 07/2006**: define os procedimentos para emissão da Declaração de Área de Conflito - DAC. Belo Horizonte: IGAM, 2006. Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2018/OUTORGA/Nota_T%C3%A9cnica_DIC.DvRU_n._07-2006.pdf. Acesso em: 4 jul. 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (Minas Gerais). **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (Brasil). **Consultar Índices Básicos**. [S. l.]: INCRA, [20--]. Disponível em: <https://pro-pgt-incra.estaleiro.serpro.gov.br/pgt/indices-basicos>. Acesso em: 20 jun. 2025.

LANDAU, E. C. *et al.* **Variação geográfica do tamanho dos módulos fiscais no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Documentos, 146). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/949260/variacao-geografica-do-tamanho-dos-modulos-fiscais-no-brasil>. Acesso em: 20 jun. 2025.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, Washington, D.C., v. 33, n. 1, p. 159-174, mar. 1977. Disponível em: [link suspeito removido]. Acesso em: 27 ago. 2024.

LEE, J. S. H. *et al.* Detecting industrial oil palm plantations on Landsat images with Google Earth Engine. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 4, p. 219–224, out. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235293851630129X>. Acesso em: 17 jun. 2024.

LEMO, R. S.; JUNIOR, A. P. M. Reflexões sobre os critérios de cálculo de vazões outorgáveis em áreas de conflito do estado de Minas Gerais: o caso da Bacia do Ribeirão Ribeiro Bonito. **Revista Espinhaço**, Diamantina, v. 4, n. 2, p. 4–12, 2015. Disponível em: <https://zenodo.org/records/3962255>. Acesso em: 7 dez. 2023.

LIU, Q. *et al.* The response and sensitivity of global vegetation to water stress: A comparison of different satellite-based NDVI products. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 120, p. 103341, 1 jun. 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843223001632>. Acesso em: 20 jul. 2025.

LOH, W.-Y. Classification and Regression Trees. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery**, v. 1, p. 14–23, jan. 2011.

MACEDO, D. R.; LIMA, L. S. Geotecnologias e Recursos Hídricos. In: MAGALHÃES JR, A. P.; LOPES, F. W. (org.). **Recursos Hídricos**: as águas na interface sociedade e natureza. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. p. 221-240.

MARQUES, F. *et al.* AQUORA - Sistema Multi-Usuário para Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 51–69, 2009. Disponível em: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=9&SUMARIO=120&ST=aquora_sistema_multi_usuario_para_gestao_de_recursos_hidricos. Acesso em: 09 jul. 2025

MARQUES, A. C.; VERAS, C. E.; RODRIGUEZ, D. A. Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127690, 1 maio 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169422002657>. Acesso em: 09 jul. 2025.

MAUPIN, M. A. *et al.* **Estimated use of water in the United States in 2010**: U.S.Geological Survey Circular 1405, 2014. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/cir1405>. Acesso em: 26 jul. 2025.

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. GEOPROCESSAMENTO PARA PROJETOS AMBIENTAIS. In: CÂMARA, G.; DAVIES, C.; VIEIRA, A. M (org). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 09 jul. 2025

MEDINA, A. J. M. *et al.* An Analysis of the Rice-Cultivation Dynamics in the Lower Utcubamba River Basin Using SAR and Optical Imagery in Google Earth Engine (GEE). **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 557, mar. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/3/557>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, DF: UnB; CNPq, 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5550408/mod_resource/content/3/Livro-SensoriamentoRemoto.pdf. Acesso em: 12 mar. 2024.

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.705, de 4 de setembro de 2019. Estabelece normas e procedimentos para a regularização de uso de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais. **Diário Oficial do Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 5 set. 2019. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49498>. Acesso em: 25 mai. 2024.

MINAS GERAIS. RESOLUÇÃO CONJUNTA SEMAD/FEAM/IEF/IGAM Nº 3.147, DE 7 DE JUNHO DE 2022. Dispõe sobre a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos e seu Comitê Gestor e estabelece o trâmite para o encaminhamento de dados geoespaciais digitais vetoriais e suas especificações técnicas, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 14 jun. 2022. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=55963>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Outorgas de direito de uso de recursos hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2024. Camada vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 25 mai. 2025.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Cadastrros de uso insignificante de recursos hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2025. Camada vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 23 mai. 2025.

Ministério do Meio Ambiente (Brasil). **Instrução Normativa nº 2/MMA, de 06 de maio de 2014**. Dispõe sobre os procedimentos para a integração, execução e compatibilização do Sistema de Cadastro Ambiental Rural- SICAR e define os procedimentos gerais do Cadastro Ambiental Rural - CAR. Brasília: MMA, 2014.

MONSERUD, R. A.; LEEMANS, R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. **Ecological Modelling**, v. 62, n. 4, p. 275–293, ago. 1992. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030438009290003W>. Acesso em: 27 ago. 2024.

MOREIRA, M. *et al.* Índices para Identificação de Conflitos pelo Uso da Água: Proposição Metodológica e Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 7–15, 2012. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=94&SUMARIO=1130>. Acesso em: 7 jun. 2024.

NEVES, A. K. *et al.* SEMANTIC SEGMENTATION OF BRAZILIAN SAVANNA VEGETATION USING HIGH SPATIAL RESOLUTION SATELLITE DATA AND U-NET. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. V-3–2020, p. 505–511, 3 ago. 2020. Disponível em: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/V-3-2020/505/2020/isprs-annals-V-3-2020-505-2020.html>. Acesso em: 19 jul. 2025.

OLIVEIRA, M. T. *et al.* Mapeamento da Vegetação do Cerrado – Uma Revisão das Iniciativas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1250–1274, 30 dez. 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56591>. Acesso em: 19 jul. 2025.

OLIVEIRA, F. F. de; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Disponibilidade de dados socioeconômicos para a gestão de bacias hidrográficas no Brasil. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABRHidro, 2013. Disponível em: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3896&ST=disponibilidade_de_dados_socioeconomicos_para_a_gestao_de_bacias_hidrograficas_no_brasil. Acesso em: 26 jul. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). **Estimativas das Vazões para as Atividades de Uso Consuntivo da Água em Bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN**. Brasília: ONS: FAHMA-DZETA: ANA: ANEEL: MME, 2005. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/downloads/Relatorio%20final%20ONS.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2024.

PEÑA, H. **Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe**. Santiago: CEPAL, 2016. (Recursos Naturales e Infraestructura, n. 178). Disponível em: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40074-desafios-la-seguridad-hidrica-america-latina-caribe>. Acesso em: 6 jun. 2024.

PESSOA, M.; KAYSER, R.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=2&ID=95&SUMARIO=1299>. Acesso em: 27 jul. 2025.

PFAFSTETTER, O. **Classificação de Bacias Hidrográficas - Metodologia de Codificação**. Rio de Janeiro, RJ: DNOS, 1989.

PHAN, T. N.; KUCH, V.; LEHNERT, L. W. Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 15, p. 2411, ago. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/15/2411>. Acesso em: 17 jun. 2024.

RIBEIRO, R. B.; PRUSKI, F. F.; RAMOS, M. C. A. DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM CONDIÇÕES DE REGULARIZAÇÃO DE VAZÃO. **Sustentare**, v. 2, n. 2, p. 210–217, 22 dez. 2018. Disponível em: http://periodicos.unincor.br/index.php/sustentare/article/view/5117/pdf_41. Acesso em: 14 jul. 2025.

ROCHA, V.; SANTOS, A. Cadastro Ambiental Rural (CAR) e municípios costeiros maranhenses: análise dos dados autodeclarados. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 4, p. 328–336, 4 set. 2019. Disponível em: <http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2019.004.0025>. Acesso em: 27 jul. 2025.

