

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Instituto de Ciências Agrárias

Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental

Fernando Oliveira Leitão Júnior

**ÁREAS PROPÍCIAS PARA IMPLANTAÇÃO DE BARRAMENTOS NA SUB-BACIA
DO RIBEIRÃO SANTA ISABEL UTILIZANDO SIG**

Unai

2023

Fernando Oliveira Leitão Júnior

**ÁREAS PROPÍCIAS PARA IMPLANTAÇÃO DE BARRAMENTOS NA SUB-BACIA
DO RIBEIRÃO SANTA ISABEL UTILIZANDO SIG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e
Ambiental da Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri.

Orientador: Prof. Dr. Denis Leocádio Teixeira

Unai

2023

Fernando Oliveira Leitão Júnior

**ÁREAS PROPÍCIAS PARA IMPLANTAÇÃO DE BARRAMENTOS NA SUB-BACIA
DO RIBEIRÃO SANTA ISABEL UTILIZANDO SIG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e
Ambiental da Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri.

Orientador: Prof. Dr. Denis Leocádio Teixeira

Data de aprovação ____/____/____.

Prof. Dr. Hermes Soares da Rocha
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Prof. Dr. Jefferson Luiz Antunes Santos
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Prof. Dr. Denis Leocádio Teixeira
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Unai

2023

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer.

“Toda ação humana, quer se torne positiva ou negativa, precisa depender de motivação.”

Dalai Lama.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando, incentivando e compreendendo as demandas do meu percurso acadêmico. Obrigado pelo amor incondicional, paciência e por serem minha fonte de inspiração.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Fernando e Grazielle, por todos os ensinamentos, valiosas lições de vida e pelo constante apoio financeiro ao longo desses anos. Sem o suporte incondicional de vocês, eu não teria alcançado este momento. Também agradeço a toda amizade e suporte da minha irmã Ana Laura. Espero poder retribuir todo o amor e apoio recebidos, e trazer imenso orgulho para vocês.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha companheira Izabella, alguém que esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores ao longo dessa jornada. Sem todo o suporte e compreensão que você ofereceu, eu não teria conseguido chegar até aqui. Ao compartilhar suas palavras de encorajamento, abraços reconfortantes e sorrisos encorajadores, você me mostrou o verdadeiro significado do amor e do apoio incondicional. Sou imensamente grato por ter você ao meu lado, pois sua presença tornou minha jornada mais significativa e me fez sentir amado e apoiado em todos os momentos.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha avó Alzira, por ter sido uma figura fundamental em minha vida, moldando meu caráter e estando sempre ao meu lado. Você sempre foi e continuará sendo como uma mãe para mim. Sem o seu apoio constante, eu não teria alcançado tudo o que conquistei até hoje. Também gostaria de agradecer ao meu falecido avô, Volnei Pereira Leitão, por todo o amor e fé que ele depositou em mim. Suas palavras deixaram uma marca indelével em minha jornada. Sua memória vive em meu coração e sou grato por ter tido a honra de conhecê-lo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus tios Fabricio, Laís, Rodrigo e Cíntia. Em especial, meu tio Fabricio, que foi uma figura fundamental em minha jornada acadêmica. Desde o início, ele me incentivou a ingressar no curso e esteve ao meu lado em todos os momentos. Sua presença constante, apoio incondicional e crença em meu potencial foram essenciais para minha trajetória até aqui. Você mudou minha vida de forma significativa, sempre me dando suporte e mostrando que eu era capaz de alcançar meus objetivos. Agradeço de coração por todo seu apoio, por acreditar em mim desde o início e por estar sempre ao meu lado. Não teria chegado tão longe sem você e sou profundamente grato por sua influência positiva em minha vida.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus amigos da UFVJM que me incentivaram a não desistir, deram suas contribuições para meu trabalho e me mantiveram firme e me acolheram em momentos difíceis, em especial a Ana Clarah, Creudeci, Jéssica, Luis Gustavo, Ricardo e Northon.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus amigos Arthur, Vitor, Henrique, Gustavo, Gabriel, Julia, Marina e Samuel. Vocês foram verdadeiras amizades em minha vida, proporcionando suporte, companheirismo e momentos inesquecíveis ao meu lado. Mesmo nos momentos em que falhei e não estive à altura, vocês estiveram presentes, demonstrando o verdadeiro significado da amizade e do apoio mútuo. Agradeço por cada gesto de compreensão, por estenderem suas mãos quando mais precisei e por compartilharem risadas, lágrimas e conquistas comigo. Sua presença constante e genuína em minha vida é um testemunho do amor e da amizade verdadeira. Sou eternamente grato por ter amigos tão especiais como vocês ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Denis Leocádio Teixeira, por todo o apoio dedicado e, principalmente, pela oportunidade de trabalharmos juntos ao longo deste projeto. Sob sua orientação, pude adquirir conhecimentos e experiências valiosas que levarei para a vida profissional, obrigado por compartilhar seu tempo, expertise e orientações, contribuindo para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Sua dedicação, sabedoria e comprometimento são verdadeiros exemplos para mim.

Agradeço aos meus professores, pelos seus ensinamentos, orientações valiosas e pelo tempo dedicado em compartilhar seus conhecimentos. Sou imensamente grato pela oportunidade de aprender com profissionais tão competentes e comprometidos.

Agradeço à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri pela valiosa oportunidade de fazer parte dessa instituição de ensino renomada. Agradeço ainda ao Instituto de Ciências Agrárias, localizado em Unaí-MG, pelo aprendizado e os ensinamentos prestados.

Agradeço ainda a todos que não estão aqui nominalmente referidos, mas que me apoiaram e contribuíram de alguma forma com este trabalho, na minha formação pessoal e profissional.

Por fim, dedico um agradecimento especial a mim mesmo, por nunca desistir diante dos obstáculos e por manter o comprometimento e dedicação ao longo desta jornada acadêmica.

Que este trabalho possa contribuir para a ampliação do conhecimento na área e trazer benefícios para a sociedade como um todo.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos tem sido aprimorada em regiões com alta demanda por água, especialmente onde ocorre conflito de uso ou escassez desse recurso. A Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel desempenha um papel crucial na manutenção dos recursos hídricos e no equilíbrio ambiental da região, desse modo, a análise das áreas propícias para implantação de barragens se torna essencial. Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise multicritério para identificar as áreas adequadas para implantação de barragens na Sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel, além de avaliar a disponibilidade hídrica da referida bacia. Após a análise, constatou-se que dos aproximadamente 173 quilômetros de hidrografia na sub-bacia, apenas 32 quilômetros (18%) são considerados aptos para implantação de barragens. Essa informação é relevante para uma gestão cuidadosa dos recursos hídricos, especialmente considerando o crescimento urbano e as atividades humanas em expansão na região. Em relação à disponibilidade hídrica, estima-se que a sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel possui uma disponibilidade potencial de 1301-1400%, esse valor demonstra uma alta disponibilidade hídrica, e conseqüentemente um alto potencial para o armazenamento de água na região, o que pode atender às demandas futuras de forma mais eficiente. As áreas propostas pelo Zoneamento Ambiental Produtivo estão alinhadas com as áreas identificadas neste estudo. No entanto, é importante considerar que tais áreas apresentam alta exposição do solo, exigindo uma avaliação cuidadosa para determinar a necessidade de recuperação e conservação do solo antes da implantação de barragens. Para uma tomada de decisão mais precisa, são necessários estudos de campo detalhados para avaliar a viabilidade e os impactos ambientais de forma mais precisa.

Palavras-chave: análise multicritério; hídrica; geoprocessamento; zoneamento ambiental produtivo; área de conflito.

ABSTRACT

Water resource management has been enhanced in regions with high water demand, particularly where there is conflict or scarcity of this resource. The Santa Isabel Hydrographic Basin plays a crucial role in maintaining water resources and environmental balance in the region, making the analysis of suitable areas for dam implementation essential. This study aimed to conduct a multicriteria analysis to identify suitable areas for dam implementation in the Santa Isabel Ribeirão Sub-basin, as well as evaluate the increase in water availability in the mentioned basin. After the analysis, it was found that out of approximately 173 kilometers of hydrography in the sub-basin, only 32 kilometers (18%) are considered suitable for dam implementation. This information is relevant for careful water resource management, especially considering urban growth and expanding human activities in the region. Regarding water availability, it is estimated that the Santa Isabel Ribeirão Sub-basin has a potential availability of 1301-1400%. This value demonstrates a high potential for water storage in the region, which can efficiently meet future demands. The areas proposed by the Productive Environmental Zoning are aligned with the areas identified in this study. However, it is important to consider that these areas have high soil exposure, requiring a careful assessment to determine the need for soil recovery and conservation before dam implementation. Detailed field studies are necessary for a more accurate decision-making process to assess feasibility and environmental impacts.

Keywords: Multicriteria analysis; water-related; geoprocessing; productive environmental zoning; conflict area.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1 <i>Bacias Hidrográficas</i>	9
2.2 <i>Barragens</i>	10
2.3 <i>Geoprocessamento</i>	12
2.4 <i>Análise multicritério</i>	13
2.5 <i>Estudo das Vazões dos Cursos de Água</i>	14
3 OBJETIVOS	15
3.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 <i>Caracterização da Área de estudo</i>	15
4.2 <i>Metodologia aplicada para seleção das áreas propícias para implantação de barragens</i>	16
4.3 <i>Obtenção de Dados</i>	17
4.3.1 <i>Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel</i>	17
4.3.2 <i>Softwares empregados no estudo</i>	18
4.3.3 <i>Plataformas de obtenção de dados espaciais</i>	18
4.3.4 <i>Análise multicritério</i>	19
4.5 <i>Solos</i>	20
4.6 <i>Geologia Erro! Indicador não definido.3</i>	
4.7 <i>Altitude e declividade</i>	24
4.8 <i>Unidades de Paisagem</i>	26
4.9 <i>Processamento de dados</i>	28
4.10 <i>Comparação das áreas propícias para a implantação de barramentos com as propostas no Zoneamento Ambiental Produtivo</i>	28
4.11 <i>Disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão</i>	29
4.12 <i>Gestão e manejo da bacia hidrográfica e uso e conservação do solo e da água</i>	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 <i>Caracterização das áreas propícias</i>	31
5.2 <i>Áreas propícias em relação ao tipo de solo</i>	32

<i>5.3 Áreas propícias em relação a geologia</i>	33
<i>5.4 Áreas propícias em relação a Unidades de Paisagem</i>	34
<i>5.5 Áreas propícias em relação a Disponibilidade Hídrica</i>	35
<i>5.6 Resultados quantitativos</i>	38
<i>5.7 Dados derivados do mapa de Gestão e manejo da bacia hidrográfica</i>	39
6. CONCLUSÃO	41
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTURO	42
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos tem sido cada vez mais aprimorada nas regiões onde a demanda por água está em constante crescimento, especialmente em áreas onde ocorre conflito de uso ou escassez desse recurso. A Bacia Hidrográfica do Santa Isabel desempenha um papel crucial na manutenção dos recursos hídricos e no equilíbrio ambiental de sua região circunvizinha IGAM (2020). Com o crescimento urbano e as atividades humanas em expansão, torna-se essencial uma gestão cuidadosa dos recursos hídricos, especialmente na análise das áreas propícias para implantação de barragens.

As bacias hidrográficas são as bases da gestão dos recursos hídricos, uma vez que fornecem a estrutura fundamental para o monitoramento e gerenciamento efetivo das águas superficiais e subterrâneas em uma determinada região, permitindo a implementação de práticas sustentáveis de uso e conservação dos recursos hídricos (FERNANDES et al., 2019). Bacia hidrográfica é toda área geográfica delimitada pela topografia, na qual as águas das chuvas e dos rios convergem para um único curso d'água principal, como um rio ou um lago (FINKLER, 2013). Essas bacias atuam como unidades de captação e armazenamento de água, proporcionando a base para a gestão integrada dos recursos hídricos, incluindo o abastecimento de água potável, a geração de energia hidrelétrica, a agricultura, a preservação dos ecossistemas aquáticos e a prevenção de desastres naturais relacionados a enchentes.

A compreensão das características físicas, climáticas e socioeconômicas de uma bacia hidrográfica é essencial para a implementação de políticas e estratégias de gestão sustentável da água, visando equilibrar as demandas humanas com a preservação dos ecossistemas aquáticos, além de garantir o acesso à água de qualidade para as gerações presentes e futuras.

Segundo Silva et al. (2018), as barragens são estruturas fundamentais na regulação do fluxo hídrico, permitindo o abastecimento humano, a geração de energia e o controle de cheias. No entanto, é necessária uma análise criteriosa das áreas adequadas para a implantação dessas barragens, levando em consideração os impactos socioambientais. Além disso, Marques et al. (2021) destaca a importância de considerar a capacidade de armazenamento e a qualidade da água ao selecionar as áreas para implantação de barragens na bacia. Esses aspectos são fundamentais para garantir a disponibilidade hídrica e a segurança da água para os diversos usos.

Em conjunto com gestão hídrica das bacias, técnicas de geoprocessamento podem ser empregadas para avaliar as melhores opções de locação dos barramentos em uma bacia (Souza

et al., (2019)). Segundo os autores supracitados tal aplicação foi essencial para a análise das áreas propícias para implantação de barragens na Bacia do Santa Isabel, afluente do Rio Paracatu em Minas Gerais. Por meio de sistemas de informações geográficas (SIG) e sensoriamento remoto, é possível coletar, armazenar, analisar e visualizar dados espaciais, fornecendo informações precisas sobre a região e seus recursos hídricos.

Nesse sentido, a análise multicritério desempenha um papel crucial na seleção das áreas adequadas para a implantação de barragens, considerando diversos fatores e suas interações. Segundo Carvalho et al. (2020), a análise multicritério permite a avaliação ponderada de aspectos socioambientais, econômicos e técnicos relevantes, auxiliando na tomada de decisões mais sustentáveis. Adicionalmente, Rocha et al. (2022) destaca a importância de considerar critérios como a viabilidade técnica, a demanda hídrica e o potencial de conflitos socioambientais, ao realizar a análise multicritério para seleção das áreas propícias para implantação de barragens. Essa abordagem holística permite considerar diferentes perspectivas e contribui para a tomada de decisões mais robustas e integradas.

