

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Vulnerabilidade ambiental e potencial agropecuário em bacias hidrográficas

Ana Luiza Melo Rodrigues
Doctor Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

ANA LUIZA MELO RODRIGUES

Vulnerabilidade ambiental e potencial agropecuário em bacias hidrográficas

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Ricardo S. Silva Amorim

Coorientadores: Demetrius D. da Silva
Frederico C. M. de M.
Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696v
2025
Rodrigues, Ana Luiza Melo, 1994-
Vulnerabilidade ambiental e potencial agropecuário em
bacias hidrográficas / Ana Luiza Melo Rodrigues. – Viçosa, MG,
2025.

1 tese eletrônica (109 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Ricardo Santos Silva Amorim.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.843>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solo - Uso - Planejamento - Paraopeba, Rio, Região
(MG). 2. Solos - Conservação. 3. Bacias hidrográficas - Manejo
- Paraopeba, Rio, Região (MG). 4. Produtividade agrícola.
I. Amorim, Ricardo Santos Silva, 1971-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.478151

ANA LUIZA MELO RODRIGUES

Vulnerabilidade ambiental e potencial agropecuário em bacias hidrográficas

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Ana Luiza Melo Rodrigues
Autora

Ricardo Santos Silva Amorim
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 05/01/2026 às 15:00:44 e pelo orientador em 05/01/2026 às 22:26:51. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3PQX.ADE3.6Y2H** e clique no botão 'Validar documento'.

A Deus, meu marido, minha família, meus amigos e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Esta tese de doutorado não poderia ter acontecido sem a benção de Deus e o apoio de várias pessoas. Em primeiro lugar, meu marido, Otávio, que desde o início não poupou esforços para me incentivar a encarar e não desistir deste desafio, e durante todo esse tempo foi e continua sendo meu porto seguro.

Também não posso deixar de agradecer ao meu orientado, Ricardo, por seus conhecimentos e paciência comigo. Aos meus coorientadores Demetrius e meu eterno professor Frederico, por toda a paciência, incentivo e empenho com que sempre me orientaram neste trabalho e em todos aqueles que realizei que me permitiram chegar aqui. Muito obrigada por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar. Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Centro e Referências em Recursos Hídricos cujo apoio, amizade e que apesar da distância ensinamentos estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço à minha família que me forneceu uma base sólida para que eu pudesse me desenvolver e florescer. Agradeço a todos meus professores, desde meu início escolar, vocês atuaram como fonte de conhecimento e inspiração. Vocês me ensinaram a ter curiosidade, a confrontar meus ensinamentos e buscar sempre mais.

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por me permitir errar, aprender e crescer. Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero muito obrigada.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

RODRIGUES, Ana Luiza Melo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Vulnerabilidade ambiental e potencial agropecuário em bacias hidrográficas**. Orientador: Ricardo Santos Silva Amorim. Coorientadores: Demetrius David da Silva e Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

Com o constante aumento da demanda por água, alimento e recursos naturais destaca-se a necessidade de um planejamento espacial de uso da terra baseado na premissa de conservação do solo e da água visando o desenvolvimento sustentável das atividades agrícolas. Desta forma, foi proposta uma metodologia para identificação de áreas potenciais à produção, propagação, acúmulo do escoamento superficial, erosão, recarga hídrica, bem como áreas com maior potencial agropecuário considerando fatores agronômicos, ambientais, econômicos. A área de estudo foi a bacia do Rio Paraopeba, sub-bacia do Rio São Francisco, que representa uma das regiões de maior importância econômica para o estado de Minas Gerais. A metodologia consistiu em selecionar critérios pertinentes a cada mapa e combiná-los usando o Processo de Hierarquização Analítica aliado à metodologia fuzzy. Os mapas dos respectivos potenciais foram categorizados em cinco classes de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Na bacia do Rio Paraopeba predomina potencial baixo a moderado para produção e propagação do escoamento e erosão hídrica, enquanto o potencial para o acúmulo de escoamento superficial e recarga hídrica predomina a classe moderada a alta. Os critérios relacionados as propriedades do solo foram mais utilizados e tiveram maior influência geral nos produtos gerados, seguidos pelos critérios uso da terra e adequação de uso da terra. As classes predominantes de potencial agropecuário foram alta e baixa. Sendo que as regiões de alto potencial estão, principalmente, no Baixo Paraopeba à margem esquerda do rio; e as áreas de baixo potencial estão, principalmente, na região do Alto Paraopeba à margem direita do rio. As áreas de cultivos dos municípios com maior rendimento por hectare estão categorizadas em muito alto e alto potencial agropecuário segundo a metodologia proposta, enquanto as áreas de cultivos dos municípios com menor rendimento estão localizados em regiões categorizadas com baixo e muito baixo potencial agropecuário. Isso evidencia a eficácia da metodologia proposta na identificação e priorização do potencial agropecuário da região da bacia do Rio Paraopeba. Ressalta-se que os produtos apresentados neste trabalho refletem o panorama atual da bacia, podendo ser alterados em função da alteração do uso e ocupação da terra.

Palavras-chave: análise multicritério; capacidade de uso da terra; escoamento superficial; planejamento espacial da terra; processo erosivo; zonas de recarga

ABSTRACT

RODRIGUES, Ana Luiza Melo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Environmental vulnerability and agricultural potential in watersheds.** Adviser: Ricardo Santos Silva Amorim. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Frederico Carlos Martins de Menezes Filho.

With the constant rise in the demand for water, food and natural resources, it's important to plan the land use based on the premise of soil and water conservation aiming at the sustainable development of agricultural activities. Thus, this work proposed a methodology for identifying areas with potential for production, propagation, and accumulation of runoff, erosion, and water recharge, as well as areas with greater agricultural suitability, considering agricultural, environmental and economic factors. The study area is the Paraopeba watershed, a sub-watershed of the São Francisco River that represents one of the regions of greatest economic importance for the state of Minas Gerais. The methodology consisted of selecting criteria relevant to each map and combining them with the Analytical Hierarchy Process and the fuzzy methodology. The end products were divided into five potential classes: very low, low, moderate, high and very high. Paraopeba watershed has low to moderate potential for runoff production and propagation and water erosion, and moderate to high potential for accumulation of runoff and water recharge predominate. The criteria related to soil properties were most used and had the greatest overall influence on the products generated, followed by the land use and intensity of land use. The main classes of agricultural potential for the Paraopeba watershed were high and low. The regions with high potential are mainly in the Lower Paraopeba on the left of the river, while those with low potential are mainly in the Upper Paraopeba region on the right of the river. According to the proposed methodology, the cultivated areas of municipalities with the highest yield per hectare are categorized as having very high and high agricultural suitability, while the cultivated areas of municipalities with the lowest yield are in regions categorized as having low and very low agricultural suitability. This demonstrates the effectiveness of the proposed methodology in identifying and prioritizing the agricultural potential of the Paraopeba River basin region. It is worth noting that the products presented in this work reflect the current panorama of the basin, and may be changed positively by reducing vulnerable areas, or even negatively by increasing vulnerable areas, due to changes in land use and land cover.

Keywords: multicriteria analysis; capacity for land use; runoff; land spatial planning; erosive process; recharge zones

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1. Processo metodológico utilizado no trabalho.....	22
Figura 2-2. Área de estudos, bacia do rio Paraopeba.....	24
Figura 2-3. Precipitação média anual da bacia do Rio Paraopeba.....	39
Figura 2-4. Uso e ocupação da terra somente para as classes consideradas para o estudo na bacia do Rio Paraopeba.	40
Figura 2-5. Potencial de recarga hídrica do componente solo, PRHS(a) e potencial pedohidrológico à recarga hídrica, PPRH (b) para a bacia do Rio Paraopeba	41
Figura 2-6. Declividade em porcentagem da bacia do Rio Paraopeba.	43
Figura 2-7. Índice topográfico (IT) (a) e a potência do escoamento (SPI) (b)	43
Figura 2-8. Distância às estradas (a) e distância à hidrografia (b) na bacia do Rio Paraopeba.....	44
Figura 2-9. Potencial Natural de Erosão (PNE).....	45
Figura 2-10 – Classificação de capacidade de uso e ocupação da terra (CCU) (a) e número de classes excedentes (NCE) (b) para a bacia do Rio Paraopeba	47
Figura 2-11 - Balanço hídrico climatológico simplificado para a bacia do Rio Paraopeba	48
Figura 2-12. Identificação de áreas potenciais à produção de escoamento superficial	51
Figura 2-13. Identificação de áreas potenciais à propagação de escoamento superficial	53
Figura 2-14. Identificação de áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial na bacia do Rio Paraopeba.	55
Figura 2-15. Identificação de áreas potenciais à ocorrência do processo erosivo na bacia do Rio Paraopeba.....	57
Figura 2-16. Identificação de áreas potenciais à recarga hídrica na bacia do Rio Paraopeba.....	59
Figura 3-1. Fluxograma da elaboração da metodologia para classificação do Potencial Agropecuário.....	80
Figura 3-2. Área de estudos.....	81
Figura 3-3 Critérios utilizados para elaboração do mapa de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba.....	87

Figura 3-4. Identificação do potencial agropecuário (A) e uso e ocupação da terra para o ano de 2022 (B) da bacia do Rio Paraopeba92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Descrição das Classes de Capacidade de uso e ocupação da terra (CCU)	33
Tabela 2-2. Intervalos atribuídos às classes de declividade para obtenção da capacidade de uso e ocupação da terra conforme Monteiro et al., (2018).....	33
Tabela 2-3. Escala de atribuição dos valores dos pesos segundo a metodologia AHP	38
Tabela 2-4. Critérios, funções e pesos utilizados para as análises multicritérios para cada produto gerado para a bacia do Rio Paraopeba.....	49
Tabela 3-1- Descrição das Classes de Capacidade de uso da terra (CCU)	83
Tabela 3-2 - Intervalos atribuídos às classes de declividade para obtenção da capacidade de uso da terra conforme Monteiro et al., (2018).	84
Tabela 3-3. Escala de atribuição dos valores dos pesos segundo a metodologia AHP	87
Tabela 3-4. Critérios, funções e pesos atribuídos para a identificação do potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba	91
Tabela 3-5. Porcentagem de cada uso e ocupação da terra por classe de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
	REFERÊNCIAS.....	16
2	ARTIGO 1: IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL À PRODUÇÃO, PROPAGAÇÃO E ACÚMULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL, EROSÃO E RECARGA HÍDRICA EM BACIA HIDROGRÁFICA.....	18
2.1	Resumo	18
2.2	Abstract.....	19
2.3	Introdução.....	19
2.4	Metodologia	21
2.4.1	Área de estudo.....	22
2.4.2	Áreas potenciais à produção do escoamento superficial	24
2.4.3	Áreas potenciais à propagação do escoamento superficial	27
2.4.4	Áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial	28
2.4.5	Áreas potenciais à erosão hídrica do solo.....	29
2.4.6	Áreas potenciais à recarga hídrica	34
2.4.7	Análise multicritério	36
2.5	Resultados e discussão.....	38
2.5.1	Critérios utilizados	38
2.5.2	Análise multicritério e Processo de Hierarquização Analítica (AHP).....	48
2.5.3	Áreas potenciais à produção de escoamento superficial.....	50
2.5.4	Áreas potenciais à propagação de escoamento superficial.....	52
2.5.5	Áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial	54
2.5.6	Áreas potenciais à ocorrência do processo erosivo.....	56
2.5.7	Áreas potenciais à recarga hídrica	58
2.5.8	Limitações e sugestões futuras	60
2.6	Conclusões	61

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
3 ARTIGO 2: IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL AGROPECUÁRIO DA BACIA DO RIO PARAPEBA COM BASE EM ASPECTOS AGRONÔMICOS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.....	76
3.1 Resumo	76
3.2 Abstract.....	77
3.3 Introdução.....	78
3.4 Metodologia	79
3.4.1 Área de estudo.....	80
3.4.2 Classificação do solo conforme capacidade de uso e ocupação da terra e rentabilidade econômica	82
3.4.2.1 Classificação da capacidade de uso e ocupação da terra.....	83
3.4.2.2 Balanço hídrico climatológico simplificado.....	84
3.4.2.3 Rendimento por hectare	85
3.4.2.4 Distância às estradas.....	85
3.4.3 Análise multicritério	86
3.5 Resultados	87
3.5.1 Critérios utilizados	87
3.5.2 Análise multicritério e Processo de Hierarquização Analítica (AHP).....	91
3.5.3 Potencial Agropecuário	92
3.6 Conclusões	95
REFERÊNCIAS.....	96
4 CONCLUSÕES GERAIS	101
5 APÊNDICE.....	102

1 INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da demanda por alimento, bem como água e demais recursos naturais tem proporcionado um intenso e inadequado processo de antropização das terras, que tem resultado em diversos problemas ambientais (Cárceles Rodríguez et al., 2022; Feng; Burian; Pomeroy, 2016). O uso inadequado das terras pode levar ao aumento do escoamento superficial e da erosão, além de reduzir a recarga dos aquíferos, causado, principalmente, pela redução da capacidade de infiltração de água no solo (Grecco et al., 2012; Qiao; Kristoffersson; Randrup, 2018; Yao; Wei; Chen, 2016). Essas alterações afetam negativamente a produção agrícola e a qualidade de vida das comunidades rurais.

Neste contexto destaca-se a necessidade de um planejamento espacial do uso da terra que considere a sua capacidade de uso e ocupação, as atividades de interesse econômico e a conservação do solo e da água. Portanto, a identificação de áreas prioritárias para a conservação de solo e água é fundamental para orientar políticas públicas e práticas de manejo que promovam o desenvolvimento sustentável das atividades agropecuárias sob o ponto de vista social, ambiental e econômico (Lepsch et al., 2015; Pruski, 2009; Zulkarnain; Prawira; Djamaludin, 2020).

As práticas de conservação de solo e água visam reduzir, conter ou direcionar o escoamento, bem como melhorar qualidade do solo (Pruski, 2009). Essas práticas trazem benefícios qualitativos e quantitativos para o meio ambiente, uma vez que proporcionam aumento da infiltração e de áreas de armazenamento de água do escoamento superficial, permitindo sua evaporação a posteriori ou até mesmo o seu reaproveitamento (Feng; Burian; Pomeroy, 2016).

A identificação de áreas prioritárias para adoção de práticas conservacionistas é necessária para potencializar a eficiência das referidas práticas em minimizar os impactos ambientais negativos, promover a resiliência e assegurar a manutenção dos serviços ecossistêmicos dos sistemas agrícolas. Contudo, apesar das práticas de conservação de solo e água terem sua importância difundida, poucas são as metodologias que permitam identificar áreas que necessitem a adoção destas práticas e que ainda considerem o potencial agropecuário da região (CÁRCELES RODRÍGUEZ et al., 2022; FAROOQ; SIDDIQUE, 2015; KARIDJO et al., 2018).

Desta forma, o desenvolvimento de uma metodologia capaz de identificar as áreas com maior potencial à produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, ao processo erosivo e à recarga hídrica, bem como áreas com maior potencial para exploração agropecuária contribuirá para a indicação de áreas prioritárias para a adoção de práticas conservacionistas, bem como para melhorar a sustentabilidade para a setor agrícola brasileiro.

O escoamento superficial e a erosão, apesar de serem fenômenos naturais, têm sido intensificados por alterações indevidas do uso e ocupação da terra. O escoamento superficial contribui para o processo erosivo, causando prejuízos ambientais como, perda de solo, poluição, inundações e assoreamentos de mananciais. Além disso, a erosão eleva os custos de produção agrícola com o uso de corretivos, fertilizantes e redução do rendimento operacional de máquinas (Grecco et al., 2012; Kennard, 2020; Pruski, 2009; Qiao; Kristoffersson; Randrup, 2018; Ricci et al., 2020; Yao; Wei; Chen, 2016). Desta forma, a análise das etapas do escoamento superficial é essencial para entender a ocorrência do processo erosivo e, conseqüentemente, para desenvolver e estabelecer intervenções eficazes na minimização do processo erosivo e suas conseqüências (Kaykhosravi et al., 2019).

Neste sentido, a presente tese propôs uma metodologia de identificação de áreas potenciais à produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, ao processo erosivo e à recarga hídrica, bem como áreas com maior potencial para exploração agropecuária considerando fatores agronômicos, ambientais e econômicos para a identificação dessas áreas prioritárias.

A tese foi dividida em dois capítulos:

1) Identificação do potencial à produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, erosão e recarga hídrica em bacias hidrográficas.

2) Identificação do potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba com base em aspectos agronômicos, ambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS

CÁRCELES RODRÍGUEZ, Belén et al. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems*, v. 6, n. 4, p. 1–37, 2022a.

CÁRCELES RODRÍGUEZ, Belén et al. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems*, v. 6, n. 4, p. 1–37, 2022b.

FAROOQ, Muhammad; SIDDIQUE, Kadambot H. M. Conservation agriculture. *Conservation Agriculture*, n. December, p. 1–665, 2015.

FENG, Youcan; BURIAN, Steven; POMEROY, Christine. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. *Journal of Hydrology*, v. 542, p. 744–755, 2016.

GRECCO, Larisse Brunoro et al. Influência da seleção de variáveis hidrológicas no projeto de sistemas urbanos de macrodrenagem - Estudos de caso para o município de Vitória? ES. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 4, p. 197–206, 2012.

KARIDJO, Boureima et al. Factors Influencing Farmers' Adoption of Soil and Water Control Technology (SWCT) in Keita Valley, a Semi-Arid Area of Niger. *Sustainability*, v. 10, n. 2, p. 288, 24 jan. 2018.

KAYKHOSRAVI, Sarah et al. The Low-Impact Development Demand Index : A New Approach to Identifying Locations for LID. *Lid*, p. 11–15, 2019.

KENNARD, Nicole Josiane. *Food Waste Management*. [S.l.: S.n.].

LEPSCH, I. Fernando et al. *Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso*. Viçosa, MG: SBCS. 170p, 2015.

PRUSKI, F. F. (Ed.). Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

QIAO, Xiu-Juan; KRISTOFFERSSON, Anders; RANDRUP, Thomas B. Challenges to implementing urban sustainable stormwater management from a governance perspective: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 196, p. 943–952, set. 2018.

RICCI, G. F. et al. Effectiveness and feasibility of different management practices to reduce soil erosion in an agricultural watershed. *Land Use Policy*, v. 90, n. November 2018, p. 104306, 2020.

YAO, Lei; WEI, Wei; CHEN, Liding. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? *Ecological Indicators*, v. 60, p. 893–905, 2016.

ZULKARNAIN; PRAWIRA, Indra; DJAMALUDIN, Owin Jamasy. Determination of Spatial Planning Area Criteria in the Perspective of Regional Autonomy to Ensure Sustainability of Land Resources (Case Study in the Province of East Kalimantan and North Kalimantan Province). *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, n. 38, p. 463–479, 2020.

2 ARTIGO 1: IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL À PRODUÇÃO, PROPAGAÇÃO E ACÚMULO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL, EROÇÃO E RECARGA HÍDRICA EM BACIA HIDROGRÁFICA

2.1 Resumo

O uso inadequado da terra promove o aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, causa prejuízos ambientais como poluição, erosão e assoreamentos de mananciais. A identificação de áreas ambientalmente vulneráveis é essencial para a preservação dos recursos naturais, manutenção e sustentabilidade da produtividade agrícola. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Paraopeba considerando o potencial à produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, à erosão hídrica e à recarga hídrica. Primeiramente foram determinados critérios representativos dos fenômenos estudados. Posteriormente, fez-se a análise e combinação dos critérios com auxílio da Análise de Decisão Multicritério (MCDA) associada ao Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A metodologia *fuzzy* foi aplicada para realizar o reescalonamento dos critérios e permitir que fossem comparados através do Processo de Hierarquização Analítica (AHP) para determinação dos seus respectivos pesos. Por fim, os mapas de potencial à produção, propagação e acúmulo do escoamento, erosão hídrica e recarga hídrica foram categorizados em cinco classes de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Os resultados evidenciam que a bacia do Rio Paraopeba possui potencial baixo a moderado para produção e propagação do escoamento e erosão hídrica e potencial moderado a alto para o acúmulo de escoamento superficial e recarga hídrica. No entanto, na região do Alto Paraopeba, principalmente à margem direita do rio, foram detectadas áreas vulneráveis à produção e propagação do escoamento superficial, à erosão hídrica e com baixo potencial à recarga.

Palavras-chave: Sistema de informação geográfica; análise multicritério; vulnerabilidade ambiental; manejo de recursos naturais

2.2 Abstract

Improper land use increases runoff and, consequently, causes environmental damage such as pollution, erosion and silting of water sources. Identifying environmentally vulnerable areas is essential for the preservation of natural resources, maintenance and sustainability of agricultural productivity. Therefore, this study aimed to spatialize the environmental vulnerability of a basin considering the potential for production, propagation and accumulation of runoff, water erosion and water recharge. First, representative criteria for the studied phenomena were determined. Subsequently, the analysis and combination of the criteria was carried out with the aid of Multicriteria Decision Analysis (MCDA) associated with Geographic Information Systems (GIS). The fuzzy methodology was applied to perform the rescaling of the criteria and allow them to be compared through the Analytical Hierarchy Process (AHP) to determine the weight of each criterion. Finally, maps of potential for runoff production, propagation and accumulation, water erosion and water recharge were categorized into five potential classes: very low, low, moderate, high and very high. The results showed that the Paraopeba River basin has low to moderate potential for runoff production and propagation and water erosion and moderate to high potential for runoff accumulation and water recharge. However, in the Upper Paraopeba region, particularly on the right bank of the river, areas vulnerable to the production and propagation of surface runoff, water erosion, and with low recharge potential were detected.

Key-words: Geographic Information Systems; multicriteria analysis; environmental vulnerability; natural resources management and planning.

2.3 Introdução

O uso inadequado da terra pode resultar em sérios danos ambientais com perdas graves ou até mesmo irreversíveis. O aumento do escoamento superficial causa prejuízos ambientais como poluição, erosão e assoreamento de mananciais. Além disso, destaca-se também os prejuízos para o setor agrícola devido a elevação dos custos de produção com aumento do uso de corretivos, fertilizantes e redução do rendimento operacional de máquinas (Grecco et al., 2012; Kennard, 2020; Pruski, 2009; Qiao; Kristoffersson; Randrup, 2018; Ricci et al., 2020; Yao; Wei; Chen, 2016).

O manejo sustentável da terra é um pilar essencial para a conservação dos recursos naturais e, conseqüentemente, para a manutenção e sustentabilidade da produção agrícola (COSTA et al., 2019). Para utilizar a terra conforme sua capacidade produtiva é necessário conhecer as características pedológicas, topográficas e climáticas do local (Karidjo et al., 2018; Pruski, 2009). Estas características são essenciais para identificar e manejar áreas susceptíveis aos fenômenos do escoamento superficial e erosão, bem como, áreas com maior potencial para recarga hídrica.

Atualmente existem diversos trabalhos que abordam a identificação de áreas susceptíveis ao escoamento superficial (LAGADEC et al., 2016; MARTIN-MIKLE et al., 2015; MIKOVITS et al., 2017; RODRIGUES; DA SILVA; DE MENEZES FILHO, 2021) e ao processo erosivo (LAGADEC et al., 2016; OLIVEIRA; WENDLAND; NEARING, 2013), bem como a identificação de zonas de recarga hídrica (CALEGARIO et al., 2020; UFV; UFMG; RENOVA, 2018). No entanto, várias dessas metodologias não foram adaptadas às condições brasileiras e, frequentemente, utilizam bases de dados específicas e de acesso limitado, o que dificulta a aplicação das mesmas (Oliveira; Wendland; Nearing, 2013; Ricci et al., 2020). Além disso, muitas delas não contemplaram a identificação das distintas fases do escoamento superficial: produção, propagação e acúmulo.

Para avaliar os potenciais ao escoamento superficial, à erosão e à recarga hídrica de uma determinada área é necessário conhecer e integrar as seguintes informações: o uso e ocupação da terra, relevo, pedologia, geologia e clima. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) juntamente com a Análise de Decisão Multicritério (MCDA) são ferramentas fundamentais na etapa de espacialização e integração destas características e foram aplicados a diversos trabalhos (Das, 2019b; Domazetović et al., 2019; El Baroudy, 2016; Khosravi et al., 2019; Lagadec et al., 2016a; Lorentz et al., 2016; Masoudi et al., 2021; Navane; Sahoo, 2021; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a; Samanta et al., 2016; Talukdar et al., 2020) .

A MCDA padroniza o processo de tomada de decisão através de modelagem matemática (ABREU et al., 2000; POURGHASEMI; PRADHAN; GOKCEOGLU, 2012). A MCDA é baseada na divisão do problema em critérios e estabelece níveis hierárquicos para melhor compreensão da interação destes critérios (SILVA et al., 2014). Sendo a escolha dos critérios uma etapa fundamental da análise multicritério,

a qual é dependente da disponibilidade de dados, do conhecimento do fenômeno e, também, do nível de detalhamento e/ou representação desejado (DOS SANTOS et al., 2019; MERROUNI et al., 2018; XIAO; YI; TANG, 2017).

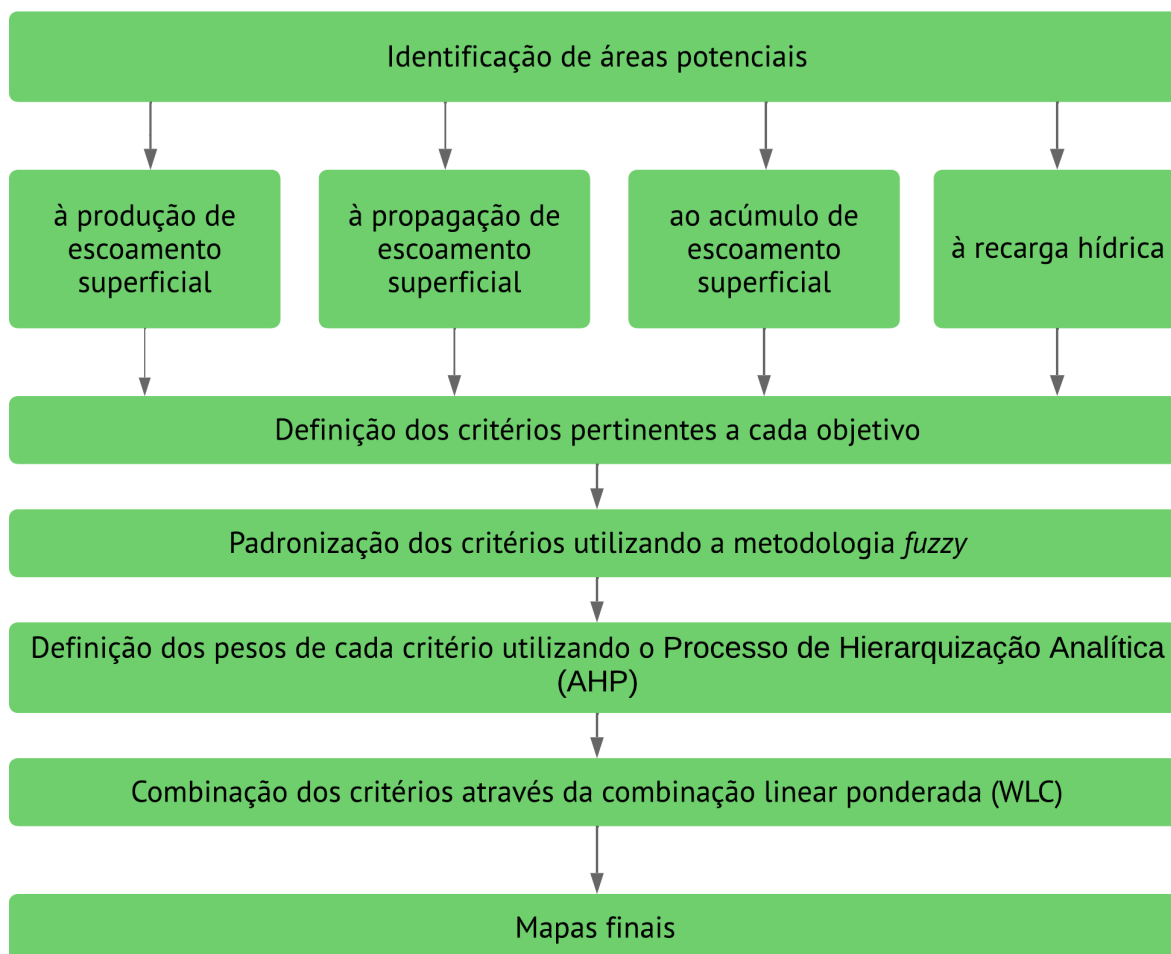
Um dos métodos existentes para a integração dos critérios escolhidos é o Processo de Hierarquização Analítica (AHP) (SAATY, 1977). O AHP consiste em um método multicritério para modelagem de dados que considera uma análise matemática para respostas subjetivas. O método considera que diferentes profissionais podem ter diferentes análises sobre o mesmo problema. Desta forma, uma análise matemática é feita com intuito de diminuir a subjetividade das interpretações, visando proporcionar maior confiança aos resultados e auxílio na tomada de decisões (MERROUNI et al., 2018; SAATY, 1980; XIAO; YI; TANG, 2017). O método AHP é amplamente utilizado em análises de adequabilidade, identificação e hierarquização de áreas com determinado potencial, planejamento regional, análises econômicas e análise de suscetibilidade a deslizamentos, erosão e enchentes (Amaral; Reis, 2017; Das; Pal, 2019; Dos Santos et al., 2019; Nath et al., 2020; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a; Rehman; Ryan, 2018).