ROLLER, J. **What are APIs? A Complete Guide**. IEEE Computer Society, 21 out. 2021. Disponível em: <https://www.computer.org/publications/tech-news/trends/what-are-apis/>. Acesso em: 20 jul. 2025

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l.], v. 16, p. 81–90, 2005. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47288>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ROUSE, J. W. *et al.* **Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation**. [S. l.]: NASA, 1974. (E75-10354). Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>. Acesso em: 21 jun. 2024.

SALLUN, A. E. M.; SUGUIO, K.; FILHO, W. S. GEOPROCESSAMENTO PARA CARTOGRAFIA DO ALOGRUPO ALTO RIO PARANÁ (SP, PR E MS). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 3, 2007. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44896>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SARAVANI, M. J.; SAADATPOUR, M.; SHAHVARAN, A. R. A web GIS based integrated water resources assessment tool for Javeh Reservoir. **Expert Systems with Applications**, v. 252, p. 124198, out. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417424010649>. Acesso em: 4 jul. 2024.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Plano Diretor das Bacias Hidrográficas dos Rios Jequitai, Pacuí e trechos do rio São Francisco**: Relatório Final. Belo Horizonte: SEMAD, 2010. 736. Disponível em: <http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/672>. Acesso em: 26 jul. 2025.

SETTI, A. A. *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001. 328 p. Disponível em: https://lamorh.ufes.br/sites/lamorh.ufes.br/files/field/anexo/introducao_ao_gerenciam_ento_de_recursos_hidricos.pdf. Acesso em: 16 jul. 2025.

SHEN, Z. *et al.* Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 417–427, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14003744>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SILVA, C. de O. F. Classificação supervisionada de área irrigada utilizando índices espectrais de imagens Landsat-8 com Google Earth Engine. **IRRIGA**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 160–169, mar. 2020. Disponível em: <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3821>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SILVA, I. J. L. *et al.* Mapeamento de áreas irrigadas como subsídio a gestão de recursos hídricos: uma proposta metodológica utilizando o Google Earth Engine. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 21., 2025, Salvador. **Anais [...]**. São José dos Campos: Galoá, 2025. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/mapeamento-de-areas-irrigadas-como-subsidio-a-gestao-de-recursos-hidricos-uma-pr?lang=pt-br>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SILVA, J. P. da *et al.* A geotecnologia SmartGeo Layers (SGeoL) e sua aplicação para as políticas públicas: o caso do Painel de Segurança Hídrica (PSH). **Confins: Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, n. 60, set. 2023. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/53998>. Acesso em: 4 jul. 2024.

SOARES, J. A. S.; MOREIRA BARBOSA, E. Conflitos Hídricos pelo Uso da Água. **Revista Brasileira de Filosofia e História**, v. 13, n. 3, 5 ago. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/382904035_Conflitos_Hidricos_pelo_Uso_da_Agua. Acesso em: 14. jul. 2025.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 17, p. 1-28, ago. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735>. Acesso em: 7 jun. 2024.

STRAUCH, J. C. M.; AZEVEDO, J. B. Inovações geoespaciais e suas contribuições para a qualidade e as investigações do Censo Demográfico 2022. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 29, p. e04392024, 21 out. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/cDKzCvp5z7X7hg8BNYx9bkj/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

TEIXEIRA, A. *et al.* Vazões Consumidas pela Irrigação e pelos Abastecimentos Animal e Humano (Urbano e Rural) na Bacia do Paracatu no Período de 1970 a 1996. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 223–233, 2006. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=23&SUMARIO=399>. Acesso em: 09 jul. 2025.

TEIXEIRA, T. C. S.; RIBEIRO, M. M. R. Integrating resilience and socioeconomic demands through adaptive governance: Dilemmas in the Brazilian water sector. **Environmental Science & Policy**, v. 167, p. 104048, 1 maio 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901125000644>. Acesso em: 09 jul. 2025.

VILLAR, P. C.; RIBEIRO, W. C. A PERCEPÇÃO DO DIREITO HUMANO À ÁGUA NA ORDEM INTERNACIONAL. **Revista Direitos Fundamentais & Democracia**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. 358–380, 2012. Disponível em: <https://revistaeletronicardfd.unibrasil.com.br/index.php/rdfd/article/view/161>. Acesso em: 16 jul. 2025.

VITALIS, S.; ARROYO OHORI, K.; STOTER, J. CityJSON in QGIS: Development of an open-source plugin. **Transactions in GIS**, v. 24, n. 5, p. 1147–1164, out. 2020.

Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tgis.12657>. Acesso em: 20 jul. 2025.

ZHANG, X. *et al.* Identifying the drivers of water yield ecosystem service: A case study in the Yangtze River Basin, China. **Ecological Indicators**, v. 132, p. 108304, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21009699>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ZHAO, Z. *et al.* Comparison of Three Machine Learning Algorithms Using Google Earth Engine for Land Use Land Cover Classification. **Rangeland Ecology & Management**, v. 92, p. 129–137, jan. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1550742423001227>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ZURQANI, H. A. *et al.* Mapping and quantifying agricultural irrigation in heterogeneous landscapes using Google Earth Engine. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100590, ago. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521001269>. Acesso em: 17 jun. 2024.

APÊNDICE A - Código utilizado no cálculo da demanda hídrica legal

```
# Instala as bibliotecas necessárias
!pip install geopandas matplotlib
import geopandas as gpd
import matplotlib.pyplot as plt

# Carrega os arquivos
gdf_a = gpd.read_file("/content/OutorgasBaciasRAW_UTM.gpkg")
gdf_b = gpd.read_file("/content/UsosInsignificantesBaciasRAW_UTM.gpkg")
gdf_c = gpd.read_file("/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg")

# Cria coluna Demanda_L_Dia com valor nulo inicialmente
gdf_a["Demanda_L_Dia"] = None

# Aplica lógica para valor de vazão em "l/s"
mask_aaa = gdf_a["unvazao_4"] == "l/s"
gdf_a.loc[mask_aaa, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_aaa, "vazjan_4"] * gdf_a.loc[mask_aaa, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/h"
mask_bbb = gdf_a["unvazao_4"] == "m³/h"
gdf_a.loc[mask_bbb, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_bbb, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_a.loc[mask_bbb, "tcapjan_4"]
).round(3)

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/s"
mask_ccc = gdf_a["unvazao_4"] == "m³/s"
gdf_a.loc[mask_ccc, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_a.loc[mask_ccc, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_a.loc[mask_ccc, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Visualizar resultados
display(gdf_a[["unvazao_4", "vazjan_4", "Demanda_L_Dia"]].head())

# Exportar resultado
gdf_a.to_file("Outorgas_Demanda_L_Dia.gpkg", driver="GPKG")
gdf_b["Demanda_L_Dia"] = None

# Aplica lógica para valor de vazão em "l/s"
mask_aaa = gdf_b["unvazao_4"] == "l/s"
gdf_b.loc[mask_aaa, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_b.loc[mask_aaa, "vazjan_4"] * gdf_b.loc[mask_aaa, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/h"
mask_bbb = gdf_b["unvazao_4"] == "m³/h"
gdf_b.loc[mask_bbb, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_b.loc[mask_bbb, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_b.loc[mask_bbb, "tcapjan_4"]
).round(3)
```

```

# Aplica lógica para valor de vazão em "m³/s"
mask_ccc = gdf_b["unvazao_4"] == "m³/s"
gdf_b.loc[mask_ccc, "Demanda_L_Dia"] = (
    gdf_b.loc[mask_ccc, "vazjan_4"] * 1000 * gdf_b.loc[mask_ccc, "tcapjan_4"] * 3600
).round(3)

# Visualizar resultados
display(gdf_b[["unvazao_4", "vazjan_4", "Demanda_L_Dia"]].head())
gdf_b.to_file("UsoInsignificante_Demanda_L_Dia.gpkg", driver="GPKG")

# Interseção espacial
gdf_a = gpd.overlay(gdf_a, gdf_c[["Codificacao_BaciaHidrografica", "geometry"]],
    how='intersection')

# Visualização
display(gdf_a[["Codificacao_BaciaHidrografica", "Demanda_L_Dia"]].head())
gdf_a.plot(column="Codificacao_BaciaHidrografica", legend=True)
plt.title("Outorgas com código da bacia")
plt.show()

gdf_a.to_file("outorgas_intersect_bacias.gpkg", driver="GPKG")

gdf_b = gpd.overlay(gdf_b, gdf_c[["Codificacao_BaciaHidrografica", "geometry"]],
    how='intersection')

display(gdf_b[["Codificacao_BaciaHidrografica", "Demanda_L_Dia"]].head())
gdf_b.plot(column="Codificacao_BaciaHidrografica", legend=True)
plt.title("uso insignificante com código das bacias")
plt.show()

gdf_b.to_file("usoinsignificante_intersect_bacias.gpkg", driver="GPKG")

# Dissolver por Código da bacia e tipo captação somando demanda
dissolved_a = gdf_a.dissolve(by=["Codificacao_BaciaHidrografica", "tipouso_4"],
    aggfunc={"Demanda_L_Dia": "sum"}).reset_index()
dissolved_b = gdf_b.dissolve(by=["Codificacao_BaciaHidrografica", "tipouso_4"],
    aggfunc={"Demanda_L_Dia": "sum"}).reset_index()

# Visualização
display(dissolved_a.head())
display(dissolved_b.head())

# Exportação
dissolved_a.to_file("outorgas_dissolvido_tipo.gpkg", driver="GPKG")
dissolved_b.to_file("usoinsignificante_dissolvido_tipo.gpkg", driver="GPKG")

# Dissolver por código da bacia somando demanda