O Zoneamento Ambiental Produtivo (Rodrigo et al., 2018), considera o aumento da disponibilidade hídrica como principal critério para a seleção de áreas para a construção de barragens em uma bacia. No entanto, observa-se que essa abordagem carece de uma análise mais detalhada dos diversos fatores envolvidos no processo. Deste modo, a hipótese inicial deste trabalho foi que os locais propícios para construção de barramentos na sub-bacia do ribeirão Santa Isabel não seriam coincidentes com os locais recomendados pelo ZAP. Esta hipótese foi construída, a partir da falta de uma abordagem mais abrangente e criteriosa pelo ZAP, por não considerar múltiplos fatores para propor as áreas mais propícias à construção de barragens.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar as áreas propícias para implantação de barragens na Sub-Bacia do Santa Isabel, utilizando o geoprocessamento e a análise multicritério como ferramentas fundamentais. Por meio de levantamento bibliográfico e análise de dados espaciais e quantitativos, espera-se fornecer um estudo abrangente sobre os desafios e as oportunidades relacionadas a essa temática, contribuindo para a gestão responsável e sustentável dos recursos hídricos na região, em conformidade com as exigências legais e ambientais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bacias Hidrográficas

Segundo Rocha e Santos (2016), a bacia hidrográfica é um sistema físico que possui uma única forma de entrada, a precipitação, e uma única forma de saída, o escoamento efluente, levando em consideração as perdas por evapotranspiração. Em macroescala, o padrão de escoamento, intensidade e sazonalidade são controlados pelos efeitos climáticos, refletindo os padrões de precipitação e circulação geral da atmosfera. No entanto, aspectos do meio físico e da cobertura do solo interagem entre si para determinar o padrão natural sazonal e espacial de variação do escoamento (PETTS et al., 1990).

A bacia hidrográfica é uma unidade fundamental de estudo em hidrologia, sendo essencial para o entendimento dos processos hidrológicos que ocorrem em uma determinada região. Além disso, a bacia hidrográfica possui grande importância ambiental, uma vez que é responsável pela manutenção do ciclo hidrológico, que é fundamental para a vida na Terra. De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica é a unidade territorial de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

De acordo com Rocha e Santos (2016), o regime de descargas de uma bacia hidrográfica é essencial para a avaliação da sazonalidade das vazões, permitindo a compreensão das possíveis variações ao longo da série histórica da estação. Essa análise é fundamental, tendo em vista as interações entre o homem e o ambiente, que podem levar a alterações nos aspectos de intensidade e qualidade da relação precipitação-deflúvio na bacia hidrográfica. Assim, a análise do regime dos deflúvios da bacia hidrográfica permite a compreensão das variações sazonais e anuais das vazões, fornecendo informações importantes para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na região em questão. Além disso, a análise do regime hídrico pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas, uma vez que permite a identificação de tendências e padrões na relação entre a precipitação e as vazões (ROCHA et al., 2016).

A compreensão do regime hidrológico dos rios é essencial para a tomada de decisão em diversas áreas do conhecimento, especialmente para aqueles que se dedicam ao planejamento ambiental e ao uso dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. No entanto, a falta de informações muitas vezes dificulta a obtenção de tal conhecimento. A falta de dados ao longo de toda a extensão da área de estudo impede a realização de um planejamento adequado às necessidades da área em questão. Conforme apontado por Souza e Oliveira (2015), a escassez

de dados hidrológicos constitui um obstáculo para a gestão de bacias hidrográficas, limitando a compreensão do comportamento hidrológico das mesmas, dificultando a identificação de áreas vulneráveis à erosão e à degradação do solo e, conseqüentemente, o desenvolvimento de medidas preventivas. Portanto, é necessário investir em pesquisas e coleta de dados para aprimorar o conhecimento acerca do regime hidrológico das bacias hidrográficas.

2.2 Barragens

O solo é um dos principais elementos a serem considerados na construção de barragens. As características do solo, como a granulometria, a permeabilidade, a compactação e a resistência, influenciam diretamente na estabilidade e na capacidade de armazenamento da barragem. Por isso, é fundamental realizar um estudo geotécnico detalhado do solo antes de projetar e construir uma barragem. A resistência do solo é um fator crítico que influencia diretamente na estabilidade da barragem, sendo o estudo geotécnico essencial para a escolha do tipo de barragem e dos materiais que serão utilizados na construção (FROEHLICH et al., 2019).

Além da disponibilidade hídrica, a granulometria do solo também desempenha um papel fundamental na construção de barragens. Solos com granulometria mais fina, como argila e silte, apresentam uma maior capacidade de retenção de água, o que pode ser vantajoso para o armazenamento nas barragens propostas. No entanto, é importante ressaltar que esses solos também possuem um maior potencial de erosão, o que pode representar um desafio para a estabilidade da estrutura da barragem ao longo do tempo. Por outro lado, solos com granulometria mais grossa, como areia e pedregulhos, possuem uma menor capacidade de armazenamento de água devido à sua baixa porosidade e menor superfície específica. Embora esses solos apresentem menor risco de erosão, sua utilização para a construção de barragens pode exigir a implementação de técnicas específicas para melhorar a sua capacidade de armazenamento. Portanto, uma análise detalhada da granulometria do solo é essencial para a seleção adequada do local de implantação da barragem, garantindo assim a sua segurança e eficiência ao longo do tempo (KONDO et al., 2020). No entanto, a granulometria do solo também pode influenciar na estabilidade da barragem, uma vez que solos com granulometria mais fina apresentam um maior potencial de erosão e menor resistência à deformação e cisalhamento. Por isso, é importante que a granulometria seja avaliada em conjunto com outras características do solo, como sua resistência e coesão, para garantir a estabilidade e segurança da barragem.

Segundo Silveira e Mello (2005), a construção de barragens envolve não apenas aspectos técnicos, mas também impactos ambientais e sociais. É fundamental avaliar cuidadosamente esses impactos para garantir a sustentabilidade do projeto e a segurança das comunidades locais. No que diz respeito aos impactos sociais, a construção de barragens pode afetar as comunidades locais de diversas maneiras. Por exemplo, a inundação de áreas pode exigir que as pessoas sejam realocadas, o que pode levar a problemas sociais e econômicos.

Por outro lado, de acordo com Pereira e Sentelhas (2019), a implantação de sistemas de barragens pode trazer benefícios para a produção agrícola e para a geração de energia, mas é preciso considerar os impactos ambientais e sociais envolvidos. É fundamental que esses impactos sejam avaliados de forma criteriosa e que sejam adotadas medidas para minimizar os possíveis impactos negativos. Para minimizar os impactos ambientais e sociais da construção de barragens, é importante que sejam realizados estudos detalhados de impacto ambiental e que sejam adotadas medidas de mitigação, como a recuperação de áreas degradadas, a implantação de programas de reflorestamento e a adoção de medidas para minimizar os impactos sobre as comunidades locais. Além disso, é importante que haja uma gestão adequada dos recursos hídricos, de forma a garantir a disponibilidade de água para os diversos usos, ou seja, proporcionando o uso múltiplo.

Outro aspecto relevante em relação aos reservatórios é a perda de água por evaporação, a qual pode ser significativa, sendo influenciada pelo clima e pela área superficial do reservatório. Um reservatório estreito e profundo apresenta uma evaporação consideravelmente menor do que um reservatório amplo e raso, devido ao seu espelho d'água. Essa informação deve ser considerada durante o processo de projeto da barragem. De acordo com o Stephens (2011), as perdas por evaporação podem ser calculadas com base em registros locais, levando em consideração que reservatórios com grandes superfícies e pequenas profundidades terão maiores taxas de evaporação do que reservatórios estreitos e profundos.

Finalmente a manutenção preventiva é fundamental para garantir a segurança e eficiência das barragens, minimizando os riscos de falhas estruturais em decorrência de enchentes (BARROS et al., 2016). Uma vez construída, a barragem requer um plano de manutenção e operação para garantir sua eficiência e segurança ao longo do tempo, além de incluir medidas de controle de sedimentos. Além de garantir a segurança das barragens, o plano de manutenção e operação também contribui para a conservação do meio ambiente e a sustentabilidade do projeto (SILVA et al., 2018).

2.3 Geoprocessamento

Os SIGs têm desempenhado um papel importante como integrador de tecnologia, possibilitando a integração de dados de diferentes fontes, além de permitir a realização de análises complexas e simulações, o que contribui para a tomada de decisões mais assertivas e eficientes em diversas áreas, como gestão ambiental, planejamento urbano e monitoramento de recursos naturais (FERREIRA, 2019). A utilização da tecnologia de SIG possibilita uma coleta e análise de informações de forma mais rápida e prática em comparação às técnicas tradicionais de pesquisa. Isso permite a realização de análises complexas por meio da compilação de dados provenientes de diversas fontes. Como resultado, é viável a criação de documentos gráficos, cartográficos e/ou temáticos que integram informações de diferentes origens, contribuindo para uma compreensão aprofundada do fenômeno em estudo (DEUS et al., 2001).

De acordo com Rosa (2011), às tecnologias de informação geográfica são amplamente utilizadas no monitoramento de regiões remotas e distantes, além disso, o geoprocessamento é uma ferramenta essencial para o planejamento e gestão de bacias hidrográficas, permitindo a análise de dados espaciais e a criação de modelos hidrológicos precisos. Tal ferramenta também é fundamental para a locação de barragens, permitindo a análise de variáveis como topografia, hidrologia e geologia, para escolha do local mais adequado e realização de estudos de impacto ambiental.

Segundo Schwalm (2008), o geoprocessamento foi utilizado para identificar barragens não cadastradas em uma bacia hidrográfica específica, demonstrando sua utilidade nesse contexto. Melo (2013) aplicou técnicas de geoprocessamento com o objetivo de identificar locais mais adequados para a construção de barragens em amplas áreas destinadas à geração de energia elétrica. O estudo considerou uma série de parâmetros técnicos, socioeconômicos e ambientais para determinar as melhores opções de locais de represamento em uma determinada bacia.

O uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para levantamento de dados, aliado a estudos de modelos hidrológicos, torna possível a análise de susceptibilidades e fragilidades de uma determinada bacia hidrográfica (ROCHA, 2014). Portanto, o uso de ferramentas de geoprocessamento se torna cada vez mais importante na gestão dos recursos hídricos e no planejamento ambiental, possibilitando uma análise mais precisa e detalhada dos dados, a identificação de áreas de risco e a promoção de ações preventivas e corretivas.

2.4 Análise multicritério

De acordo com Pacheco et al. (2016), a Análise Multicritério é uma técnica que possibilita a análise simultânea de vários critérios e variáveis na tomada de decisão. Essa abordagem pode gerar um mapeamento das áreas com diferentes potencialidades e fragilidades à construção de barragens, considerando fatores como o escoamento superficial analisado através do fluxo acumulado, a declividade do terreno e o uso e cobertura do solo. Essa técnica foi aplicada por Pacheco et al. (2016) na seleção de áreas aptas à construção de barraginhas em relevo forte ondulado, permitindo a identificação das áreas com maior potencial para implantação desse tipo de técnica de conservação de solo e água.

Na análise multicritério, o critério é a base para a tomada de decisão, podendo ser medido e avaliado. A indicação de um indivíduo pode ser atribuída a um conjunto de decisões, e esses critérios podem ser classificados em dois padrões: fatores e restrições. Tais critérios podem pertencer tanto aos atributos de um indivíduo quanto a um conjunto inteiro de decisão (EASTMAN, 2012). Os critérios utilizados na análise multicritério podem ser classificados em duas categorias: restritivos e relativos. Os restritivos, também conhecidos como restrições, são aqueles que impõem limitações e restringem as alternativas que estão sendo analisadas, eliminando áreas e limitando espacialmente as possibilidades de opção. Já os critérios relativos são aqueles que destacam ou enfatizam a adequabilidade de uma opção em relação aos outros critérios considerados (BARROS, 2017). Segundo o mesmo autor, estes critérios são sempre de estilo booleano (sim ou não).

Segundo Tagliarini et al. (2018), as técnicas de geoprocessamento e análise multicritério são importantes ferramentas para o planejamento de atividades, pois permitem a adaptação do uso das terras e outros critérios ambientais na tomada de decisão. A utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilita uma estimativa conjunta desses critérios, o que resulta em procedimentos mais eficientes e confiáveis na tomada de decisão. De acordo com Francisco et al. (2007), a análise multicritério possibilita a identificação de prioridades para a recuperação de Áreas de Preservação Permanente. Barros (2017) destaca que um dos aspectos cruciais em problemas de decisão é a estruturação ou formulação do problema, que envolve a identificação dos atores envolvidos, das alternativas possíveis, dos critérios relevantes, a caracterização do problema e a escolha do método multicritério adequado. Essa estruturação depende do contexto, da problemática e da estrutura de preferência envolvida.

Diversos procedimentos de avaliação em multicritério foram implementados em ambiente SIG, incluindo operações Booleanas, Média Ponderada Ordenada e Combinação

Linear Ponderada, citados por Malczewski (2004) e Eastman (2003). Entre esses métodos, os dois primeiros são considerados mais simples e comumente aplicados (CORSEUIL, 2006). As regras de decisão são definidas pelas relações entre os dados espaciais utilizados como entrada e os dados resultantes, ou seja, os mapas finais (EASTMAN, 1998; MALCZEWSKI, 2004).

2.5 Estudo das Vazões dos Cursos de Água

Segundo Ribeiro (2013), a rede hidrométrica é formada pela soma de cada seção específica de medição sobre a hidrografia da bacia hidrográfica e permite a estimativa de vazões através de suas respectivas séries históricas. A bacia hidrográfica é uma unidade de gestão determinada pela Política Nacional de Recursos Hídricos e sua hidrografia é essencial para a gestão dos recursos hídricos. Tucci (2002) afirma que a rede hidrométrica, em geral, não é capaz de cobrir completamente a hidrografia de uma bacia hidrográfica, o que pode deixar uma grande parte da área sem os dados necessários para a estimativa de vazões. O autor também destacou a importância da otimização das informações disponíveis em uma região devido aos altos custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica. Sendo assim a técnica de regionalização de vazões é amplamente utilizada devido à escassez de dados hidrometeorológicos em certas regiões, permitindo a espacialização e otimização das informações existentes nas estações fluviométricas de uma determinada área, contribuindo para a gestão dos recursos hídricos (RIBEIRO, 2018).

A regionalização de vazão é um importante conceito utilizado na gestão de recursos hídricos, que pressupõe a homogeneidade de uma região hidrológica com base em suas características fisiográficas e hidrometeorológicas. Conforme destacado por Garbossa e Pinheiro (2015) em seu trabalho "Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento", a regionalização de vazão é fundamental para estimar a disponibilidade hídrica em bacias sem dados de monitoramento e, conseqüentemente, para a tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, a aplicação desse conceito pode contribuir significativamente para a sustentabilidade e uso adequado dos recursos hídricos em uma região.