Diante do exposto, no presente estudo objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Paraopeba considerando o potencial à produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, à erosão hídrica e à recarga hídrica.

2.4 Metodologia

O processo para identificação de áreas suscetíveis à produção, propagação e acumulação do escoamento superficial, à erosão hídrica e áreas com maior potencial de recarga hídrica foi realizado conforme fluxograma apresentado na Figura 2-1. Na sequência é apresentada a descrição da área utilizada para o presente estudo, bem como das etapas presentes no referido fluxograma (Figura 2-1).

Figura 2-1. Processo metodológico utilizado no trabalho.



Fonte: Autora

2.4.1 Área de estudo

Para realização do presente estudo foi utilizada a bacia do rio Paraopeba (Figura 2-2), que é uma importante sub-bacia da bacia do Rio São Francisco, e está localizada na região central de Minas Gerais, próximo a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. A bacia do rio Paraopeba possui uma área de drenagem de aproximadamente 12.054 km² e abrange 48 cidades no estado de Minas Gerais. Os principais usos da água da bacia do rio Paraopeba são: geração de energia elétrica; abastecimento público e abastecimento industrial, com destaque para mineração e irrigação (CPRM, 2020).

Segundo a classificação Köppen o clima próximo a foz da bacia é Aw (tropical com inverno seco), na parte central-norte da bacia o clima é Cwa (Subtropical húmido com inverno seco e verão quente) e Cwb (Subtropical húmido com inverno seco e

temperado) na parte central-sul (Alvares et al., 2013). A bacia do Paraopeba possui uma diversidade de classe de solo, sendo predominantes as classes Latossolos e Cambissolos.

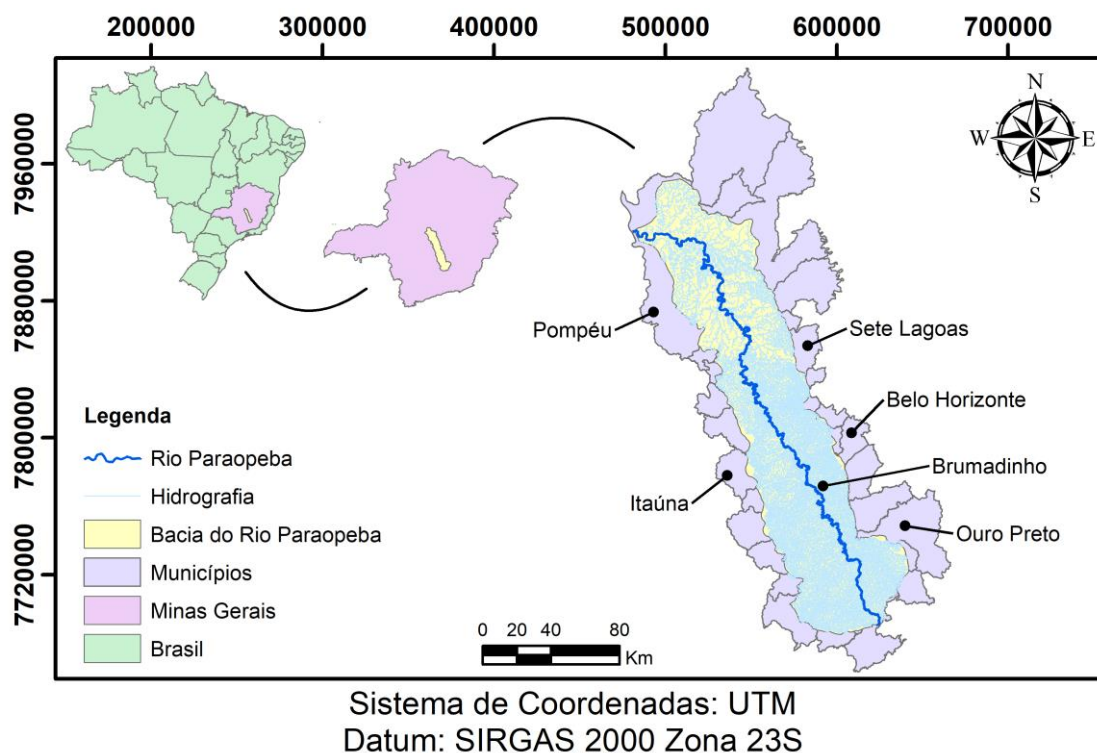
A bacia abastece cerca de 5,15 milhões de habitantes na RMBH, possuindo três reservatórios para abastecimento: rio Manso (Manso), ribeirão Juatuba (Serra Azul) e rio Betim (Várzea das Flores). Além disso, para geração elétrica, a bacia do rio Paraopeba possui as usinas hidrelétricas de Salto do Paraopeba e Retiro Baixo, e a barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé, além de afluir para o reservatório de Três Marias (CPRM, 2020).

O uso e ocupação da bacia do rio Paraopeba é bem diverso, envolvendo atividades agropecuária (predominância de pecuária), mineração, extração de areia e argila e indústrias automobilísticas. A bacia do Rio Paraopeba é uma das regiões de maior importância econômica para o estado de Minas Gerais, e contempla o segundo polo industrial do país (CALAZANS et al., 2018).

A dinâmica econômica da bacia do rio Paraopeba é bem variada, possuindo atividades dos três setores (primário, secundário e terciário). Em relação ao setor primário, as atividades agrosilvopastoris são de extrema importância na bacia.

Apesar da grande importância da bacia do Rio Paraopeba para o desenvolvimento econômico e social do estado de Minas Gerais, por mais de uma década, o Rio Paraopeba apresenta parâmetros de qualidade de água em desconformidade com aqueles estipulados pela legislação (DA COSTA et al., 2017). Com o rompimento da barragem do Córrego do Feijão, além de agravar ainda mais a qualidade da água, também causou a degradação de mais de 70 mil hectares de áreas de preservação permanente (Thompson et al., 2020). Desta forma, considerando a importância da bacia com esse desastre ambiental, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos que possibilitam analisar a vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Paraopeba.

Figura 2-2. Área de estudos, bacia do rio Paraopeba.



Fonte: Autora

Mesmo antes do desastre de rompimento da barragem do Córrego do Feijão, a bacia do Rio Paraopeba, por mais de uma década, já apresentava problemas de qualidade de água, apresentando parâmetros em desconformidade com os estipulados pela legislação (DA COSTA et al., 2017). O rompimento da barragem do Córrego do Feijão, além de agravar ainda mais a qualidade da água, também causou a degradação de mais de 70 mil hectares de áreas de preservação permanente (Thompson et al., 2020). Este cenário apenas reforça a importância de se analisar a vulnerabilidade ambiental da bacia.

2.4.2 Áreas potenciais à produção do escoamento superficial

Para a identificação de áreas potenciais à produção do escoamento superficial foram utilizados como critérios as seguintes variáveis: precipitação, uso e ocupação da terra, capacidade de infiltração e índice topográfico.

A precipitação é a principal fonte de entrada de água para a produção de escoamento superficial, sendo considerado que quanto maior a precipitação em uma área maior será o potencial de produção de escoamento superficial (Dahri; Abida,

2017; Das, 2019b). Essa consideração justifica a utilização da precipitação como uma das variáveis de entrada para mapear a produção de escoamento superficial em vários estudos (Hou; Gao; Wu, 2020; Prokešová; Horáčková; Snopková, 2022; Wang et al., 2022).

Para definição da base de dados de precipitação a ser utilizada no presente trabalho fez-se previamente a comparação de duas bases de dados: o *WorldClim version 2* de 1970-2000 (FICK, 2017) (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>) e *TerraClimate* de 1958-2015 (Abatzoglou et al., 2018) (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>). Considerando que ambas as bases apresentam médias anuais e distribuição espacial semelhantes ao longo da bacia (resultados apresentados no APÊNDICE A), para esta variável adotou-se a base de dados do *WorldClim version 2*, devido a sua melhor resolução espacial (aproximadamente 1x1km) comparada à base de dados do *TerraClimate* (aproximadamente 4x4km).

A base de dados de precipitação média mensal do *WorldClim version 2* é obtida a partir de dados de precipitação mensal de diversas estações e outros produtos de sensoriamento remoto para o período de 1970-2000 (FICK, 2017). A precipitação média anual utilizada para determinação do potencial de produção do escoamento superficial foi obtida pela soma precipitação média mensal do *WorldClim version 2*.

A variável uso e ocupação da terra foi incluída como critério para definição do potencial à produção do escoamento superficial, uma vez que alguns usos do solo o tornam mais propensos a produção do escoamento superficial (Akbari; Samah; Daryabor, 2016; Lagadec et al., 2016a; Pruski; Brandão; Silva, 2004; USDA, 1972; Wang et al., 2022).

Os dados de uso e ocupação da terra foram obtidos do projeto Mapbiomas coleção 8 para o ano de 2022 junto ao Ministério do Meio Ambiente. As imagens do MAPBIOMAS são derivadas do satélite Landsat e estão disponíveis na resolução de 30x30m (Mapbiomas, 2024).

O projeto Mapbiomas classifica o uso e ocupação da terra em 48 classes. No entanto, para o presente trabalho os usos e ocupação da terra foram agrupados em seis classes: floresta, formação natural não florestal, lavouras temporárias, lavouras permanentes, silvicultura e pastagem. Os usos corpo d'água e área não vegetada (campo alagado e área pantanosa, formação campestre e afloramento rochoso) não

foram incluídos no presente trabalho, por considerar que não fazem parte do escopo da pesquisa, uma vez que a pesquisa visa o mapeamento da vulnerabilidade de áreas com potencial de produção agropecuárias. A classificação completa dos usos existente na área de estudo, bem como o agrupamento nas seis classes adotadas no presente trabalho está apresentada no **Apêndice B**.

A infiltração de água no solo é um dos processos mais importantes para a produção do escoamento superficial (Prokešová; Horáčková; Snopková, 2022; Pruski, 2009). A capacidade de infiltração potencial de água no solo, dentre outros fatores, é dependente das características do solo, tais como, profundidade efetiva do solo, estrutura, textura, densidade, e porosidade (Akbari; Samah; Daryabor, 2016; Mello; Silva; Beskow, 2020; Pruski; Brandão; Silva, 2004; USDA, 1972).

A avaliação da capacidade de infiltração potencial de água no solo foi baseada nas classes de solos existente na área de estudo, que foram obtidas do mapeamento de solos junto ao IBGE na escala 1:250.000 (IBGE, 2023). Sendo atribuído para cada classe de solo o peso de 1 a 5, sendo que 1 representa baixa capacidade de infiltração potencial de água no solo e 5 alta capacidade de infiltração de água no solo, conforme proposto em Neto et al. (2023) para representar o potencial de recarga hídrica das classes de solos (**Apêndice C**)

Considerando que as unidades de mapeamento de solos podem ser compostas de classe principal e classes associadas, para representar o potencial de infiltração de cada unidade de mapeamento aplicou-se a Equação 2-1 proposta em Neto et al. (2023), que estima potencial de recarga hídrica do componente solo por meio da ponderação das classes principal e associadas que compõe as unidades de mapeamento.

$$PRHS = 0,7 * CP + 0,3 * CA \quad (2 - 1)$$

Sendo:

PRHS = peso do potencial de recarga hídrica do componente solo;

CP = peso atribuído à classe de solo do componente principal, presente na unidade de mapeamento;

CA = peso atribuído à classe de solo do componente associado, presente na unidade de mapeamento.

A topografia do terreno tem relação direta com a produção do escoamento em uma área, uma vez que a declividade do terreno influencia o acúmulo ou a propagação do escoamento superficial (Prokešová; Horáčková; Snopková, 2022; Wang et al., 2022). Para expressar o efeito da topografia na produção de escoamento superficial foi utilizado o índice topográfico (t_i) (Equação 2-2), que relaciona a área de contribuição de escoamento que chega em cada pixel com a declividade do pixel (Beven; Kirkby, 1979). Quanto maiores os valores de t_i , maior a produção de escoamento superficial (Manfreda et al., 2014; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a).

$$t_i = \ln \frac{\alpha}{\text{tg}\beta} \quad (2 - 2)$$

Sendo:

α = área de drenagem dividida pelo seu perímetro (m)

β = declividade do pixel (rad)

Para o cálculo do índice topográfico em cada pixel, foram obtidas a área, o perímetro e a declividade de sua área de drenagem. Essas variáveis foram obtidas a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistido (MDEHC) da área de drenagem da bacia hidrográfica em estudo. O MDEHC foi obtido com base no modelo digital de elevação NASADEM com resolução de 30m (NASA, 2020).

2.4.3 Áreas potenciais à propagação do escoamento superficial

Para a identificação de áreas potenciais à propagação do escoamento superficial foram utilizados como critérios as seguintes variáveis: índice de potência do escoamento superficial (*stream power index*), uso e ocupação da terra e distância às estradas.

O índice de potência do escoamento (SPI) determina a concentração do escoamento superficial e sua aceleração, conseqüentemente, quanto maior seu valor, maior a propagação e a energia cisalhante do escoamento (Domazetović et al., 2019; Khosravi et al., 2019; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a; Saha et al., 2019; Samanta et al., 2016; Sharma; Singh, 2017). O SPI foi determinado a partir da área de drenagem e declividade de cada pixel com auxílio da Equação 2-3 proposta por Moore et al. (1991).

$$SPI = \ln(As * \text{tg}\beta) \quad (2 - 3)$$

Sendo:

A_s = área de drenagem contribuinte ao pixel (m^2)

β = declividade do pixel (rad)

A cobertura vegetal atua como uma barreira que dissipa a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, diminui a sua energia cisalhante. Desta forma, quanto maior a cobertura vegetal menor o potencial de propagação do escoamento superficial (Domazetović et al., 2019; Khosravi et al., 2019; Lagadec et al., 2016a; Mello; Silva; Beskow, 2020; Samanta et al., 2016; Wang et al., 2022). No presente trabalho o uso e ocupação da terra foi obtido e reclassificado conforme descrito no item 2.4.2.

As estradas aumentam conectividade do terreno e atuam como caminhos preferenciais para o escoamento superficial (Kastridis, 2020; Lagadec et al., 2016a). Desta forma, a variável distância às estradas foi utilizado como critério para avaliação do potencial à propagação do escoamento superficial em cada pixel dentro da área de estudo, sendo que quanto mais próximo à estrada maior é o potencial de propagação do escoamento superficial (Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a; Zellner et al., 2016).

A distância às estradas foi determinada por meio da distância euclidiana de cada pixel em relação às estradas, sendo utilizado o mapeamento de estradas estaduais e federais disponibilizado pelo Mapbiomas (MAPBIOMAS, 2019).

2.4.4 Áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial

Para identificação de áreas potenciais ao acúmulo do escoamento superficial foram utilizados como critérios as seguintes variáveis: declividade, capacidade potencial de infiltração de água no solo, uso e ocupação da terra e distância à hidrografia.

A declividade é um indicador da capacidade do local em armazenar ou transportar escoamento superficial, sendo que quanto menor a declividade maior será o potencial em acumular escoamento superficial (Das, 2019b; EMBRAPA, 1979; Khosravi et al., 2019; Lagadec et al., 2016a; Samanta et al., 2016; Xiao; Yi; Tang, 2017). A declividade do terreno foi obtida a partir do MDEHC da bacia do rio Paraopeba, conforme descrito no item 2.4.2.

A capacidade potencial de infiltração de água no solo é dependente do tipo de solo, sendo que quanto maior a capacidade potencial de infiltração de água no solo, menor será o acúmulo de escoamento superficial (Das, 2019b; Pruski; Brandão; Silva, 2004; USDA, 1972). Para determinação deste critério, foram utilizados os mesmos passos descritos no item 2.4.2.

O uso e ocupação da terra também impacta o armazenamento do escoamento devido a sua relação com a capacidade de infiltração de água no solo. Quanto maior a cobertura vegetal maior será a capacidade de infiltração de água no solo, uma vez que a cobertura vegetal evita a formação do encrostamento superficial e, além disso, as raízes formam caminhos preferenciais para a movimentação da água no solo (Das, 2019b; Pruski; Brandão; Silva, 2004; Samanta et al., 2016; USDA, 1972; Xiao; Yi; Tang, 2017). O uso e ocupação da terra foi obtido conforme descrito no item 2.4.2.

A distância à hidrografia também foi utilizada como critério para definição do potencial de acúmulo do escoamento superficial, pois quanto mais próximo à hidrografia, maiores as chances de ocorrência do acúmulo do escoamento superficial (TALUKDAR et al., 2020), por serem áreas naturalmente inundáveis, já que o escoamento superficial tende a convergir e se concentrar na hidrografia.

A distância à hidrografia foi determinada por meio da distância euclidiana de cada pixel em relação à hidrografia (Khosravi et al., 2019). O presente estudo utilizou a hidrografia disponível na base de dados da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável na escala de 1:25.000 (FBDS, 2023). Este critério possui um patamar de máxima susceptibilidade sendo considerado até 90m, que é o valor médio encontrado na literatura (Das, 2019; Pradhan, 2009; Samanta et al., 2016; Xiao; Yi; Tang, 2017).

2.4.5 Áreas potenciais à erosão hídrica do solo

A avaliação do potencial à erosão hídrica do solo seguiu os preceitos apresentados por Pruski (2009) e Oliveira, Wendland e Nearing (2013), bem como os fatores naturais que influenciam a perda de solo que são considerados na equação Universal de Perda de Solo Revisada RUSLE (USDA, 1972). Sendo assim, foram utilizados como critério as seguintes variáveis: o potencial natural de erosão do solo, a intensidade de uso e ocupação da terra e o índice de potência do escoamento (SPI – *Stream Power Index*).

O potencial natural de erosão representa a susceptibilidade natural de um dado local ao processo erosivo, a qual é dependente da erosividade da chuva, da erodibilidade do solo, da declividade e do comprimento de rampa do relevo (USDA, 1972). Desta forma, o potencial natural de erosão considera apenas as características intrínsecas do local, desconsiderando os fatores que derivam de ações antrópicas como o uso e ocupação da terra e presença de práticas de conservação de solo e água (Chagas et al., 2017).

Neste estudo, o potencial natural de erosão (PNE) foi estimado pela Equação 2-4 proposta em Neto et al. (2023), o qual estima o PNE por meio da soma ponderada da erosividade da chuva, da erodibilidade do solo, do comprimento e declividade da encosta, escalonados de 0 a 1. Desta forma, os valores do PNE no presente trabalho variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior será o potencial natural a erosão.

$$PNE = 0,5K + 0,25R + 0,25 LS \quad (2 - 4)$$

Sendo:

PNE = o potencial natural de erosão

R = erosividade da chuva

K = erodibilidade do solo

LS = fator topográfico

A erosividade da chuva foi calculada, utilizando primeiramente a Equação 2-5 proposta para o município de Sete Lagoas – MG, disponível em Neto et al. (2023), o qual se encontra dentro da área de estudo. Esta equação permite calcular a média mensal do índice de Erosividade da chuva (El_{30}) a partir das precipitações médias mensais e média anual. Posteriormente, os valores médios mensais de El_{30} foram somadas, para a obtenção da erosividade da chuva na bacia do Rio Paraopeba. Os dados de precipitação mensais e anuais foram obtidos da base de dados do *WorldClim version 2*, conforme descrito no item 2.4.2.

$$El_{30} = 25,3 + 43,35 \times \left(\frac{p^2}{P}\right) - 0,232 \times \left(\frac{p^2}{P}\right)^2 \quad (2 - 5)$$

Sendo:

El_{30} = média mensal do índice de erosão, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹;

p = precipitação média mensal, em mm;

P = precipitação média anual.

A erodibilidade do solo foi avaliada por meio da equação 2-6 descrita em Neto et al. (2023), qual considera as classes de solo bem como as unidades litológicas existentes. A classificação da erodibilidade do solo foi realizada atribuindo-se valores de 1 a 5 às classes de solo e unidades litológicas, sendo que quanto maior o valor, maior a erodibilidade do solo. Esses valores foram baseados na avaliação dos solos proposta em Schaefer (2000), Resende et al. (2019) e Neto et al. (2023).

$$K = 0,60 * PKS + 0,40 * PKG \quad (2 - 6)$$

Sendo:

K = fator erodibilidade do solo;

PKS = peso do fator erodibilidade do solo do componente solo, calculado conforme Equação 2-7 proposta por Neto et al. (2023).

PKG = peso do fator erodibilidade do solo do componente geológico.

$$PKS = 0,70 * CP + 0,3 * CA \quad (2 - 7)$$

Sendo:

PKS = peso do fator erodibilidade do solo do componente solo;

CP = peso atribuído à classe de solo do componente principal, presente na unidade de mapeamento;

CA = peso atribuído à classe de solo do componente associado, presente na unidade de mapeamento.

Os pesos atribuídos a cada classe de solo e a cada formação geológica foram obtidos de Neto et al. (2023) e estão apresentados no **Apêndice C**.

Para representar a influência do relevo sobre o processo erosivo foi utilizado o fator topográfico (LS), que relaciona a declividade com a distância pela qual o escoamento se processa (PRUSKI, 2009), sendo o mesmo determinado aplicando-se a Equação 2-8 proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1990).

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18} \quad (2 - 8)$$

Sendo:

L = comprimento da encosta, m, considerado como 30m por ser o tamanho do pixel.

S = declividade da encosta em porcentagem.

Como os fatores do PNE (erosividade da chuva, erodibilidade do solo e o fator topográfico) possuem magnitudes de valores diferentes, foi necessário fazer a

padronização dos dados, a qual foi realizada utilizando-se o comando “*Raster fuzzify (associação linear)*” (QGIS, 2025) do *software QGIS 3.22*.

Para considerar a influência do uso e ocupação da terra no potencial à erosão, foi utilizado como critério a variável intensidade de uso da terra representada pelo número de classes excedentes (NCE), determinado conforme descrito por Calegario et al. (2023). Este critério é determinado com base no número de classes excedentes à capacidade de uso e ocupação da terra e o uso atual do solo (Equação 2-9).

$$NCE = CCU - CUA \quad (2 - 9)$$

Sendo:

NCE = número de classes excedentes

CCU = classe de capacidade de uso

CUA = classe de uso atual

Segundo Calegario et al. (2023), o NCE permite avaliar o quanto o solo está sendo usado em relação a sua máxima capacidade de uso. O NCE pode variar de -7 a 7. Valores positivos indicam que o solo está sendo usado além da sua máxima capacidade. Valores negativos indicam que o solo está sendo usado abaixo da sua máxima capacidade e que seu uso poderia ser intensificado. NCE igual a zero, indica que o solo está sendo usado conforme a sua máxima capacidade de uso.

No presente trabalho, a classificação da capacidade de uso da terra considerou principalmente os fatores referentes a classe de solo e ao relevo, já que fatores como fertilidade aparente do solo, são passíveis de correção (CALEGARIO et al., 2020). Na Tabela 2-1 estão apresentadas as oito classes que compõem o sistema de classificação de capacidade de uso.

A classificação da capacidade de uso e ocupação da terra foi realizada utilizando-se o método de classificação da capacidade de uso proposto por Lepsch et al., (2015), considerando os fatores declividade (Tabela 2-2) e o componente principal do solo (**Apêndice C**), conforme metodologia descrita em Lepsch et al. (Lepsch et al., 2015).

Tabela 2-1 - Descrição das Classes de Capacidade de uso e ocupação da terra (CCU)

CCU	Descrição
I	Terras próprias para todos os usos, inclusive para cultivos agrícolas intensivos sem necessitar de práticas intensivas de conservação
II	Terras próprias para culturas com práticas simples de conservação
III	Terras próprias para culturas com práticas intensivas ou complexas de conservação
IV	Terras próprias para culturas anuais ocasionais, cultivos perenes limitados e culturas em rotação com pastagens, florestas e proteção de fauna e floras silvestre
V	Terras com pouco ou nenhum risco de erosão, mas com limitações impraticáveis de serem removidas, o que limita muito a sua utilização, sendo, por isso, mais apropriadas para pastagens, reflorestamento ou vida silvestre;
VI	Terras com limitações severas, geralmente inadequadas para cultivos e uso limitado para pastagens, florestas cultivadas ou nativas para refúgio de flora e fauna silvestre
VII	Terras com limitações muito severas, inadequadas para lavouras e de uso restrito para pastagens, florestas cultivadas e refúgio de flora e fauna silvestre
VIII	Terras com limitações que impedem seu uso para qualquer atividade agrícola, restringindo-as à recreação e/ou proteção da flora e fauna silvestres ou ainda armazenamento de águas (represamentos).

Fonte: (LEPSCH et al., 2015)

Tabela 2-2. Intervalos atribuídos às classes de declividade para obtenção da capacidade de uso e ocupação da terra conforme Monteiro et al., (2018).

Valores de Declividade (%)	Classe de Capacidade de Uso
0-2	I
2-5	II
5-10	III
10-20	IV
20-30	V
30-45	VI
45-70	VII
>70	VIII

Para a classificação do uso atual, os valores adotados para cada uso, estão apresentados no **Apêndice B**. Conforme estabelece o novo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), às Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal foram atribuídas a classe VIII, pois são áreas destinadas a proteção da flora e fauna silvestres ou ainda armazenamento de águas.

O índice de potência do escoamento (SPI) representa o potencial do escoamento superficial em se concentrar e aumentar sua energia cinética. Quanto maior o índice, maior a concentração do escoamento superficial e, portanto, maior a energia cinética para o desprendimento das partículas (Domazetović et al., 2019; Khosravi et al., 2019; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a; Saha et al., 2019; Samanta et al., 2016; Sharma; Singh, 2017). O índice de potência do escoamento foi determinado conforme item 2.4.3.

2.4.6 Áreas potenciais à recarga hídrica

Para avaliação do potencial à recarga hídrica foram utilizados como critérios as seguintes variáveis: balanço hídrico climatológico simplificado, potencial de infiltração e percolação, intensidade de uso da terra, declividade e distância à hidrografia.

O balanço hídrico climatológico simplificado foi utilizado para determinar áreas com excedente hídrico, por meio da subtração das entradas (chuva) e saídas (evapotranspiração) de água no sistema (Abijith et al., 2020; Achu; Reghunath; Thomas, 2020; Hou; Gao; Wu, 2020; UFV; UFMG; Renova, 2018a).