```

```

dissolved_a_all = gdf_a.dissolve(by="Codificacao_BaciaHidrografica",
aggfunc={"Demanda_L_Dia": "sum"}).reset_index()
dissolved_b_all = gdf_b.dissolve(by="Codificacao_BaciaHidrografica",
aggfunc={"Demanda_L_Dia": "sum"}).reset_index()

# Visualização
display(dissolved_a_all.head())
display(dissolved_b_all.head())

# Exportação
dissolved_a_all.to_file("Outorgas_dissolvido_bacia.gpkg", driver="GPKG")
dissolved_b_all.to_file("usoinsignificante_dissolvido_bacia.gpkg", driver="GPKG")

# Junção com o bacias, renomeando as colunas para indicar origem
a_attrs = dissolved_a_all[["Codificacao_BaciaHidrografica",
"Demanda_L_Dia"]].rename(columns={"Demanda_L_Dia": "Demanda_L_Dia_Outorga"})
b_attrs = dissolved_b_all[["Codificacao_BaciaHidrografica",
"Demanda_L_Dia"]].rename(columns={"Demanda_L_Dia": "Demanda_L_Dia_UsoInsignificante"})

# Unir com bacias
gdf_c_merge = gdf_c.merge(a_attrs, on="Codificacao_BaciaHidrografica", how="left")
gdf_c_merge = gdf_c_merge.merge(b_attrs, on="Codificacao_BaciaHidrografica", how="left")

# Criar nova coluna com soma das demandas
gdf_c_merge["DemandaLegal_L_Dia_Total"] = (
    gdf_c_merge["Demanda_L_Dia_Outorga"].fillna(0) +
    gdf_c_merge["Demanda_L_Dia_UsoInsignificante"].fillna(0)
)

# Visualização
display(gdf_c_merge[["Codificacao_BaciaHidrografica", "Demanda_L_Dia_Outorga",
"Demanda_L_Dia_UsoInsignificante", 'DemandaLegal_L_Dia_Total']].head())

gdf_c_merge.plot(column="Demanda_L_Dia_Outorga", legend=True)
plt.title("Bacias com Demanda_L_Dia Outorga")
plt.show()

gdf_c_merge.plot(column="Demanda_L_Dia_UsoInsignificante", legend=True)
plt.title("Bacias com Demanda_L_Dia UsoInsignificante")
plt.show()

gdf_c_merge.plot(column="DemandaLegal_L_Dia_Total", legend=True)
plt.title("Bacias com DemandaLegal_L_Dia Total")
plt.show()

# Exportação
gdf_c_merge.to_file("DemandaHidricaLegalCalculada_UTM.gpkg", driver="GPKG")

```

APÊNDICE B - Código utilizado na identificação de áreas irrigadas

```

/*****
*   PREPARAÇÃO DOS DADOS
*****/

// Definição do contorno pintado das bacias de interesse
var baciaInteresse = ee.Image().byte();
var contornoBaciasInteresse = baciaInteresse.paint({
  featureCollection: baciaEstudada,
  color: 1,
  width: 1.5
});

Map.centerObject(baciaEstudada, 10);

// Estilização das amostras para visualização
var amostrasIrigadoStyled = amostrasIrigado.style({
  color: 'red',
  width: 1
});

var amostrasNaoIrigadoStyled = amostrasNaoIrigado.style({
  color: 'purple',
  width: 1
});

// Adiciona camadas ao mapa
Map.addLayer(contornoBaciasInteresse, {palette: ['0000FF']}, 'Bacias Estudadas'); // azul
Map.addLayer(amostrasIrigadoStyled, {}, 'Amostras Irrigado');
Map.addLayer(amostrasNaoIrigadoStyled, {}, 'Amostras Não Irrigado');

/*****
*   1) COLEÇÃO SENTINEL-2 SR
*****/
var colecao = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
  .select(['B11', 'B8', 'B4', 'B3', 'B2', 'QA60'])
  .filterDate('2024-01-01', '2024-12-31')
  .filterBounds(baciaEstudada)
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 5))
  .sort('system:time_start');

print('Coleção Sentinel-2 Raw', colecao);

/*****
*   2) MÁSCARA DE NUVENS
*****/
function mascaraS2(img) {
  var qa = img.select('QA60');
```

```

var cloud = 1 << 10;    // bit-10: nuvem densa
var cirrus = 1 << 11;   // bit-11: cirrus
var mask = qa.bitwiseAnd(cloud).eq(0)
               .and(qa.bitwiseAnd(cirrus).eq(0));

return img.updateMask(mask)
               .select(['B11', 'B8', 'B4', 'B3', 'B2'])
               .multiply(0.0001)
               .copyProperties(img, img.propertyNames());
}
var colecaoSemNuvem = colecao.map(mascaraS2);
print('Coleção Sem Nuvem', colecaoSemNuvem);

/*****
* VISUALIZAÇÃO RGB - ANTES e DEPOIS DA MÁSCARA
*****/
var visRGB = {
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
  min: 0,
  max: 0.3
};

// RGB COM NUVENS
var rgbNuvens = colecao
  .map(function (img) {
    return img.select(['B4', 'B3', 'B2']).multiply(0.0001);
  })
  ;
Map.addLayer(rgbNuvens, visRGB, 'Sentinel-2 RGB - c/ Nuvens');

// RGB SEM NUVENS
var rgbSemNuvem = colecaoSemNuvem
  .select(['B4', 'B3', 'B2'])
  ;
Map.addLayer(rgbSemNuvem, visRGB, 'Sentinel-2 RGB - s/ Nuvens');

/*****
* 3) ÍNDICES
*****/
function addIndices(img) {
  var ndvi = img.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');

  return img.addBands([ndvi]).clip(baciaEstudada);
}

var colecaoIndices = colecaoSemNuvem.map(addIndices);

// Extraíndo pilhas NDVI para print
var imagensNdvi = colecaoIndices.select('NDVI');
```

```

print('Pilha NDVI Sentinel-2', imagensNdvi);

/*****
* 4) COMPOSIÇÃO (MÁXIMO)
*****/
var compMax = coleccionIndices.max();
Map.addLayer(compMax.select('NDVI'), {min:-1, max:1,
palette:['red','orange','yellow','green']}, 'NDVI - Máx');

print('Coleção reduzida pela máxima', compMax);

/*****
* 5) AMOSTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO
*****/
var bandas = ['NDVI','B11','B8','B4','B3','B2'];

var irr = amostrasIrrigado.randomColumn();
var nirr = amostrasNaoIrrigado.randomColumn();
var treino = irr.filter(ee.Filter.lt('random', 0.7))
               .merge(nirr.filter(ee.Filter.lt('random', 0.7)));
var valida = irr.filter(ee.Filter.gte('random', 0.7))
               .merge(nirr.filter(ee.Filter.gte('random', 0.7)));

var treinoSample = compMax.select(bandas).sampleRegions({
  collection: treino,
  properties: ['Irrigacao'],
  scale: 10
});

var rf = ee.Classifier.smileRandomForest(100)
        .train({
          features: treinoSample,
          classProperty: 'Irrigacao',
          inputProperties: bandas
        });

var classificado = compMax.select(bandas).classify(rf).clip(baciaEstudada);
Map.addLayer(classificado, {min:0,max:1,palette:['grey','green']}, 'RF - Sentinel-2');

print('Imagem Classificada', classificado);

/*****
* 6) AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA
*****/
var confTreino = rf.confusionMatrix();
print('Matriz - Treino RF', confTreino);
print('Acurácia - Treino RF', confTreino.accuracy());

var validaSample = compMax.sampleRegions({
  collection: valida,