Sousa (2009) menciona que a técnica de regionalização de vazões envolve procedimentos matemáticos e estatísticos aplicados às séries de dados históricos de vazões e às características físicas e climáticas das bacias hidrográficas, o que torna a utilização de sistemas computacionais indispensável para manipular a grande quantidade de dados envolvidos.

Moreira e Silva (2014) realizaram uma análise dos métodos de estimativa da $Q_{7,10}$ e da vazão média de longa duração (Q_{mld}) na bacia do rio Paraopeba. O estudo foi baseado no Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais e utilizou os métodos de regionalização de vazões Tradicional, o de Proporcionalidade de vazões específicas e o de Conservação de massas. Os autores observaram que os maiores erros nas estimativas de vazões ocorreram nas regiões de cabeceira da bacia. Além disso, verificaram que entre os métodos de regionalização utilizados no estudo, o método Tradicional foi o que permitiu uma melhor estimativa dos valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} para a bacia hidrográfica.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Este trabalho teve por objetivo geral identificar áreas propícias para a implantação de barramentos na Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel, além de avaliar a disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar áreas com maior potencial para implantação de barramentos a partir de análises multicritérios e informações sobre a topografia, hidrografia, vegetação, clima, solos, e disponibilidade hídrica da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel;
- Comparar as áreas propícias para a implantação de barramentos obtidas neste trabalho com as propostas no Zoneamento Ambiental Produtivo;
- Avaliação do aumento da disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão proporcionadas pelos barramentos na sub-bacia sendo uma perspectiva promissora para um trabalho futuro;
- Analisar a implantação dos reservatórios em termos de gestão e manejo da bacia hidrográfica e de uso e conservação do solo e da água.

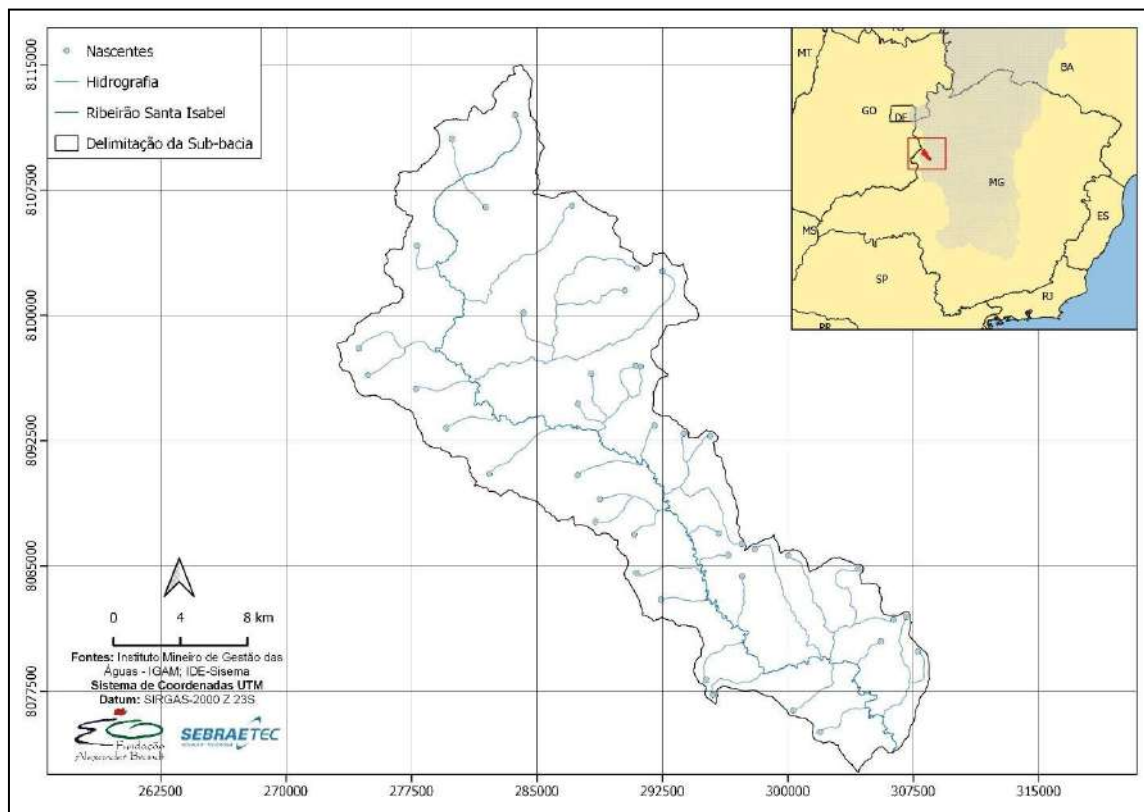
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área de estudo

A sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel está situada integralmente no município de Paracatu-MG. Com uma extensão aproximada de 50.000 hectares, ela faz parte da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Paracatu (UPGRH SF7). O curso d'água principal, o Ribeirão Santa Isabel, desemboca no Ribeirão Escurinho, que, por sua

vez, desagua no Rio Escuro, culminando no Rio Paracatu, com as coordenadas geográficas (17°12'21,56" S e 46°59'26,21" O) (Figura 1). De acordo com a classificação climática de Köppen adotada por Álvares et al. (2013), em seu trabalho "Köppen's climate classification map for Brazil", o clima predominante na sub-bacia é classificado como Aw - clima tropical, com chuvas de verão e estação invernal pouco definida ou ausente e forte precipitação anual. A temperatura média na região é de 23,1 °C e a média anual de precipitação é de 1305 mm. O mês de junho apresenta a menor pluviosidade, enquanto o mês de dezembro é o mais chuvoso, com uma média de aproximadamente 211 mm de precipitação.

Figura 1 – Localização geográfica da Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018).

4.2 Metodologia aplicada para seleção das áreas propícias para implantação de barragens

Quadro 1 – Metodologia aplicada no trabalho

Etapa	Ação
-------	------

1. Análise do Zoneamento Ambiental Produtivo	Revisão da literatura sobre Zoneamento Ambiental Produtivo; Identificação dos critérios e indicadores relevantes.
2. Download de shapefiles	Identificação de fontes confiáveis; Download dos shapefiles contendo informações sobre solo, geologia, delimitação da bacia e unidades de paisagem.
3. Processamento no QGIS	Importação dos shapefiles no QGIS; Realização de operações geoespaciais para integrar as informações; Geração de mapas temáticos e análises preliminares.
4. Análise de áreas propícias para implantação de barragens	Definição de critérios específicos; Utilização de ferramentas do QGIS para realizar análises espaciais; Delimitação das áreas propícias.
5. Avaliação e interpretação dos resultados	Análise dos resultados obtidos; Comparação com critérios estabelecidos; Discussão das limitações e incertezas.
6. Conclusão	Síntese dos principais resultados e conclusões; Discussão sobre a relevância dos resultados para o Zoneamento Ambiental Produtivo e a implantação de barragens.

4.3 Obtenção de Dados

Nesta seção, apresentados os procedimentos utilizados para a obtenção dos dados necessários para o levantamento de áreas propícias para a construção de barramentos no Ribeirão Santa Isabel em Paracatu.

4.3.1 Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel

A base de dados foi obtida a partir do Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel (Rodrigo et al., 2018). Esse zoneamento é um documento técnico que contém informações sobre as características ambientais e produtivas da região de estudo. Durante o processo de pesquisa, foram realizados downloads de shapefiles contendo informações geográficas detalhadas, como polígonos, linhas e pontos relacionados ao zoneamento. Os

shapefiles utilizados continham diversos dados relevantes, incluindo informações sobre relevo, solo, geologia, delimitação da bacia do Ribeirão Santa Isabel, unidades de paisagem, unidade de conservação e hidrografia.

4.3.2 Softwares empregados no estudo

Para a criação dos mapas e realização do levantamento, foram utilizados os seguintes softwares: QGIS[®], um software livre e de código aberto para análise e visualização de dados geoespaciais, empregado para carregar shapefiles, realizar análises espaciais e criar mapas temáticos; Google Earth Pro, uma ferramenta para visualizar imagens de satélite da área de estudo e identificar características geográficas relevantes; New LocClim, um software com banco de dados para estimativas das condições climáticas médias, usado para obter dados de evapotranspiração e precipitação; o Microsoft Excel[®], utilizado para organizar e manipular os dados coletados, realizar cálculos e gerar estatísticas descritivas; e Siscah, o Sistema de Controle de Atividades Hídricas, necessário para acessar informações sobre a disponibilidade hídrica e restrições legais relacionadas ao uso da água no Ribeirão Santa Isabel.

Como complemento às análises realizadas no QGIS[®], utilizou-se o Google Earth Pro para a análise do relevo e áreas de conservação. A ferramenta oferece imagens de alta resolução e recursos para a visualização e medição do terreno. Foram exploradas as funcionalidades de visualização em 3D, medição de elevações e identificação de características do relevo.

Com os dados processados e integrados, foram realizadas análises espaciais utilizando as ferramentas disponíveis no QGIS[®]. Foram aplicados critérios específicos para a identificação de áreas propícias para implantação de barragens, levando em consideração os dados de solo, geologia, unidades de paisagem, áreas de conservação e as características identificadas na análise do relevo. Os resultados obtidos foram avaliados e interpretados com base nos critérios estabelecidos para o Zoneamento Ambiental Produtivo e a implantação de barragens.

4.3.3 Plataformas de obtenção de dados espaciais

Além dos softwares mencionados anteriormente, foram utilizadas as seguintes plataformas para obtenção de dados espaciais manipulados nos softwares: IDE - Sisema (Sistema Estadual de Meio Ambiente), que forneceu dados espaciais relacionados ao meio ambiente, como unidades de conservação, áreas de preservação permanente e outras informações ambientais relevantes para a região de estudo e o Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel; o ASF Data Search (Alaska Satellite Facility Data Search),

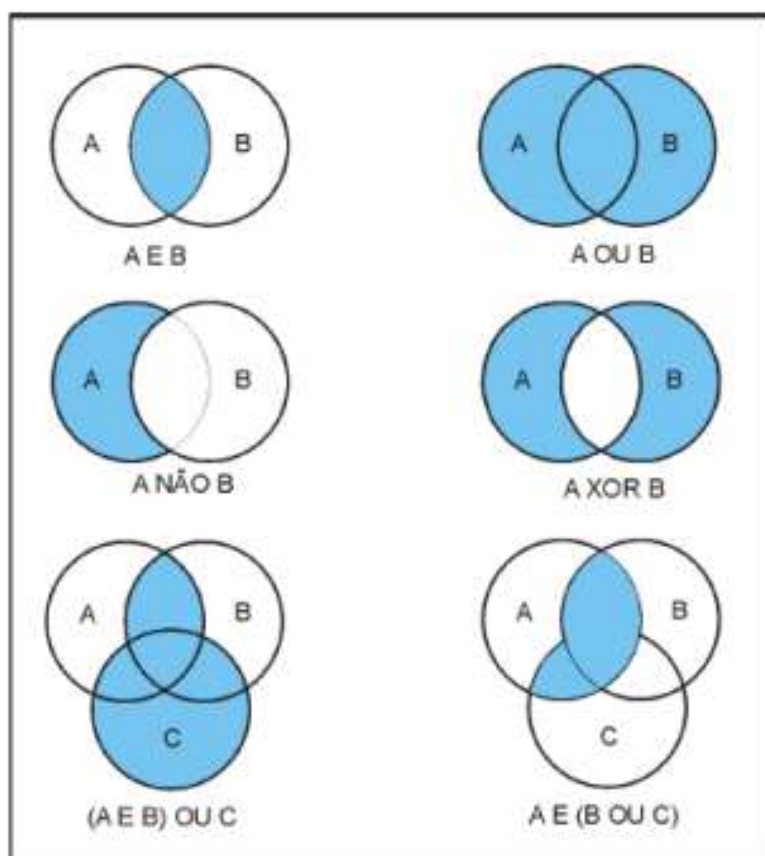
que permitiu obter imagens de satélite de alta resolução da área do Ribeirão Santa Isabel, utilizadas para análises visuais e identificação de características geográficas específicas; e o Hidroweb, uma plataforma que disponibiliza dados hidrológicos, como vazão dos rios, níveis de água e outras informações relacionadas aos recursos hídricos. Esses dados foram utilizados para avaliar a disponibilidade de recursos hídricos na região e analisar sua influência no escopo do estudo.

4.3.4 Análise multicritério

Há diversas abordagens de análise multicritério disponíveis para avaliar e comparar alternativas considerando múltiplos critérios ou objetivos. No presente trabalho, foi utilizada a análise Booleana devido a algumas características principais. A análise Booleana é uma técnica relativamente simples de ser aplicada, permitindo uma rápida identificação de áreas propícias com base em critérios booleanos (verdadeiro/falso). Além disso, essa abordagem é flexível, permitindo a combinação de múltiplos critérios de forma flexível e a incorporação de diferentes variáveis e considerações em uma única análise.

Para identificar as áreas propícias para a construção de barramentos, foi aplicada a análise booleana aos dados obtidos. Segundo Câmara (2007), a álgebra booleana consiste em capturar as principais características dos operadores lógicos e conjuntos, fornecendo uma estrutura para lidar com afirmações e suas propriedades essenciais, utilizando operações lógicas como "E" (AND), "OU" (OR) e "NÃO" (NOT), para identificar áreas que atendam a critérios específicos. A Figura 2 apresenta o Diagrama de Venn, no qual é possível visualizar a aplicação dos operadores utilizados nesse tipo de algoritmo.

Figura 2: Diagrama de Venn.