Os dados de precipitação e de evapotranspiração foram obtidos através de produtos de sensoriamento remoto. Os dados de evapotranspiração foram obtidas para o período de 2000 a 2022 provenientes do Espectro Radiômetro de Imagem de Resolução Moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS) (500x500m) produto MOD16A3GF Versão 6.1 (USGS, 2023). Os dados de precipitação foram obtidos da base de dados provenientes do *TerraClimate* (4x4km) O presente trabalho utilizou o *TerraClimate* por possuir série de dados coincidentes com a base de dados utilizados para determinar a evapotranspiração (Abatzoglou et al., 2018). Para a obtenção do BHC foram utilizadas a média anual de precipitação e a média anual de evapotranspiração.

O potencial de infiltração e percolação de água no solo é dependente, dentre outros fatores, das características do solo (por exemplo, profundidade efetiva do solo, estrutura, textura, densidade, porosidade) e das características geológicas. Considerando que estas características são inerentes às classes de solo e à composição geológica, para avaliar o potencial de infiltração e percolação de água no solo foi utilizada a equação de potencial pedohidrológico à recarga hídrica (Equação 2-10) proposta em Neto et al. (2023).

$$PPRH = 0,7 * PRHS + 0,3 * PRHG \quad (2 - 10)$$

Sendo:

PPRH = potencial pedohidrológico à recarga hídrica;

PRHS = peso referente ao potencial de recarga hídrica do componente solo (Apêndice C);

PRHG = peso referente ao potencial de recarga hídrica do componente geológico (Apêndice D).

A avaliação do potencial de infiltração e percolação foi baseada nas classes de solos e unidades geológicas existente na área de estudo. As classes de solo foram obtidas do mapeamento de solo do IBGE na escala 1:250.000 (IBGE, 2023). Enquanto as unidades geológicas foram obtidas junto ao IBGE na escala 1:250,000 (IBGE, 2018).

De posse das classes de solos e unidades geológicas existentes na área de estudo, atribuiu-se a cada classe de solo e unidade geológica o peso de 1 a 5, conforme proposto por Neto et al. (2023) para representar o potencial de recarga hídrica das classes de solos e geologia (**Apêndice C e D**, respectivamente). Quanto mais próximo de 5, maior é o potencial de infiltração e percolação.

Considerando que as unidades de mapeamento de solos são compostas de classe principal e classes associadas, para representar o potencial de infiltração e percolação de cada unidade de mapeamento, aplicou-se a Equação 2-1 proposta em Neto et al. (2023) para representar o referido potencial, considerando as classes (principal e associadas) de solo que compõe cada unidade de mapeamento.

$$PRHS = 0,7 * CP + 0,3 * CA \quad (2 - 1)$$

Sendo:

PRHS = peso do potencial de recarga hídrica do componente solo;

CP = peso atribuído à classe de solo do componente principal, presente na unidade de mapeamento;

CA = peso atribuído à classe de solo do componente associado, presente na unidade de mapeamento.

A intensidade de uso do solo foi representada pelo número de classes excedentes, que representa o quão distante o uso da terra está do ideal. O número de classes excedentes foi determinado conforme o item 2.4.5. O NCE varia de -7 a 7, sendo que os valores negativos representam áreas cujo uso da terra atual está abaixo da sua capacidade, podendo assim, representar um maior potencial de recarga hídrica.

Para favorecer a infiltração de água, é necessário que o escoamento se concentre e permaneça em determinado local por tempo necessário para sua infiltração. Desta forma, a declividade foi utilizada na definição das áreas de recarga, uma vez que as áreas planas são mais favoráveis à infiltração da água do que áreas declivosas, devido, principalmente, ao maior tempo de permanência da água sobre a superfície da terra, o que proporciona um maior tempo de oportunidade de infiltração (Fang et al., 2008). A declividade foi determinada conforme o item 2.4.2.

A distância à hidrografia pode ser entendida como a distância em que a água, proveniente da precipitação, deverá percorrer até encontrar um corpo d'água. Quanto maior essa distância, maior o tempo de permanência da água dentro da bacia hidrográfica. Desta forma, garantir a infiltração em áreas mais distantes da hidrografia assegura um maior potencial de recarga hídrica. A determinação da distância à hidrografia foi realizada conforme descrito no item 2.4.4.

2.4.7 Análise multicritério

As variáveis utilizadas como critério para a elaboração de cada mapa possuem diferentes dimensionalidades, escalas e interpretações, por isso, foi necessário adotar um processo de padronização destas variáveis (Achu; Reghunath; Thomas, 2020; Das, 2019b; Sharma; Singh, 2017) para que as variáveis pudessem ser comparadas entre si (Dahri; Abida, 2017; Lorentz et al., 2016). Desta forma, todas as variáveis foram convertidas para o formato matricial e reescaladas entre os valores 0 e 1,

sendo padronizado que quanto maior o valor, maior a aptidão da variável para o objetivo desejado (Abijith et al., 2020; Khosravi et al., 2019).

Para o reescalonamento dos valores das variáveis, foi utilizado a metodologia *fuzzy* do software QGIS 3.22 (QGIS, 2025). Para cada variável, o histograma da distribuição dos dados foi analisado para definição de possíveis valores de corte, a fim de eliminar a influência de valores extremos de baixa frequência e valores discrepantes. Metodologia de corte semelhante àquela utilizado em Neto et al. (2023) para ajuste dos dados.

Já a variável uso e ocupação da terra, por ser categórica, valores dentro da escala de 0 a 1, foram atribuídos para cada classe de uso e ocupação conforme sua aptidão para o objetivo desejado. Como todas as análises são relacionadas ao escoamento superficial e infiltração potencial, os conceitos de coeficiente de escoamento e número da curva foram utilizados como base para atribuição dos valores de cada classe (Kumar et al., 2021; Pruski; Brandão; Silva, 2004; Rana; Suryanarayana, 2020).

Para a integração dos mapas foi utilizado a técnica de combinação linear ponderada (WLC – *weighted linear combination*), onde os critérios, já normalizados, foram ponderados a partir de um conjunto de pesos e multiplicados entre si (Lorentz et al., 2016; Miranda et al., 2012). A definição dos pesos de cada critério da análise multicritérios seguiu a metodologia proposta por Thomas Saaty (Saaty, 1990), que é baseada na definição de pesos a partir da comparação das variáveis, tanto quantitativas como qualitativas, através do Processo de Hierarquização Analítica (AHP) (Fraga et al., 2019; Leal, 2020) de modo a diminuir a subjetividade das interpretações e trazer maior confiança aos resultados e decisões (MIHI; BENARFA; ARAR, 2020; SAATY, 1980).

Os pesos de cada critério foram baseados em uma matriz que compara em pares os critérios utilizados (Fraga et al., 2019; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012a). Os valores dos pesos variaram de 1 a 9, sendo 1 considerado como igual importância e 9 considerado como extrema importância, conforme Tabela 2-3 (DAHRI; ABIDA, 2017; MIHI; BENARFA; ARAR, 2020).

Tabela 2-3. Escala de atribuição dos valores dos pesos segundo a metodologia AHP

1	1/3	1/5	1/7	1/9
MAIS IMPORTANTE	Pouco	Muito	Bastante	Extremamente
	MENOS IMPORTANTE			

Após a comparação, foi verificada a consistência dos pesos dados aos critérios. Para isso, utilizou-se a taxa de consistência (CR). O CR varia entre 0 e 1, sendo aceitáveis valores de CR menores do que 0,10 (MIHI; BENARFA; ARAR, 2020; SAATY, 1980).

Para definir a faixa de valores de cada uma das classes foi utilizado o método de intervalos iguais, por ser uma técnica amplamente utilizada em análises cartográficas temáticas (Ferreira, 2016), por dividir o intervalo da faixa de valores, no caso do presente trabalho de 0 a 1, em intervalos iguais, que no caso do presente trabalho foram cinco classes de vulnerabilidade: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Este método de classificação foi utilizado por permitir a comparação de diferentes mapas em uma mesma escala.

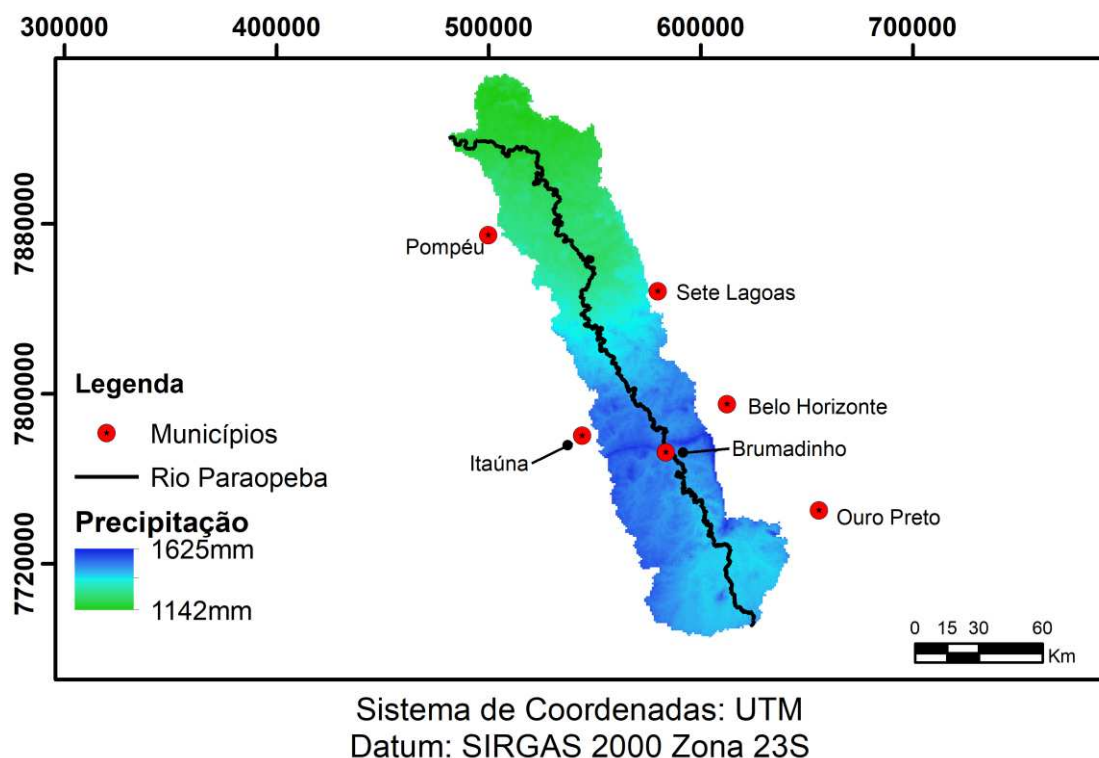
2.5 Resultados e discussão

2.5.1 Critérios utilizados

Na sequência são apresentados os mapas de cada um dos critérios utilizados para elaboração dos mapas de potenciais de produção, propagação e acúmulo do escoamento superficial, de erosão hídrica e de recarga hídrica.

Na Figura 2-3 tem-se a precipitação média anual da bacia do rio Paraopeba, na qual pode-se observar que a precipitação média anual varia de 1129mm a 1635mm, segundo os dados do *WorldClim*, que são também semelhantes aos valores encontrados por Costa et al. (2023) e Pacheco; Pissarra (2023). Sendo observado maiores valores de precipitação média anual nas regiões da bacia de maior altitude.

Figura 2-3. Precipitação média anual da bacia do Rio Paraopeba.

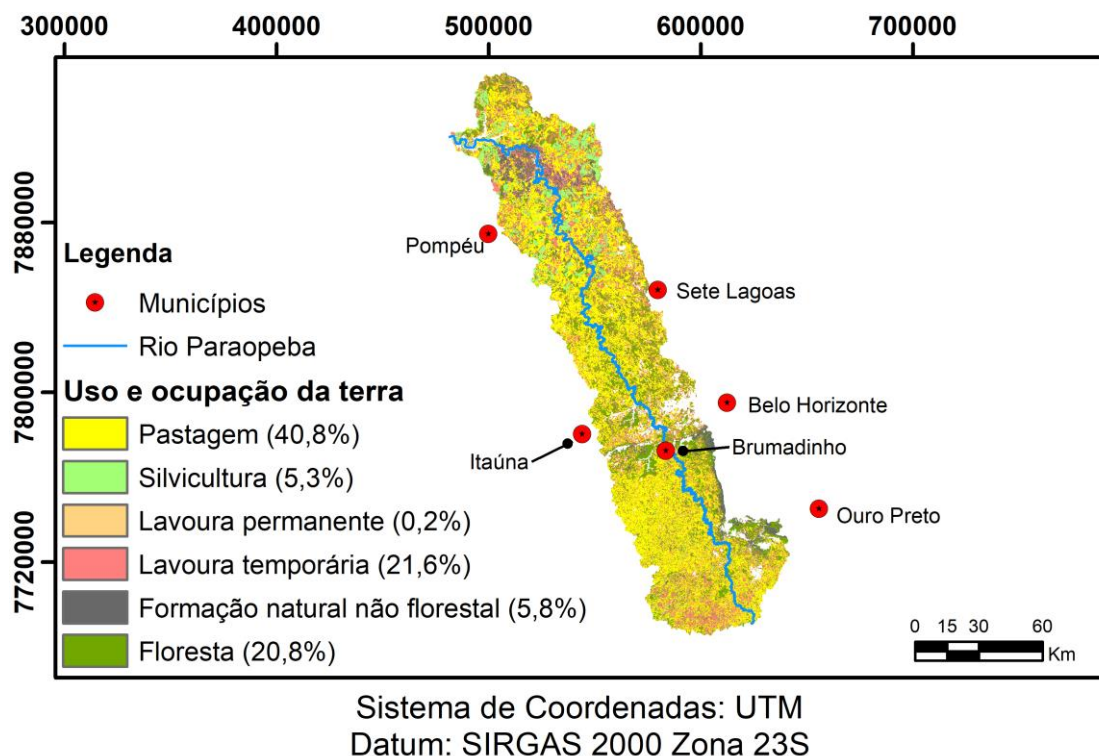


Fonte: Autora

Na Figura 2-4 são apresentadas as classes de uso e ocupação do solo da bacia do Rio Paraopeba agrupadas em seis classes. Segundo o critério de classificação do Mapbiomas, foram identificadas 18 classes de usos e ocupação do solo, as quais foram agrupadas em seis classes (pastagem, silvicultura, lavoura permanente, lavoura temporária, formação natural não florestal e floresta), conforme apresentado no **Apêndice B**.

A agropecuária é o uso mais prevalente na bacia em toda a sua extensão, correspondendo a 68% da bacia, sendo pastagem a principal classe de uso. Os usos floresta e silvicultura são predominantes nas áreas de maior declividade. Enquanto a classe de uso “formação natural não florestal”, formada principalmente por afloramentos rochosos, situados nas áreas de maior declividade e com predominância de cambissolos; e por áreas pantanosas e campos alagados, situadas nas áreas próximas a foz da bacia.

Figura 2-4. Uso e ocupação da terra somente para as classes consideradas para o estudo na bacia do Rio Paraopeba.



Fonte: Autora

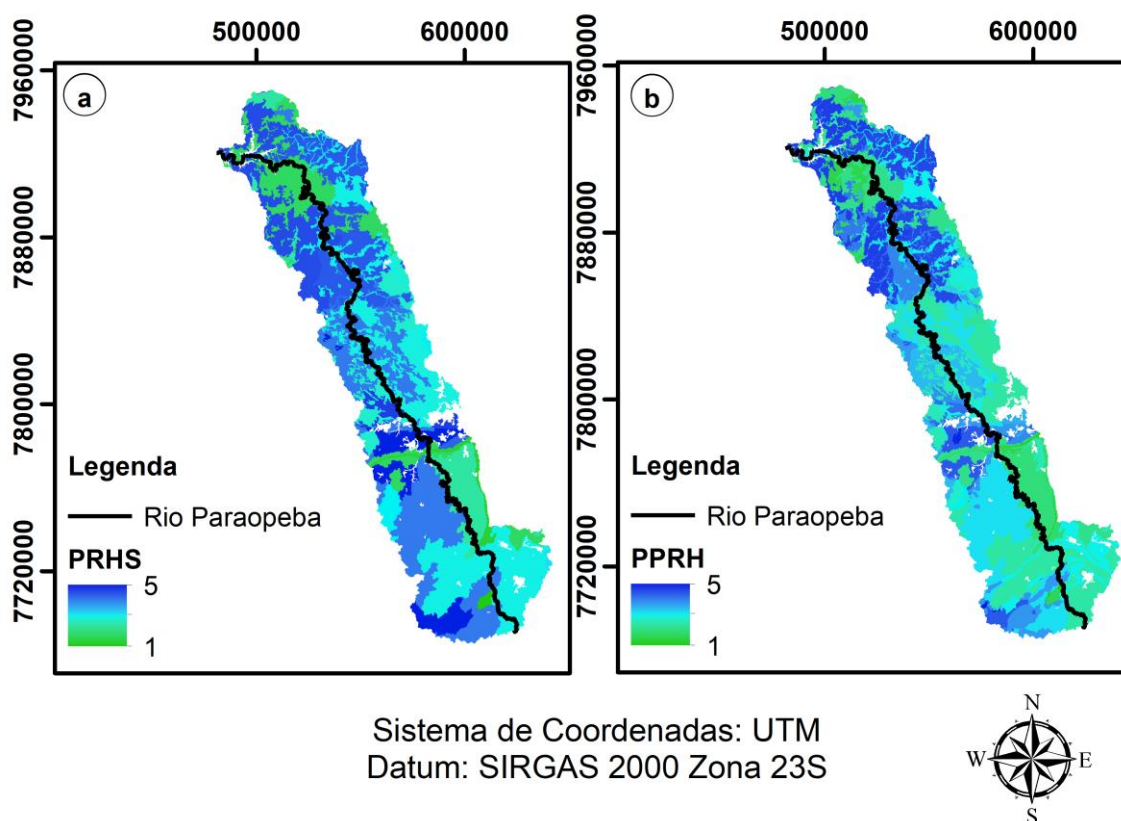
Nas Figuras 2-5a e 2-5b são apresentados, respectivamente, o potencial de recarga hídrica devido ao componente solo (PRHS) e o potencial pedrohidrológico (PPRH), que foram utilizados para expressar a capacidade de infiltração potencial de água no solo.

Em geral os maiores valores de PRHS são coincidentes com as áreas de Latossolos (47,15%), enquanto as áreas de Cambissolos (33,31%) possuem valores menores. Além disso, as áreas com os menores valores de PRHS coincidem com as áreas de formação natural não florestal localizadas na foz da bacia e à margem direita do rio Paraopeba, próximo a Serra da Calçada, compatíveis com áreas com limitado potencial de infiltração. Além disso, esta é uma região formada por rochas gnaisse de baixa porosidade primária, sendo que a recarga do aquífero nessa região se dá por meio das fissuras nas rochas (Costa et al., 2023).

Com relação ao PPRH, nota-se que as áreas com os maiores valores de PPRH na bacia do Rio Paraopeba estão localizadas principalmente na parte média e baixa

da bacia, enquanto os menores valores de PPRH predominam nas áreas mais elevadas da bacia.

Figura 2-5. Potencial de recarga hídrica do componente solo, PRHS(a) e potencial pedohidrológico à recarga hídrica, PPRH (b) para a bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Autora

Comparando-se os mapas de PRHS e PPRH, nota-se que a geologia da bacia se mostra um fator limitante do potencial de infiltração da bacia do Rio Paraopeba. Formações geológicas possuem forte correlação com a recarga hídrica, sendo capazes de aumentar ou reduzir seu potencial (Das; Pal, 2019). Mogaji e Lim (2020) avaliaram a influência da geologia na recarga hídrica e encontraram que locais compostos por rochas aluviais e sedimentares influenciaram positivamente a recarga hídrica, enquanto as rochas ígneas o efeito foi o oposto, reduzindo seu potencial de recarga. O mesmo, pode ser observado no presente estudo onde a região do Médio e Alto Paraopeba, onde predomina a ocorrência de rochas metamórficas e ígneas de baixa porosidade primária, possuem valores menores de PPRH. Já a região do Baixo

Paraopeba é formada por rochas sedimentares, que favorecem a percolação, e por isso, possuem maior PPRH. Esses resultados corroboram aqueles observado por Pacheco e Pissarra (2023).

A declividade da bacia do Rio Paraopeba (Figura 2-6) varia de 0 a 276%, sendo que 40,6% da bacia possui relevo ondulado, 28,4 % relevo suave e ondulado e 20% com relevo forte e ondulado, segundo as classes de declividade propostas pela EMBRAPA (1979). Observa-se um gradiente de declividade da nascente para a foz do Rio Paraopeba, sendo que a nascente se situa em relevo forte ondulado, enquanto na foz predomina um relevo mais plano.

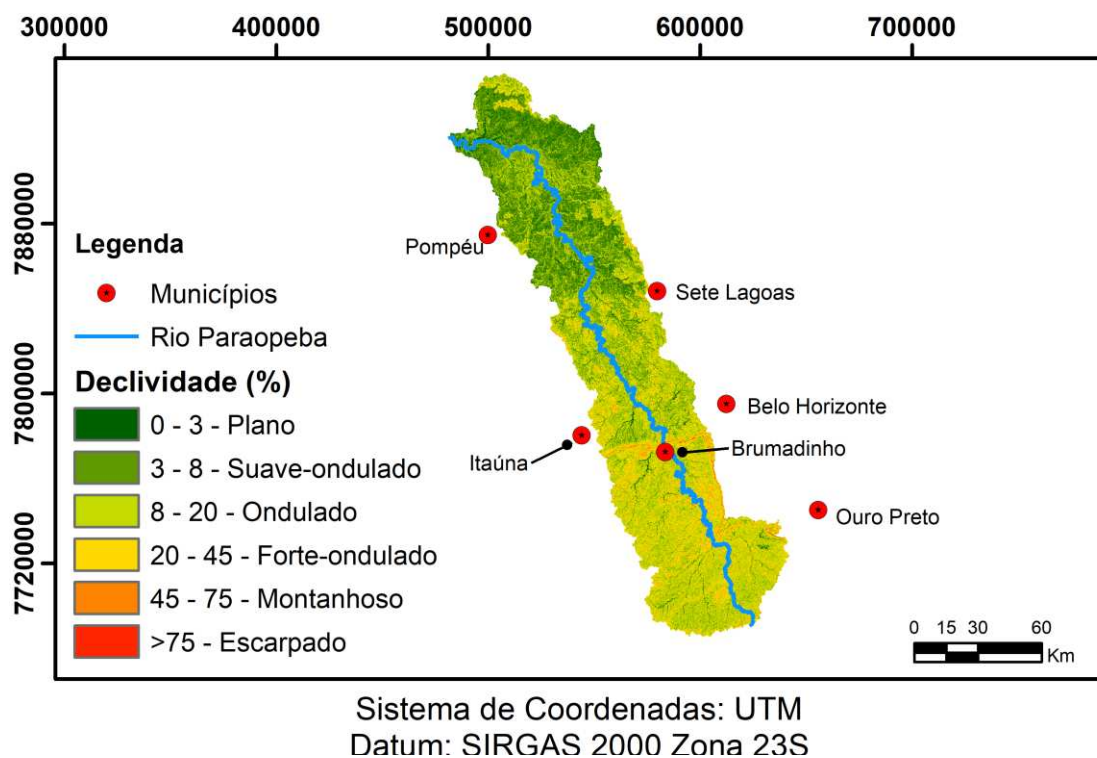
O índice topográfico (IT) e o índice de potência do escoamento (SPI) da bacia do rio Paraopeba estão apresentados na Figura 2-7a e Figura 2-7b, respectivamente.

Os valores de IT variaram de 6,28 a 23,32 na área de estudo. O histograma de IT apresentou uma cauda na parte superior dos dados, representando que os maiores valores do IT apresentam baixa frequência. Por esse motivo, foi adotado um valor de corte igual a 13,94 que equivale a média mais duas vezes o desvio padrão.

Como esperado, próximo aos divisores de água os valores de IT são menores, pois são regiões com áreas de drenagem baixas. Já os maiores valores se encontram próximos à hidrografia e foz da bacia, correspondente às áreas de drenagem maiores.

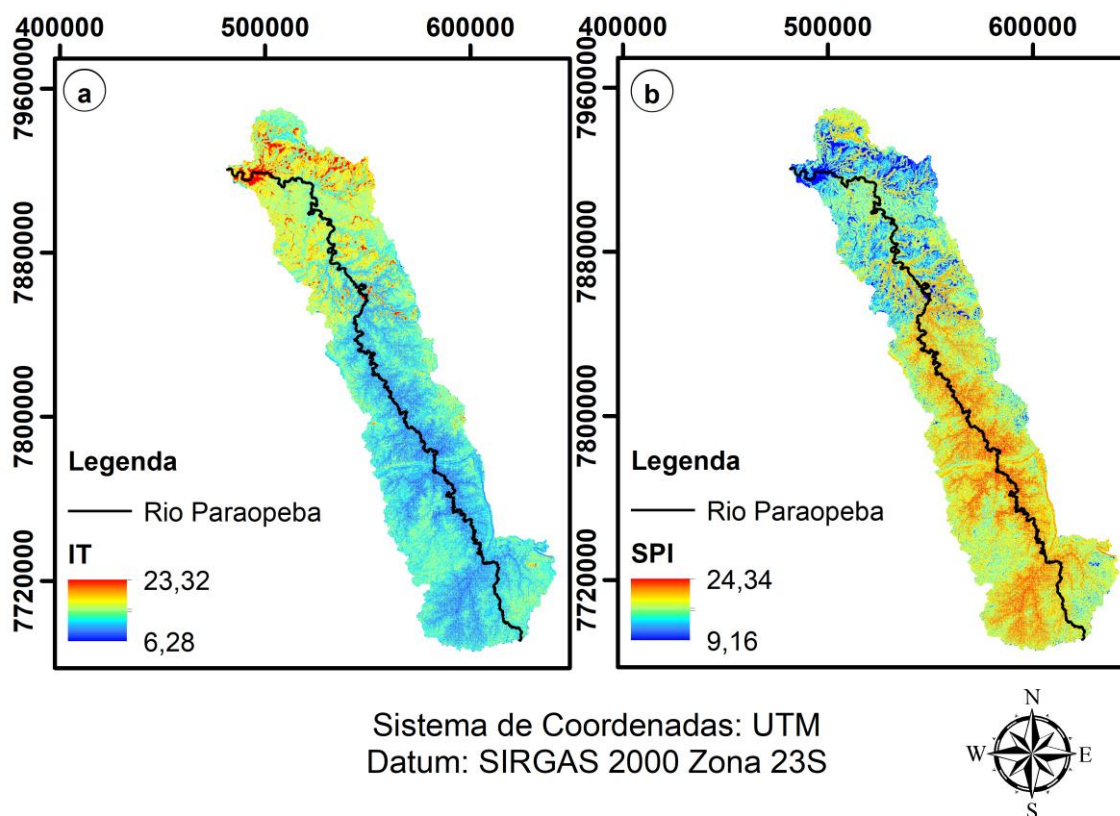
Os maiores valores encontrados para o SPI são coincidentes com as regiões onde ocorrem a rede de drenagem da bacia. Isso se deve ao fato da rede de drenagem representar os caminhos preferenciais de concentração do escoamento superficial. Nota-se também que as áreas de cabeceira da bacia possuem um SPI maior do que a foz da bacia, isso se deve, principalmente devido à alta declividade das áreas de cabeceiras (Micu; Urdea, 2022). O histograma de SPI apresentou uma cauda na faixa inicial dos dados, representando que valores muito baixos de SPI são pouco frequentes na bacia. Portanto, foi adotado um valor de corte igual a 18,49 que equivale a média menos duas vezes o desvio padrão.

Figura 2-6. Declividade em porcentagem da bacia do Rio Paraopeba.