```

```

    properties: ['Irrigacao'],
    scale: 10
  }).classify(rf);

var confValida = validaSample.errorMatrix('Irrigacao', 'classification');
print('Matriz - Validação RF', confValida);
print('Acurácia - Validação RF', confValida.accuracy());
print('Kappa - Validação RF', confValida.kappa());

/*****
* 7) Pós-Processamento
*****/
// ----- Passo 1: Filtro de Maioria (Neighborhood Mode) -----

// Kernel 3x3
var kernel = ee.Kernel.square(1);

// Aplicar o filtro de maioria
var maioria = classificado.reduceNeighborhood({
  reducer: ee.Reducer.mode(),
  kernel: kernel
});

// ----- Passo 2: Morphological Closing (preencher buracos pequenos) -----

// Dilatação
var dilatado = maioria.focal_max({
  kernel: kernel,
  iterations: 1
});

// Erosão
var fechado = dilatado.focal_min({
  kernel: kernel,
  iterations: 1
});

// ----- Passo 3: Morphological Opening (remover pequenos objetos isolados) -----
---

// Erosão
var erodido = fechado.focal_min({
  kernel: kernel,
  iterations: 1
});

// Dilatação
var suavizadoFinal = erodido.focal_max({

```

```

        kernel: kernel,
        iterations: 1
    });

// ----- Visualizar -----

Map.addLayer(suavizadoFinal, {min:0, max:1, palette:['grey','green']}, 'Classificação Final
Suavizada');

/*****
*   8) EXPORTAÇÃO
*****/
Export.image.toDrive({
    image: suavizadoFinal,
    description: 'AreaIrigadaAprimoradaSentinel2_CS_2024',
    region: baciaEstudada,
    crs: 'EPSG:4326',
    scale: 10,
    maxPixels: 1e13
});

```

APÊNDICE C - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica da agricultura

```
# Instala as bibliotecas necessárias
!pip install geopandas rasterio matplotlib fiona shapely

import rasterio
import numpy as np
import geopandas as gpd
import matplotlib.pyplot as plt
from rasterio.features import shapes
from shapely.geometry import shape
from rasterio.mask import mask

# Abre o raster de CS sentinel e filtrar valor 1
with rasterio.open("/content/AreaIrigadoAprimoradaSentinel2_CS_10m_Bacias_RAW_UTM.tif") as src1:
    data1 = src1.read(1)
    profile1 = src1.profile

# Cria máscara mantendo apenas valores 1
filtered1 = np.where(data1 == 1, 1, 0)

# Exporta resultado
profile1.update(dtype=rasterio.uint8, count=1)
with rasterio.open("CS_ApenasIrriagdo.tif", 'w', **profile1) as dst:
    dst.write(filtered1.astype(rasterio.uint8), 1)

# Lista de valores para manter
valores_mantidos = [15, 19, 21, 36]

# Abre raster Mapbiomas 10 m
with rasterio.open("/content/Mapbiomas2023_10m_Bacias_RAW_UTM.tif") as src2:
    data2 = src2.read(1)
    profile2 = src2.profile

# Filtra valores desejados
filtered2 = np.isin(data2, valores_mantidos).astype(np.uint8)

# Exporta resultado
profile2.update(dtype=rasterio.uint8, count=1)
with rasterio.open("Mapbiomas_Agropecuaria.tif", 'w', **profile2) as dst:
    dst.write(filtered2, 1)

from rasterio.warp import reproject, Resampling

# Reprojeta o raster mapbiomas (filtered2) para alinhar com raster CS
aligned_filtered2 = np.empty_like(filtered1)
```

```

reproject(
    source=filtered2,
    destination=aligned_filtered2,
    src_transform=profile2['transform'],
    src_crs=profile2['crs'],
    dst_transform=profile1['transform'],
    dst_crs=profile1['crs'],
    resampling=Resampling.nearest
)

# Interseção lógica entre rasters já alinhados
intersect = (filtered1 == 1) & (aligned_filtered2 == 1)

# Exporta o resultado
with rasterio.open("AreasAgricultivasPotencialmenteIrrigadas_UTM.tif", 'w', **profile1) as dst:
    dst.write(intersect.astype(np.uint8), 1)

# Reabre o raster áreas agrícolas potencialmente irrigadas
with rasterio.open("/content/AreasAgricultivasPotencialmenteIrrigadas_UTM.tif") as src3:
    data3 = src3.read(1)
    mask3 = data3 == 1 # Máscara apenas onde valor é 1

    # Extrai geometrias dos pixels
    results = (
        {'properties': {'value': v}, 'geometry': s}
        for s, v in shapes(data3, mask=mask3, transform=src3.transform)
    )

    # Constrói GeoDataFrame
    gdf_AreasAgricultivas = gpd.GeoDataFrame.from_features(list(results), crs=src3.crs)

# Remove coluna redundante 'value'
gdf_AreasAgricultivas = gdf_AreasAgricultivas.drop(columns='value')

# Visualização
gdf_AreasAgricultivas.plot()
plt.title("áreas agrícolas potencialmente irrigadas")
plt.show()

# Exporta como GPKG
gdf_AreasAgricultivas.to_file("AreasAgricultivasPotencialmenteIrrigadas_UTM.gpkg", driver="GPKG")

# --- 1. Leitura dos dados -----
gdf_car = gpd.read_file('/content/ImoveisCARBaciasRAW_UTM.gpkg')

# --- 2. Garante mesmo CRS -----
if gdf_AreasAgricultivas.crs != gdf_car.crs:
    gdf_car = gdf_car.to_crs(gdf_AreasAgricultivas.crs)