Fonte: Adaptado de Câmara et al. (2007)

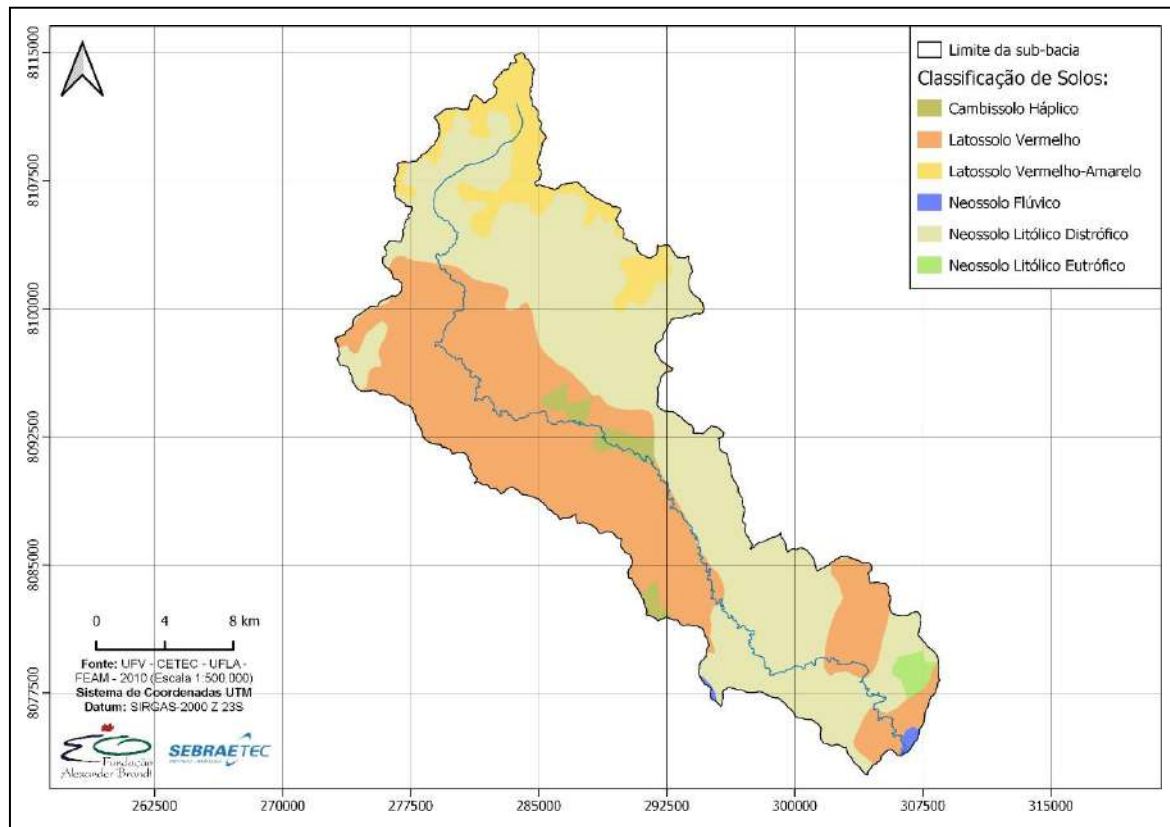
Nesse contexto, utilizou-se os dados do Zoneamento Ambiental Produtivo, informações sobre solo, geologia, unidades de paisagem e disponibilidade hídrica para a identificação de áreas adequadas para a construção de barramentos. Ao combinar essas informações por meio de operações booleanas, pôde-se identificar as áreas que apresentavam as características desejadas. É importante ressaltar que a análise booleana foi realizada utilizando os softwares mencionados anteriormente, permitindo a visualização dos resultados em forma de mapas temáticos e a geração de relatórios descritivos sobre as áreas identificadas.

4.5 Solos

Em relação aos solos presentes na sub-bacia, foram identificadas cinco classes que se fazem presentes, os quais são representados pelas classes dos Cambissolos Háplicos, Latossolos Vermelho, Latossolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Litólicos (ERNESTO et al., 2010). O Neossolo Litólico Distrófico é o mais predominante na área da sub-bacia, sendo encontrado principalmente em áreas de pastagens e agricultura extensiva, enquanto os Latossolos Vermelhos são frequentemente observados em regiões com intensa atividade

agropecuária. Em seguida, realizou-se um estudo utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos como referência para analisar as características dos solos presentes e determinar qual deles será mais adequado para a construção de barragens (Figura 3).

Figura 3 – Representação cartográfica das classes de solos na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018).

Os Cambissolos Háplicos são solos pouco desenvolvidos, com características de pedogênese pouco avançada. Eles apresentam uma estrutura do solo pouco desenvolvida, com pouca alteração do material de origem, evidenciada pela quase ausência de estrutura da rocha ou estratificação dos sedimentos. Esses solos são comumente encontrados em relevos fortemente ondulados ou montanhosos e não possuem o horizonte superficial A Húmico. O mesmo apresenta fertilidade natural variável, mas apresentam limitações para uso, como relevo com declives acentuados, pequena profundidade e ocorrência de pedras na massa do solo. Quanto à drenagem, podem variar de fortemente a imperfeitamente drenados. Quando localizados em planícies aluviais, estão sujeitos a inundações, que podem ser frequentes e de média a longa duração, o que limita seu uso agrícola pleno (EMBRAPA, 2021).

Já os Latossolos são solos caracterizados por uma intensa intemperização, sendo conhecidos como solos velhos. Os Latossolos possuem boas condições físicas para uso agrícola, pois são solos bem estruturados e altamente porosos, o que contribui para uma boa permeabilidade. No entanto, devido às suas características físicas, apresentam baixa retenção de umidade, especialmente aqueles de textura mais grossa em climas mais secos. São adequados para uso agrícola devido às suas boas condições físicas, como estrutura bem desenvolvida e alta porosidade, embora tenham baixa retenção de umidade. Além disso, são resistentes aos processos erosivos devido às suas boas condições físicas. Os Latossolos Vermelhos são solos com cores vermelhas intensas devido aos óxidos de ferro presentes. Eles ocorrem em áreas bem drenadas e possuem características uniformes de cor, textura e estrutura. São mais comuns em áreas de relevo plano ou suavemente ondulado, o que facilita a mecanização agrícola. Esses solos são profundos, porosos e permeáveis, mas requerem atenção para evitar a compactação do solo. Outro Latossolo que é presente na área de estudo é o Latossolo Vermelho-Amarelo que está associado a relevos planos, suavemente ondulados ou ondulados e é encontrado em ambientes bem drenados. Esses solos são muito profundos e apresentam características de cor, textura e estrutura uniformes ao longo de sua profundidade. Sua coloração varia entre o vermelho e o amarelo, e eles desempenham um papel importante na agricultura devido à sua capacidade de armazenamento de água e nutrientes (EMBRAPA, 2021).

Por fim, outro solo que é presente na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel é o Neossolo. São solos pouco evoluídos que possuem pouca manifestação dos atributos diagnósticos de formação do solo. Eles ocorrem em uma ampla gama de ambientes, desde áreas com relevos movimentados até áreas planas com influência do lençol freático. Os Neossolos em encostas são especialmente suscetíveis à erosão, exigindo práticas conservacionistas. Esses solos têm limitações em termos de fertilidade natural e retenção de água, o que pode afetar sua aptidão para uso agrícola. Neossolos Flúvicos são solos encontrados em áreas próximas a rios ou drenagens em relevo plano. Eles são formados por camadas de solo depositadas e estão sujeitos a riscos de inundação. Apesar da variação em suas propriedades físicas, esses solos são considerados com grande potencial agrícola. Neossolos Litólicos são solos rasos encontrados em áreas com declives acentuados. Suas principais limitações para o uso agrícola estão relacionadas à pouca profundidade, presença da rocha próxima à superfície e aos declives íngremes. Essas características podem afetar a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, bem como o desenvolvimento do sistema radicular e aumentar o risco de erosão do solo (EMBRAPA, 2021).

4.6 Geologia

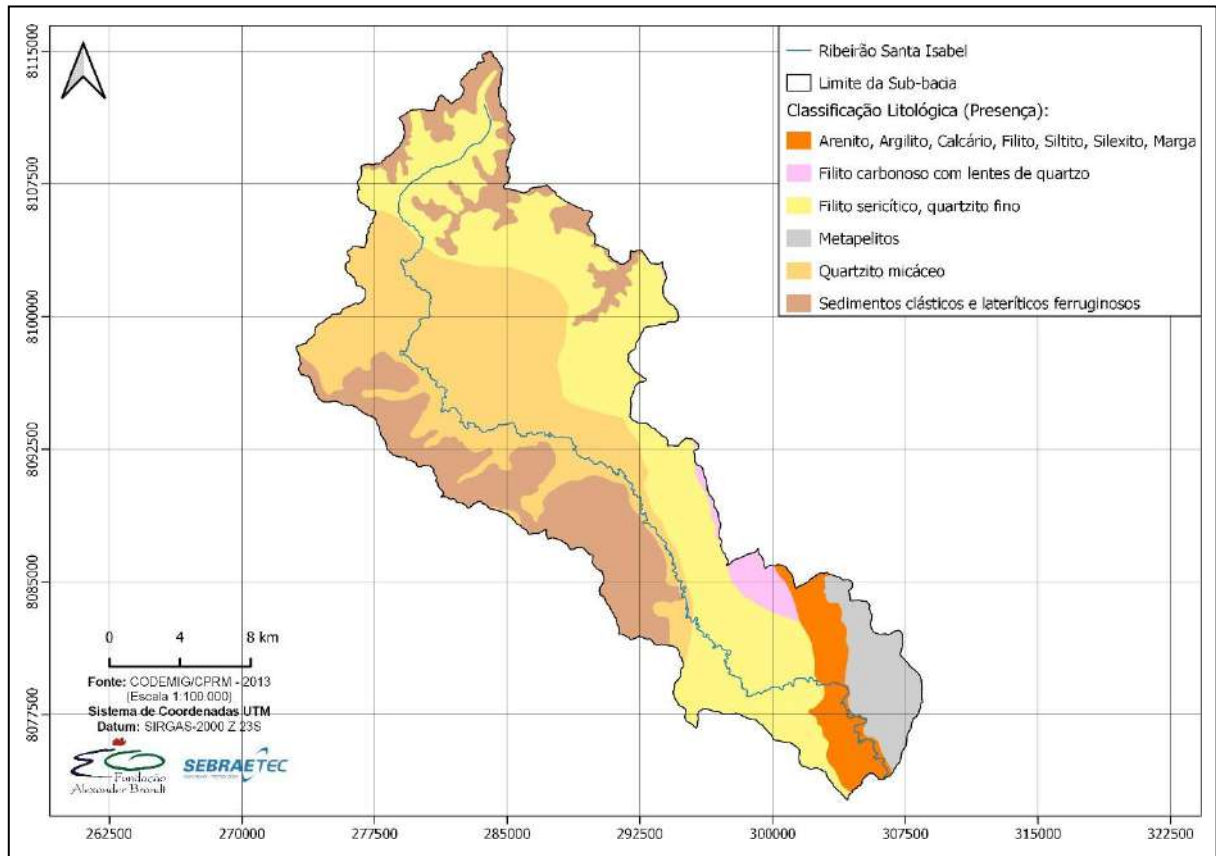
De acordo com o Zoneamento Ambiental Produtivo, foram apresentados dados referentes à geologia e solo, sendo esses dados obtidos em outros trabalhos. De acordo com pesquisas conduzidas por Hasui et al. (2012), do ponto de vista geológico, a área em questão está situada no Cinturão Brasília, mais precisamente na Faixa Brasília, na região oeste das unidades dos Grupos Canastra e Vazante, caracterizadas predominantemente por rochas metassedimentares.

Segundo Hasui et al. (2012), no grupo Canastra, a Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel é composta pelas Formações Paracatu e Chapada dos Pilões, constituídas principalmente por quartzitos basais e filitos carbonosos. Já no grupo Vazante, a sub-bacia é formada pelas Formações Lapa e Serra do Poço Verde, compostas por dolomitos estromatolíticos, brechas intraformacionais, ardósias carbonosas, metassiltitos, arenitos conglomeráticos e quartzitos. A extensa área de sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos é classificada pela CODEMIG (2014) como cobertura superficial indiferenciada. As classes litológicas encontradas foram: Arenito, Argilito, Cálcario, Filito, Siltito, Silexito, Marga; Filito carbonoso com lentes de quartzo; Filito sericítico, quartzito fino; Metapelitos; Quartzito micáceo; Sedimento clásticos e lateríticos ferruginosos. Considerando as classes litológicas identificadas, foi necessário determinar quais delas seriam utilizadas para as áreas mais adequadas, levando em consideração o solo apto de referência (Figura 4). Sendo assim as únicas classes que não foram consideradas foram: Arenito, Argilito, Cálcario, Filito, Siltito, Silexito, Marga e Metapelitos.

A abordagem adotada justifica-se pelo fato de que a primeira classe inclui uma variedade de formações geológicas, como Arenito, Argilito, Calcário, Filito, Siltito, Silexito e Marga. Entretanto, devido à impossibilidade de separar o Arenito das demais formações, optou-se por não utilizá-lo, principalmente devido às suas características de alta permeabilidade, o que resulta em elevada taxa de infiltração e percolação da água. Essa condição pode acarretar em significativas perdas de água no reservatório, o que não é desejável para as áreas aptas para construção. Diante dessa consideração, optou-se por utilizar solos mais argilosos, que proporcionam áreas com menor taxa de infiltração. Isso implica em reduzir as perdas de água do reservatório por percolação e infiltração no solo, garantindo assim a disponibilidade de água. Optou-se por não utilizar os metapelitos devido à sua composição predominante de argila e minerais metamórficos, como mica e quartzo. Essas rochas são formadas a partir da transformação de sedimentos argilosos por meio do processo de metamorfismo, o qual pode

causar mudanças na estrutura e composição dos metapelitos devido a altas temperaturas e pressões.

Figura 4 – Representação cartográfica das classes litológicas na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.

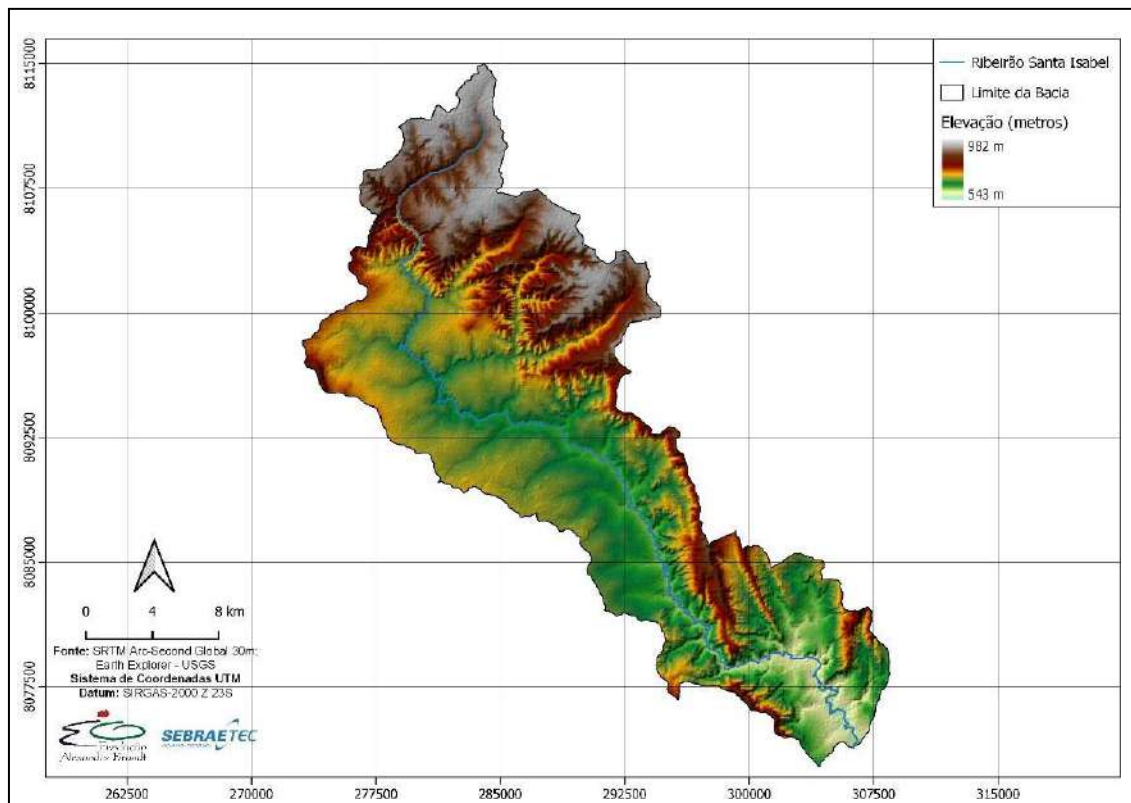


Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018)

4.7 Altitude e declividade

A Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel está localizada na Depressão São-Franciscana e apresenta um relevo moderadamente plano, com algumas elevações. A altitude varia de 982 metros na cabeceira da sub-bacia, na região oeste, até 543 metros na foz do ribeirão, na região leste (Figura 5).