Fonte: Autora

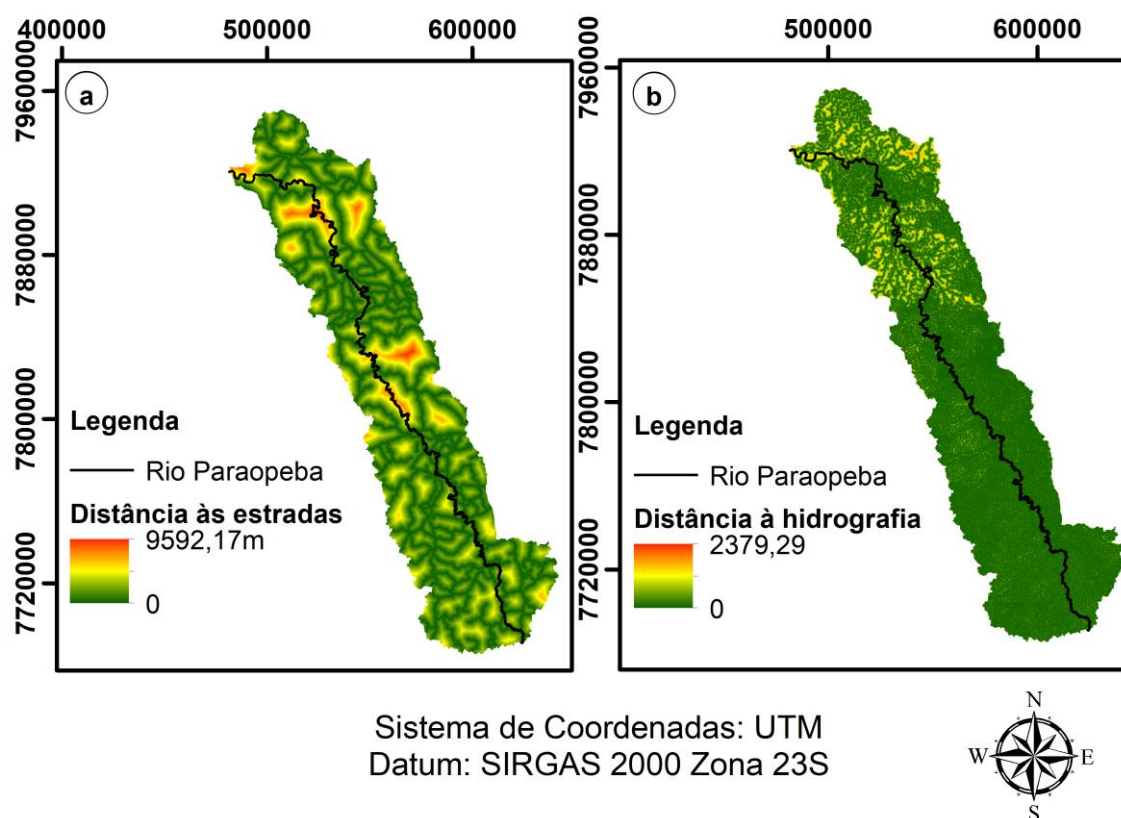
Figura 2-7. Índice topográfico (IT) (a) e a potência do escoamento (SPI) (b)



Fonte: Autora

As distâncias às estradas e à hidrografia estão apresentadas na Figura 2-8a e Figura 2-8b, respectivamente. Na bacia do Rio Paraopeba existe uma predominância de pequenas e médias distâncias às estradas, sendo a distância máxima a ser percorrida menor do que 10km. Por um lado, baixas distâncias entre estradas se apresenta como vantajosa do ponto de vista econômico por facilitar a logística e acessibilidade (Tegebu; Seid, 2017). Por outro lado, como as estradas, assim como a hidrografia, atuam como caminhos preferenciais para o escoamento superficial, é necessário adotar medidas que evitem a conectividade entre estradas e a hidrografia (Kastridis, 2020).

Figura 2-8. Distância às estradas (a) e distância à hidrografia (b) na bacia do Rio Paraopeba.



Fonte: Autora

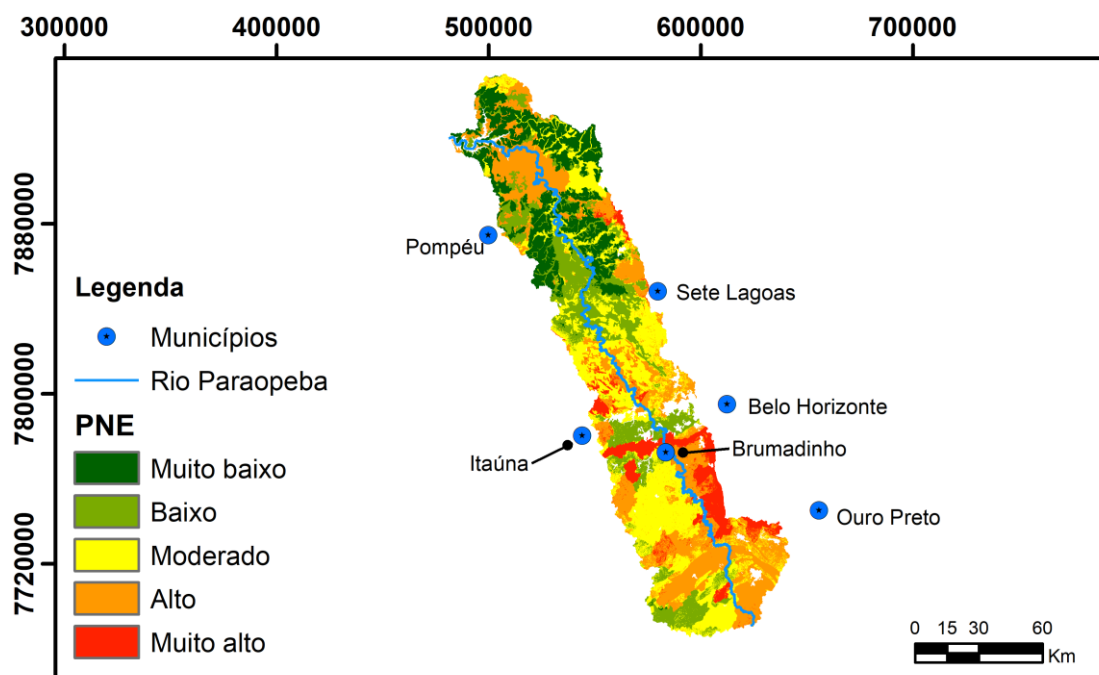
A bacia do Rio Paraopeba possui baixas distâncias entre hidrografias indicando ser uma bacia com uma elevada densidade de drenagem. Consoante, Santos et al. (2019), encontrou que a bacia do rio Paraopeba possui uma densidade de drenagem de 2,0021 km/km², e densidade hidrográfica 7,3106 canais fluviais/km². Considerando

que quanto maior a rede de drenagem e, conseqüentemente, menor a distância à hidrografia, mais rápido a água proveniente da precipitação encontra um curso d'água, o que corrobora com os resultados de distância à hidrografia encontrados no presente trabalho.

Os menores valores de distância à hidrografia são observados na parte alta e média da bacia do Rio Paraopeba, enquanto os maiores valores no baixo Paraopeba, próximo a foz da bacia. A distância média à hidrografia foi 211 m, sendo, aproximadamente, 11 vezes menor que o valor máximo observado, o que mostra uma elevada frequência de pequenas distâncias, reforçando a hipótese de que a bacia do Rio Paraopeba ser uma bacia bem drenada.

O mapa de potencial natural de erosão está apresentado na Figura 2-9, na qual observa-se que as áreas com maior potencial natural a erosão, se encontram próximas ao divisor de águas e não necessariamente seguem a hidrografia. Isso pode ser explicado pelo fato de o PNE não considerar a hidrografia diretamente e sim aspectos referentes ao tipo de solo (erodibilidade do solo), precipitação (Erosividade da chuva) e comprimento de rampa (fatores topográficos).

Figura 2-9. Potencial Natural de Erosão (PNE)



Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Zona 23S

Fonte: Autora

As áreas com maior PNE, coincidem com as áreas de maior precipitação que estão localizadas próximas aos divisores de água. Desta forma, é importante reduzir o processo erosivo desde a formação do escoamento superficial, já que o solo perdido nestas áreas, próximas ao divisor de água e distante da foz, será transportado para os rios, contribuindo para seu assoreamento.

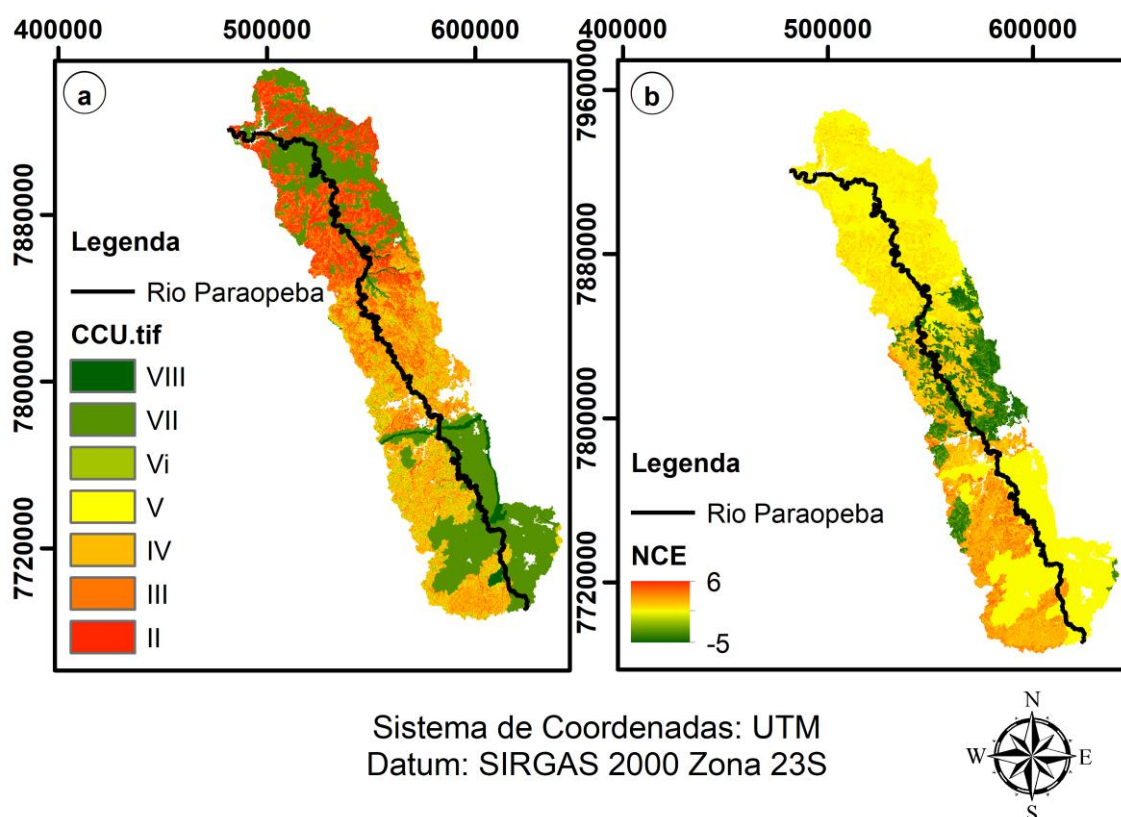
Destaca-se que a região de mineração, próximo a Brumadinho, foi classificada com alto PNE. Sendo assim, o controle da perda de solo nesses locais é essencial até mesmo para se reduzir a contaminação dos rios. Costa et al. (2023) apontam que a presença de áreas florestais, especialmente, próximo as áreas de maior potencial erosivo, é essencial para a retenção de poluentes.

O PNE abrange em sua composição as variáveis da equação da perda de solo. Em outros trabalhos, é possível notar o uso das mesmas variáveis utilizadas separadamente, como em Chakraborty et al. (2020) e Francisco, Santos e Brito (2022). Os autores encontraram que o fator topográfico LS foi o mais importante para a identificação de áreas potenciais de perda de solo na Índia. Francisco, Santos e Brito (2022) analisaram o PNE para uma região na Paraíba e encontraram que o fator LS teve maior importância para a análise, seguido da erosividade e da erodibilidade do solo. Contudo, no presente trabalho o fator LS não foi o mais influente. A erosividade da chuva e a erodibilidade do solo tiveram maior influência no resultado. A maior influência da erodibilidade era esperada por possuir maior peso na equação 2-4. Já a erosividade da chuva, apesar de possuir o mesmo peso do que o fator LS, se destacou no critério PNE, por possuir maior variabilidade espacial.

A classe de uso e ocupação da terra (CCU) e a adequação de uso e ocupação da terra (NCE) estão apresentados na Figura 2-10.

A maior parte da bacia do Rio Paraopeba, se encontra subutilizada ou com uso adequado. Contudo, áreas próximas a hidrografia e aos divisores de água apresentam até 6 classes acima da máxima capacidade de uso, evidenciando que essas áreas estão sendo sobreutilizadas e, conseqüentemente, podem reduzir a recarga hídrica e aumentar a produção de escoamento superficial.

Figura 2-10 – Classificação de capacidade de uso e ocupação da terra (CCU) (a) e número de classes excedentes (NCE) (b) para a bacia do Rio Paraopeba

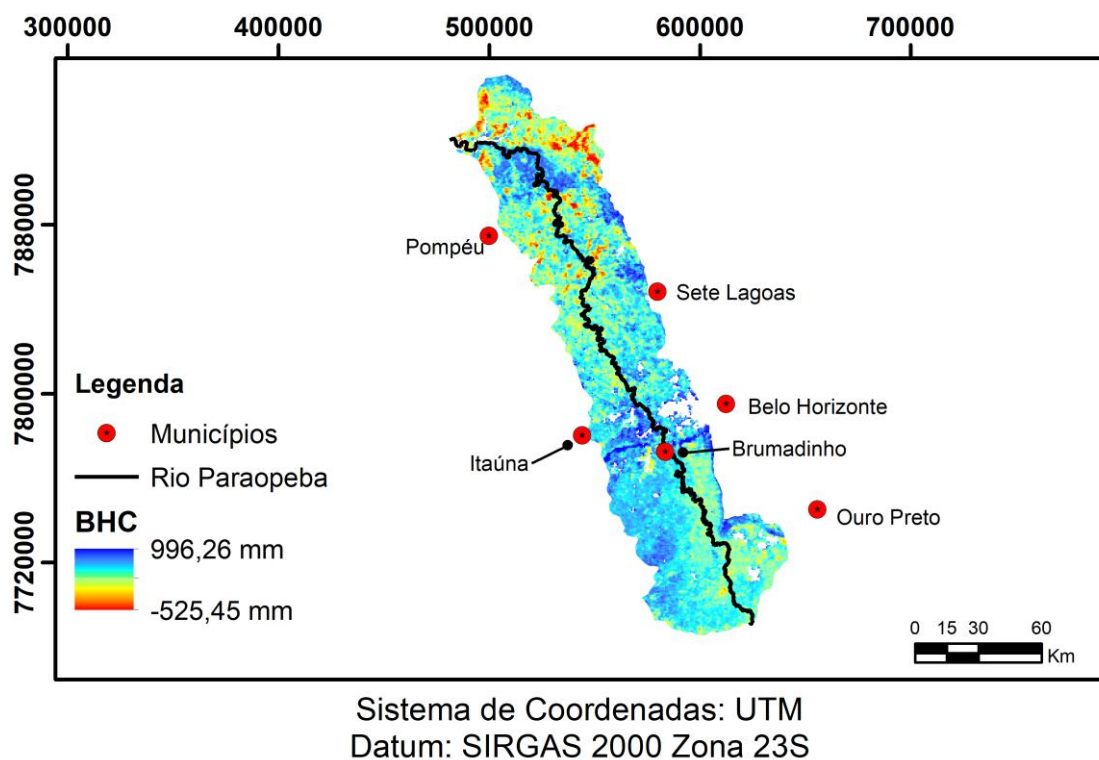


Fonte: Autora

O balanço hídrico climatológico simplificado (BHC), apresentado na Figura 2-11, identifica áreas com déficit hídrico (valores negativos) e áreas com excedente hídrico (valores positivos).

De maneira geral, a bacia do Rio Paraopeba apresenta mais áreas de excedente hídrico do que áreas com déficit hídrico. As áreas com maior elevação são também as áreas com os maiores valores de excedente hídrico. As áreas com déficit hídrico estão, em sua maioria, concentradas na região do baixo Paraopeba, próximo a foz. Essa variação pode ser explicada pelos menores índices de precipitação observados no Baixo Paraopeba aliadas a uma evapotranspiração intermediária causada pela predominância do uso agropecuário.

Figura 2-11 - Balanço hídrico climatológico simplificado para a bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Autora

2.5.2 Análise multicritério e Processo de Hierarquização Analítica (AHP)

Para cada critério, os histogramas da distribuição de frequência dos dados foram analisados e os valores utilizados para corte estão apresentados na Tabela 2-4. Além disso, também estão apresentados na Tabela 2-4 os tipos de funções adotadas, os limites mínimos e máximos, que representam os valores de corte, e os pesos de cada critério para cada um dos produtos gerados.

Tabela 2-4. Critérios, funções e pesos utilizados para as análises multicritérios para cada produto gerado para a bacia do Rio Paraopeba.

Identificação de áreas potenciais à produção de ES (CR = 4,3%)				
Critério	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Precipitação (mm)	Linear crescente	1142	1625	56,5
Capacidade de infiltração	Linear decrescente	1	5	26,2
Uso e ocupação da terra	Floresta – 0,30	-	-	11,8
	Formação nat. não florestal – 0,90			
	Lavoura temporária – 0,80			
	Lavoura permanente – 0,50			
	Silvicultura – 0,40			
Pastagem – 0,60				
Índice topográfico	Linear crescente	6,28	13,94	5,5
Identificação de áreas potenciais à propagação de ES (CR = 4%)				
Critério	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Potência do escoamento (SPI)	Linear crescente	18,49	24,34	63,7
Uso e ocupação da terra	Igual ao potencial de produção de escoamento superficial	-	-	25,8
Distância às estradas (m)	Linear decrescente	0	9592,2	10,5
Identificação de áreas potenciais ao acúmulo de ES (CR = 5,7%)				
Critério	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Declividade	Linear decrescente	0	35	50,6
Capacidade de infiltração	Linear decrescente	1	5	21,7
Uso e ocupação da terra	Igual ao potencial de produção de escoamento superficial	-	-	21,7
Distância à hidrografia	Linear decrescente	0	90	6,0
Identificação de áreas potenciais ao processo erosivo (CR = 4%)				
Critério	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Potencial natural à erosão	-	-	-	63,7
Intensidade de uso da terra	Linear crescente	0	7	25,8

Potência do escoamento	Linear crescente	18,49	24,34	10,5
Identificação de áreas potenciais à recarga hídrica (CR = 4%)				
Critério	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Balço hídrico climatológico simplificado (mm)	Linear crescente	0	996	36,5
Declividade	Linear decrescente	0	35	26,9
Potencial pedohidrológico a recarga hídrica	Linear crescente	1	5	22,4
Intensidade de uso da terra	Linear decrescente	0	-5	10,2
Distância à hidrografia	Linear crescente	0	679	4,9

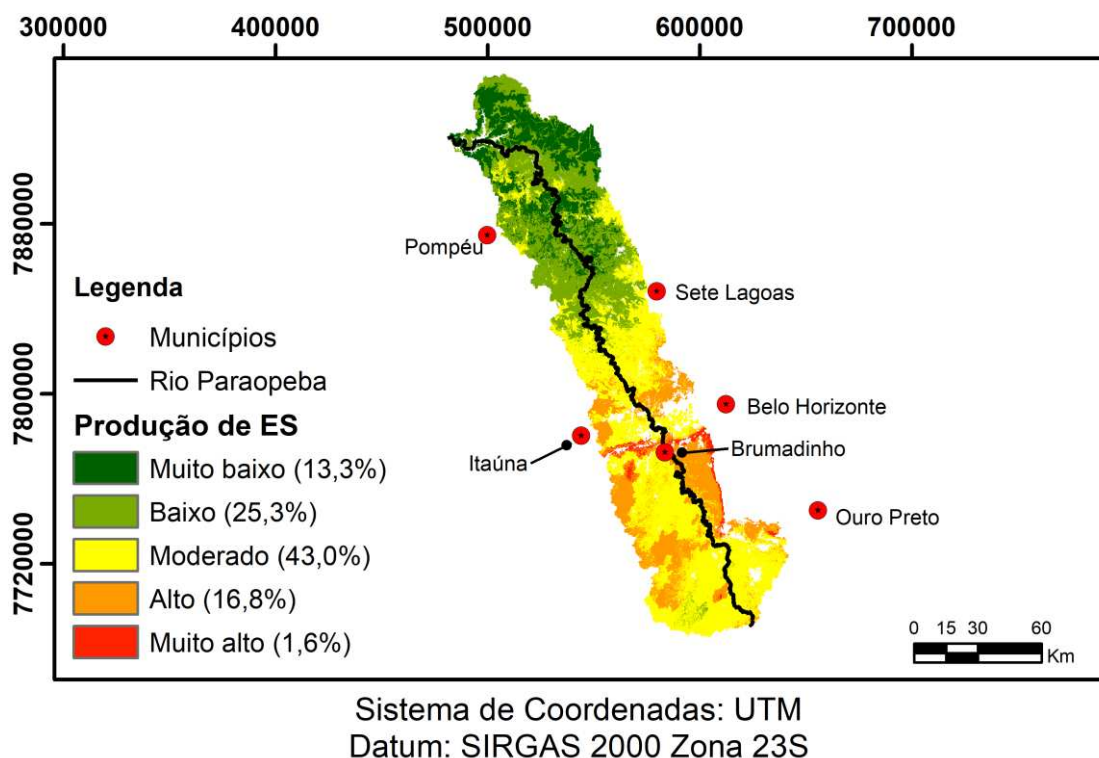
2.5.3 Áreas potenciais à produção de escoamento superficial

Na Figura 2-12 está apresentado o mapa com a categorização do potencial de produção de escoamento superficial na bacia do Rio Paraopeba.

Para a identificação de áreas potenciais à produção do escoamento superficial a precipitação foi definida como critério de maior importância, seguida pela capacidade de infiltração, uso e ocupação da terra e índice topográfico, conforme apresentado na Tabela 2-4. Esse resultado corrobora aos obtidos por Hou, Gao e Wu (2020), que também identificaram a precipitação e o uso e ocupação da terra como critérios de maior importância para definição do potencial de produção de escoamento superficial.

Na bacia do Rio Paraopeba a produção de escoamento superficial é maior em áreas próximas aos divisores de água e, principalmente, no Alto e Médio Paraopeba. Esse padrão é consistente com o padrão de variação da precipitação, haja visto que a precipitação foi o critério de maior peso na definição do potencial de produção de escoamento. Zhou et al. (2021) apontam que a precipitação possui forte correlação com o escoamento superficial tanto em qualidade quanto em quantidade, e que essa correlação aumenta com o tamanho da bacia. Este fato, pode estar relacionado a heterogeneidade da distribuição das chuvas.

Figura 2-12. Identificação de áreas potenciais à produção de escoamento superficial



Fonte: Autora

As áreas com o potencial de produção de escoamento muito alto, encontram-se nas áreas mais declivosas da bacia, por exemplo, a Serra da Calçada. Segundo Wang et al. (2022) há uma forte relação entre a topografia e a produção do escoamento, os quais observaram que em áreas mais declivosas a produção de escoamento é maior. Esta relação é resultante da interação de diversos fatores como a rugosidade do terreno, e uso e ocupação da terra. Na bacia do Rio Paraopeba, a região de alta produção de escoamento superficial, se encontra no Médio Paraopeba, próximo a Brumadinho. Essa região, possui essa combinação de fatores mencionada por Wang et al. (2022), ou seja, alta declividade, uso e ocupação da terra que não favorece a infiltração e solo com baixo potencial de infiltração.

É importante ressaltar que o escoamento superficial que é produzido em áreas de cabeceira será conduzido por toda a extensão da bacia, contribuindo para o processo erosivo. Portanto, é necessário que medidas sejam adotadas para reduzir a formação de escoamento superficial nestas áreas. Qiu (2009) utilizou o IT para encontrar áreas críticas para produção do escoamento superficial e comparou o custo-benefício de se adotar medidas de conservação de solo e água nessas áreas comparado a apenas áreas de preservação permanentes, e obtiveram como

resultado, uma redução significativa dos custos de implementação ao adaptar áreas consideradas críticas para a produção de escoamento superficial. Segundo o autor, as áreas em posições mais elevadas também devem ser preservadas devido ao seu potencial de produção de escoamento superficial. É necessário aumentar a infiltração em posições mais elevadas para reduzir a propagação do escoamento superficial e assegurar a manutenção da água com maior potencial dentro da bacia hidrográfica (Pruski, 2009).

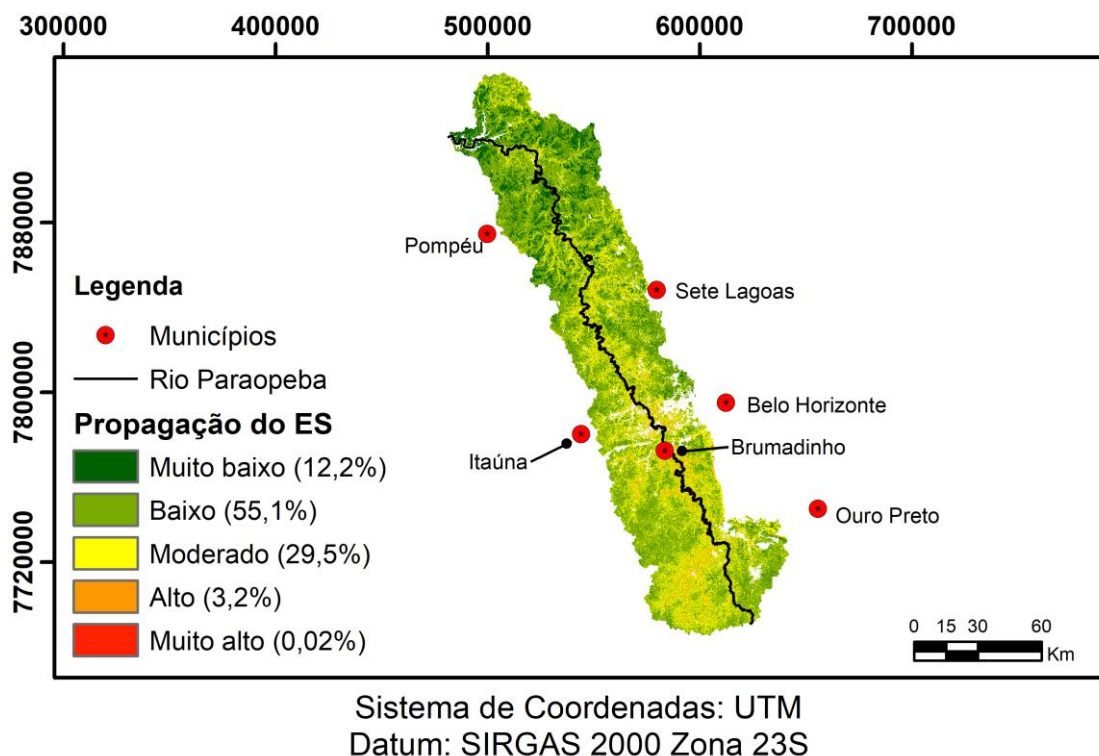
Apesar de terem sido encontradas áreas de alto potencial à produção do escoamento superficial, a maior parte da bacia (68,3%) encontra-se nas classes baixa (25,3%) e moderada (43,0%) e estão presentes em todas as regiões da bacia. Esse resultado, pode ser explicado pela distribuição do uso e ocupação da terra, já que 40,8% da bacia está coberta por pastagens, que possuem potencial moderado para a produção do escoamento superficial. Além disso, apesar de algumas regiões apresentarem altas declividades, a maior parte da bacia possui relevo plano a ondulado (Figura 2-6) que possuem menor relação com a produção do escoamento superficial.

De maneira geral, na região do Baixo Paraopeba são observadas áreas de médio potencial à produção do escoamento superficial, apesar de ter uma precipitação média anual menor. Isso, provavelmente, se deve ao uso da terra nessa região que é, predominantemente, de lavouras temporárias, que são mais propensas a produção do escoamento superficial (Kumar et al., 2021), aliadas à presença de cambissolos, que por sua vez, possuem baixo potencial de infiltração. Por consequência, mesmo em áreas de baixa precipitação, o uso e ocupação da terra e o baixo potencial a infiltração do solo elevaram a produção de escoamento superficial (Wang et al., 2022).