```

```

# --- 3A. Recorte das Áreas usando CAR -----
gdf_A = gpd.clip(gdf_AreasAgricultoras, gdf_car)

# --- 4. Exportações -----
gdf_A.to_file('/content/AreasAgricultorasPotencialmenteIrrigadas_DentroImoveis_UTM.gpkg',
driver='GPKG')

# Carrega camada (limites municipais)
gdf_B = gpd.read_file("/content/LimitesMunicipais_UTM.gpkg")[['geocodigo', 'nome',
'geometry']]

# Interseção espacial
gdf_A = gpd.overlay(gdf_A, gdf_B, how='intersection')

# Visualização e tabela
print(gdf_A[['nome', 'geocodigo']].head())
gdf_A.plot(column='nome', legend=True)
plt.title("Arquivo A com Municípios (interseção)")
plt.show()

# Salva resultado
gdf_A.to_file("AreasAgricultorasPotencialmenteIrrigadas_UTM_municipios.gpkg", driver="GPKG")

# Carrega bacias
gdf_C =
gpd.read_file("/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg")[['Codificacao_BaciaHidrografica', 'geometry']]

# Interseção espacial
gdf_A = gpd.overlay(gdf_A, gdf_C, how='intersection')

# Visualização
print(gdf_A[['nome', 'Codificacao_BaciaHidrografica']].head())
gdf_A.plot(column='Codificacao_BaciaHidrografica', legend=True)
plt.title("AreasAgricultorasPotencialmenteIrrigadas_UTM com código da bacia")
plt.show()

# Exporta
gdf_A.to_file("AreasAgricultorasPotencialmenteIrrigadas_UTM_Codificado.gpkg", driver="GPKG")

# Dissolve unificando polígonos com mesmo Código + Nome municipio
gdf_A = gdf_A.dissolve(by=['Codificacao_BaciaHidrografica', 'geocodigo'], as_index=False)

# Adiciona Geocodigo novamente por merge (caso tenha sido perdido)
gdf_A = gdf_A.merge(gdf_B[['geocodigo', 'nome']], on='geocodigo', how='left')

# Visualização

```

```

gdf_A.plot(column='Codificacao_BaciaHidrografica', legend=True)
plt.title("Áreas Agrícolas Potencialmente Irrigadas_UTM por Setor e Município")
plt.show()

# Exporta
gdf_A.to_file("ÁreasAgrícolasPotencialmenteIrrigadas_UTM_dissolvido.gpkg", driver="GPKG")

# Dicionário necessidade de irrigação por município
coef_por_municipio = {
    '3107406': 0.117,
    '3110004': 0.180,
    '3126000': 0.109,
    '3140506': 0.123,
    '3145802': 0.133,
    '3147105': 0.136
}

# Adiciona coeficiente
gdf_A['NecessidadeIrrigacao'] = gdf_A['geocodigo'].map(coef_por_municipio)

# Cálculo da área
gdf_A['Area_m2'] = gdf_A.geometry.area
gdf_A['Area_Ha'] = gdf_A['Area_m2'] / 10000

# Visualização
print(gdf_A[['geocodigo', 'Codificacao_BaciaHidrografica', 'NecessidadeIrrigacao',
'Area_Ha']].head())

# Multiplica área por coeficiente
gdf_A['Demanda_L_Dia_Irrigacao'] = gdf_A['Area_Ha'] * gdf_A['NecessidadeIrrigacao'] * 86400

# Tabela final
print(gdf_A[['Codificacao_BaciaHidrografica', 'Area_Ha', 'NecessidadeIrrigacao',
'Demanda_L_Dia_Irrigacao']].head())

# Exporta
gdf_A.to_file("DemandaHidrica_L_Dia.gpkg", driver="GPKG")

# Define funções de agregação (sem 'geometry')
agg_funcs = {
    'Demanda_L_Dia_Irrigacao': 'sum',
    'NecessidadeIrrigacao': 'first',
    'Area_m2': 'sum',
    'Area_Ha': 'sum'
}

# Dissolve por código da bacia (geometria é unida automaticamente)
gdf_A_dissolvida = gdf_A.dissolve(by='Codificacao_BaciaHidrografica',
aggfunc=agg_funcs).reset_index()

```

```

# Visualização em tabela e mapa
print(gdf_A_dissolvida[['Codificacao_BaciaHidrografica',
'Demanda_L_Dia_Irrigacao']].head())
gdf_A_dissolvida.plot(column='Demanda_L_Dia_Irrigacao', legend=True)
plt.title("Area agricola potencialmente irrigada dissolvida por bacia (Necessidade
Somada)")
plt.show()

# Exporta como GPKG
gdf_A_dissolvida.to_file("AreasAgricolasPotencialmenteIrigadas_UTM_final.gpkg",
driver="GPKG")

# Carrega novamente com bacias
gdf_C = gpd.read_file("/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg")

# Faz merge com base no codigo
gdf_C_completo = gdf_C.merge(
    gdf_A_dissolvida.drop(columns='geometry'),
    on='Codificacao_BaciaHidrografica',
    how='left'
)

# Visualização final
print(gdf_C_completo[['Codificacao_BaciaHidrografica', 'Demanda_L_Dia_Irrigacao']].head())
gdf_C_completo.plot(column='Demanda_L_Dia_Irrigacao', legend=True)
plt.title("Demanda hidrica agricola por bacia (Final)")
plt.show()

# Exporta
gdf_C_completo.to_file("DemandaHidricaPorBacia_UTM.gpkg", driver="GPKG")

```

APÊNDICE D - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica da pecuária

```
# Instala bibliotecas necessárias
!pip install geopandas openpyxl pyproj

# Importa bibliotecas
import pandas as pd
import geopandas as gpd

# Lê a planilha Excel com os dados da PPM
df_animais = pd.read_excel("/content/PPM2023MunicipiosTratada.xlsx")

# Lê o arquivo de pontos (estabelecimentos CNEFE)
gdf_pontos = gpd.read_file("/content/AgropecuariosCNEFEMunicipiosRAW_UTM.gpkg")

# Lê o arquivo de polígonos (BACIAS)
gdf_setores = gpd.read_file("/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg")

# Visualiza os primeiros dados
print("Excel - Animais por município:")
display(df_animais.head(10))

print("\nGPKG - Estabelecimentos (pontos):")
display(gdf_pontos.head(10))

print("\nGPKG - Bacias (polígonos):")
display(gdf_setores.head(10))

# Junta os dados do Excel aos pontos, com base no código do município
gdf_pontos = gdf_pontos.merge(df_animais, how='left', left_on='COD_MUNICI',
                             right_on='Geocodigo')

# Conta quantos pontos há por município
contagem_pontos = gdf_pontos.groupby('COD_MUNICI').size().rename("num_pontos")
gdf_pontos = gdf_pontos.merge(contagem_pontos, on="COD_MUNICI")

# Divide os animais igualmente entre os pontos do mesmo município e converte para inteiro
for animal in ['Bovino', 'Equino', 'Suino', 'Galinaceo']:
    gdf_pontos[animal] = (gdf_pontos[animal] /
                          gdf_pontos['num_pontos']).round().astype(int)

# Visualiza os resultados parciais
display(gdf_pontos[['COD_MUNICI', 'Bovino', 'Equino', 'Suino', 'Galinaceo']].head(10))

# Exporta o resultado para Geopackage
#output_path = '/content/resultado.gpkg'
#gdf_pontos.to_file(output_path, layer='pontos_com_animais', driver='GPKG')

# Valores de gasto diário -
```

```

gasto_bovino = 127.5 * 0.6 # Litros por cabeça por dia considerando retorno * consumo 127,5
* 0,6 (60%)
gasto_equino = 40 * 0.8
gasto_suino = 18.7 * 0.60
gasto_galinaceo = 0.22 * 0.69

# Cria colunas com os valores
gdf_pontos['Gasto_Bovino'] = gasto_bovino
gdf_pontos['Gasto_Equino'] = gasto_equino
gdf_pontos['Gasto_Suino'] = gasto_suino
gdf_pontos['Gasto_Galinaceo'] = gasto_galinaceo

# Visualiza os resultados parciais
display(gdf_pontos[['Bovino', 'Gasto_Bovino', 'Equino', 'Gasto_Equino']].head(10))

gdf_pontos['Demanda_L_Dia_Bovino'] = (gdf_pontos['Bovino'] *
gdf_pontos['Gasto_Bovino']).round(3)
gdf_pontos['Demanda_L_Dia_Equino'] = (gdf_pontos['Equino'] *
gdf_pontos['Gasto_Equino']).round(3)
gdf_pontos['Demanda_L_Dia_Suino'] = (gdf_pontos['Suino'] *
gdf_pontos['Gasto_Suino']).round(3)
gdf_pontos['Demanda_L_Dia_Galinaceo'] = (gdf_pontos['Galinaceo'] *
gdf_pontos['Gasto_Galinaceo']).round(3)

# Visualiza os resultados parciais
display(gdf_pontos[['Demanda_L_Dia_Bovino', 'Demanda_L_Dia_Equino', 'Demanda_L_Dia_Suino',
'Demanda_L_Dia_Galinaceo']].head(10))

# Garante que ambos estão no mesmo sistema de coordenadas
gdf_pontos = gdf_pontos.to_crs(gdf_setores.crs)

# Interseção espacial
gdf_pontos_setores = gpd.sjoin(gdf_pontos, gdf_setores, how='left', predicate='intersects')

gdf_pontos_setores = gdf_pontos_setores.dropna(subset=['Codificacao_BaciaHidrografica'])

# Visualiza o código da bacia que foi adicionado
display(gdf_pontos_setores[['Demanda_L_Dia_Bovino',
'Codificacao_BaciaHidrografica']].head(10))

# Define o código da bacia
codigo_setor = 'Codificacao_BaciaHidrografica'

# Soma os valores por bacia
colunas_somar = ['Demanda_L_Dia_Bovino', 'Demanda_L_Dia_Equino', 'Demanda_L_Dia_Suino',
'Demanda_L_Dia_Galinaceo']
df_agg = gdf_pontos_setores.groupby(codigo_setor)[colunas_somar].sum().reset_index()

# Visualiza o resultado