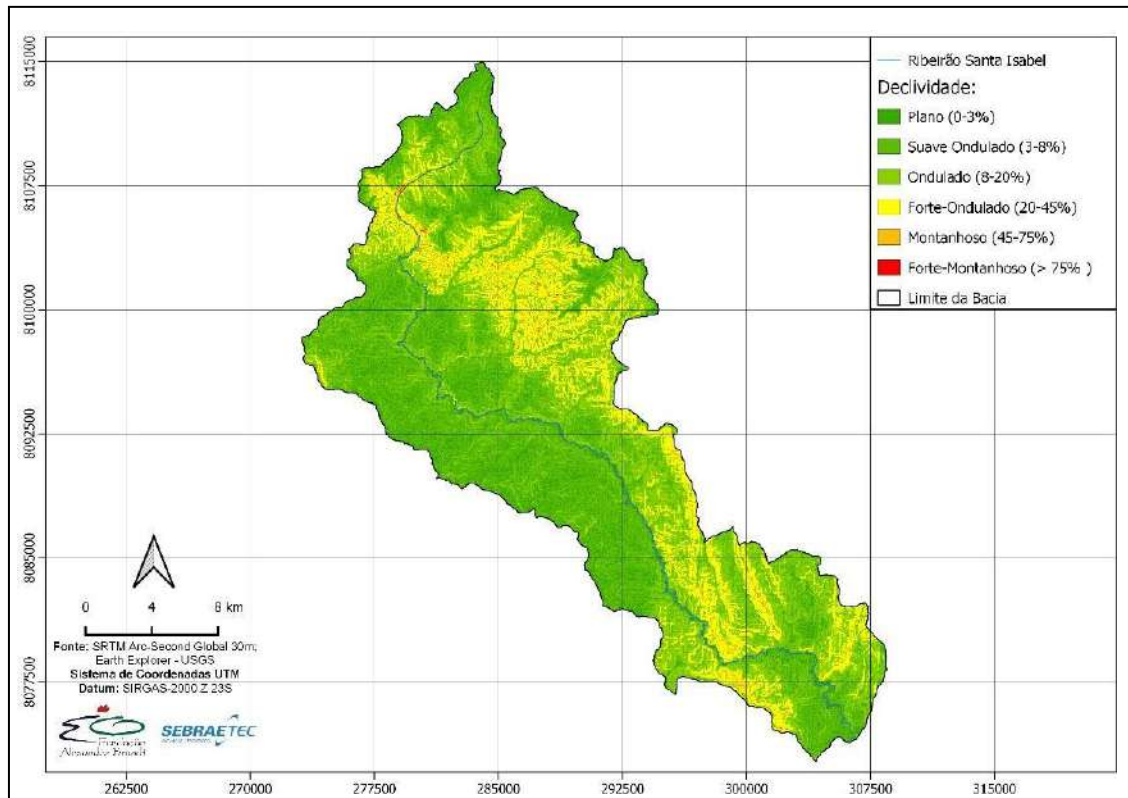
Figura 5 – Representação cartográfica do Modelo Digital de Elevação (MDE) na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018)

Na região oeste, a declividade apresenta-se de forma suave, com valores concentrados entre 0% e 8% (Figura 6). Porém, nas regiões norte e leste, a paisagem revela uma maior diversidade topográfica, com declividades mais pronunciadas, atingindo valores superiores a 45%. Essa variação significativa na inclinação do terreno pode ter implicações importantes na hidrologia local, no uso da terra e na vulnerabilidade a processos erosivos. É fundamental considerar essas distintas características de declividade em qualquer planejamento territorial e na tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento sustentável da região.

Figura 6 – Representação cartográfica da Declividade na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018)

4.8 Unidades de Paisagem

As unidades de paisagem desempenham um papel essencial na análise e classificação do ambiente, sendo definidas como diferentes áreas geográficas dentro da região de estudo que apresentam características físicas, biológicas e socioeconômicas distintas. A identificação e delimitação das unidades de paisagem são realizadas com base em características como topografia, geologia, vegetação, uso do solo e aspectos sociais.

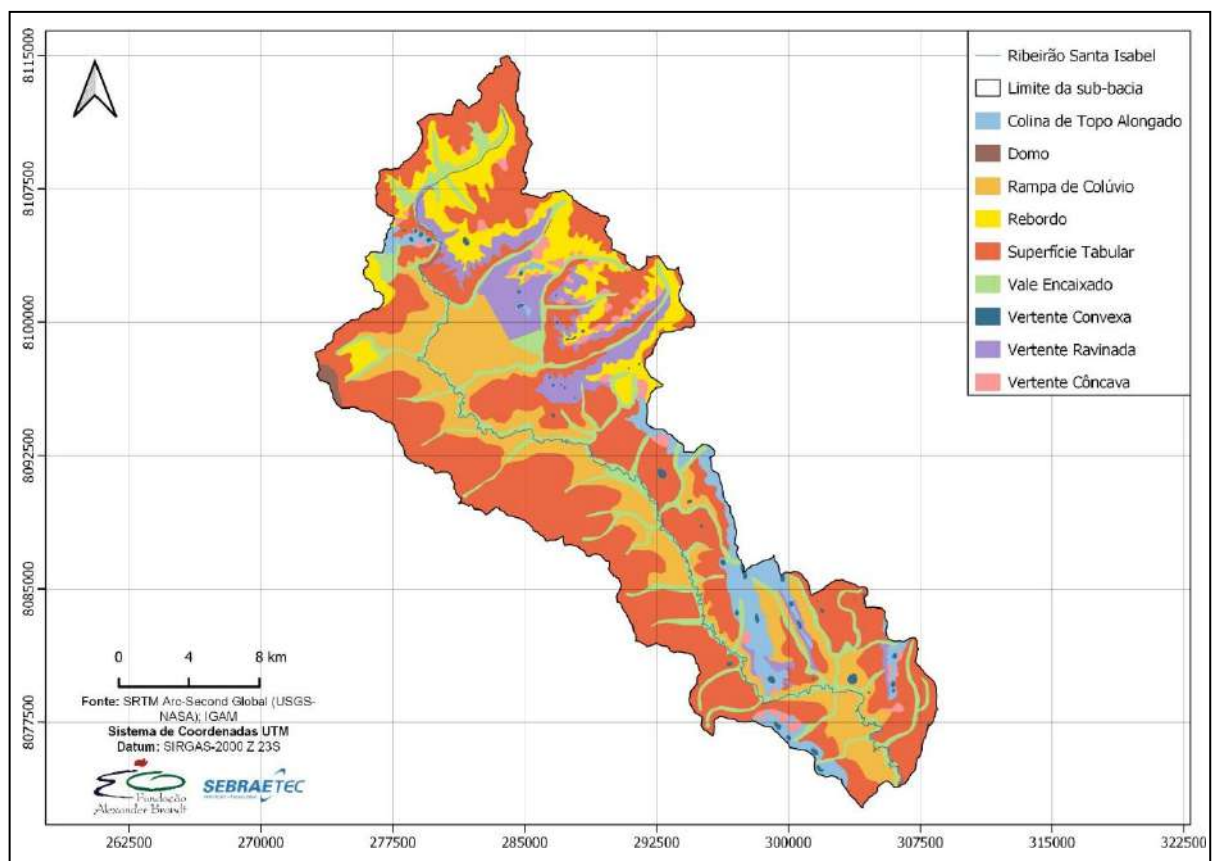
Portanto, as unidades de paisagem são importantes ferramentas de análise e tomada de decisão no contexto do Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel, permitindo a compreensão das características distintas do ambiente e contribuindo para a elaboração de estratégias adequadas de uso e gestão dos recursos naturais.

No Zoneamento Ambiental Produtivo, foram identificadas nove classes que descrevem as características do meio físico: Colina de Topo Alongado, Domo, Rampa de Colúvio, Rebordo, Superfície Tabular, Vale Encaixado, Vertente Côncava, Vertente Convexa e Vertente Ravinada. Essas classes fornecem a base para uma metodologia de caracterização integrada do ambiente físico, permitindo inferências sobre os aspectos bióticos e antrópicos. Essa abordagem

visa promover a adequação ambiental e produtiva desse território geográfico, considerando suas características específicas. O próprio Zoneamento Ambiental Produtivo fornece um quadro que resume as Unidades de Paisagem e suas limitações. Com base nessas características, decidiu-se não empregar as seguintes unidades: Domo - Solos rasos e instáveis, além de apresentar ocorrência de rochas subsuperficiais; Rebordo - Alta vulnerabilidade ambiental, relevo acidentado e solos rasos, podem apresentar refúgio de fauna silvestre e ocorrência de nascentes; Vertente Convexa - Baixa fertilidade e acidez elevada, comprimento da vertente em declive e suscetibilidade a processos de erosão hídrica laminar; Vertente Ravinada - Relevo acidentado, pedregosidade, solos rasos e instáveis.

Com base nas características mencionadas acima, optou-se por não utilizar as Unidades de Paisagem mencionadas (Figura 7).

Figura 7 – Representação cartográfica das Unidades de Paisagem na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: Adaptado de Rodrigo et al. (2018).

4.8 Processamento de dados

Foi utilizado o software QGIS para análise geoespacial dos dados de solo, geologia e unidades de paisagem, que são fundamentais para a análise do zoneamento. Em seguida, foi realizada a reprojeção dos dados para o sistema de coordenadas Sirgas 2000 23S, etapa importante para garantir a consistência e integração dos dados, possibilitando a sobreposição correta das informações.

Utilizando o método de análise booleana, foram realizadas operações de interseção e sobreposição entre os arquivos de solo, geologia e unidades de paisagem. Isso permitiu identificar áreas com características específicas que atendem aos critérios estabelecidos para as áreas propícias à implantação de barragens. No entanto, foi necessário realizar a correção das geometrias dos lugares aptos para garantir sua exatidão e consistência. Isso envolveu ajustes nas formas e limites das áreas identificadas, evitando sobreposições ou lacunas.

Por fim, os arquivos de solo, geologia e unidades de paisagem foram novamente interseccionados para fornecer uma visão integrada das características consideradas essenciais para construção dos barramentos. Essa etapa permitiu obter uma compreensão abrangente das relações entre esses elementos e suas influências no planejamento e tomada de decisões. O Google Earth Pro foi utilizado para realizar uma análise mais detalhada das junções dos cursos hídricos identificados como locais adequados para a construção das barragens, podendo ter uma visão mais detalhada da topografia, vegetação e uso antrópico.

Além disso, foi realizado o cálculo do volume acumulado de água nas barragens, que é um fator crucial para determinar a capacidade de armazenamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Essa informação é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos da região e para garantir o abastecimento adequado em diferentes períodos e a regularização do curso hídrico. Ao utilizar o Google Earth Pro, obteve-se informações precisas e visualizações em 3D dos locais selecionados para a implantação das barragens. Essa abordagem permite uma análise mais detalhada do terreno, facilitando a identificação de áreas de maior potencial e auxiliando na tomada de decisões estratégicas.

4.9 Comparação das áreas propícias para a implantação de barramentos com as propostas no Zoneamento Ambiental Produtivo

A metodologia empregada nos dois estudos revela abordagens distintas na avaliação das áreas propícias para a implantação de barragens na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.

No Zoneamento Ambiental Produtivo, a metodologia se baseou principalmente no déficit hídrico calculado para a área de agricultura irrigada e na demanda para abastecimento humano. Com base nesses fatores, foram determinadas as áreas para a construção das barragens. Nesse caso, maior ênfase foi dada à disponibilidade de água como critério principal.

Por outro lado, o presente trabalho adotou uma abordagem mais abrangente, considerando múltiplos fatores em sua metodologia de avaliação. Além do déficit hídrico, foram levados em conta aspectos como solo, geologia, unidades de paisagem, exposição do solo, intensidade das chuvas, risco de erosão, vulnerabilidade dos solos à erosão, precipitação média anual e cobertura e uso da terra. Essa metodologia mais ampla proporcionou uma análise mais completa e integrada das áreas propícias para a implantação de barragens, considerando não apenas a disponibilidade de água, mas também fatores geológicos, ambientais, sociais e de risco.

4.10 Disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão

De acordo com a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março de 2012, que estabelece as diretrizes para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais, as outorgas de água a fio d'água podem ser concedidas até que seja alcançado 50% da vazão mínima média de sete dias de duração, considerando um período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$), para a maioria das bacias hidrográficas estaduais. Em situações em que o curso d'água esteja regularizado, as outorgas podem ser concedidas até que seja atingida a vazão média de longa duração (Q_{mld}), deixando uma vazão remanescente de pelo menos 50% da $Q_{7,10}$.