2.5.4 Áreas potenciais à propagação de escoamento superficial

Na Figura 2-12 está apresentado o mapa com a identificação de áreas potenciais à propagação do escoamento superficial na bacia do Rio Paraopeba.

Figura 2-13. Identificação de áreas potenciais à propagação de escoamento superficial



Fonte: Autora

Como apresentado na Tabela 3-4, o SPI foi o critério de maior importância para a identificação de áreas potenciais à propagação do escoamento superficial, seguido pelo critério usos e ocupação da terra e por último pelo critério distância às estradas. Nota-se que o SPI foi maior em áreas mais próximas a hidrografia, áreas em que naturalmente ocorre a concentração e intensificação do escoamento superficial, sendo estas áreas também classificadas com potencial alto e muito alto de propagação do escoamento superficial. Resultado similar foi encontrado por Sharma e Singh (2017).

O uso e ocupação da terra pode influenciar a propagação do escoamento superficial, principalmente, de duas formas: (a) alterando a rugosidade da superfície do solo; e (b) proteção do solo da ação erosiva da chuva.

A rugosidade atua como dissipador da energia cinética do escoamento superficial reduzindo, desta forma, sua tensão cisalhante e seu potencial erosivo (Pruski, 2009). Enquanto, o uso e ocupação da terra interfere na propagação do escoamento superficial pela proteção que pode proporcionar ao solo à ação erosiva da chuva (erosividade da chuva) e manutenção da capacidade de infiltração (Pruski, 2009). O uso e ocupação da terra mais predominante na bacia é a pastagem (Rana;

Suryanarayana, 2020), a qual oferece boa rugosidade ao terreno e atua de forma a dissipar a energia cisalhante do escoamento superficial, favorecendo baixos valores de potencial de transporte do escoamento superficial.

Visto que a bacia do Rio Paraopeba apresenta potencial baixo a muito baixo de transporte do escoamento superficial, a manutenção da capacidade de infiltração se torna ainda mais importante. Uma alta capacidade de infiltração aliada a redução da velocidade do escoamento superficial favorece o processo de re-infiltração de água. A re-infiltração de água é definida pela infiltração da água do escoamento superficial durante sua propagação sobre a superfície do solo (Zhang et al., 2020). Gabriels, Willems e Van Orshoven (2022), ao analisar o impacto de diversos cenários de mudanças no uso e ocupação da terra no escoamento superficial, encontraram que a maior redução no escoamento superficial com o mínimo de intervenção foi obtida quando houve o aumento de áreas florestais em áreas de propagação do escoamento superficial. Consoante, no presente estudo as áreas florestais encontram-se em áreas de menor propagação do escoamento, ou seja, as florestas contribuem para reduzir a propagação do escoamento superficial.

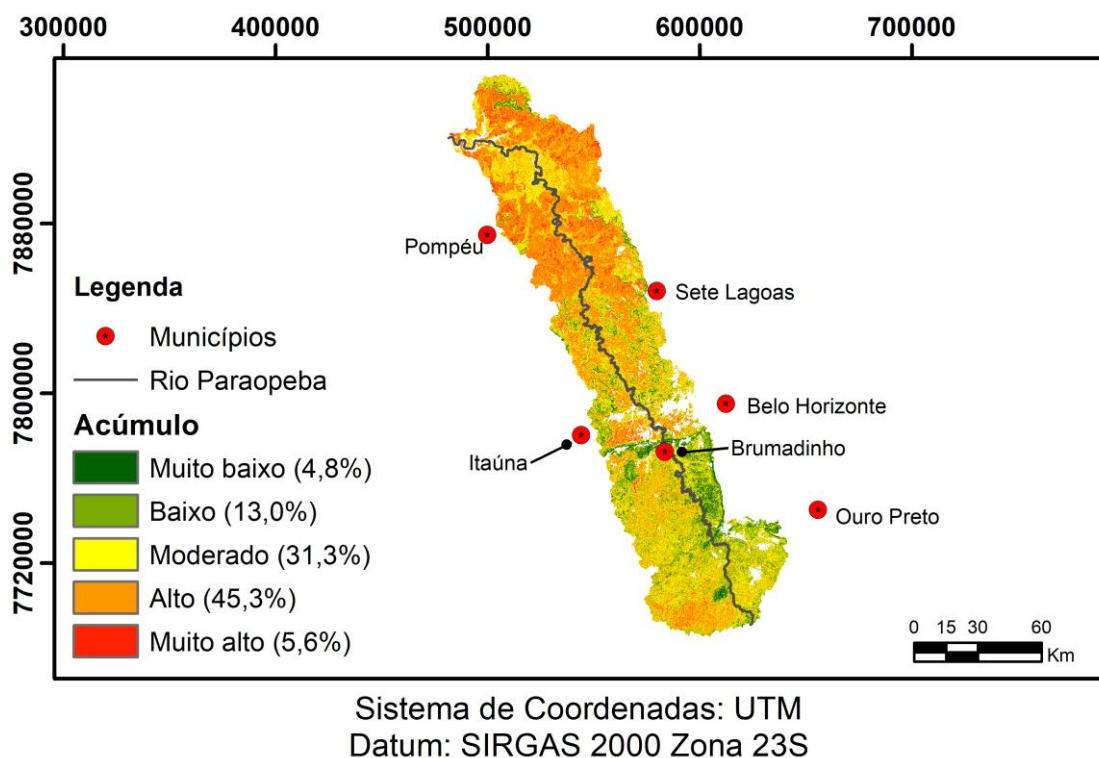
A distância às estradas também foi um critério utilizado para determinação do potencial ao transporte do escoamento superficial, pois as estradas facilitam o transporte do escoamento. Contudo, destaca-se que o peso atribuído a este critério foi menor do que os outros critérios, pois diante dos outros critérios escolhidos, este possui menor importância para o fenômeno estudado, desta forma, esta variável teve pouca influência no produto final.

2.5.5 Áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial

Na Figura 2-14 está apresentado o mapa com a identificação de áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial. A declividade foi o critério de maior influência seguido pela capacidade de infiltração e uso e ocupação da terra de igual influência para a identificação de áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial, como pode ser visto na Tabela 3-4. Resultados semelhantes foram “observados” por Rana e Suryanarayana (2020) e por Muttaquin et al. (2023) na identificação de áreas ideais para o acúmulo de escoamento superficial. Talukdar et al. (2020) utilizaram critérios semelhantes para identificação de áreas com risco de inundação e determinaram que o uso e ocupação da terra é o critério de maior

influência, seguido pela declividade, distância à hidrografia e elevação. Neste estudo, os autores apontam que o uso e ocupação da terra foi mais influente devido a área de estudo ser plana com baixo gradiente de declividade.

Figura 2-14. Identificação de áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial na bacia do Rio Paraopeba.



Fonte: Autora

Analisando a posição de ocorrência das áreas com potencial muito alto e alto à acumulação do escoamento superficial, nota-se que a maioria estão junto a hidrografia, na região do Baixo Paraopeba. Resultado semelhante foi encontrado por Allafta e Opp (Allafta; Opp, 2021). Este resultado foi especialmente favorecido pelo critério distância à hidrografia, que priorizou áreas com até 90m de distância (Das, 2019b; Pradhan, 2009; Samanta et al., 2016; Xiao; Yi; Tang, 2017). Estas são áreas naturalmente inundáveis, o que reforça a necessidade de manutenção da vegetação ripária a fim de minimizar possíveis danos e favorecer a re-infiltração da água (Zhang et al., 2020).

Outro fator que contribuiu para a maior concentração de acúmulo de escoamento na região do Baixo Paraopeba, pode também estar ligado ao fato de a

bacia do Paraopeba ser uma bacia bem drenada. Bacias hidrográficas bem drenadas possuem maior propensão ao acúmulo de escoamento próximo a foz, já que a água, por rapidamente encontrar um canal e atingir a foz (Ahmed et al., 2023). Segundo Rana e Suryanarayana (2020) a densidade de drenagem está relacionada ao potencial de acúmulo do escoamento superficial.

Além das áreas localizadas ao longo da hidrografia, há áreas com potencial muito alto e alto ao acúmulo do escoamento superficial no Baixo Paraopeba. Este resultado está alinhado com outros trabalhos que também encontraram uma relação inversa entre potencial de acúmulo do escoamento superficial com a elevação (Das, 2019b; Khosravi et al., 2019; Samanta et al., 2016; Talukdar et al., 2020; Xiao; Yi; Tang, 2017). Na bacia do rio Paraopeba, estas áreas mais baixas, além de possuírem menor declividade também possuem menor capacidade de infiltração e estão em áreas com cultivos temporários, o que agrava ainda mais um cenário de possíveis enchentes.

Costa et al. (2023) ao analisar a resposta hidrológica da bacia do rio Paraopeba utilizando o modelo SWAT, notaram que a bacia possui um alto risco de eventos de inundação, especialmente de dezembro a fevereiro. Isso reforça, a necessidade de se tomar medidas para minimizar os impactos destes eventos.

2.5.6 Áreas potenciais à ocorrência do processo erosivo

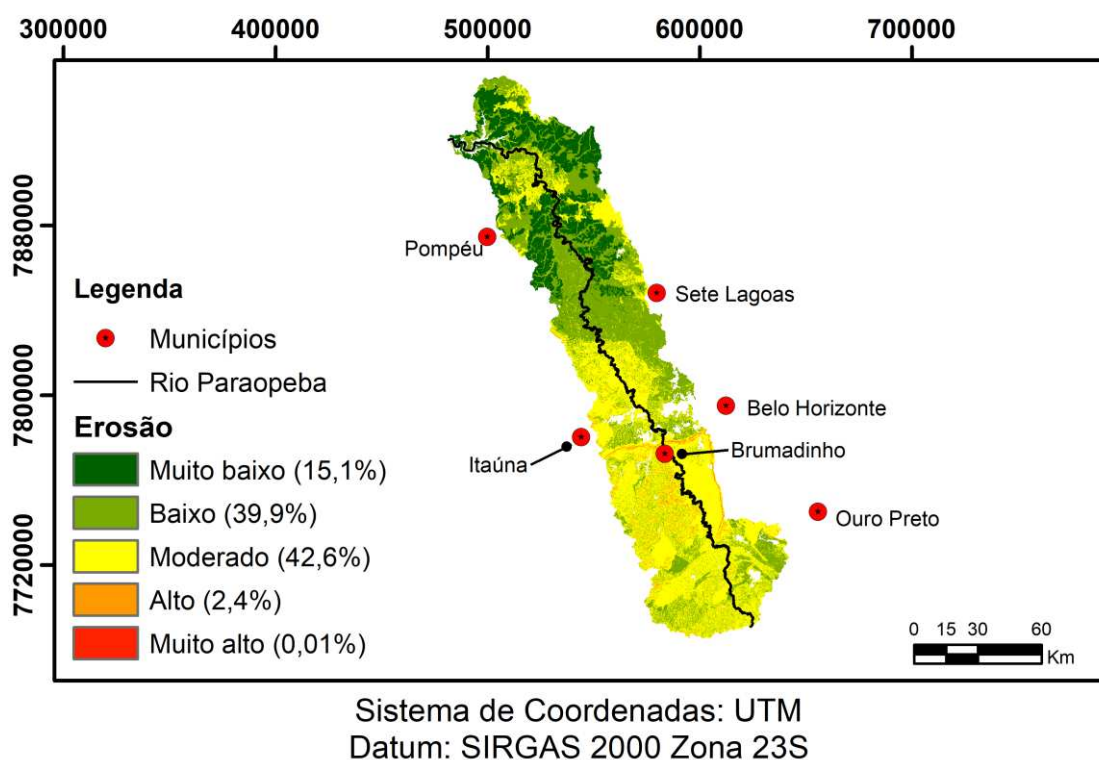
Na Figura 2-15 está apresentado o mapa com a identificação de áreas potenciais à ocorrência do processo erosivo na bacia do Rio Paraopeba.

Para a identificação de áreas potenciais à erosão hídrica, o critério potencial natural de erosão (PNE) foi aquele de maior influência, pois ele é obtido por fatores intrínsecos do clima, solo e relevo, os quais afetam diretamente a magnitude da erosão hídrica. Outros autores utilizaram critérios semelhantes (Barbosa; Guerra; Valladares, 2024; Mihi; Benarfa; Arar, 2020; Sindhu et al., 2015), porém não de forma unificada como no presente trabalho.

O uso e ocupação da terra, quando realizado conforme sua capacidade de uso (Pruski, 2009), é considerada a melhor prática de proteção do solo contra a ação erosiva da chuva, além disso, ajuda na manutenção da estrutura do solo e redução da tensão de cisalhamento do escoamento superficial (Barbosa; Guerra; Valladares, 2024). Motivo pelo qual o número de classes excedentes foi o segundo critério de

maior influência para a definição do potencial à ocorrência da erosão hídrica. Como a maior parte da bacia do Rio Paraopeba não se encontra em classe elevadas de sobreutilização. Desta forma, nota-se que este critério promoveu uma amortização do potencial erosivo. Costa et al., 2023 utilizaram uma metodologia diferente para determinar as áreas em que o uso e ocupação atual não correspondem com o uso ideal. Contudo, os autores chegaram a resultados similares aos apresentados aqui, mostrando que mais da metade da bacia está sendo usado conforme sua capacidade, e que mesmo as áreas de uso intensificado, não estão muitas classes acima do ideal.

Figura 2-15. Identificação de áreas potenciais à ocorrência do processo erosivo na bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Autora

Áreas classificadas com potencial erosivo muito alto e alto foram encontradas somente nas regiões de maior declividade da bacia, como a Serra da Calçada e nos divisores de água. Esta é uma região, cujo uso e ocupação da terra não fornece uma boa proteção ao solo. Além disso, esta região é formada por neossolo, os qual possui alta erodibilidade.

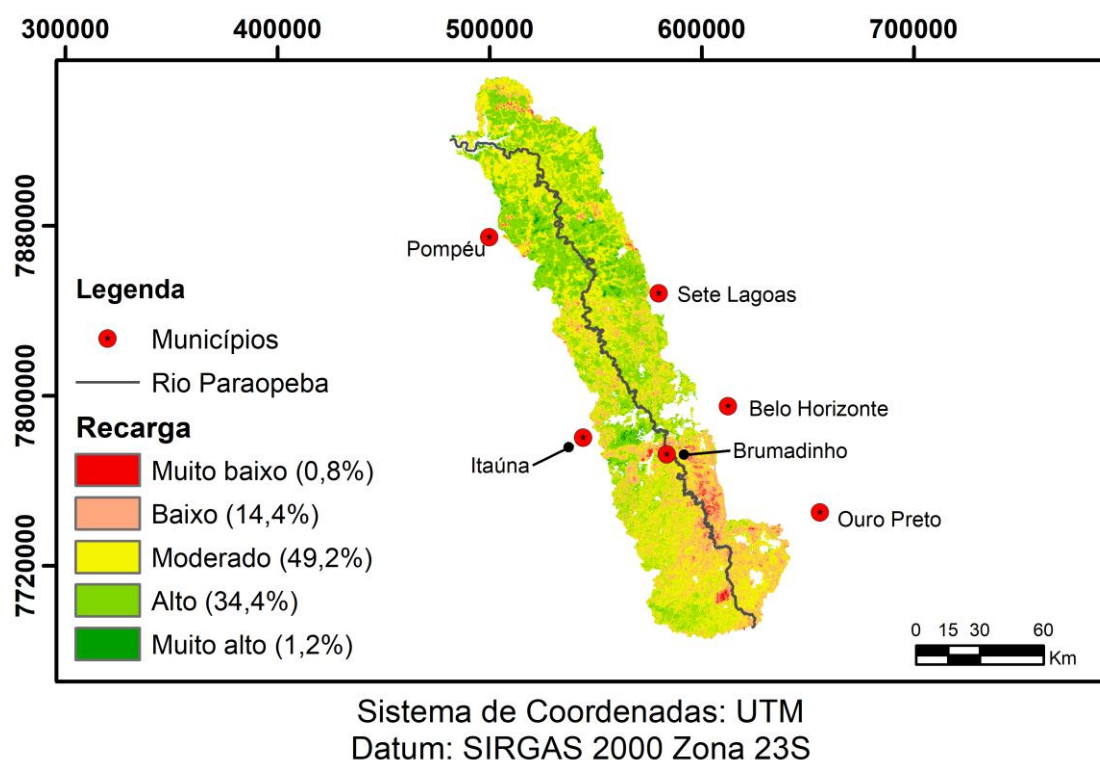
As áreas classificadas como potencial moderado ao processo erosivo, estão localizadas principalmente no Alto e Médio Paraopeba. Isso se deve ao fato de serem as regiões com maior erosividade da chuva e relevo forte-ondulado a montanhoso, sendo expressas por valores mais altos de PNE. Segundo Barbosa, Guerra e Valladares (2024), a erosividade da chuva é o principal responsável pela perda de solo.

No Baixo Paraopeba também são observadas áreas com potencial moderado ao processo erosivo, sendo essas coincidentes com áreas de cultivo temporário que estão sendo sobreutilizadas. Sugere-se então que nestas áreas sejam adotadas medidas de conservação de solo e água afim de minimizar o processo erosivo.

2.5.7 Áreas potenciais à recarga hídrica

Na Figura 2-16 está apresentado o mapa com a identificação do potencial de recarga hídrica na bacia do Rio Paraopeba. O balanço hídrico climatológico simplificado foi o critério com maior influência (Tabela 2-4). Foram considerados somente as áreas com excedente hídrico, ou seja, áreas em que a entrada de água (precipitação) é maior do que a saída de água no sistema (evapotranspiração). Contudo, apenas essa análise é insuficiente para determinar se há recarga hídrica no local. A precipitação é sim um critério essencial para a recarga hídrica, visto, ser a principal fonte de entrada de água na bacia hidrográfica (Abdo et al., 2024; Mello; Silva; Beskow, 2020). Contudo, a evapotranspiração atua como fonte de retirada de água do sistema, também devendo ser considerada. Segundo Cheng et al. (2017), quanto maior porte e adensamento dessas florestas, maior a taxa de evapotranspiração e interceptação da precipitação, o que reduz o armazenamento de água no solo e a recarga do lenço freático. Ainda, Oliveira, et al. (2017), em seu estudo realizado no cerrado brasileiro, concluíram que a recarga hídrica tende a diminuir com o aumento da densidade da vegetação. Desta forma, mesmo em locais de alta precipitação, houve também alta evapotranspiração, não representando uma área com alto potencial para recarga hídrica.

Figura 2-16. Identificação de áreas potenciais à recarga hídrica na bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Autora

Nota-se também, que a região da Serra da Calçada, próximo ao município de Brumadinho, apresentam potencial à recarga hídrica baixo ou muito baixo. A declividade, e uso e ocupação da terra são fatores determinantes para baixa infiltração.

O critério declividade, segundo critério de maior peso, influencia diretamente o processo de recarga dos aquíferos. Áreas declivosas não favorecem a recarga, pois o escoamento transporta rapidamente a água para outro local (Upwanshi et al., 2023). A bacia do Rio Paraopeba possui em sua maioria, áreas de relevo suave a ondulado, o que favoreceu o potencial de recarga hídrica. As regiões identificadas com potencial muito baixo a recarga hídrica, estão localizadas principalmente na parte mais declivosa da bacia. Próximo a foz, também foram encontradas áreas com potencial muito baixo, áreas que por sua vez, também possuem declividade mais acentuada.

Na região do Alto Paraopeba, à margem direita do Rio Paraopeba estão as áreas de menor potencial à recarga hídrica da bacia. Esta região foi influenciada principalmente pelo baixo potencial pedohidrológico à recarga hídrica. Esta é uma

região formada por rochas ígneas e metamórficas de baixa porosidade primária, e que permitem que a recarga do aquífero aconteça através de fissuras, reduzindo assim, seu potencial à recarga hídrica.

Outros estudos também consideraram a geologia para determinação de áreas potenciais para a recarga hídrica (ABIJITH et al., 2020; ACHU; REGHUNATH; THOMAS, 2020; DAS; PAL, 2019, 2020). Das e Pal (2019) consideraram a geologia como segundo critério mais importante para determinação de áreas para recarga hídrica. Senthilkumar, Gnanasundar e Arumugam (2019) afirmaram que o uso da geologia auxiliou na identificação de áreas potenciais para recarga hídrica artificial na Índia.

Outro critério que influenciou, contudo em menor peso, foi a distância à hidrografia. Como mencionado, a bacia do Rio Paraopeba possui uma distância à hidrografia pequena, principalmente na região do Médio e Alto Paraopeba. Para a definição do potencial de recarga, considerou-se que quanto maior a distância à hidrografia, maior o potencial de recarga. Tal fato, justifica a redução do potencial de recarga hídrica na região do Alto Paraopeba. Meng et al. (2024) também observaram relação inversamente proporcional entre a distância à hidrografia e o potencial de recarga hídrica.

Neto et al. (2023) obteve mapas que representam o potencial a erosão hídrica e a recarga hídrica na bacia do Rio Paraopeba. Ambos os produtos apresentam distribuição semelhante com os produtos apresentados neste trabalho (potencial à erosão hídrica e recarga hídrica) apesar de terem utilizados critérios diferentes. Desta forma, é possível concluir que a metodologia apresentada foi eficiente em identificar a variabilidade espacial do potencial de recarga hídrica e potencial de erosão hídrica da bacia do rio Paraopeba.

2.5.8 Limitações e sugestões futuras

Os resultados apresentados servem como um critério norteador para tomadas de decisões futuras. Os resultados aqui apresentados possuem aplicabilidade para guiar políticas públicas de zoneamento e utilização da terra. Além disso, possibilita também conhecer as limitações potenciais de cada área e, conseqüentemente, auxiliar no planejamento de uso e ocupação das áreas a recuperar ou mitigar os efeitos adversos da antropização e das mudanças climáticas.

Contudo, é necessário se atentar as limitações do presente estudo, para que o mesmo possa ser replicado em outras áreas. Bases de dados de livre acesso no Brasil se apresentam como uma grande limitação para estudos que utilizam Sistemas de Informações Geográficas. Até o momento da elaboração do estudo, não há bases de dados padronizadas sobre todos os critérios utilizados. Por exemplo, os dados de precipitação (1x1km *WorldClim* e 4x4km *TerraClimate*) estão em escala diferentes dos dados do modelo digital de elevação (30x30m) e dos dados de evapotranspiração (500x500m). Ainda, a hidrografia, utilizada neste estudo, foi obtida em uma escala de 1:25.000 enquanto o levantamento de pedologia e geologia foram obtidos em escala de 1:250.000. Apesar de não representarem as condições ideais, estas limitações não atuaram como fator impeditivo para a elaboração da pesquisa.

Outra questão que demanda atenção ao replicar a metodologia apresentada em diferentes áreas, é a escolha das variáveis. Ao comparar o presente estudo com outros em temas similares, nota-se que não há sempre um padrão nas escolhas das variáveis, com alguns estudos utilizando mais ou menos variáveis. Isso se deve a relevância e variabilidade da variável frente ao objetivo. Como exemplo, cita-se a utilização da variável curvatura para identificação de áreas potenciais ao acúmulo de escoamento superficial. Apesar de amplamente utilizada na literatura (Das, 2019a; Lagadec et al., 2016b; Pourghasemi; Pradhan; Gokceoglu, 2012b; UFV; UFMG; Renova, 2018b), na bacia do Rio Paraopeba esta variável não apresentou grande variabilidade espacial, não sendo considerada no presente estudo.

2.6 Conclusões

- A bacia do Rio Paraopeba possui potencial baixo a moderado para produção e propagação do escoamento e erosão hídrica e potencial moderado a alto para o acúmulo de escoamento superficial e recarga hídrica. Isso representa a capacidade da bacia em reter o escoamento superficial gerado. Desta forma, é de fundamental importância a adoção de medidas que visem manter ou aumentar a capacidade de infiltração de água no solo.

- Os critérios relacionados as propriedades do solo (PRHS e PPRH) foram aqueles mais utilizados e que apresentaram maior influência geral nos produtos gerados, seguidos pelos critérios uso da terra e intensidade de uso da terra. Em

relação aos critérios PRHS e PPRH, por representarem propriedades intrínsecas das classes de solo, são mais difíceis de serem melhorados, sendo possível apenas a manutenção de sua qualidade. Por outro lado, critérios relacionados ao uso da terra são possíveis de alteração. Desta forma, os produtos apresentados refletem apenas o panorama atual, podendo ser alterados positivamente, com redução de áreas vulneráveis, ou negativamente, com aumento das áreas vulneráveis, em função de alterações no uso da terra.

- Na região de cabeceira da bacia, alto do Rio Paraopeba, especialmente à margem direita do rio, foram encontradas muitas áreas vulneráveis a produção e propagação do escoamento superficial, erosão hídrica e baixo potencial à recarga hídrica. Este é um resultado crucial, pois as áreas de cabeceira são de extrema importância, pois o escoamento superficial gerado nessas áreas será propagado por toda a extensão da bacia. Isso reforça a importância de haver uma readequação do uso do solo nesta região, visando o favorecimento da infiltração de água em áreas de cabeceira e, conseqüentemente, aumentando o tempo de permanência da água dentro da bacia e favorecendo a segurança hídrica da bacia.

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATZOGLOU, John T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–12, 2018.

ABDO, Hazem Ghassan *et al.* GIS-based multi-criteria decision making for delineation of potential groundwater recharge zones for sustainable resource management in the Eastern Mediterranean: a case study. **Applied Water Science**, v. 14, n. 7, 1 jul. 2024.

ABIJITH, Devanantham *et al.* GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. **HydroResearch**, v. 3, p. 1–14, 2020.

ACHU, A. L.; REGHUNATH, Rajesh; THOMAS, Jobin. Mapping of Groundwater Recharge Potential Zones and Identification of Suitable Site-Specific Recharge Mechanisms in a Tropical River Basin. **Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 1, p. 131–145, 2020.

AHMED, Alaa *et al.* Flood susceptibility mapping utilizing the integration of geospatial and multivariate statistical analysis, Erbil area in Northern Iraq as a case study. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.

AKBARI, Abolghasem; SAMAH, Azizan Abu; DARYABOR, Farshid. Raster-based derivation of a flood runoff susceptibility map using the revised runoff curve number (CN) for the Kuantan watershed, Malaysia. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 20, p. 1–8, 2016.

ALLAFTA, Hadi; OPP, Christian. GIS-based multi-criteria analysis for flood prone areas mapping in the trans-boundary Shatt Al-Arab basin, Iraq-Iran. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 12, n. 1, p. 2087–2116, 2021.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMARAL, Cinthia Maria; REIS, Claudio Henrique. Suscetibilidade a Escorregamentos E Inundações: Hierarquização Dos Graus De Riscos Na Área Urbana De Viçosa-Mg. **Revista da Anpege**, v. 13, n. 21, p. 199–219, 2017.

BARBOSA, Wellynne Carla de Sousa; GUERRA, Antonio José Teixeira; VALLADARES, Gustavo Souza. Soil Erosion Modeling Using the Revised Universal Soil Loss Equation and a Geographic Information System in a Watershed in the Northeastern Brazilian Cerrado. **Geosciences (Switzerland)**, v. 14, n. 3, 1 mar. 2024.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. [S.l.: S.n.].

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BINTE MOSTAFIZ, Rubaiya; NOGUCHI, Ryozi; AHAMED, Tofael. Agricultural land suitability assessment using satellite remote sensing-derived soil-vegetation indices. **Land**, v. 10, n. 2, p. 1–26, 1 fev. 2021.

CALEGARIO, Arthur Telles *et al.* Characterizing and mapping intensity of land use in large basins through the concept of land use capability. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 6, p. 1–14, 2023.

CÁRCELES RODRÍGUEZ, Belén *et al.* Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. **Soil Systems**, v. 6, n. 4, p. 1–37, 2022.

CHAGAS, Reurysson *et al.* Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica Estimation of the Natural Soil Erosion Potential of the Upper Gurguéia

Basin, Piauí-Brazil, using Geographic Information System. **Número Especial**, v. 27, 2017.