```

```

display(df_agg.head(10))

# Junta com o GeoDataFrame original de bacias
gdf_setores = gdf_setores.reset_index()
gdf_setores = gdf_setores.merge(df_agg, how='left',
left_on='Codificacao_BaciaHidrografica', right_on='Codificacao_BaciaHidrografica')

# Visualiza
display(gdf_setores.head(10))

# Exemplo de soma de colunas - substitua pelos nomes desejados
gdf_setores['Demanda_L_Dia_Pecuaria_Total'] = (gdf_setores['Demanda_L_Dia_Bovino'] +
gdf_setores['Demanda_L_Dia_Equino'] + gdf_setores['Demanda_L_Dia_Suino']
+ gdf_setores['Demanda_L_Dia_Galinaceo']).round(3)

# Visualiza
display(gdf_setores['Demanda_L_Dia_Pecuaria_Total'].head(10))

gdf_setores_final = gdf_setores.fillna(0)

# Exporta o resultado
gdf_setores_final.to_file("DemandaHidricaPecuariaBacias_UTM.gpkg", driver="GPKG")

# Confirmação
print("Arquivo exportado com sucesso: setores_resultado.gpkg")

```

APÊNDICE E - Código utilizado na estimativa da demanda hídrica para o abastecimento humano

```
# Instala bibliotecas necessárias
!pip install geopandas shapely pyogrio

# Importa as bibliotecas principais
import geopandas as gpd
import pandas as pd
import numpy as np

# 1. Carrega os dados da grade e da bacia
caminho_grade = '/content/GradeEstatisticaBaciasTratado_UTM.gpkg'
caminho_bacia = '/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg'

# 2 ▶ le arquivos -----
grade = gpd.read_file(caminho_grade)
bacia = gpd.read_file(caminho_bacia)

# 3 ▶ checa coluna-chave -----
if "id" not in grade.columns:
    raise KeyError("A coluna 'id' não existe na camada da grade.")

# 4 ▶ garante CRS igual -----
if grade.crs != bacia.crs:
    bacia = bacia.to_crs(grade.crs)

# 5 ▶ área total de cada grade (antes de dividir) -----
grade["area_total"] = grade.geometry.area

# 6 ▶ interseção grade × bacia -----
intersecao = gpd.overlay(grade, bacia, how="intersection")

# 7 ▶ área de cada pedaço gerado -----
intersecao["area_intersec"] = intersecao.geometry.area

# 8 ▶ calcula proporção da área ocupada e criar POPProporcional -----
intersecao["proporcao"] = intersecao["area_intersec"] / intersecao["area_total"]
intersecao["POPProporcional"] = (intersecao["POP"] *
intersecao["proporcao"]).round().astype(int)

# 9 ▶ gera centroides -----
centroides = intersecao.copy()
centroides["geometry"] = centroides.geometry.centroid

# 10 ▶ exporta - duas camadas no mesmo GPKG -----
saida = "grade_dividida_por_bacia.gpkg"
intersecao.to_file(saida, layer="poligonos", driver="GPKG")
centroides.to_file(saida, layer="centroides", driver="GPKG")
```

```

print("Exportação finalizada com sucesso.")

# Caminho do arquivo GPKG gerado
caminho_resultado = "grade_dividida_por_bacia.gpkg"

# Atribuir às variáveis desejadas
arquivo_pontos = caminho_resultado # camada 'centroides' está dentro desse mesmo
arquivo

# Carregar os dados conforme necessário
gdf_poligonos = gpd.read_file(caminho_bacia)
gdf_pontos = gpd.read_file(arquivo_pontos, layer='centroides')

# Visualização inicial
gdf_pontos.head(10)

# Dicionário de crescimento anual
tx_cresc_dict = {
    'Bom Despacho': 1.05/100,
    'Caeté': -0.41/100,
    'Florestal': 1.62/100,
    'Martinho Campos': 0.88/100,
    'Onça de Pitangui': -0.24/100,
    'Pará de Minas': 1.2/100
}

# Aplica ao GeoDataFrame
gdf_pontos['TaxaCrescimentoAnual'] = gdf_pontos['NM_MUN'].map(tx_cresc_dict)

gdf_pontos.head(10)

# Dicionário de demanda por habitante
dem_per_capta_dict = {
    'Bom Despacho': 154.1,
    'Caeté': 115.3,
    'Florestal': 185.4,
    'Martinho Campos': 172.3,
    'Onça de Pitangui': 108.4,
    'Pará de Minas': 144.3
}

gdf_pontos['DemandaUrbanaPerCapta'] = gdf_pontos['NM_MUN'].map(dem_per_capta_dict)

gdf_pontos.head(10)

# Dicionário de razão de perdas
raz_perdas_dict = {
    'Bom Despacho': 0.2894,