Para saber o acréscimo em disponibilidade hídrica devido à consideração da vazão permissível para outorga foi utilizada a fórmula proposta por BALIEIRO et al. (2018), os quais consideram a relação entre a disponibilidade hídrica potencial (Q_{mld}) e a natural ($Q_{7,10}$) ao longo da hidrografia. Em seguida, calculou-se o aumento de disponibilidade devido à consideração da vazão permissível para outorga para condições de regularização em relação ao critério a fio d'água, a partir da aplicação da Equação 1. Os valores $Q_{mld}/Q_{7,10}$ podem variar de 1 a 10, sendo que quanto maior for esse valor, maior será a $\Delta Disp. \%$ no curso hídrico (Eq. 01).

$$\Delta \text{Disp. \%} = \frac{(Q_{\text{mld}} - 0,5 Q_{7,10}) - 0,5 Q_{7,10}}{0,5 Q_{7,10}} 100 \quad (\text{Eq. 01})$$

Em que;

$\Delta \text{Disp. \%}$ - aumento da disponibilidade hídrica resultante da consideração da vazão admissível, ao mesmo tempo em que se dá as condições de regularização em relação ao critério a fio d'água.

4.11 Gestão e manejo da bacia hidrográfica e uso e conservação do solo e da água

A gestão e manejo da bacia hidrográfica, juntamente com o uso e conservação do solo e da água foram considerados neste trabalho por meio do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), que se enquadra na Política Nacional do Meio Ambiente e disponibiliza diversos instrumentos e projetos territoriais para realizar as devidas análises de gestão e manejo da bacia, levando em consideração as áreas propícias à implantação de barragens na sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel.

Foram empregados os dados de precipitação média anual, vulnerabilidade do solo à erosão, risco potencial de erosão, intensidade de chuva e exposição do solo, fornecidos pelo Zoneamento Ecológico-Econômico, disponibilizados no site IDE Sisema. Após o download dos dados, foi necessário utilizar o software QGIS para manipulá-los, realizar as reprojeções das coordenadas necessárias e corrigindo as geometrias dos arquivos.

Com as correções realizadas, foi realizado um recorte de cada camada em relação ao limite da sub-bacia. Em seguida, cada camada foi sobreposta, considerando as áreas mais propícias para a implantação de barragens. Essa sobreposição permitiu avaliar a necessidade de algum trabalho prévio para recuperar determinadas áreas ou até mesmo prever áreas onde possa ocorrer erosão do solo, o que poderia resultar em assoreamento das barragens. Além disso, com base nas informações do Zoneamento Ecológico-Econômico, também foram consideradas a precipitação média anual e a intensidade de chuva na sub-bacia. Essas características são primordiais para a construção das barragens, uma vez que áreas com maior intensidade de chuva tendem a maiores valores de escoamento superficial.

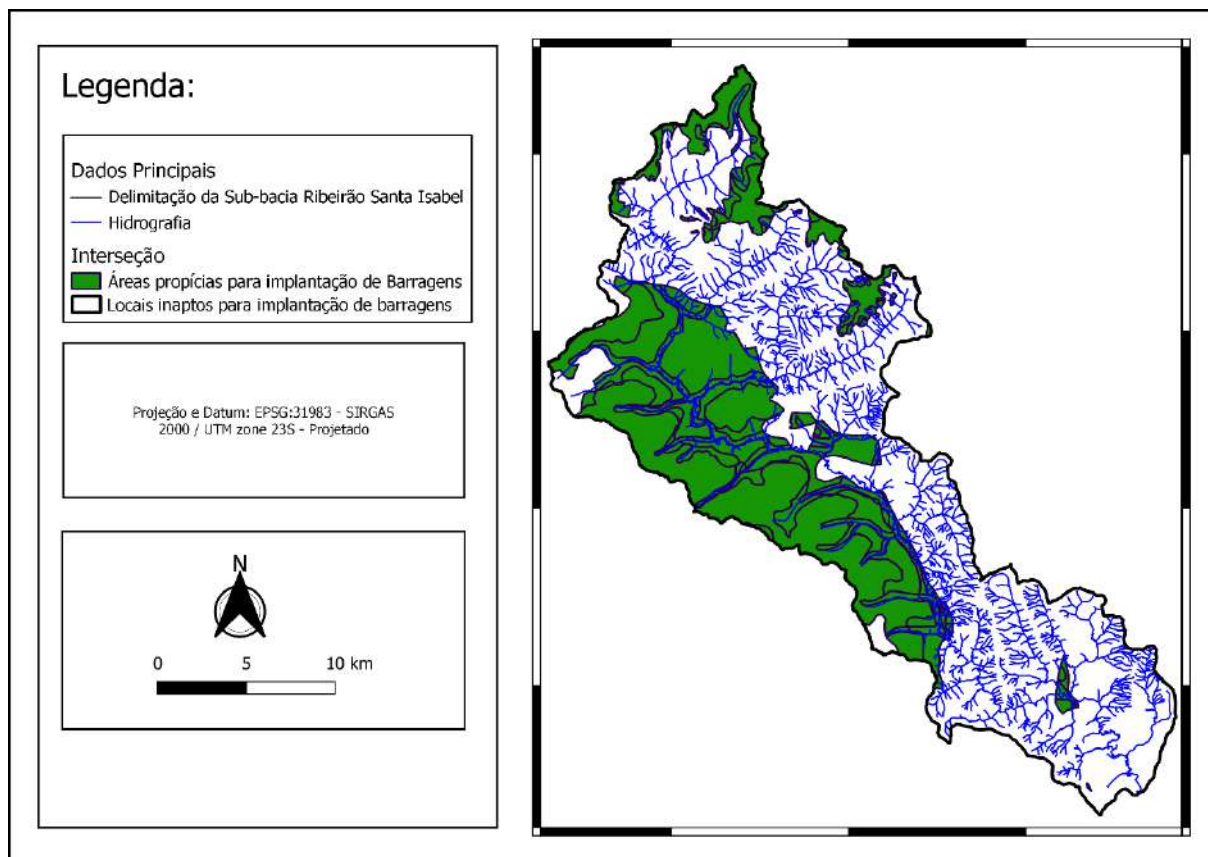
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das áreas propícias

Considerando as características físicas, biológicas e socioeconômicas da Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel, foi possível determinar as regiões que apresentam as condições mais favoráveis para a construção das barragens.

A análise das características do solo permitiu avaliar sua capacidade de suporte e estabilidade, enquanto o estudo da geologia possibilitou identificar formações rochosas adequadas para a contenção da água. Além disso, a consideração das unidades de paisagem contribuiu para compreender a diversidade e heterogeneidade do ambiente, auxiliando na escolha de áreas que harmonizam com o contexto regional. Essa abordagem integrada foi fundamental para o mapeamento e a identificação precisa das áreas propícias (Figura 8), fornecendo subsídios valiosos para o planejamento e a tomada de decisões no âmbito do desenvolvimento ambiental e produtivo da região.

Figura 8 – Representação cartográfica das áreas propícias à implantação de barragens Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.

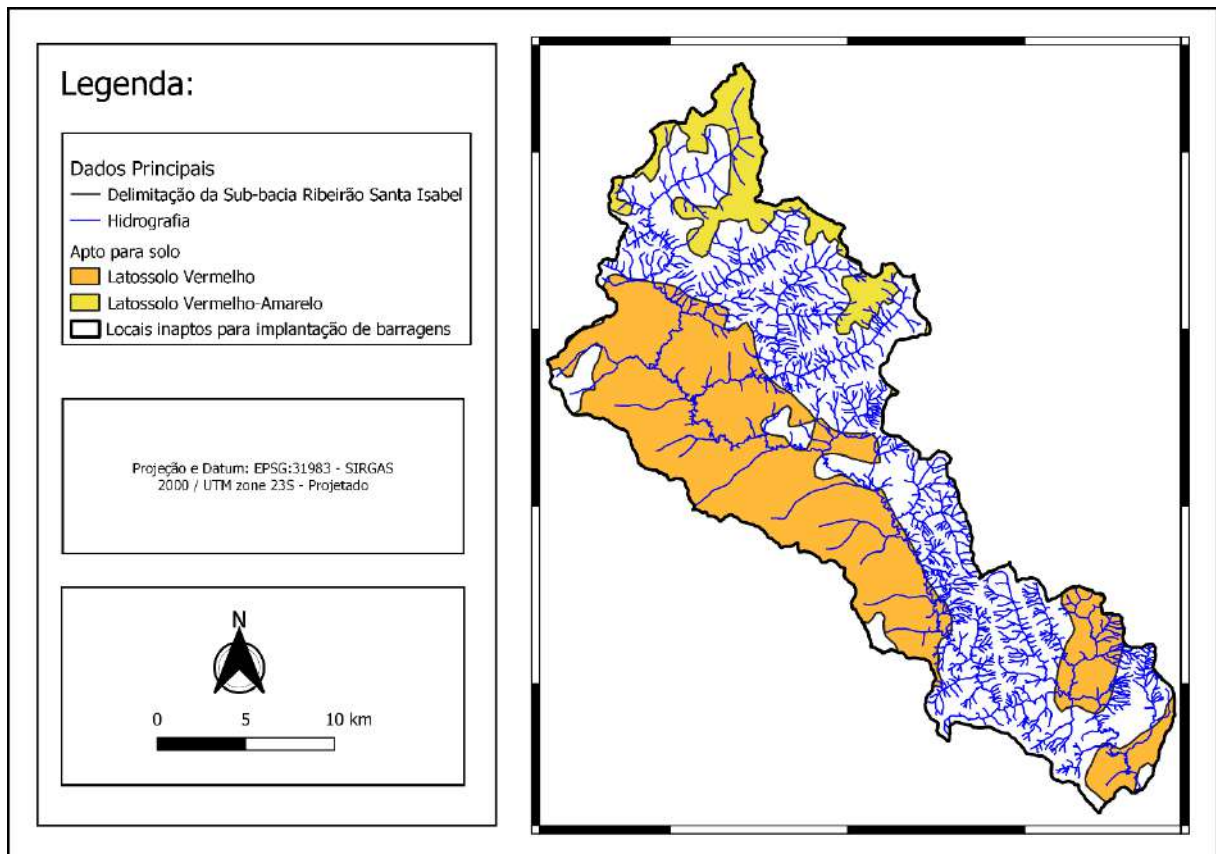


Fonte: O autor.

5.2 Áreas propícias em relação ao tipo de solo

Nesse quesito foram considerados fatores como a capacidade de suporte e estabilidade do solo, sua capacidade de retenção de água e a presença de camadas impermeáveis. Com base nessas informações, foi possível identificar que o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho-Amarelo foram os solos considerados favoráveis para a implantação das barragens na sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel, levando em conta as características dos mesmos em relação as boas condições físicas para uso agrícola, pois são solos bem estruturados, dessas estruturas (Figura 9). Essa análise detalhada dos tipos de solo presente na área de estudo é fundamental para garantir o sucesso do projeto e minimizar possíveis impactos ambientais.

Figura 9 – Representação cartográfica dos locais aptos para solos na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel



Fonte: O autor

Conforme Dermeval (2018), a escolha adequada do solo para a construção de barragens é fundamental para garantir a estabilidade e eficiência dessas estruturas. É necessário considerar algumas características do solo, como:

- Solos com muitos afloramentos de rochas: Devido à falta de uma boa ligação entre o maciço e os lajedos de pedra do terreno, causando permeabilidade do solo no fundo do reservatório, esses tipos de solo mencionados não são adequados para a construção de barragens de terra. Essa condição aumenta consideravelmente o risco de deslizamentos e rompimentos do maciço, justamente pela percolação da água em solos mais arenosos. Portanto, em áreas com essas características, é recomendável optar por outros tipos de barragens, como as de alvenaria;

- Solos firmes e profundos, com características argilosas: Condição ideal para a construção de barragens, para a construção de barragens de terra, é ideal que o solo esteja seco, firme e profundo, permitindo o assentamento direto da barragem sobre o solo;

- Solos arenosos: Se o solo no local for arenoso ou apresentar camadas de areia próximas à superfície, não é recomendado construir a barragem diretamente sobre o terreno. Isso ocorre devido à alta taxa de infiltração de água que pode comprometer a eficiência da estrutura. É necessário considerar outras opções de construção como barragens de concreto e enrocamento para garantir a segurança e estabilidade da barragem;

- Solos úmidos ou parcialmente alagados (brejos): Se o solo é caracteristicamente úmido para brejos, é devido ao fato de haver muitas "micronascentes" ou nascentes esparsas na área. Neste caso, também não é recomendado construir um aterro apenas para apoiar no solo, pois a presença de nascentes sob o aterro pode se tornar um grande problema no futuro e até causar deslizamentos de terra no aterro.

Essas características são atribuídas ao fato de que esses solos são altamente desenvolvidos, possuem boa profundidade e ausência de afloramentos rochosos. Além disso, têm baixa retenção de umidade e demonstram resistência aos processos erosivos devido às suas propriedades físicas (EMBRAPA, 2021). O Latossolo Vermelho se apresenta em 40,46% da área total da Sub-Bacia e o Latossolo-Vermelho-Amarelo em 8,30% da área da bacia. Sendo assim, 48,76% da área pode ser classificada apta para implantação dos barramentos, considerando os solos predominantes, embora outros critérios também devam ser analisados para a indicação de aptidão.

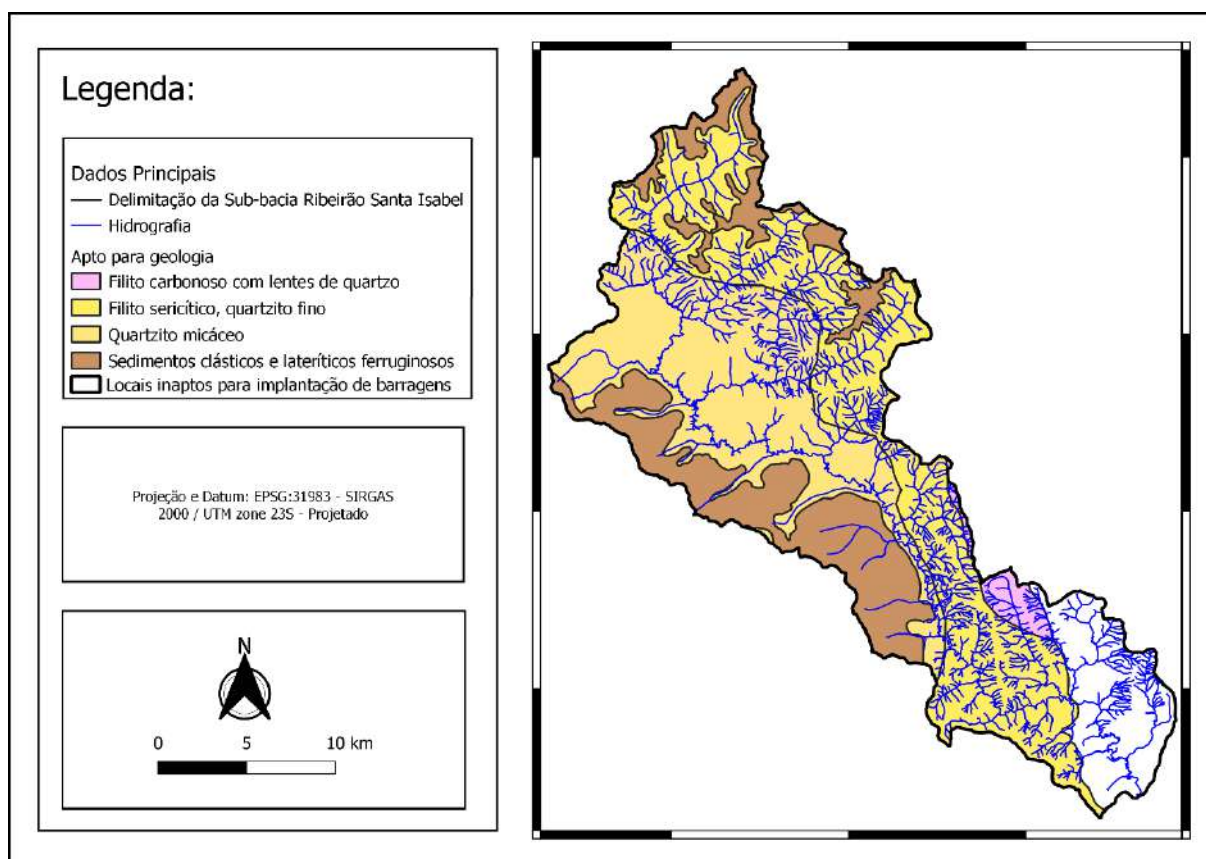
5.3 Áreas propícias em relação à geologia

Em relação à geologia foram definidas as seguintes classes: filito carbonoso com lentes de quartzo; filito sericítico, quartzito fino, quartzito micáceo e sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos.