CHAKRABORTTY, Rabin *et al.* Soil erosion potential hotspot zone identification using machine learning and statistical approaches in eastern India. **Natural Hazards**, v. 104, n. 2, p. 1259–1294, 1 nov. 2020.

CHENG, Lei *et al.* Quantifying the impacts of vegetation changes on catchment storage-discharge dynamics using paired-catchment data. **Journal of the American Water Resources Association**, p. 5963–5979, 2017.

COELHO, Clívia Dias *et al.* Development and Application of an Environmental Vulnerability Index (EVI) for Identifying Priority Restoration Areas in the São Francisco River Basin, Brazil. **Land**, v. 13, n. 9, 1 set. 2024.

COSTA, Renata Cristina Araújo *et al.* Hydrologic Response to Land Use and Land Cover Change Scenarios: An Example from the Paraopeba River Basin Based on the SWAT Model. **Water (Switzerland)**, v. 15, n. 8, 1 abr. 2023.

DAHRI, Noura; ABIDA, Habib. Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 7, p. 1–14, 2017.

DAS, Biswajit; PAL, Subodh Chandra. Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. **HydroResearch**, v. 2, p. 21–30, 2019.

DAS, Sumit. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 14, n. September 2018, p. 60–74, 2019a.

DAS, Sumit. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 14, p. 60–74, 1 abr. 2019b.

DOMAZETOVIĆ, Fran *et al.* Development of automated multicriteria GIS analysis of gully erosion susceptibility. **Applied Geography**, v. 112, n. May, p. 102083, nov. 2019.

DOS SANTOS, Paulo Henrique *et al.* The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 119–138, 2019.

EL BAROUDY, A. A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. **Catena**, v. 140, p. 96–104, 1 maio 2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sumula da X Reunião Técnica de Levantamentos de Solos (SNLCS, Série Miscelânea, 1). **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, 1979.

FANG, Xing *et al.* Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. 2, p. 202–211, 2008.

FENG, Youcan; BURIAN, Steven; POMEROY, Christine. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 744–755, 2016.

FERREIRA, Marcos Cesar. **Iniciação à análise geoespacial**. [S.l.]: SciELO-Editora UNESP, 2016.

FRAGA, Micael de Souza *et al.* Methodological proposal for the allocation of water quality monitoring stations using strategic decision analysis. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 12, 2019.

FRANCISCO, Paulo Roberto Megna; SANTOS, Djail; BRITO, Thiago Pereira de. Natural potential of erosion and tolerance limit of loss of soil in a hydrographic basin in the region of brejo paraibano. **Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, v. 8, n. 1, p. 33–42, 2022.

GABRIELS, Karen; WILLEMS, Patrick; VAN ORSHOVEN, Jos. An iterative runoff propagation approach to identify priority locations for land cover change minimizing downstream river flood hazard. **Landscape and Urban Planning**, v. 218, 1 fev. 2022.

GRECCO, Larisse Brunoro *et al.* Influência da seleção de variáveis hidrológicas no projeto de sistemas urbanos de macrodrenagem - Estudos de caso para o município de Vitória ? ES. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 197–206, 2012.

HAN, Cheng *et al.* Evaluation of agricultural land suitability based on RS, AHP, and MEA: A case study in Jilin province, China. **Agriculture (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 1 abr. 2021.

HOU, Wenjuan; GAO, Jiangbo; WU, Shaohong. Quantitative Analysis of the Influencing Factors and Their Interactions in Runoff Generation in a Karst Basin of Southwestern China. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2898, 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pedologia 1:250.000**.

KARIDJO, Boureima *et al.* Factors Influencing Farmers' Adoption of Soil and Water Control Technology (SWCT) in Keita Valley, a Semi-Arid Area of Niger. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 288, 24 jan. 2018.

KASTRIDIS, Aristeidis. **Impact of forest roads on hydrological processes**. **ForestsMDPI AG**, , 1 nov. 2020.

KAYKHOSRAVI, Sarah *et al.* The Low-Impact Development Demand Index : A New Approach to Identifying Locations for LID. n. Lid, p. 11–15, 2019.

KENNARD, Nicole Josiane. **Food Waste Management**. [S.l.: S.n.].

KHOSRAVI, Khabat *et al.* A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi-Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. **Journal of Hydrology**, v. 573, p. 311–323, 1 jun. 2019.

KUMAR, Abanish *et al.* Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. **HydroResearch**, v. 4, p. 61–74, 1 jan. 2021.

LAGADEC, Lilly Rose *et al.* Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016a.

LAGADEC, Lilly Rose *et al.* Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016b.

LEAL, José Eugenio. AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method. **MethodsX**, v. 7, p. 100748, 2020.

LEPSCH, I. Fernando *et al.* Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. **Viçosa, MG: SBCS. 170p**, 2015.

LORENTZ, Juliana F. *et al.* Multicriteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. **Natural Hazards**, v. 83, n. 1, p. 41–52, 22 ago. 2016.

MANFREDA, Salvatore *et al.* Investigation on the use of geomorphic approaches for the delineation of flood prone areas. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 863–876, 2014.

MAPBIOMAS. **Projeto Mapbiomas - Coleção 8 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil.**

MASOUDI, Malihe *et al.* GIS-Based Multi-Criteria and Multi-Objective Evaluation for Sustainable Land-Use Planning (Case Study: Qaleh Ganj County, Iran) “Landuse Planning Using MCE and Mola”. **International Journal of Environmental Research**, v. 15, n. 3, p. 457–474, 2021.

MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antônio Marciano da; BESKOW, Samuel. **Hidrologia de superfície: princípios e aplicações.** 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020.

MICU, Dorina; URDEA, Petru. VULNERABLE AREAS, THE STREAM POWER INDEX AND THE SOIL CHARACTERISTICS ON THE SOUTHERN SLOPE OF THE LIPOVEI HILLS. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 17, n. 2, p. 207–218, 2022.

MIHI, Ali; BENARFA, Noureddine; ARAR, Abdelkrim. Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. **Applied Geomatics**, v. 12, n. 2, p. 179–191, 3 jun. 2020.

MIRANDA, Gisele Horta Barroso *et al.* O uso da análise multicritério no mapeamento do desenvolvimento do saneamento básico de Viçosa-MG, entre os anos de 2000 e 2010. n. August, p. 635–643, 2012.

MOGAJI, Kehinde Anthony; LIM, Hwee San. A GIS-based linear regression modeling approach to assess the impact of geologic rock types on groundwater recharge and its hydrological implication. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, n. 1, p. 183–199, 1 mar. 2020.

MUTTAQIN, K. *et al.* Mapping Flood-Prone Areas Based Geographic Information System Using Composite Mapping Analysis. **International Journal of Geoinformatics**, v. 19, n. 12, p. 93–105, 1 dez. 2023.

NASA. **NASADEM_HGT v001**.

NATH, Biswajit *et al.* Geo-Information Land Use and Land Cover Change Modeling and Future Potential Landscape Risk Assessment Using Markov-CA Model and Analytical Hierarchy Process. **International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 134, p. 25, 2020.

NAVANE, Vishal Sagar; SAHOO, Sanat Nalini. Identification of groundwater recharge sites in Latur district of Maharashtra in India based on remote sensing, GIS and multi-criteria decision tools. **Water and Environment Journal**, v. 35, n. 2, p. 544–559, 15 maio 2021.

NETO, J. A. F. *et al.* **Metodologia de priorização de áreas para recuperação ambiental nas cabeceiras selecionadas das bacias dos Rios Grande, Paranaíba, São Francisco e Parnaíba. Relatório Técnico. Caderno 2 - Metodológico. [S.l.: S.n.]**.

OLIVEIRA, Paulo Tarso S. *et al.* Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. **Ecohydrology**, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2017.

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; WENDLAND, Edson; NEARING, Mark A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139–147, 2013.

ÖZKAN, Barış; DENGİZ, Orhan; TURAN, İnci Demirağ. Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 22074, 16 dez. 2020.

PACHECO, Fernando António Leal; PISSARRA, Teresa Cristina Tarlé. Groundwater security indicators and their drivers: An assessment made in a region of tropical climate (Paraopeba River basin, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 901, 25 nov. 2023.

POURGHASEMI, Hamid Reza; PRADHAN, Biswajeet; GOKCEOGLU, Candan. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 965–996, 2012a.

POURGHASEMI, Hamid Reza; PRADHAN, Biswajeet; GOKCEOGLU, Candan. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 965–996, 2012b.

PRADHAN, Biswajeet. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 9, n. 2, p. 1–18, 2009.

PROKEŠOVÁ, Roberta; HORÁČKOVÁ, Šárka; SNOPOKOVÁ, Zora. Surface runoff response to long-term land use changes: Spatial rearrangement of runoff-generating areas reveals a shift in flash flood drivers. **Science of the Total Environment**, v. 815, 1 abr. 2022.

PRUSKI, F. F. (Ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

PRUSKI, Fernando Falco; BRANDÃO, Viviane dos Santos; SILVA, Demetrius David da. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa - MG: UFV, 2004.

QGIS. **24.1.15. Raster analysis — QGIS Documentation**. Disponível em: <https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html#fuzzify-raster-linear-membership>. Acesso em: 17 jun. 2025.

QIAO, Xiu-Juan; KRISTOFFERSSON, Anders; RANDRUP, Thomas B. Challenges to implementing urban sustainable stormwater management from a governance perspective: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 943–952, set. 2018.

QIU, Zeyuan. Assessing critical source areas in watersheds for conservation buffer planning and riparian restoration. **Environmental Management**, v. 44, n. 5, p. 968–980, 2009.

RAMOS, Marcos de Paulo *et al.* Otimização de rotas de transporte em estradas florestais: um estudo de caso em Paraopeba/MG. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 4, p. e3633, 11 abr. 2024.

RANA, Vikas Kumar; SURYANARAYANA, Tallavajhala Maruthi Venkata. GIS-based multi criteria decision making method to identify potential runoff storage zones within watershed. **Annals of GIS**, v. 26, n. 2, p. 149–168, 2 abr. 2020.

REHMAN, Obaid Ur; RYAN, Michael J. A framework for design for sustainable future-proofing. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 715–726, 2018.

RICCI, G. F. *et al.* Effectiveness and feasibility of different management practices to reduce soil erosion in an agricultural watershed. **Land Use Policy**, v. 90, n. November 2018, p. 104306, 2020.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SAHA, Sunil *et al.* Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 23, 2019.

SAMANTA, Sailesh *et al.* Flood risk analysis in lower part of Markham river based on multi-criteria decision approach (MCDA). **Hydrology**, v. 3, n. 3, p. 1–13, 2016.

SANTOS, Andréa Cristina Rodrigues dos *et al.* MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAOPEBA ATRAVÉS DO TauDEM E DINÂMICA DA COBERTURA VEGETAL E USO DA TERRA. p. 2438–2441, 2019.

SCOPESEI, C. *et al.* Land capability classification of Vernazza catchment , Cinque Terre National Park , Italy. **Journal of Maps**, v. 16, n. 2, p. 357–362, 2020.

SENTHILKUMAR, Mohanavelu; GNANASUNDAR, Devadasan; ARUMUGAM, Rethinam. Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravathi aquifer system, Tamil Nadu, South India. **Sustainable Environment Research**, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2019.

SHARMA, Tejpal; SINGH, Omvir. Soil erosion susceptibility assessment through geo-statistical multivariate approach in Panchkula district of Haryana, India. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 2, p. 733–753, 18 jun. 2017.

SINDHU, D. *et al.* Quantitative Analysis of Catchment Using Remote Sensing and Geographic Information System. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1421–1428, 2015.

TALUKDAR, Swapan *et al.* Flood susceptibility modeling in Teesta River basin, Bangladesh using novel ensembles of bagging algorithms. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 34, n. 12, p. 2277–2300, 4 dez. 2020.

TASHAYO, Behnam *et al.* Combined Fuzzy AHP–GIS for Agricultural Land Suitability Modeling for a Watershed in Southern Iran. **Environmental Management**, v. 66, n. 3, p. 364–376, 1 set. 2020.

TEGEBU, Fredu Nega; SEID, Edris Hussein. Quantifying the Road Influence Zone on Socio-economic Developments in Rural Tigray, Ethiopia. **African Development Review**, v. 29, n. 4, p. 601–614, 1 dez. 2017.

THOMPSON, Fabiano *et al.* Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135914, fev. 2020.

UFV, Universidade Federal de Viçosa; UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais; RENOVA, Fundação. **Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce**. Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018a.

UFV, Universidade Federal de Viçosa; UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais; RENOVA, Fundação. **Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce**. Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018b.

UPWANSHI, Mitina *et al.* Delineation of potential groundwater recharge zones using remote sensing, GIS, and AHP approaches. **Urban Climate**, v. 48, 1 mar. 2023.

USDA, SCS. National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4. **United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10)**, 1972.

USTAOGLU, E.; SISMAN, S.; AYDINOGLU, A. C. Determining agricultural suitable land in peri-urban geography using GIS and Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques. **Ecological Modelling**, v. 455, 1 set. 2021.

WANG, Shuo *et al.* Analysis of runoff generation driving factors based on hydrological model and interpretable machine learning method. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 42, 1 ago. 2022.

XIAO, Yangfan; YI, Shanzhen; TANG, Zhongqian. Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. **Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 1034–1046, 2017.

YAO, Lei; WEI, Wei; CHEN, Liding. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893–905, 2016.

ZADEH, Lotfi A. **Fuzzy sets. Information and control**, 1965.

ZELLNER, Moira *et al.* Exploring the effects of green infrastructure placement on neighborhood-level flooding via spatially explicit simulations. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 59, p. 116–128, 2016.

ZHANG, Jiaqi *et al.* Understanding the re-infiltration process to simulating streamflow in North Central Texas using the WRF-hydro modeling system. **Journal of Hydrology**, v. 587, 1 ago. 2020.

ZHOU, Wenjie *et al.* Impacts of rainfall spatial and temporal variabilities on runoff quality and quantity at the watershed scale. **Journal of Hydrology**, v. 603, 1 dez. 2021.

ZULKARNAIN; PRAWIRA, Indra; DJAMALUDIN, Owin Jamasy. Determination of Spatial Planning Area Criteria in the Perspective of Regional Autonomy to Ensure Sustainability of Land Resources (Case Study in the Province of East Kalimantan and North Kalimantan Province). **International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding**, n. 38, p. 463–479, 2020.

3 ARTIGO 2: IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL AGROPECUÁRIO DA BACIA DO RIO PARAPEBA COM BASE EM ASPECTOS AGRONÔMICOS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

3.1 Resumo

A crescente demanda por alimento e recursos naturais tem demandado um aumento da capacidade produtiva dos agroecossistemas, o qual deve ocorrer de forma eficiente e sustentável. Neste contexto, neste estudo buscou-se desenvolver uma metodologia que integra a classificação de capacidade de uso da terra com características econômicas, a fim de identificar áreas prioritárias para o desenvolvimento agropecuário em nível de bacia hidrográfica. Foram utilizados como critérios as variáveis balanço hídrico climatológico simplificado, classificação de capacidade de uso da terra, rendimento por hectare e distância às estradas. A integração dos critérios selecionados foi realizada por meio da Análise de Decisão Multicritério (MCDA) associada a Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A metodologia *fuzzy* foi aplicada no processo de reescalonamento dos critérios permitindo, assim, a comparação e estabelecimento do peso dos critérios através do Processo de Hierarquização Analítica (AHP). Por fim, o potencial agropecuário foi dividido em cinco classes: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. As principais classes de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba foram alto e baixo. Sendo as regiões de alto potencial localizadas principalmente Baixo Paraopeba e a margem esquerda do rio. Enquanto as de baixo potencial estão localizadas, principalmente, na região do Alto Paraopeba à margem direita do rio. Os municípios com maior rendimento por hectare possuem suas áreas de cultivo localizadas em áreas de potencial agropecuário alto e muito alto enquanto os municípios com menor potencial possuem suas áreas de cultivo localizadas em regiões com potencial agropecuário baixo e muito baixo. O que comprova a eficácia da metodologia apresentada em identificar o potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba.

Palavras-chave: Conservação de solo e água; produção agropecuária; gestão e manejo de recursos hídricos.

3.2 Abstract

The growing demand for food and natural resources has required an increase in the productive capacity of agroecosystems, which must occur efficiently and sustainably. In this context, this study sought to develop a methodology that integrates the classification of land use capacity with economic characteristics to identify priority areas for agricultural development. The variables used as criteria were simplified climatological water balance, classification of land use capacity, yield per hectare, and distance to roads. The integration of the selected criteria was performed with the aid of Multicriteria Decision Analysis (MCDA) associated with Geographic Information Systems (GIS). The fuzzy methodology was applied to rescale the criteria and allow them to be compared through the Analytical Hierarchy Process (AHP) to determine the weight of each criterion. Finally, the agricultural potential was classified into five classes: very low, low, moderate, high, and very high. The main classes of agricultural potential for the Paraopeba River basin were high and low. The regions with high potential are mainly in the Lower Paraopeba and on the left bank of the river. While those with low potential are mainly in the Upper Paraopeba region on the right bank of the river. The municipalities with the highest yield per hectare have their crop in areas with high and very high agricultural potential, while the municipalities with the lowest potential have their cultivation areas in regions with low and very low agricultural potential. This proves the effectiveness of the methodology presented in identifying the agricultural potential of the Paraopeba River basin.

Keywords: Soil and water conservation; agricultural potential; water resources management and planning.

3.3 Introdução

Com o constante aumento populacional, é necessário que novas áreas sejam incorporadas ao sistema de produção agropecuário para atender a demanda mundial por alimento (ÖZKAN; DENGIZ; TURAN, 2020). No entanto, a expansão da fronteira agrícola tem sido dificultada por questões ambientais, socioeconômicas e conflito com os diferentes usos da terra.

Desta forma, a identificação e destinação de áreas com maior potencial para o setor agrícola considerando os aspectos agronômicos, ambientais e socioeconômicos, são essenciais para o desenvolvimento sustentável e eficiente da agricultura e, conseqüentemente, para minimizar os impactos ambientais negativos, promover a conservação dos solos e garantir a viabilidade econômica e ambiental das propriedades rurais (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; ÖZKAN; DENGIZ; TURAN, 2020; TASHAYO et al., 2020).

Ademais, identificar áreas com maior potencial agropecuário proporciona benefícios expressivos, tais como, aumento da produtividade, redução de custos de produção e mitigação de riscos ambientais (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013). Além disso, permite o planejamento e a implementação mais precisa de práticas agrícolas sustentáveis contribuindo, portanto, para o desenvolvimento socioeconômico das regiões rurais (BINTE MOSTAFIZ; NOGUCHI; AHAMED, 2021).

O uso da terra de forma racional é a principal maneira de otimizar a produção agrícola e maximizar a rentabilidade das atividades agropecuárias. Contudo, para fazer o uso racional da terra é fundamental conhecer sua capacidade de uso, de modo que a intensidade de uso aplicada à terra não proporcione a diminuição da sua capacidade produtiva a médio e longo prazo (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; BINTE MOSTAFIZ; NOGUCHI; AHAMED, 2021; COSTA et al., 2019). A capacidade de uso da terra para a exploração agropecuária depende de suas características pedológicas, topográficas e das características climáticas local (PRUSKI, 2009).

Segundo Lepsch et al., (2015), utilizar o solo conforme sua capacidade de uso é o primeiro passo para a conservação do solo, sendo uma ferramenta crucial no uso racional da terra, pois permite identificar as aptidões e limitações do solo para diferentes tipos de cultivos. Usar a terra conforme sua capacidade eleva a produtividade ao seu nível máximo de rendimento, e tornando o sistema de produção

mais eficiente, racional e intensivo, sem proporcionar sua degradação (Pruski, 2009; Scopesi et al., 2020).

Associar a ocupação da terra, que envolve o estudo das práticas agrícolas vigentes e o uso atual da terra, com análises de rentabilidade econômica, oferecem uma visão holística que auxilia na tomada de decisões mais assertivas quanto à escolha de novas áreas, bem como o melhor manejo de áreas já produtivas (KARIDJO et al., 2018; TASHAYO et al., 2020).

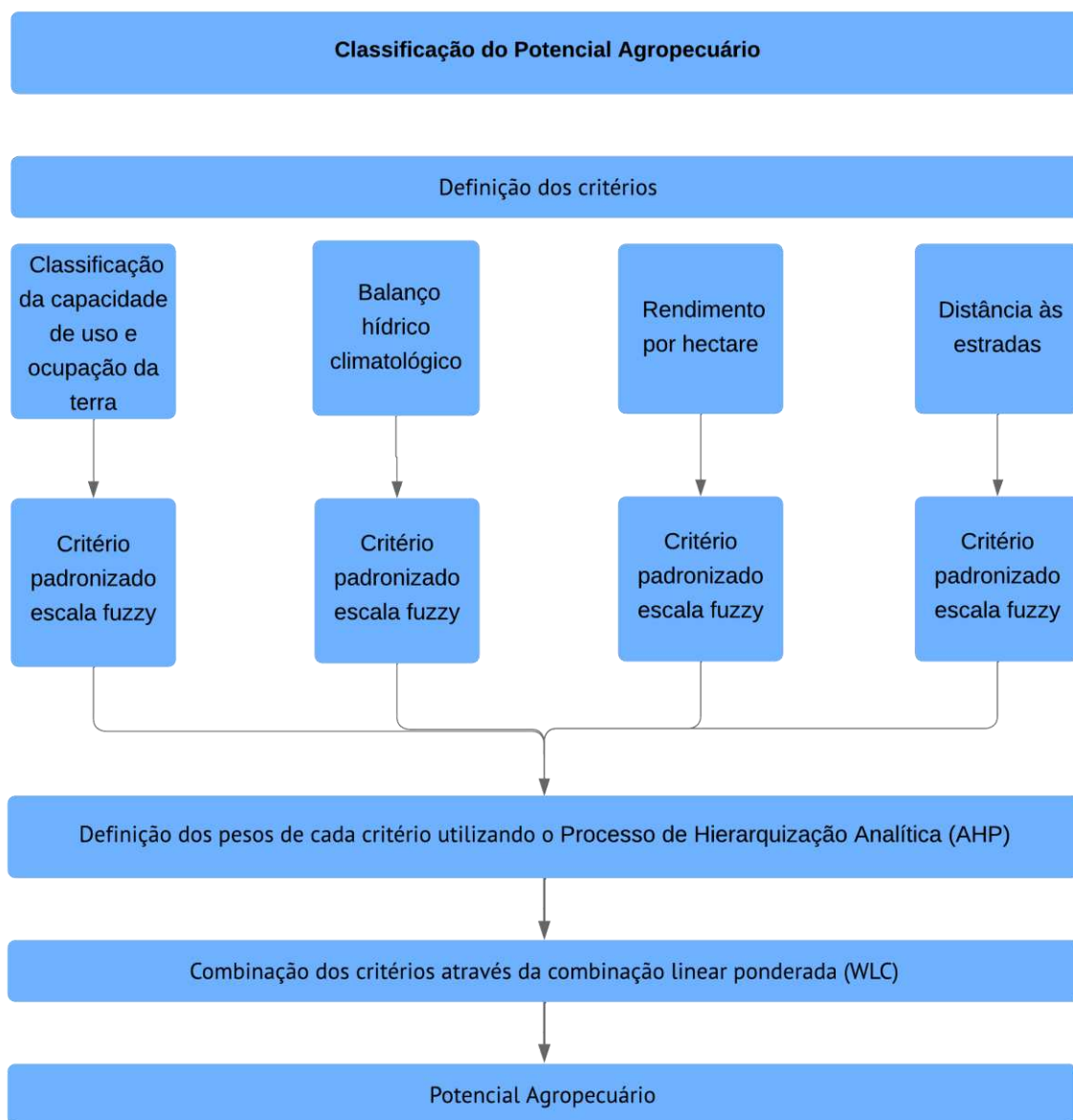
Vários estudos visaram identificar áreas com maior potencial agropecuário (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; BINTE MOSTAFIZ; NOGUCHI; AHAMED, 2021; MARCOS-MARTINEZ et al., 2017; OSTOVARI et al., 2019; ÖZKAN; DENGIZ; TURAN, 2020; TASHAYO et al., 2020), contudo, alguns consideraram critérios relacionados apenas com as propriedades do solo e terreno, ou dados de campo, não disponíveis em outras áreas. Taveira (2019) apontam que apesar da importância de se considerar fatores socioeconômicos na classificação da capacidade de uso da terra, poucos são os trabalhos que o consideraram. Özkan, Dengiz e Turan (2020) sugerem que a inclusão de dados socioeconômicos é fundamental para a análise do potencial agropecuário e, desta forma, deve ser incorporada na etapa do planejamento do uso da terra.

Neste estudo buscou-se desenvolver uma metodologia que integra a classificação de capacidade de uso da terra com características econômicas, a fim de identificar áreas prioritárias para o desenvolvimento agropecuário em nível de bacia hidrográfica. A aplicação dessa metodologia busca fornecer subsídios para políticas públicas e estratégias de expansão agrícola promovendo a sustentabilidade e a eficiência na utilização dos recursos naturais.

3.4 Metodologia

As etapas da metodologia proposta para a identificação e priorização de áreas com potencial para uso agropecuário estão apresentadas no fluxograma da Figura 3-1.

Figura 3-1. Fluxograma da elaboração da metodologia para classificação do Potencial Agropecuário



3.4.1 Área de estudo

Para aplicação e avaliação da metodologia proposta, foi selecionada a bacia do Rio Paraopeba (Figura 3-2), que é uma importante sub-bacia da bacia do Rio São Francisco, e está localizada na região central de Minas Gerais, próximo a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH.

A bacia do rio Paraopeba possui uma área de drenagem de aproximadamente 12.054km² e abrange 48 cidades no estado de Minas Gerais. Os principais usos da

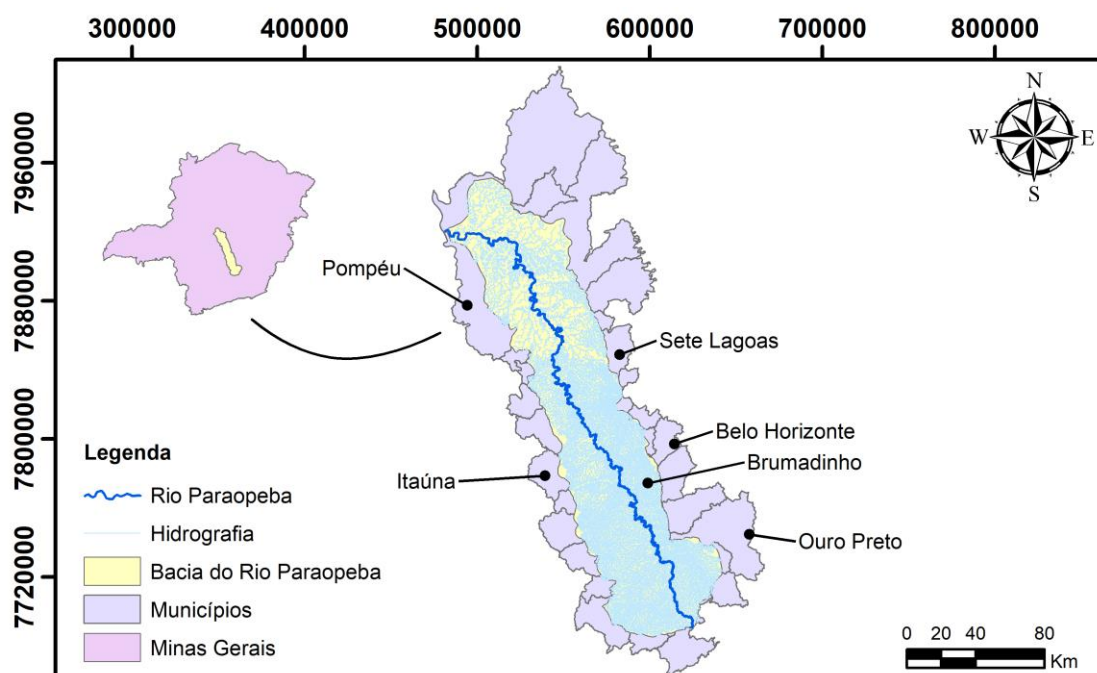
água da bacia do rio Paraopeba são: geração de energia elétrica; abastecimento público e abastecimento industrial, com destaque para mineração e irrigação (CPRM, 2020).