```

```

    'Caeté': 0.54,
    'Florestal': 0.2557,
    'Martinho Campos': 0.2481,
    'Onça de Pitangui': 0.3988,
    'Pará de Minas': 0.1705
}

gdf_pontos['PercentualPerdasAbstecimento'] = gdf_pontos['NM_MUN'].map(raz_perdas_dict)

gdf_pontos.head(10)

# Aplica a fórmula PopAtualizada = POP * (1 + TxCrescA) ^ 12
gdf_pontos['PopulacaoCalculada2022'] = (
    (gdf_pontos['POPProporcional'].fillna(0)) * ((1 +
gdf_pontos['TaxaCrescimentoAnual'].fillna(0)) ** 12)
).round().astype(int)

gdf_pontos.head(10)

# Cria a coluna com NaN inicialmente
gdf_pontos['Demanda_L_Dia_PopRural'] = np.where(gdf_pontos['Zona'] == 'Rural',
gdf_pontos['PopulacaoCalculada2022'] * 125, 0).round(3)

gdf_pontos.head(10)

gdf_pontos['Demanda_L_Dia_PopUrbana'] = np.where(gdf_pontos['Zona'] == 'Urbana',
gdf_pontos['PopulacaoCalculada2022'] * gdf_pontos['DemandaUrbanaPerCapta'], 0).round(3)
gdf_pontos['Demanda_L_Dia_PopUrbana_Ajustada'] = gdf_pontos['Demanda_L_Dia_PopUrbana'] / (1
- gdf_pontos['PercentualPerdasAbstecimento']).round(3)

#gdf_pontos.head(10)
gdf_pontos.loc[gdf_pontos['Zona'] == 'Urbana'].head(10)

# Lista de colunas a serem somadas
cols_to_sum = ['POPProporcional', 'PopulacaoCalculada2022', 'Demanda_L_Dia_PopRural',
'Demanda_L_Dia_PopUrbana', 'Demanda_L_Dia_PopUrbana_Ajustada']

# Inclui a coluna de dissolução e a geometria
colunas_para_dissolver = ['Codificacao_BaciaHidrografica'] + cols_to_sum + ['geometry']

# Cria GeoDataFrame filtrado
gdf_tmp = gdf_pontos[colunas_para_dissolver]

# Aplica o dissolve apenas nessas colunas
gdf_dissolvido = gdf_tmp.dissolve(by='Codificacao_BaciaHidrografica',
aggfunc='sum').reset_index()

# Visualiza o resultado
gdf_dissolvido.head(10)

```

```

gdf_dissolvido['Demanda_L_Dia_AbastecimentoHumanoTotal'] =
(gdf_dissolvido['Demanda_L_Dia_PopRural'] +
gdf_dissolvido['Demanda_L_Dia_PopUrbana_Ajustada']).round(3)

gdf_dissolvido.head(10)

# Verifique se 'ID' está presente nas duas
assert 'Codificacao_BaciaHidrografica' in gdf_dissolvido.columns and
'Codificacao_BaciaHidrografica' in gdf_poligonos.columns, "A coluna
'Codificacao_BaciaHidrografica' precisa estar nas duas camadas"

# Remover geometria dos pontos antes do merge (opcional, evita confusão)
dados_atributos = gdf_dissolvido.drop(columns='geometry')

# Fazer o merge
gdf_final = gdf_poligonos.merge(dados_atributos, on='Codificacao_BaciaHidrografica',
how='left')

# Ver resultado
gdf_final.head(10)

# Exporta o resultado final contendo só a geometria dos polígonos e as colunas transferidas
gdf_final.to_file('/content/DemandaHidricaAbastecimentoHumanoUTM.gpkg', driver='GPKG')

print("Arquivo exportado com sucesso para '/content/resultado_final.gpkg'")

```

APÊNDICE F - Código utilizado na definição de bacias prioritárias para análise

```
# Instala bibliotecas necessárias
!pip install geopandas

# Importação das bibliotecas necessárias
import geopandas as gpd

# Carrega os arquivos

gdf_A = gpd.read_file("/content/DemandaHidricaLegalCalculada_UTM.gpkg")
gdf_B = gpd.read_file("/content/DemandaHidricaEstimadaAgricultura_UTM.gpkg")
gdf_C = gpd.read_file("/content/DemandaHidricaEstimadaPecuararia_UTM.gpkg")
gdf_D = gpd.read_file("/content/DemandaHidricaEstimadaAbastecimentoHumano_UTM.gpkg")
gdf_E = gpd.read_file("/content/Ottobacias07Tratado_Todas_UTM.gpkg")

coluna_chave = "Codificacao_BaciaHidrografica"

df_A = gdf_A[[coluna_chave,
"DemandaLegal_L_Dia_Total"]].rename(columns={"DemandaLegal_L_Dia_Total":
"DemandaLegal_L_Dia"})
df_B = gdf_B[[coluna_chave,
"Demanda_L_Dia_Irrigacao"]].rename(columns={"Demanda_L_Dia_Irrigacao":
"DemandaIrrigacao_L_Dia"})
df_C = gdf_C[[coluna_chave,
"Demanda_L_Dia_Pecuararia_Total"]].rename(columns={"Demanda_L_Dia_Pecuararia_Total":
"DemandaPecuararia_L_Dia"})
df_D = gdf_D[[coluna_chave,
"Demanda_L_Dia_AbastecimentoHumanoTotal"]].rename(columns={"Demanda_L_Dia_AbastecimentoHumanoTotal": "DemandaAbastHumano_L_Dia"})

gdf_resultado = gdf_E.merge(df_A, on=coluna_chave, how='left')
gdf_resultado = gdf_resultado.merge(df_B, on=coluna_chave, how='left')
gdf_resultado = gdf_resultado.merge(df_C, on=coluna_chave, how='left')
gdf_resultado = gdf_resultado.merge(df_D, on=coluna_chave, how='left')

# Calcula a demanda hidrica estimada total
gdf_resultado["DemandaEstimada_L_Dia"] = gdf_resultado[["DemandaIrrigacao_L_Dia",
"DemandaPecuararia_L_Dia", "DemandaAbastHumano_L_Dia"]].sum(axis=1)

gdf_resultado.to_file('/content/DemandaEstimadaDemandaLegal.gpkg', driver='GPKG')

# Parâmetros: escolha o tipo de ponderação
# Opções:
# 'igual' => peso igual entre as duas demandas
modo_ponderacao = 'igual'

# Caminho do seu arquivo
caminho_gpkg = '/content/DemandaEstimadaDemandaLegal.gpkg'
```

```

gdf = gpd.read_file(caminho_gpkg)

# Definir número de classes (agora fixo em 5)
n_classes = 5

# Definir manualmente os limites das classes (você deve ajustar esses valores conforme sua
necessidade)
# Exemplo (substitua pelos seus valores reais):
bins_legal = [863000, 2130000, 3610000, 7500000, 26300000] # Limites da Demanda Legal
bins_estimada = [326000, 1120000, 2000000, 4620000, 19220000] # Limites da Demanda
Estimada

# Função de classificação baseada nos bins manuais
def classificar_manual(valor, bins):
    for i, limite in enumerate(bins):
        if valor <= limite:
            return i
    return len(bins) # Para valores acima da última faixa

# Aplicar classificação usando os limites manuais
gdf['FaixaDemandaHidricaLegal'] = gdf['DemandaLegal_L_Dia'].apply(lambda x:
classificar_manual(x, bins_legal))
gdf['FaixaDemandaHidricaEstimada'] = gdf['DemandaEstimada_L_Dia'].apply(lambda x:
classificar_manual(x, bins_estimada))

# Definir pesos conforme o modo escolhido
if modo_ponderacao == 'igual':
    gdf['Prioridade'] = gdf['FaixaDemandaHidricaLegal'] +
gdf['FaixaDemandaHidricaEstimada']
else:
    raise ValueError("Escolha um modo válido: 'igual'")

# Criar classificação textual final (ajustado para 5 classes)
def classificar_prioridade(score):
    if score >= (n_classes - 1) * 2: # Exemplo: se n_classes=5, score>=8
        return "Muito Alta"
    elif score >= (n_classes - 1) * 1.5: # Exemplo: >=6
        return "Alta"
    elif score >= (n_classes - 1): # Exemplo: >=4
        return "Média"
    elif score >= 1:
        return "Baixa"
    else:
        return "Muito Baixa"

def classificar_prioridade(score):
    if score >= 8:
        return "Muito Alta"
    elif score >= 6:

```

```

        return "Alta"
    elif score >= 4:
        return "Média"
    elif score >= 1:
        return "Baixa"
    else:
        return "Muito Baixa"

gdf['ValorAreaPrioritaria'] = gdf['Prioridade'].apply(classificar_prioridade)

# Exportar o resultado
saida_gpkg = '/content/Bacias_Priorizadas.gpkg'
gdf.to_file(saida_gpkg, layer='prioridade', driver='GPKG')

# Função para exibir os intervalos das classes
def mostrar_faixas(nome, bins):
    print(f"Faixas para {nome}:")
    for i, limite in enumerate(bins):
        if i == 0:
            print(f" Classe 0: <= {limite}")
        else:
            print(f" Classe {i}: > {bins[i-1]} até {limite}")
    print(f" Classe {len(bins)}: > {bins[-1]}")

# Mostrar as faixas usadas
mostrar_faixas("Demanda Legal", bins_legal)
mostrar_faixas("Demanda Estimada", bins_estimada)

print(f"Processo concluído! Arquivo salvo em: {saida_gpkg}")
print(gdf[['DemandaLegal_L_Dia', 'DemandaEstimada_L_Dia', 'FaixaDemandaHidricaLegal',
'FaixaDemandaHidricaEstimada', 'Prioridade', 'ValorAreaPrioritaria']].head())

```

APÊNDICE G - Código utilizado no protocolo de identificação de áreas potenciais de usos irregulares

```
# Instala bibliotecas necessárias
!pip install pandas geopandas matplotlib shapely

import geopandas as gpd
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Carregar POL1
pol1 = gpd.read_file('/content/MatrizPriorizacaoBacias.gpkg')

# Filtra por dois valores específicos E por área mínima
valores_alvo = ['Muito Alta', 'Alta']
cod_bacia = [7698624]

pol1_sel = pol1[
    (pol1['ValorAreaPrioritaria'].isin(valores_alvo)) &
    (pol1['Codificacao_BaciaHidrografica'].isin(cod_bacia))
]

# Print info
print(f'POL1 - Seleccionadas: {len(pol1_sel)} / Total: {len(pol1)}')

# Plot
pol1_sel.plot(edgecolor='black', facecolor='cyan')
plt.title('Feições Seleccionadas em POL1')
plt.show()

# Parâmetro de filtro
limite_valorHa = 20.0

# Carregar POL2 e POL3
pol2 = gpd.read_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_UTM.gpkg')

# Filtros
pol2_filtrado = pol2[pol2['Area_Ha_Propriedade'] >= limite_valorHa]

# Print info
print(f'POL2 após filtro: Total em POL2: {len(pol2_filtrado)}')

# Plot
pol2_filtrado.plot(edgecolor='black', facecolor='orange')
plt.title('POL2 Filtrado')
plt.show()

# Exportar
```

```

pol2_filtrado.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_UTM_Temp1.gpkg',
driver='GPKG')

# Recarregar arquivos, se quiser
pol2exp = gpd.read_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_UTM_Temp1.gpkg')

# Interseção com pol1_sel
pol2expv2 = pol2exp[pol2exp.intersects(pol1_sel.unary_union)]

# Print info
print(f'POL2ExpV2 - Feições selecionadas: {len(pol2expv2)} / Total em POL2Exp:
{len(pol2exp)}')

# Plot
pol2expv2.plot(edgecolor='black', facecolor='lime')
plt.title('POL2ExpV2 - Intersectando POL1 Selecionado')
plt.show()

# Exportar
pol2expv2.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_UTM_Temp2.gpkg',
driver='GPKG')

# Carregar PNT1 e PNT2
pnt1 = gpd.read_file('/content/OutorgasBaciasRAW_UTM.gpkg')
pnt2 = gpd.read_file('/content/UsosInsignificantesBaciasRAW_UTM.gpkg')

# Concatenar
pnt_merged = gpd.GeoDataFrame(pd.concat([pnt1, pnt2], ignore_index=True), crs=pnt1.crs)

# Dividir pela presença de "X" na coluna (exemplo: 'descricao')
coluna_texto = 'finuso1_4'

pnTA = pnt_merged[pnt_merged[coluna_texto].str.contains('Irrigação', na=False, case=False)]
pnTB = pnt_merged[~pnt_merged[coluna_texto].str.contains('Irrigação', na=False,
case=False)]

# Print
print(f'PNTA: {len(pnTA)}, PNTB: {len(pnTB)}, Total: {len(pnt_merged)}')

# Exportar os dois juntos num único GPK com camadas diferentes
pnTA.to_file('/content/CaptacaoSubdividida.gpkg', layer='Irrigacao', driver='GPKG')
pnTB.to_file('/content/CaptacaoSubdividida.gpkg', layer='OutrasFinalidades', driver='GPKG')

from shapely.geometry import Point

# Recarregar
pol2expv2 =
gpd.read_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrrigadasTratado_UTM_Temp2.gpkg')

```

```

pol3 =
gpd.read_file('/content/AreasAgricolasPotencialenteIrrigadas_DentroImoveisDissolve_UTM.gpkg
')
pnta = gpd.read_file('/content/CaptacaoSubdividida.gpkg', layer='Irrigacao')
pntb = gpd.read_file('/content/CaptacaoSubdividida.gpkg', layer='OutrasFinalidades')

# Faz o join: traz 'Area_HA' de pol3 para pol2expv2, renomeando
pol2expv2 = pol2expv2.merge(
    pol3[['cod_imovel', 'Area_Ha_Irrigada']],
    on='cod_imovel',
    how='left'
)
# Função para testar se um polígono contém pontos de cada camada
def verifica_contencao(pol, pontos):
    return pontos.within(pol).any()

# Cria listas
so_pnta, so_pntb, ambos, nenhum = [], [], [], []

for idx, pol in pol2expv2.iterrows():
    tem_pnta = pnta.within(pol.geometry).any()
    tem_pntb = pntb.within(pol.geometry).any()

    if tem_pnta and tem_pntb:
        ambos.append(pol)
    elif tem_pnta:
        so_pnta.append(pol)
    elif tem_pntb:
        so_pntb.append(pol)
    else:
        nenhum.append(pol)

# Converte listas em GeoDataFrames
gdf_so_pnta = gpd.GeoDataFrame(so_pnta, crs=pol2expv2.crs)
gdf_so_pntb = gpd.GeoDataFrame(so_pntb, crs=pol2expv2.crs)
gdf_ambos = gpd.GeoDataFrame(ambos, crs=pol2expv2.crs)
gdf_nenhum = gpd.GeoDataFrame(nenhum, crs=pol2expv2.crs)

gdf_so_pnta['classe'] = 'Irrigação'
gdf_so_pntb['classe'] = 'OutrasFinalidades'
gdf_ambos['classe'] = 'IrrigaçãoeOutrasFinalidades'
gdf_nenhum['classe'] = 'SemCaptação'

# Criar o ranking dentro de cada camada
for gdf in [gdf_so_pnta, gdf_so_pntb, gdf_ambos, gdf_nenhum]:
    if 'Area_Ha_Irrigada' in gdf.columns and not gdf.empty:
        gdf['Prioridade'] = gdf['Area_Ha_Irrigada'].rank(method='first',
ascending=False).astype(int)
    else:

```

```

gdf['Prioridade'] = None # Para caso de camada vazia

# Print
print(f'Irrigação: {len(gdf_so_pnta)}')
print(f'Outras Finalidades: {len(gdf_so_pntb)}')
print(f'Irrigação e Outras Finalidades: {len(gdf_ambos)}')
print(f'Sem Captação: {len(gdf_nenhum)}')

# Exporta
gdf_so_pnta.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg',
layer='Irigacao', driver='GPKG')
gdf_so_pntb.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg',
layer='OutrasFinalidades', driver='GPKG')
gdf_ambos.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg',
layer='Irigacao e Outras Finalidades', driver='GPKG')
gdf_nenhum.to_file('/content/ImoveisCARBaciasComAreasIrigadasTratado_7698624_UTM.gpkg',
layer='SemCaptacao', driver='GPKG')

```