Em princípio, a grande maioria dos materiais geológicos são estáveis, exceto os que podem sofrer alteração, por exemplo, modificando suas propriedades geotécnicas (Leão, 2020). Essas alterações podem envolver o surgimento de novos minerais, modificações na textura da rocha e reorientação dos minerais presentes. Portanto, os metapelitos estão sujeitos a alterações durante os processos geológicos e não foram considerados.

Sendo assim a classes de Filito carbonoso com lentes de quartzo apresentou 2,06% de área apta para implantação, já a classe Filito sericítico, quartzito fino teve 35,57% apta, seguida por 30,16% de Quartzito micáceo e 21,49% Sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos, totalizando 89,28% apto para implantação e 10,72% inapto em relação a geologia selecionada (Figura 10).

Figura 10 – Representação cartográfica dos locais aptos para geologia na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: O autor.

5.4 Áreas propícias em relação às Unidades de Paisagem

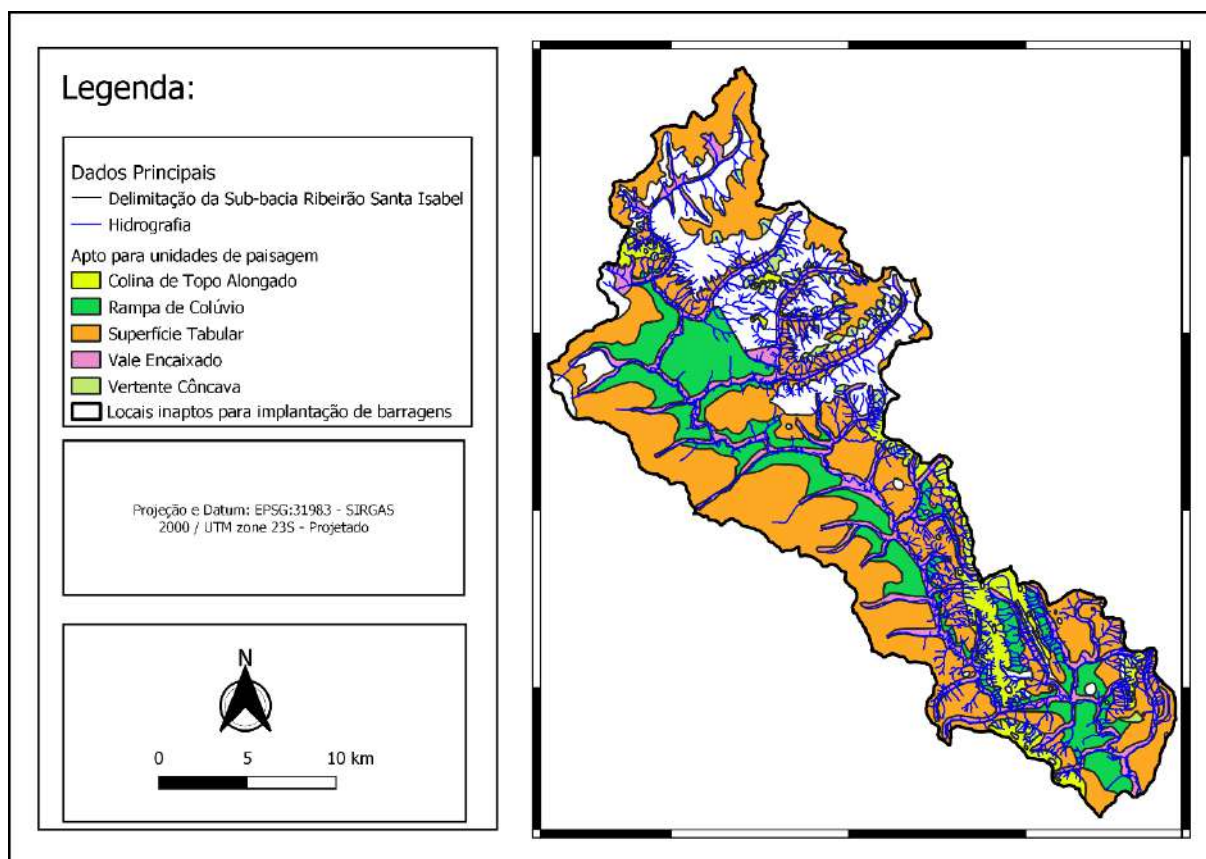
Os resultados obtidos a partir dos dados derivados do mapa de Unidades de Paisagem revelaram informações importantes para a identificação de áreas propícias para implantação de barragens na bacia do Ribeirão Santa Isabel. Neste estudo, foram selecionadas as seguintes

unidades de paisagem: Colina de topo Alongado (5,94%), Vertente Côncava (2,33%), Vale Encaixado (13,69%), Rampa de Colúvio (16,29%) e Superfície Tabular (43,92%).

A escolha dessas unidades de paisagem foi baseada nas informações obtidas no Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel. Para a definição das áreas mais adequadas para a implantação de barragens, levou-se em consideração as características específicas de cada unidade de paisagem e sua compatibilidade com os critérios estabelecidos.

Considerando a área total para implantação em relação às unidades de paisagem selecionadas, verificou-se que corresponde a 82,17% do território analisado. Isso indica que há uma extensa área potencial para a construção de barragens na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel, levando em conta as características das unidades de paisagem escolhidas (Figura 11).

Figura 11 – Representação cartográfica dos locais aptos para unidades de paisagem na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



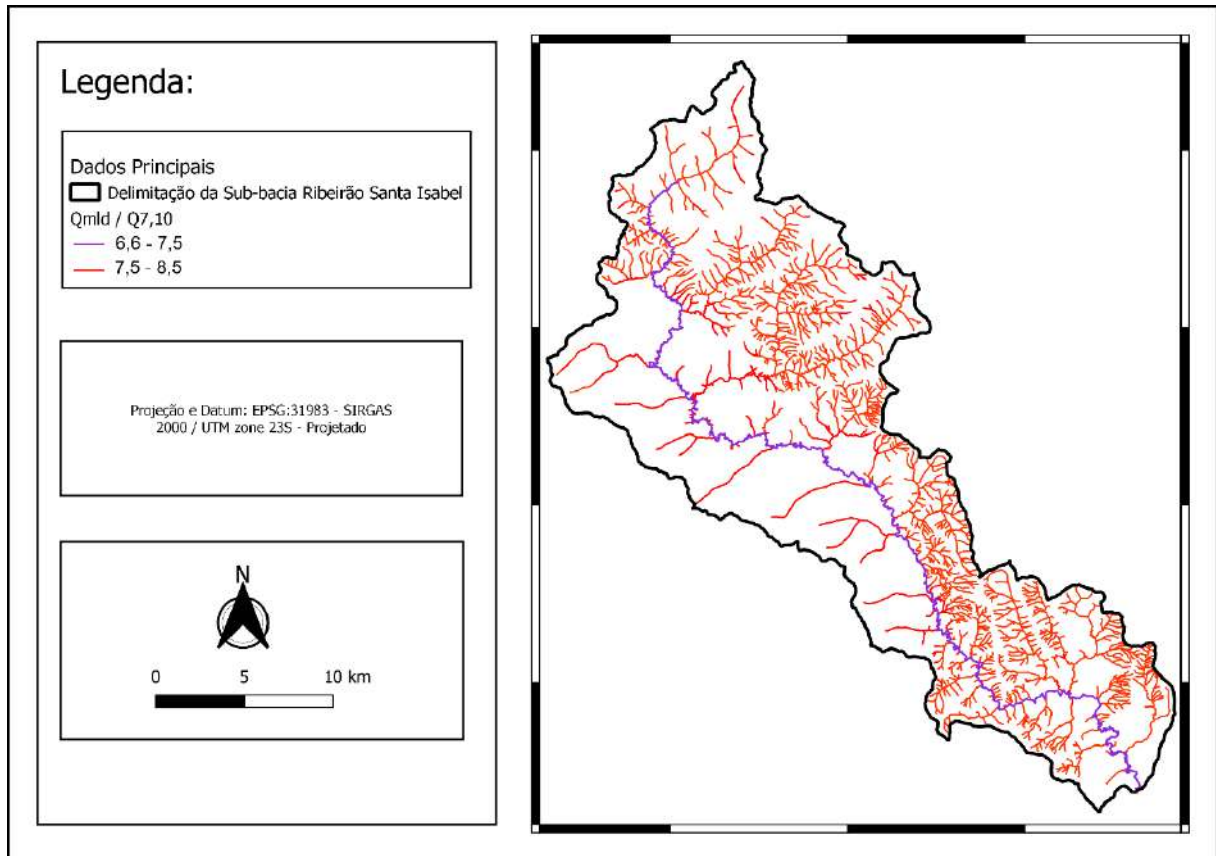
Fonte: O autor.

5.5 Áreas propícias em relação à Disponibilidade Hídrica

Os resultados obtidos a partir dos dados derivados do mapa de Disponibilidade Hídrica revelaram informações significativas para a avaliação das condições hídricas na área de estudo.

Após realizar os cálculos sobre a disponibilidade hídrica, constatou-se que a relação $Q_{mld}/Q_{7,10}$ apresenta valores variando de 6,6 até 7,5 e 7,5 até 8,5 (Figura 12).

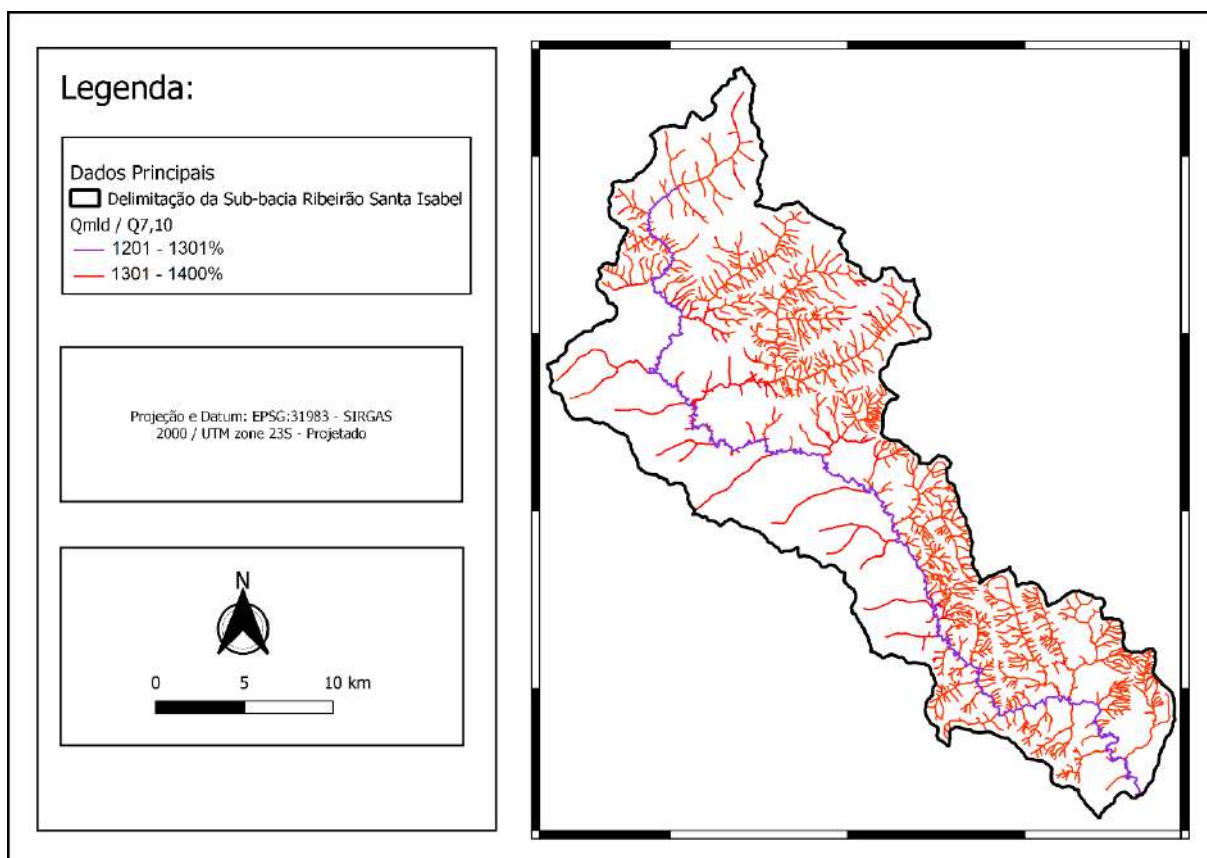
Figura 12 – Representação cartográfica $Q_{mld}/Q_{7,10}$ para a sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: O autor

Já o aumento de disponibilidade hídrica em relação aos índices encontrados acima e a aplicação da fórmula apresentada para utilização do cálculo foi constatada variações onde indicam um incremento de disponibilidade hídrica na faixa de 1201 até 1300% e 1301 até 1400% (Figura 13).