A bacia abastece cerca de 5,15 milhões de habitantes na RMBH, possuindo três reservatórios para abastecimento: rio Manso (Manso), ribeirão Juatuba (Serra Azul) e rio Betim (Várzea das Flores). Além disso, para geração elétrica, a bacia do rio Paraopeba possui as usinas hidrelétricas de Salto do Paraopeba e Retiro Baixo, e a barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé, além de afluir para o reservatório de Três Marias (CPRM, 2020).

O uso e ocupação da bacia do Rio Paraopeba é bem diverso, envolvendo atividades agropecuária (predominância de pecuária), mineração, extração de areia e argila e indústrias automobilísticas. A bacia do Rio Paraopeba é uma das regiões de maior importância econômica para o estado de Minas Gerais, e contempla o segundo polo industrial do país (CALAZANS et al., 2018).

A dinâmica econômica da bacia do rio Paraopeba é bem variada, possuindo atividades dos três setores (primário, secundário e terciário). Em relação ao setor primário, a atividades agrosilvopastoris são de extrema importância na bacia.

Figura 3-2. Área de estudos.



Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Zona 23S

Fonte: Autora

3.4.2 Classificação do solo conforme capacidade de uso e ocupação da terra e rentabilidade econômica

A escolha dos critérios para um processo de priorização de potenciais é um passo fundamental e dependente da representação do fenômeno desejado e também da disponibilidade de dados (DOS SANTOS et al., 2019; MERROUNI et al., 2018; XIAO; YI; TANG, 2017). Diversos são os critérios que interferem no potencial agropecuário de uma região, contudo, é necessário analisar quais critérios possuem bases de dados disponíveis e de livre acesso, e dentre estes, escolher aqueles que são mais representativos e não possuem correlação entre si (HAN et al., 2021), uma vez que a utilização de muitos critérios torna a análise mais complexa e difícil de ser realizada (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; ÖZKAN; DENGİZ; TURAN, 2020).

Para o desenvolvimento da metodologia proposta no presente trabalho para identificar áreas com maior potencial agropecuário foram utilizadas como critérios as seguintes variáveis: classe de capacidade de uso da terra, balanço hídrico climatológico simplificado, rendimento da produção por hectare e distância às estradas.

Este trabalho visou identificar o potencial agropecuário de forma geral, sem considerar uma cultura específica, portanto, critérios como acesso a recursos hídricos, temperatura e atributos químicos do solo não foram considerados (AKINCI; ÖZALP; TURGUT, 2013; BINTE MOSTAFIZ; NOGUCHI; AHAMED, 2021). Apesar dos atributos químicos do solo serem importantes, muitos são passíveis de correção, e portanto, não foram considerados neste estudo (CALEGARIO et al., 2020; TASHAYO et al., 2020).

A precipitação apesar de ser considerada em outros estudos (BINTE MOSTAFIZ; NOGUCHI; AHAMED, 2021; HAN et al., 2021), não foi considerada de forma isolada neste estudo, e sim através do balanço hídrico climatológico simplificado (BHC). Na sequência serão descritos os procedimentos metodológicos para obtenção dos critérios selecionados.

3.4.2.1 Classificação da capacidade de uso e ocupação da terra

A classificação das áreas conforme sua capacidade de uso foi baseado nos critérios apresentados por Rio Grande do Sul (1979) e Lepsch et al. (2015), que adaptaram a classificação proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1972) para os solos e clima brasileiros. O critério fertilidade aparente não foi considerado, uma vez que, em um planejamento conservacionista/agrícola, esse parâmetro é passível de correção (CALEGARIO et al., 2020; MONTEIRO et al., 2018). Na Tabela 3-1 estão apresentadas as classes de capacidade de uso da terra. A classificação do componente principal do solo está apresentada no **Apêndice C**.

Tabela 3-1- Descrição das Classes de Capacidade de uso da terra (CCU)

CCU	Descrição
I	Terras próprias para todos os usos, inclusive para cultivos agrícolas intensivos sem necessitar de práticas intensivas de conservação
II	Terras próprias para culturas com práticas simples de conservação
III	Terras próprias para culturas com práticas intensivas ou complexas de conservação
IV	Terras próprias para culturas anuais ocasionais, cultivos perenes limitados e culturas em rotação com pastagens, florestas e proteção de fauna e floras silvestre
V	Terras com pouco ou nenhum risco de erosão, mas com limitações impraticáveis de serem removidas, o que limita muito a sua utilização, sendo, por isso, mais apropriadas para pastagens, reflorestamento ou vida silvestre;
VI	Terras com limitações severas, geralmente inadequadas para cultivos e uso limitado para pastagens, florestas cultivadas ou nativas para refúgio de flora e fauna silvestre
VII	Terras com limitações muito severas, inadequadas para lavouras e de uso restrito para pastagens, florestas cultivadas e refúgio de flora e fauna silvestre
VIII	Terras com limitações que impedem seu uso para qualquer atividade agrícola, restringindo-as à recreação e/ou proteção da flora e fauna silvestres ou ainda armazenamento de águas (represamentos).

Fonte: (LEPSCH et al., 2015)

O mapa de declividade foi obtido a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistido (MDEHC) da bacia hidrográfica em estudo e reclassificado conforme as oito classes de capacidade de uso da terra, as quais estão apresentadas na Tabela 3-2. O MDEHC foi obtido com base no modelo digital de elevação NASADEM com resolução de 30m (NASA, 2020).

Tabela 3-2 - Intervalos atribuídos às classes de declividade para obtenção da capacidade de uso da terra conforme Monteiro et al., (2018).

Valores de Declividade (%)	Classe de Capacidade de Uso
0-2	I
2-5	II
5-10	III
10-20	IV
20-30	V
30-45	VI
45-70	VII
>70	VIII

3.4.2.2 Balanço hídrico climatológico simplificado

A disponibilidade de água é fator essencial para o desenvolvimento agropecuário. O balanço hídrico climatológico simplificado (BHC) foi utilizado para determinar áreas com excedente hídrico, conforme Equação 3-1. Para a determinação do BHC, considerou os dados de precipitação (entrada) e evapotranspiração (saída), conforme descrito em RENOVA-UFV (2018).

$$BHC = PT - ET \quad (3 - 1)$$

sendo, BHC = balanço hídrico climatológico simplificado; PT = precipitação; ET = evapotranspiração

Os dados de precipitação e de evapotranspiração foram estimados através de dois produtos de sensoriamento remoto. Os dados de evapotranspiração foram obtidas para o período de 2000 a 2022 provenientes do Espectro Radiômetro de Imagem de Resolução Moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS*) (500x500m) produto MOD16A3GF Versão 6.1 (USGS, 2023)

(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv061>). Enquanto os dados de precipitação foram obtidos da base de dados provenientes do *TerraClimate* (4x4km) para o mesmo período (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>).

3.4.2.3 Rendimento por hectare

Para obter a variável rendimento, foram utilizados três bases de dados diferentes, uma para cada um dos tipos de atividades agrícolas existentes na bacia do Rio Paraopeba: Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (IBGE, 2022a); Lavouras Temporárias (IBGE, 2022b); e Lavouras Permanentes (IBGE, 2022c). Essas bases de dados contém o valor da produção agrícola e a área destinada à colheita da respectiva produção por município para o ano de 2022.

O valor de rendimento por hectare de cada município foi obtido dividindo a soma de todas as produções pela área total destinada as respectivas produções de cada município. Essa metodologia foi também utilizada por Marcos-Martinez et al., (2017) para definição dos preços comerciais para venda de cereais e de gado, considerando dados de 1992-2010. Os valores de rendimento por hectare para cada tipo de produção e respectivas áreas estão apresentados no Apêndice E.

O uso e ocupação da terra foi obtido junto ao portal Mapbiomas para o ano de 2022 e reclassificado em seis classes de uso e ocupação da terra, conforme apresentado no **Apêndice B**.

O valor do rendimento por hectare de cada município foi atribuído as regiões cujo uso e ocupação da terra corresponde ao uso agropecuário (pastagem, cultivo temporário, cultivo permanente e silvicultura). Para as áreas em que o uso e ocupação da terra corresponde ao uso florestal e formação natural não florestal foi atribuído o rendimento R\$0,00, por não serem consideradas áreas produtivas. Foram excluídas da análise, as áreas que não se enquadram no escopo da pesquisa, como áreas não vegetadas e corpos hídricos.

3.4.2.4 Distância às estradas

Considerando que as estradas contribuem para o desenvolvimento do setor agropecuário e florestal por facilitarem o acesso e escoamento da produção (Ramos et al., 2024; Ustaoglu; Sisman; Aydinoglu, 2021), adotou-se que quanto mais próximo a estradas maior o potencial agropecuário.

A distância às estradas foi determinada por meio da distância euclidiana de cada pixel em relação às estradas, sendo utilizado o mapeamento de estradas estaduais e federais disponibilizado pelo Mapbiomas (MAPBIOMAS, 2019).

3.4.3 Análise multicritério

Na aplicação da análise multicritério foi utilizada a técnica de combinação ponderada, onde os critérios foram reescalados e ponderados a partir de um conjunto de pesos que permitiu a hierarquização dos critérios (Lorentz et al., 2016; Miranda et al., 2012). Para o reescalonamento das variáveis foi utilizado o conceito *fuzzy*, que utiliza as diferenças dentro de cada fator e assume uma função de distribuição matemática que melhor explica a variação do fator (Fraga et al., 2019). O reescalonamento foi realizado na escala de 0 a 1, seguindo uma função linear para todos os critérios, sendo padronizado que quanto maior o valor, maior a aptidão do critério para o objetivo desejado.

A definição dos pesos de cada critério na análise multicritérios seguiu a metodologia proposta por Thomas Saaty (SAATY, 1990), que se baseia na elaboração de uma matriz de comparação dos critérios em pares (FRAGA et al., 2019; LEAL, 2020). Para elaboração dessa matriz, os critérios foram hierarquizados com base em sua importância relativa para o objetivo final (POURGHASEMI; PRADHAN; GOKCEOGLU, 2012). A utilização desta metodologia possibilitou diminuir a subjetividade das interpretações, proporcionando maior confiança aos resultados e decisões (MIHI; BENARFA; ARAR, 2020; SAATY, 1980).

Na análise AHP, os critérios são comparados entre si e os pesos são atribuídos a cada comparação, baseado na importância dos critérios para o fenômeno especificado. Os valores dos pesos variam de 1 a 9, sendo 1 considerado como igual importância e 9 considerado como extrema importância (DAHRI; ABIDA, 2017; MIHI; BENARFA; ARAR, 2020), conforme Tabela 3-3 (DAHRI; ABIDA, 2017; MIHI; BENARFA; ARAR, 2020).

Tabela 3-3. Escala de atribuição dos valores dos pesos segundo a metodologia AHP

1	1/3	1/5	1/7	1/9
MAIS IMPORTANTE	Pouco	Muito	Bastante	Extremamente
	MENOS IMPORTANTE			

Após a atribuição dos pesos, a consistência dos pesos dados aos critérios foi avaliada por meio da taxa de consistência (CR), que pode variar de 0 a 1, sendo considerado aceitáveis valores de CR menores do que 0,10 (MIHI; BENARFA; ARAR, 2020; SAATY, 1980).

Após integração dos critérios para obtenção do mapa do potencial agropecuário, o mesmo foi categorizado em seis classes de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Para o processo de categorização foi utilizado o método distribuição de classes com intervalos iguais, por ser uma técnica amplamente utilizada em análises cartográficas temáticas (Ferreira, 2016), por dividir o intervalo da faixa de valores, no caso do presente trabalho de 0 a 1, em intervalos iguais.

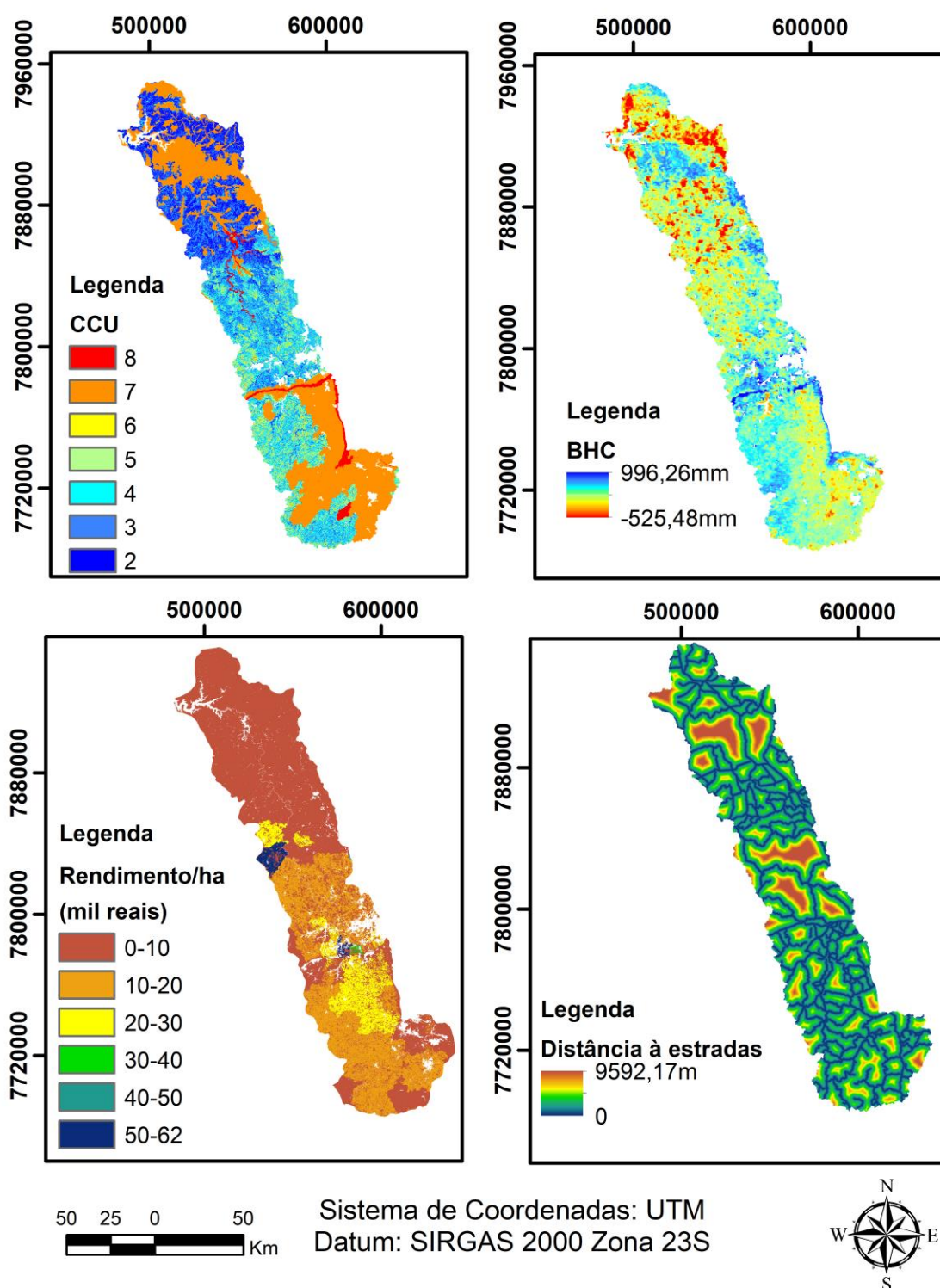
3.5 Resultados

3.5.1 Critérios utilizados

Na

Figura 3-3 são apresentados os mapas de distribuição espacial dos critérios classificação da capacidade de uso da terra (Figura 3-2a), balanço hídrico climatológico simplificado (Figura 3-2b), rendimento por hectare (Figura 3-2c) e distância às estradas (Figura 3-2d) utilizados para elaboração do mapa de potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba.

Figura 3-3 Critérios utilizados para elaboração do mapa de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Autora

Na bacia do Rio Paraopeba, observa-se áreas com capacidade de uso e ocupação da terra variando de classes II até VIII, com predominância das classes IV e VII, correspondendo a 51,2% da bacia em estudo, as quais são destinadas à

pecuária e silvicultura. Esses resultados evidenciam que a bacia do rio Paraopeba, de maneira geral, tem uma "boa" adequação de uso da terra, por apresentarem uso e ocupação da terra correspondente a sua capacidade de uso, já que a 46,1% da bacia é composta por pastagem (40,8%) e silvicultura (5,3%).

As classes destinadas ao cultivo intensivo (classes II e III) correspondem a uma área de 21,8% da bacia com predominância nas áreas do Baixo Paraopeba, próximo a foz da bacia. Essa é uma região com predominância de Latossolos, que são solos bem estruturados, profundos e em geral possuem bom potencial de infiltração (Coelho et al., 2024) o que favorece o uso agropecuário na região.

Na região do Alto Paraopeba, por ser uma região serrana, o principal fator limitante para o uso da terra foi a declividade. Esta região é composta por Neossolo Litólico, um solo que possui alta erodibilidade, e rochas ígneas, de baixa porosidade, o que aliado a alta declividade, favorece a perda de solo e, conseqüentemente, favorece o aparecimento de áreas de afloramento rochoso. Além disso, essa é uma região que também possui alto excedente hídrico, pois além de apresentar alta precipitação e baixa evapotranspiração. Desta forma, é necessário que medidas sejam tomadas a fim de favorecer a infiltração de água no local por dois principais motivos:

- 1) Por possuir um grande excedente hídrico e baixo potencial de infiltração, esta região pode contribuir potencialmente para a geração de escoamento superficial e processo erosivo, aumentando a vulnerabilidade da bacia.
- 2) Esta é uma região com atividade mineradora, que possivelmente podem contribuir para o aumento da carga de poluentes, que podem ser transportados pelo escoamento superficial.

Já para a região do Baixo Paraopeba, o fator limitante para a capacidade de uso da terra foi o solo. Nesta região predomina Cambissolos, que são solos rasos e com baixo potencial de infiltração. Sendo assim, é necessário que medidas sejam tomadas a fim de se garantir a capacidade de infiltração de água nessa região, visto ser uma área com grande excedente hídrico.

O segundo critério utilizado foi o balanço hídrico climatológico simplificado. Em geral a bacia do Rio Paraopeba apresenta mais áreas de excedente hídrico do que áreas com déficit hídrico, corroborando com os resultados obtidos por Coelho et al. (2024). Áreas de excedente hídrico podem ser consideradas benéficas para produção

agropecuária, uma vez que BHC positivo é indicativo de elevada disponibilidade de água ao longo do ano.

As áreas com déficit hídrico, em sua maioria, estão localizadas no Baixo Paraopeba, que coincidem com as áreas com capacidade de uso da terra adequadas para cultivo intensivo (classes II e III). Isso é possível porque o sistema de classificação de uso da terra considera apenas as características do solo e do relevo e desconsidera as características climáticas. Contudo, segundo Pacheco e Pissarra (2023), esta região recebe uma grande contribuição de água subterrânea, o que pode explicar a expressiva área de cultivo irrigado nesta região.

As áreas com maior excedente hídrico coincidem com as classes de uso VII e VIII, classes destinadas a pastagens e conservação, respectivamente. Esta região coincide com as áreas de maior precipitação, que aliada a vegetação de menor porte, contribui para os valores elevados de BHC. Segundo Cheng et al. (2017), quanto maior porte e adensamento dessas florestas, maior a taxa de evapotranspiração.

Em relação ao critério rendimento por hectare, o município de Caetanópolis obteve o menor valor para o ano de 2022, sendo que o cultivo mais rentável, foi o de lavoura permanente. Em contraste, o município de Pequi, obteve o maior rendimento por hectare, sendo o cultivo de lavouras temporárias mais rentável. A média de rendimento por hectare para toda a bacia do Rio Paraopeba foi de R\$15.133,86, sendo que, de maneira geral, as áreas com cultivo permanente foram as mais rentáveis. Uma limitação deste critério, é que ele não distingue os rendimentos relativos à criação de animais, por exemplo, não separa o rendimento de bovinos para corte e para produção de leite.

O critério distância às estradas buscou avaliar a facilidade de escoamento da produção e acesso às propriedades. A maior parte da bacia do Rio Paraopeba possui distância às rodovias menor do que 2km. Tegebu e Seid (2017) ao pesquisar a influência de estradas no desenvolvimento socioeconômico, notou que os investimentos na agricultura diminuem com distâncias acima de 1,5km. Tal fato pode ser também evidenciado na bacia do Rio Paraopeba, onde as maiores distâncias são observadas em áreas com uso e ocupação formação natural não florestal, silvicultura ou área florestal. As menores distâncias, por sua vez, são mais predominantes nas áreas cujo uso e ocupação da terra é pastagem e lavouras (temporárias ou permanentes). Contudo, destaca-se que este critério considerou apenas as rodovias

estaduais e federais, por serem dados oficiais disponibilizados, desta forma, muitas estradas vicinais não foram representadas neste critério. No entanto, vale ressaltar que a bacia do Rio Paraopeba é bem desenvolvida, possuindo o segundo maior polo industrial do país (CALAZANS et al., 2018) e, portanto, é uma região bem servida de rodovias, o que favorece a predominância de pequenas distâncias às rodovias.

3.5.2 Análise multicritério e Processo de Hierarquização Analítica (AHP)

A Tabela 3-4 apresenta os critérios utilizados na análise multicritério, bem como as funções de reescalonamento, os valores limites e os pesos obtidos pela análise AHP.

Tabela 3-4. Critérios, funções e pesos atribuídos para a identificação do potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba

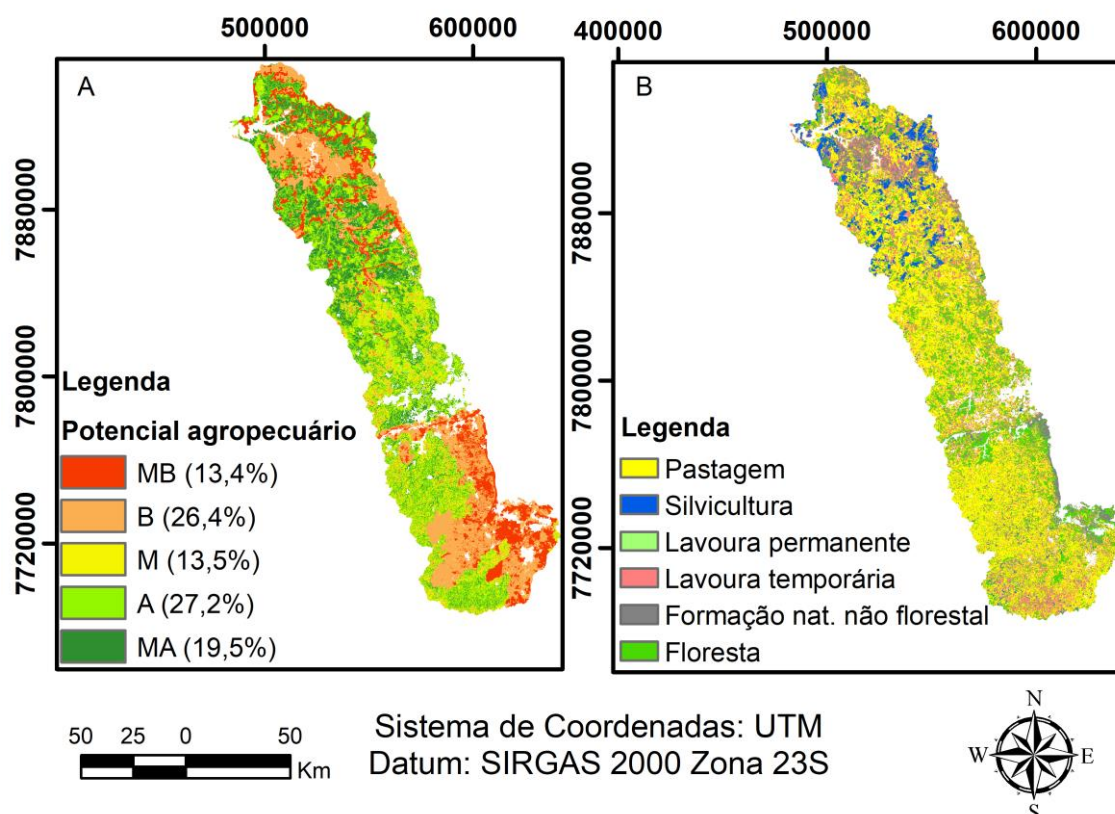
Identificação do potencial agropecuário da bacia do Rio Paraopeba (CR = 0,043)				
Critérios	Função <i>fuzzy</i>	Limites		Peso (%)
		Min.	Máx.	
Classificação de capacidade de uso da terra	Linear decrescente	2	8	56,5
Balanço hídrico climatológico simplificado	Linear crescente	0	996	26,2
Rendimento por hectare	Linear crescente	0	62000	11,8
Distância às estradas	Linear decrescente	0	9592	5,5

Os histogramas dos critérios capacidade de uso da terra, rendimento por hectare e distância às estradas não apresentarem nenhum deslocamento, e, portanto, todos os valores foram utilizados. Para critério BHC, considerou-se que apenas as áreas com excedente hídrico possuem potencial agropecuário, sendo o valor zero atribuído a todas as áreas de déficit hídrico, portanto, apenas os valores positivos foram utilizados. Ressalta-se que a matriz estabelecida para fazer a avaliação comparativa dos critérios e obtenção dos seus respectivos pesos finais para a análise multicritérios foi adequada, apresentando um uma taxa de consistência igual a 0,043, ou seja, menor do que o mínimo necessário para aceitar a atribuição dos pesos finais dos critérios utilizados em uma análise multicritérios.

3.5.3 Potencial Agropecuário

Na Figura 3-4 tem-se a variabilidade espacial do potencial agropecuário (Figura 3-3a) e do uso e ocupação da terra da bacia do Rio Paraopeba (Figura 3-3b).

Figura 3-4. Identificação do potencial agropecuário (A) e uso e ocupação da terra para o ano de 2022 (B) da bacia do Rio Paraopeba



MB = Muito baixo potencial agropecuário; B = Baixo potencial agropecuário; M = Moderado potencial agropecuário; A = Alto potencial agropecuário; MA = Alto potencial agropecuário. Fonte: (A) Autora, (B) Mapbiomas (2024) adaptado.

Na bacia do Rio Paraopeba há uma maior frequência de potencial agropecuário baixo (26,4%) e alto (27,2%), totalizando juntos 53,6% da área da bacia. As áreas com alto potencial agropecuário encontram-se, predominantemente, no Baixo Paraopeba. Os pixels identificados com alto potencial agropecuário possuem baixa declividade, predominância de Latossolos e boa disponibilidade hídrica, tanto de águas superficiais quanto subterrâneas (Pacheco; Pissarra, 2023), o que favorece a exploração agrícola da região.

Algumas áreas no Baixo Paraopeba possuem potencial agropecuário baixo e muito baixo. Estas regiões são as áreas formadas por Cambissolos, cujo uso e ocupação da terra corresponde a formação natural não florestal.

As áreas de potencial agropecuário moderado estão, principalmente, na região do Médio Paraopeba e no Alto Paraopeba à margem esquerda do rio. Nesta região, o principal uso e ocupação da bacia correspondem à pastagem, lavouras permanentes e áreas florestais.

Na região do Alto Paraopeba à margem direita do rio, incluindo a Serra da Calçada, estão as áreas classificadas com potencial agropecuário baixo e muito baixo. Estas são as regiões de maior declividade, menor balanço hídrico e de menor potencial de infiltração.

Como descrito na Tabela 3-4, o critério capacidade de uso da terra, foi o critério de maior influência, e por esse motivo as áreas com alto e muito alto potencial agropecuário coincidem com as classes de uso da terra II e III. Enquanto as áreas classificadas com muito baixo e baixo potencial agropecuário são coincidentes com as classes de uso da terra VII e VIII.

O BHC, segundo critério de maior influência (Tabela 3-4), impactou de forma a melhorar a classificação da capacidade de uso da terra, permitindo maior flexibilidade no uso da terra. Na região do Baixo Paraopeba, há áreas com capacidade de uso classe II, porém nem todas possuem potencial agropecuário muito alto. Nestas áreas, há a ocorrência de déficit hídrico, o que contribuiu para a redução do potencial agropecuário, de muito alto para alto. Situação semelhante pode ser observado à margem direita do rio na região do Alto Paraopeba. Esta região possui classe de capacidade de uso VII e é possível notar o potencial agropecuário baixo e muito baixo, o que também coincide com as áreas de déficit hídrico.

A região do Baixo Paraopeba, apesar de apresentar relevo suave, possui um solo com baixo potencial agropecuário, sendo, portanto, o fator limitante. Já para as regiões de alto potencial agropecuário, a classe de solo também foi o fator de maior impacto. Ostovari et al. (2019) também encontraram o solo como fator de maior influência para determinação de áreas próprias para cultivo. Tashayo et al. (2020) e Han et al. (2021) encontraram que a textura do solo foi o principal critério seguido pela declividade para a determinação do potencial agropecuário. Solo e declividade são os

fatores que compõe o critério de capacidade de uso da terra, critério mais importante neste estudo.

Na Tabela 3-5 está apresentado o percentual de cada uso e ocupação da terra para o ano de 2022 (MAPBIOMAS, 2024) para cada classe de potencial agropecuário encontrado na bacia do Rio Paraopeba.

Tabela 3-5. Porcentagem de cada uso e ocupação da terra por classe de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba

Potencial	Floresta	Formação nat.	Temporária	Permanente	Silvicultura	Pastagem
Muito Baixo	25,9%	22,8%	11,4%	7,3%	9,4%	7,5%
Baixo	22,1%	57,5%	30,7%	11,7%	7,7%	24,7%
Moderado	21,7%	3,6%	10,6%	5,9%	15,2%	12,1%
Alto	21,2%	8,1%	26,2%	31,6%	46,3%	30,7%
Muito Alto	9,1%	8,0%	21,2%	43,5%	21,4%	24,9%

As áreas identificadas com potencial muito baixo e baixo, deveriam ser recomendadas para usos voltados a preservação e manutenção da cobertura do solo, como o uso florestal. Desta forma, é possível notar que o mais da metade (69,7%) das áreas florestais encontram-se em áreas de potencial agropecuário muito baixo a moderado. Enquanto 57,5% das formações naturais não florestais (correspondem a campos alagadas, áreas pantanosas, formação campestre e afloramento rochoso), consideradas impróprias para o cultivo, estão em áreas de baixo potencial agropecuário. Vale ressaltar que o uso e ocupação do solo não foi um critério considerado para elaboração do potencial agropecuário, sendo assim, os valores apresentados na Tabela 3-5 reforçam a coerência dos resultados apresentados.

É possível notar que há algumas discrepâncias entre o mapa de potencial agropecuário e o uso e ocupação da terra. A classe de baixo potencial agropecuário, contém 30,7% do cultivo de lavouras temporárias da bacia do Rio Paraopeba, localizadas, principalmente na região do Baixo Paraopeba. Apesar do Baixo Paraopeba possuir baixa declividade, a região possui áreas de déficit hídrico. Um fator que possivelmente viabiliza o cultivo nestas áreas de baixo potencial é o cultivo irrigado com maior disponibilidade de água através de reservatórios e baixa declividade, que favorece a agricultura em grande escala, já que esta é uma região com expressiva presença de cultivo irrigado por pivô central.

Já para o cultivo de culturas permanentes, 31,6% e 43,5% se encontram em áreas de potencial agropecuário alto e muito alto, respectivamente. No Apêndice E estão apresentados os rendimentos por hectare para cada tipo de cultivo por município. O município de Paraopeba obteve o maior rendimento por hectare para o cultivo de culturas permanentes, e encontra-se em uma área com potencial alto a muito alto. Já o município de Resende Costa, localizado no Alto Paraopeba à margem esquerda do rio, apresentou o menor rendimento por hectare para o cultivo de culturas permanentes. No município, a maioria das áreas de cultivo estão localizadas em áreas de potencial baixo a muito baixo.

O município de Pequi obteve o maior rendimento por hectare, sendo cultivo de lavouras temporárias o mais rentável. Ao analisar a localização das áreas de cultivo, nota-se que estão em áreas de potencial agropecuário muito alto. Para o município de São Joaquim de Bicas, com segundo maior rendimento por hectare, é possível notar uma distribuição semelhante ao município de Pequi.

Tais fatos demonstram uma relação entre o potencial agropecuário e o rendimento da produção, o que também foi observado por outros autores (Binte Mostafiz; Noguchi; Ahamed, 2021; Han et al., 2021; Tashayo et al., 2020).

3.6 Conclusões

Após análise dos resultados foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Os municípios com maior rendimento por hectare possuem suas áreas de cultivo localizadas em áreas de potencial agropecuário alto e muito alto, enquanto os municípios com menor potencial possuem suas áreas de cultivo localizadas em regiões com potencial agropecuário baixo e muito baixo evidenciando, desta forma, a eficácia da metodologia em identificar o potencial agropecuário da região da bacia do Rio Paraopeba.
- As principais classes de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba foram alto e baixo. Sendo as regiões de alto potencial localizadas principalmente Baixo Paraopeba e a margem esquerda do rio. Enquanto as de baixo potencial estão localizadas, principalmente, na região do Alto Paraopeba à margem direita do rio.

REFERÊNCIAS

- ABIJITH, D. et al. GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. **HydroResearch**, v. 3, p. 1–14, 2020.
- ABREU, L. M. DE et al. Escolha De Um Programa De Controle Da Qualidade Da Água Para Consumo Humano : Aplicação Choice of a Water Quality Control Program for Human Consumption : Application of the Ahp Method. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 257–262, 2000.
- ACHU, A. L.; REGHUNATH, R.; THOMAS, J. Mapping of Groundwater Recharge Potential Zones and Identification of Suitable Site-Specific Recharge Mechanisms in a Tropical River Basin. **Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 1, p. 131–145, 2020.
- AKINCI, H.; ÖZALP, A. Y.; TURGUT, B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 71–82, 2013.
- BINTE MOSTAFIZ, R.; NOGUCHI, R.; AHAMED, T. Agricultural land suitability assessment using satellite remote sensing-derived soil-vegetation indices. **Land**, v. 10, n. 2, p. 1–26, 1 fev. 2021.
- BRASIL. **Lei nº 12.651/2012, de 25 de maio da Casa Civil**BRASIL, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 29 jan. 2019
- CALAZANS, G. M. et al. The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 8, 2018.
- CALEGARIO, A. T. et al. Land use capability at recharge zones. **Soil Use and Management**, n. March, 2020.
- CÁRCELES RODRÍGUEZ, B. et al. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. **Soil Systems**, v. 6, n. 4, p. 1–37, 2022.
- COSTA, R. C. A. et al. Land Use Policy Land capability of multiple-landform watersheds with environmental land use conflicts. **Land Use Policy**, v. 81, p. 689–704, 2019.
- CPRM, C. D. P. D. R. M. –. **Monitoramento Especial da Bacia Do Rio Paraopeba - Relatório 05: MONITORAMENTO HIDROLÓGICO, SEDIMENTOMÉTRICO E**

GEOQUÍMICO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_01_2019_PARAOPEBA.pdf>.

DA COSTA, E. P. et al. Evaluation of violations in water quality standards in the monitoring network of São Francisco River basin, the third largest in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 11, 2017.

DAS, B.; PAL, S. C. Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. **HydroResearch**, v. 2, p. 21–30, 2019.

DAS, B.; PAL, S. C. Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 6, p. 5905–5923, 2020.

DOS SANTOS, P. H. et al. The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 119–138, 2019.

FAROOQ, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Conservation agriculture. **Conservation Agriculture**, n. December, p. 1–665, 2015.

FICK, S. E. WorldClim 2 : new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. 2017.

GRECCO, L. B. et al. Influência da seleção de variáveis hidrológicas no projeto de sistemas urbanos de macrodrenagem - Estudos de caso para o município de Vitória ? ES. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 197–206, 2012.

HAN, C. et al. Evaluation of agricultural land suitability based on RS, AHP, and MEA: A case study in Jilin province, China. **Agriculture (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 1 abr. 2021.

HOU, W.; GAO, J.; WU, S. Quantitative Analysis of the Influencing Factors and Their Interactions in Runoff Generation in a Karst Basin of Southwestern China. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2898, 2020.

IBGE, I. B. DE G. E. E. **PEVS - Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=resultados>>.

IBGE, I. B. DE G. E E. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>.

IBGE, I. B. DE G. E E. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>>.

KARIDJO, B. et al. Factors Influencing Farmers' Adoption of Soil and Water Control Technology (SWCT) in Keita Valley, a Semi-Arid Area of Niger. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 288, 24 jan. 2018.

LAGADEC, L. R. et al. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 495–509, 2016.

LEPSCH, I. F. et al. Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. **Viçosa, MG: SBCS. 170p**, 2015.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>>. Acesso em: 11 maio. 2021.

MAPBIOMAS. **Projeto Mapbiomas - Coleção 8 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil**.

MARCOS-MARTINEZ, R. et al. Agricultural land-use dynamics: Assessing the relative importance of socioeconomic and biophysical drivers for more targeted policy. **Land Use Policy**, v. 63, p. 53–66, 2017.

MARTIN-MIKLE, C. J. et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. **Landscape and Urban Planning**, v. 140, p. 29–41, 2015.

MERROUNI, A. A. et al. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. **Renewable Energy**, v. 119, p. 863–873, 2018.

MIKOVITS, C. et al. Decision Support for Adaptation Planning of Urban Drainage Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 12, p. 04017069, dez. 2017.

MONTEIRO, L. I. B. et al. Methodology for payment for ecosystem services based on the concept of land use and management capability. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 4, p. 515–524, 2018.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**,

v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139–147, 2013.

OSTOVARI, Y. et al. GIS and multi-criteria decision-making analysis assessment of land suitability for rapeseed farming in calcareous soils of semi-arid regions. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 479–487, 1 ago. 2019.

ÖZKAN, B.; DENGİZ, O.; TURAN, İ. D. Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 965–996, 2012.

PRUSKI, F. F. (ED. . **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

QIAO, X.-J.; KRISTOFFERSSON, A.; RANDRUP, T. B. Challenges to implementing urban sustainable stormwater management from a governance perspective: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 943–952, set. 2018.

RENOVA, UFV, U. Metodologia de priorização. 2018.

RIO GRANDE DO SUL. **Manual de conservação do solo**. 1979. ed. Rio Grande do Sul: [s.n.].

RODRIGUES, A. L. M.; DA SILVA, D. D.; DE MENEZES FILHO, F. C. M. Methodology for Allocation of Best Management Practices Integrated with the Urban Landscape. **Water Resources Management**, 2021.

SAATY, T. JOURNAL OF Mathematical Psychology. **JOURNAL OF Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234–281, 1977.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process Mcgraw Hill, New York. **Agricultural Economics Review**, v. 70, 1980.

SILVA, V. et al. AHP NA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO MINI CORREDOR ECOLÓGICO SERRA DAS ONÇAS (BA) AHP in Modeling of Environmental Vulnerability of Mini Ecological Corridor of Serra das Onças (BA). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 6, p. 66–1363, 2014.

TALUKDAR, S. et al. Flood susceptibility modeling in Teesta River basin, Bangladesh using novel ensembles of bagging algorithms. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 34, n. 12, p. 2277–2300, 4 dez. 2020.

TASHAYO, B. et al. Combined Fuzzy AHP–GIS for Agricultural Land Suitability Modeling for a Watershed in Southern Iran. **Environmental Management**, v. 66, n. 3, p. 364–376, 1 set. 2020.

TAVEIRA, L. R. S. et al. Land use capability classification adaptation in low and intermediate technology farming systems: A soil erosion indicator. **Soil Use Management**, p. 1–17, 2019.

UFV, U. F. DE V.; UFMG, U. F. DE M. G.; RENOVA, F. **Metodologia de priorização: Definição de critérios de priorização de áreas para recuperação ambiental na bacia do Rio Doce** Produto 3.2 Universidade Federal de Viçosa, , 2018.

USDA, S. National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4. **United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (Chapters 4–10)**, 1972.

USGS. **MOD16A3GFV061**. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3gfv061/>>.

XIAO, Y.; YI, S.; TANG, Z. Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. **Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 1034–1046, 2017.

YAO, L.; WEI, W.; CHEN, L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893–905, 2016.

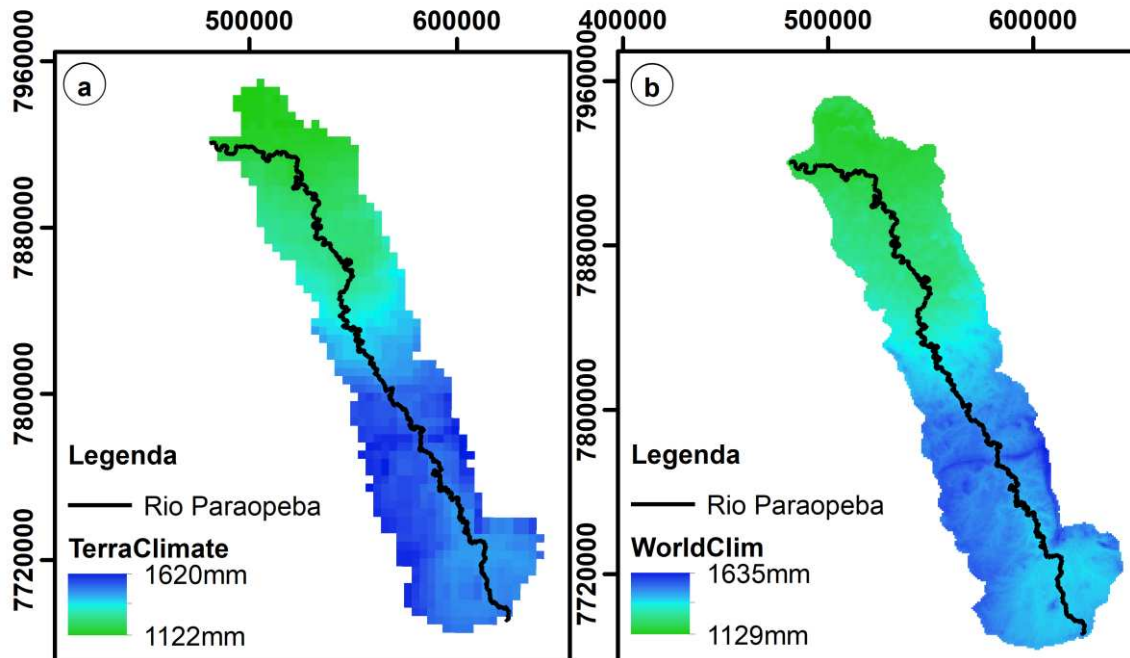
4 CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados da presente tese, pode-se concluir que:

- A bacia do Rio Paraopeba possui potencial baixo a moderado para produção e propagação do escoamento e erosão hídrica e potencial moderado a alto para o acúmulo de escoamento superficial e recarga hídrica. Isso representa a capacidade da bacia em reter o escoamento superficial gerado. Desta forma, é de fundamental importância a adoção de medidas que visem manter ou aumentar a capacidade de infiltração de água no solo.
- Os critérios relacionados as propriedades do solo (PRHS e PPRH) foram aqueles que tiveram maior influência geral nos produtos gerados, seguidos pelos critérios uso da terra e intensidade de uso da terra.
- Foram encontradas muitas áreas vulneráveis à produção e propagação do escoamento superficial, erosão hídrica e baixo potencial à recarga na região do Alto Paraopeba, principalmente a direita do rio. Este é um resultado crucial, pois as áreas de cabeceira são de extrema importância, uma vez que todo o escoamento superficial gerado nas cabeceiras será propagado por toda a extensão da bacia. Assim, favorecer a infiltração de água em regiões de cabeceira aumenta o tempo de permanência água da bacia favorecendo, portanto, a segurança hídrica da região.
- As principais classes de potencial agropecuário para a bacia do Rio Paraopeba foram alto e baixo. Sendo as regiões de alto potencial localizadas principalmente no Baixo Paraopeba e a margem esquerda do rio. Enquanto as de baixo potencial estão localizadas, principalmente, na região do Alto Paraopeba a margem direita do rio.
- As áreas de cultivos dos municípios com maior rendimento por hectare são categorizadas nas classes de potencial agropecuário alto e muito alto, enquanto as áreas de cultivo dos municípios com menor rendimento por hectare são categorizadas nas classes de potencial agropecuário baixo e muito baixo evidenciando, desta forma, a eficácia da metodologia em identificar o potencial agropecuário da região da bacia do Rio Paraopeba.

5 APÊNDICE

Apêndice A – Dados de precipitação provenientes das bases de dados TerraClimate (a) e WorldClim (b) para a bacia do Rio Paraopeba.



Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Zona 23S



Apêndice B– Classificação dos usos e ocupação do solo presentes na bacia do Rio Paraopeba, segundo levantamento do MapBiomias para o ano de 2022 (MAPBIOMAS, 2024).

Código Mapbiomas	Descrição	Classe	CUA*
3	Formação Florestal	1	VIII
4	Formação Savânica	1	VIII
9	Silvicultura	5	V
11	Campo alagado e área pantanosa	2	VIII
12	Formação campestre	2	VIII
15	Pastagem	6	V
20	Cana de açúcar	3	II
21	Mosaico de usos (agricultura)	3	I
24	Área urbana	-	-
25	Outras áreas não vegetadas	-	-
29	Afloramento rochoso	2	-
30	Mineração	-	-
33	Rio, Lago e Oceano	-	-
39	Soja	3	I
41	Outras lavouras temporárias	3	I
46	Café	4	IV
47	Citrus	4	IV
48	Outras lavouras perenes	4	IV

* CUA = Classe de uso da terra baseada no uso e ocupação da terra para o ano de 2022.

Apêndice C. Valores do fator potencial pedohidrológico, erodibilidade e capacidade de uso e ocupação da terra adotados para cada unidade de mapeamento de solo (classe principal e associada) da bacia do Rio Paraopeba.

Código	Componente principal	Classe Associada	PKS	PRHS	CCU
CXa12	CX	RL	4,3	1,7	VII
Cxa14	CX	RL + LVA	3,7	2,3	VII
CXa18	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXa2	CX	PVA	3,7	2,3	VII
CXa20	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXbd21	CX	PV	3,7	2,3	VII
CXbd22	CX	LVA	3,1	2,9	VII
CXbd24	CX	LV	3,1	2,9	VII
CXbd25	CX	PVA	3,7	2,3	VII
CXbd26	CX	LV	3,1	2,9	VII
CXbd31	CX	LV	3,1	2,9	VII
CXbd33	CX	LV+CX	3,6	2,5	VII
CXbd35	CX	LV+LVA	3,1	2,9	VII
CXbd43	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXbd45	CX	PV	3,7	2,3	VII
CXbd52	CX	RL+LV	3,7	2,3	VII
CXbd57	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXbd69	CX	LV	3,1	2,9	VII
CXbd73	CX	LV	3,1	2,9	VII
CXbd74	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXj1	CX	RL	4,3	1,7	VII
CXj2	CX	RL	4,3	1,7	VII
FFlf	FF	LV	2,4	4,3	VII
GXbd2	GX	RQ	1,9	2,9	VIII
LVAAd17	LVA	RQ+PV	1,8	4,7	II
LVAAd19	LVA	CX	1,9	4,1	II
LVAAd20	LVA	CX	1,9	4,1	II
LVAAd22	LVA	CX	1,9	4,1	II
LVAAd4	LVA	LA	1,0	5,0	II
LVAw2	LVA	LVA	1,0	5,0	II
LVAw3	LVA	LV	1,0	5,0	II
LVd13	LV	LV	1,0	5,0	II
LVd20	LV	LVA	1,0	5,0	II
LVd21	LV	CX	1,9	4,1	II
LVd22	LV	LVA	1,0	5,0	II
Lvd24	LV	CX	1,9	4,1	II
LVd25	LV	PV	1,6	4,4	II
LVd25	LV	LVA	1,0	5,0	II
LVd33	LV	LVA+RL	1,6	4,4	II

LVd37	LV	LVA+CX	1,5	4,6	II
LVd6	LV	PV	1,6	4,4	II
LVd62	LV	LV+CX	1,5	4,6	II
LVd66	LV	LVA+PV	1,5	4,7	II
LVd9	LV	CX	1,9	4,1	II
LVw2	LV	LV	1,0	5,0	II
PVAd21	PVA	PV+CX	3,2	2,9	III
PVAd32	PVA	CX	3,3	2,7	III
PVAd39	PVA	CX+LVA	2,9	3,2	III
PVAd4	PVA	PV+CX	3,2	2,9	III
PVAd5	PVA	CX	3,3	2,7	III
PVd1	PV	PV	3,0	3,0	III
PVe31	PV	CX	3,3	2,7	III
PVe43	PV	PV	3,0	3,0	III
RLd1	RL	RL	5,0	1,0	VIII
RLd20	RL	CX	4,7	1,3	VIII
RLd5	RL	RL+CX	4,9	1,2	VIII
RLd7	RL	CX	4,7	1,3	VIII

Sendo: CX = Cambissolo; FF = Plintossolo Pétrico; GX = Gleissolo Háplico; LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; PV = Argissolo Vermelho; PVA = Argissolo Vermelho Amarelo; RL = Neossolo Litólico; RQ = Neossolo Quartzarênico; PKS = peso do fator erodibilidade do componente solo; PRHS = peso do potencial de recarga hídrica do componente solo; CCU = classe de uso da terra baseado no componente solo.

Apêndice D. Pesos do fator pedohidrológico (PRHG) e erodibilidade (PKG) do componente geológico da bacia do Rio Paraopeba.

Unidade Geológica	PKG	PRHG
Alto Maranhão	4	1
Belo Horizonte	2	1
Bonfim	3	1
Caraça	3	3
Cauê	2	3
Cercadinho	3	1
Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica	1	5
Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica	1	5
Depósitos Aluvionares Holocênicos	2	5
Divinópolis	3	2
Fecho do Funil	3	3
Gandarela	3	1
Gnaisse Souza Noschese	2	1
Granito Itaúna	3	2
Granitóides sin a tarditectônicos Neoarqueanos	4	2
Granodiorito Santana do Paraopeba	4	1
Itabira	3	3
Itacolomi	2	3
Juatuba	3	5
Lagoa do Jacaré	3	1
Lagoa Santa	4	1
Lavras	2	1
Maquiné	3	3
Minas	3	3
Monsenhor Isidro	3	1
Nova Lima	3	3
Pedro Leopoldo	3	2
Piracicaba	4	3
Prados	5	2
Quartzo-Monzodiorito Bom Jardim	2	3
Rio das Velhas	3	3
Rochas metabásicas proterozoicas indiferenciadas	3	1
Rochas metaultramáficas Arqueanas	3	1
Sabará	3	3
Santo Amaro	2	3
Serra do Jabitacá	2	2
Serra de Santa Helena	4	3
Terraços Holocênicos	2	5
Tonalito Samambaia	4	1
Três Marias	4	1

Apêndice E. Pesos do fator pedohidrológico e erodibilidade do componente geológico da bacia do Rio Paraopeba.

Município	Silvicultura - Extração Vegetal		Temporária		Permanente		Total
	Rendimento (1000*R\$)	Área (ha)	Rendimento (1000*R\$)	Área (ha)	Rendimento (1000*R\$)	Área (ha)	
Belo Horizonte	21788	4065	28101	1633	55066	2172	R\$13.336,09
Belo Vale	845	328	6207	320	65527	2920	R\$20.341,65
Betim	0	10	1403	108	359	18	R\$12.955,88
Bonfim	66	120	12164	587	15459	566	R\$21.750,98
Brumadinho	330	45	4156	356	30940	1243	R\$1.548,66
Cachoeira da Prata	20	7	458	11	0	0	R\$26.555,56
Caetanópolis	1893	750	825	94	33	2	R\$3.251,77
Capim Branco	0	0	3518	85	61	2	R\$41.137,93
Carandaí	24909	2325	137911	9620	3186	74	R\$13.811,96
Casa Grande	2679	450	40686	4557	2838	67	R\$9.105,83
Congonhas	513	200	1442	195	520	27	R\$5.864,93
Conselheiro Lafaiete	10209	652	11621	920	302	14	R\$13.954,60
Contagem	0	0	9	1	26	1	R\$17.500,00
Cordisburgo	11775	2373	5482	253	1340	46	R\$6.959,96
Corinto	46337	10130	12351	1220	295	18	R\$5.188,51
Cristiano Ottoni	1309	240	9923	1083	654	37	R\$8.739,71
Crucilândia	442	60	18448	1020	414	18	R\$17.581,06
Curvelo	356326	73413	71728	8548	29305	930	R\$5.517,60
Desterro de Entre Rios	7688	1066	20976	2048	4670	161	R\$10.178,32

Entre Rios de Minas	9172	700	19837	2190	5890	169	R\$11.408,63
Esmeraldas	2818	275	3376	240	2290	60	R\$14.754,78
Felixlândia	53930	18250	11287	1154	789	32	R\$3.396,07
Florestal	449	70	1649	70	350	10	R\$16.320,00
Fortuna de Minas	60	88	471	54	0	0	R\$3.739,44
Ibirité	205	20	792	20	198	8	R\$24.895,83
Igarapé	238	40	4241	96	1236	61	R\$29.010,15
Inhaúma	150	135	4856	410	204	8	R\$9.421,34
Itabirito	3265	625	1458	226	1008	21	R\$6.572,25
Itaguara	14790	2954	76073	4431	109743	4497	R\$16.883,18
Itatiaiuçu	575	500	2864	204	501	19	R\$5.449,52
Itaúna	3579	764	2739	241	248	11	R\$6.462,60
Itaverava	3607	600	7512	702	353	19	R\$8.684,33
Jeceaba	7731	625	2347	282	1876	75	R\$12.173,12
Juatuba	39	17	227	19	2934	85	R\$26.446,28
Lagoa Dourada	12692	1925	184283	14163	4004	134	R\$12.389,29
Maravilhas	1542	475	20547	279	213	8	R\$29.267,72
Mário Campos	0	0	656	19	74	4	R\$31.739,13
Mateus Leme	163	180	7179	402	3358	103	R\$15.620,44
Moeda	0	36	323	38	1886	117	R\$11.565,45
Morro da Garça	15743	1650	6016	593	0	0	R\$9.700,85
Nova Lima	8908	964	193	13	197	11	R\$9.410,93
Onça de Pitangui	351	370	16598	290	2034	43	R\$27.002,84
Ouro Branco	2193	1150	10380	489	1763	48	R\$8.497,93
Ouro Preto	61117	5060	8871	1250	3177	122	R\$11.375,16
Papagaios	19287	7000	15269	1175	130	6	R\$4.239,82

Pará de Minas	17404	2750	46779	2481	4497	163	R\$12.732,67
Paraopeba	30077	7202	6311	712	9735	167	R\$5.707,59
Pequi	290	50	13599	148	998	42	R\$62.029,17
Piedade dos Gerais	1431	850	14415	692	20611	650	R\$16.631,84
Piracema	1903	340	5834	434	826	31	R\$10.637,27
Pompéu	144418	27255	215171	22441	734	36	R\$7.245,29
Queluzito	2726	275	3746	310	2431	90	R\$13.189,63
Resende Costa	22152	3475	14128	1146	9	1	R\$7.851,36
Ribeirão das Neves	0	2	110	11	83	3	R\$12.062,50
Rio Manso	101	85	5742	254	136	6	R\$17.330,43
São Brás do Suaçuí	2233	180	2326	184	521	13	R\$13.474,80
São Joaquim de Bicas	0	0	1257	18	758	19	R\$54.459,46
São José da Varginha	194	120	2139	74	682	26	R\$13.704,55
Sarzedo	0	0	489	47	104	5	R\$11.403,85
Sete Lagoas	104859	24475	119295	7009	30605	915	R\$7.863,17