Figura 13 – Representação cartográfica do aumento de disponibilidade hídrica para a sub-bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: O autor

Balieiro et al. (2018), analisando a disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão da bacia do Rio Paracatu, obtiveram relação $Q_{mld}/Q_{7,10}$ variando de 6,6 a 10. No referido estudo, o incremento de vazão variou de 531% a 1795%. É válido ressaltar que a bacia do Rio Paracatu foi dividida em três regiões e os resultados obtidos na região 3, objeto deste estudo, corroboram com a metodologia utilizada. Esses resultados evidenciam a importância do emprego dessa ferramenta, demonstrando sua relevância na avaliação da disponibilidade hídrica.

Esses valores mais elevados podem ser atribuídos à presença de uma região com hidrogeologia cárstica e precipitações anuais mais abundantes nos locais em questão (IGAM, 2006). Essas variações estão relacionadas ao acréscimo na disponibilidade hídrica devido à consideração da vazão permissível para outorga, levando em conta as condições de regularização em relação ao critério de captação a fio d'água. Essa análise demonstra que a área em estudo possui uma boa condição para a construção de barragens, uma vez que os reservatórios de regularização permitem que a disponibilidade de uma bacia se aproxime de seu potencial máximo.

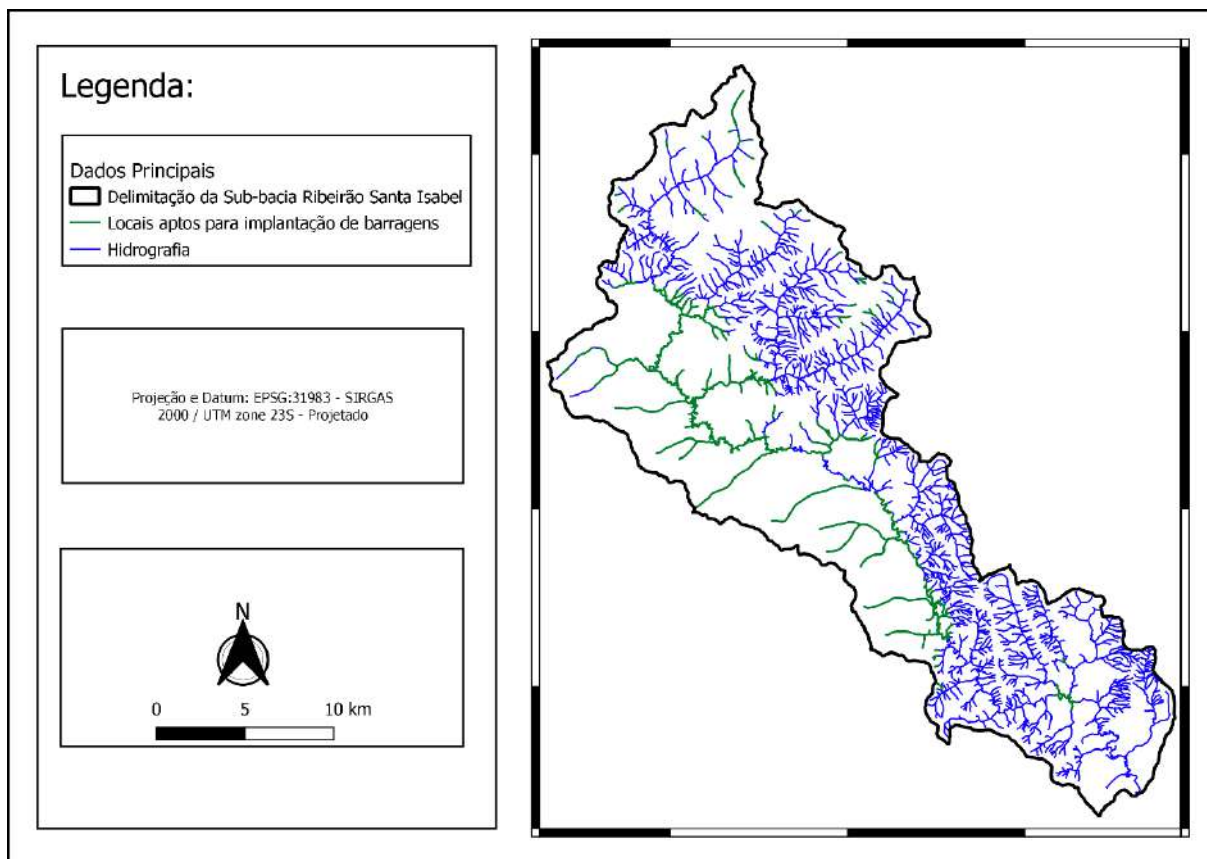
Dessa forma, a construção de barragens na área em estudo apresenta-se como uma alternativa viável para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. A utilização de reservatórios de regularização permitiria uma melhor utilização dos recursos hídricos disponíveis, reduzindo a vulnerabilidade da região em períodos de escassez e contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos na Sub-Bacia do Santa Isabel.

5.6 Resultados quantitativos

Nesta seção são apresentados os resultados quantitativos obtidos a partir da correlação dos arquivos de solo, geologia e unidades de paisagem no Zoneamento Ambiental Produtivo do Ribeirão Santa Isabel, visando identificar áreas propícias para a implantação de barragens.

Após a análise e processamento dos dados, constatou-se que existe uma área total de 9.000 hectares que pode ser considerada apta para a implantação de barragens, de acordo com os critérios estabelecidos. Essa área foi derivada da sobreposição dos arquivos de solo, geologia, unidades de paisagem, altitude, declividade, levando-se em consideração as características favoráveis encontradas em cada critério. Os resultados revelaram que cerca de 18% dos comprimentos dos corpos hídricos da Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel é propício para a implantação de barragens (Figura 14).

Figura 14 – Representação cartográfica dos locais aptos para implantação de barragens na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel.



Fonte: O autor.

Esses resultados são de extrema relevância, pois fornecem informações precisas sobre a disponibilidade de áreas adequadas para a construção de barragens no contexto do Zoneamento Ambiental Produtivo. Tais informações podem ser utilizadas como base para tomadas de decisões estratégicas no planejamento sustentável da região, levando em conta as características físicas e geológicas do ambiente. A combinação de análises quantitativas e qualitativas permite uma avaliação mais abrangente e fundamentada para o desenvolvimento de projetos de implantação de barragens de forma sustentável no Ribeirão Santa Isabel.

5.7 Dados derivados do mapa de Gestão e manejo da bacia hidrográfica

Os dados derivados da análise dos mapas do Zoneamento Ecológico Econômico forneceram informações relevantes para a análise da viabilidade ambiental da implantação de barragens na área de estudo. Embora o presente estudo tenha identificado que 18% da área da sub-bacia sejam adequados para a construção de barragens, é crucial considerar outros aspectos relacionados à segurança ambiental e à manutenção do volume dos reservatórios.

De acordo com o Zoneamento Ecológico Econômico, constatou-se que a sub-bacia apresenta uma precipitação anual de 1420 à 1533 mm, apresentando boas condições para garantir uma disponibilidade hídrica dos reservatórios, porém, por outro lado, tais índices de precipitação juntamente com uma alta vulnerabilidade do solo à erosão hídrica e exposição do solo podem resultar em escoamento superficial, assoreamento do reservatório e, conseqüentemente, alterar a vazão das barragens.

A vulnerabilidade do solo à erosão é outro fator que precisa ser considerado. Sobrepondo as camadas do trabalho em questão com a camada de vulnerabilidade apresentada no Zoneamento Ecológico Econômico foi possível observar que os resultados mostraram que a área possui vulnerabilidade média e vulnerabilidade baixa. Essa informação é relevante para a construção das barragens, pois solos com maiores vulnerabilidades podem apresentar um alto nível de assoreamento dos reservatórios. Além disso, analisando e comparando as camadas de risco potencial de erosão nas áreas definidas para implantação de barragens foi possível classificar como muito baixo. Essa constatação é importante, pois indica que as áreas selecionadas possuem uma menor probabilidade de sofrer processos erosivos que poderiam comprometer a eficiência e a segurança das barragens. Por fim foi sobreposta a camada de exposição do solo com as áreas propostas pelo trabalho e também foi avaliada e constatou-se que é alta nas áreas definidas como aptas para a implantação das barragens. Esse dado ressalta a importância de adotar medidas de manejo adequadas para minimizar os impactos da exposição do solo, como a implementação de práticas de conservação e controle da erosão.

Outro fator importante que foi observado diz respeito ao fato de que, apesar da presença de algumas barragens na Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel, o uso da água está concentrado exatamente na região em que a disponibilidade hídrica é menor e a captação ocorre principalmente a partir da vazão superficial. Essas pequenas barragens existentes foram construídas em tributários de pouca vazão e apesar de serem outorgadas como barragens com regularização de vazão, possuem capacidade limitada para armazenar água durante o período chuvoso, o que dificulta a regularização em outros trechos à jusante da Sub-Bacia. Araújo et al. (2015) destacam que a principal função de um reservatório é regular o fluxo hídrico, proporcionando um abastecimento de água mais estável. Isso resulta na aproximação da capacidade máxima da bacia hidrográfica, representada pela vazão média de longo período. Deste modo, as vazões à jusante do reservatório deixam de refletir a vazão mínima ou natural, passando a representar uma porção do potencial de vazão do corpo d'água.

No entanto, é crucial reconhecer que a implantação dessas barragens pode acarretar impactos na vegetação local. Por esse motivo, torna-se imperativo realizar um levantamento ambiental abrangente, a fim de avaliar cuidadosamente a área em questão e determinar se a sua implementação pode resultar na perda significativa de vegetação. Esse levantamento ambiental possibilitará a identificação de espécies vegetais presentes, a análise do ecossistema e a proposição de medidas mitigadoras, garantindo que o desenvolvimento desses projetos seja realizado de forma sustentável, respeitando a integridade do meio ambiente e contribuindo para a preservação da biodiversidade local.

6. CONCLUSÃO

A Sub-Bacia do Ribeirão Santa Isabel possui aproximadamente 173 quilômetros de cursos d' água, porém apenas 32 quilômetros são aptos para implantação de barragens, ou seja, apenas 18% do total.

Em relação ao incremento de disponibilidade hídrica, verificou-se valores na faixa de 1201 até 1400% para a sub-bacia, aumento este considerado de extrema importância para garantir a sustentabilidade hídrica da região, atender às demandas de água e promover o equilíbrio ambiental.

As áreas propostas pelo Zoneamento Ambiental Produtivo estão em consonância com as áreas identificadas no presente estudo. No entanto, é importante destacar que essas áreas estão sujeitas a uma alta exposição do solo, o que pode requerer uma avaliação cuidadosa para determinar a necessidade de recuperação e conservação do solo antes de uma eventual implantação de barragens. O presente estudo, ao considerar o volume estabelecido pelo Zoneamento Ambiental Produtivo, identificou que o aumento da disponibilidade hídrica apresenta vastas oportunidades para o armazenamento por meio das barragens propostas. Isso destaca a viabilidade e a importância desse incremento para a gestão dos recursos hídricos e o suprimento de água na região.

Diante dos resultados, é válido considerar a possibilidade de construir mais de quatro barragens, conforme sugerido no Zoneamento Ambiental Produtivo. Isso poderia ampliar a capacidade de armazenamento de água na região e contribuir para atender às demandas futuras de forma mais eficiente. No entanto, é importante ressaltar que essas considerações estão baseadas em análises preliminares e estimativas. Caso sejam tomadas decisões concretas, é fundamental realizar estudos de campo detalhados para avaliar a viabilidade e os impactos ambientais de forma mais precisa.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho desempenha um papel fundamental como referência e subsídio para a construção e elaboração de futuros projetos. Sua relevância reside na apresentação de um método analítico para realizar o levantamento necessário à construção de barragens. Dessa forma, é de extrema importância que, em trabalhos futuros, se leve em consideração a realização de levantamentos a campo para uma análise mais precisa das áreas selecionadas para a construção.

Uma sugestão essencial a ser considerada é a adoção de barragens menores, em vez de barragens maiores, devido aos menores impactos ambientais e à redução na supressão vegetal. Tal abordagem pode se mostrar mais benéfica tanto para o meio ambiente quanto para a comunidade local. Portanto, recomenda-se que, nos futuros trabalhos, seja dada uma maior ênfase à avaliação detalhada dos impactos ambientais associados à construção de barragens e à busca de alternativas que minimizem esses efeitos adversos

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). **Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728.
- AYOADE, J. O. (2001). **Introdução à climatologia para os trópicos**, (6ª edição). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 332 p.
- BARROS, Ana Clara de. **Análise multicritério aplicada ao zoneamento agrícola do município de Itaberá-SP**. 2016. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2016.
- BENDA, F. **Favorabilidade de áreas para implantação de aterros controlados no município de Campos dos Goytacazes/RJ utilizando sistemas de informação geográfica**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2008.
- BARROS, J. L. et al. **A manutenção preventiva em Barragens**. Irriga, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 242-253, 2016.
- BRASIL. Portaria IGAM N° 29. Decreto n° 47.866, de 19 de fevereiro de 2020. **Declara as Áreas de Conflito**. Belo Horizonte, 19 de junho de 2020.

Carvalho, J. P., Melo, R. F., Gomes, J. A., & Silva, F. D. (2020). **Multi-criteria decision analysis in water resources planning and management**: A review of the state-of-the-art. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 69(1), 1-22.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. **Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos**: INPE, 2013. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

CLARKE, R. T.; TUCCI, C. E.; COLLISCHONN, W. **Variabilidade temporal no regime hidrológico da bacia do rio Paraguai**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 8 n. 1 jan mar p. 201-211, 2003.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras**. 2006. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Sociais Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

CODEMIG - **Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2014. Escala 1:1.000.000

DEUS, L. A. B., NASCIMENTO, J. A. S. **Desafio Da Sustentabilidade Da Mineração Na Amazônia - O Geoprocessamento Como Instrumento De Análise**. CETEM, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2001.

DERMEVAL, J. S .L. **Quero construir uma barragem de terra. Como deve ser o solo?**. Curso CPT. Disponível em: <https://www.cpt.com.br/cursos-irrigacao-agricultura/artigos/quero-construir-uma-barragem-de-terra-como-deve-ser-o-solo#:~:text=2%20%2D%20Solos%20firmes%20e%20profundos,assentada%20diretamente%20sobre%20o%20solo>>. Acesso em 20 de julho de 2023

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos Tropicais. Brasília, DF, 2021**.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark University, Manual Version 14.00. 328p. 2003.

EASTMAN, J. R. **Decision suport: decision strategy analysis**. In: EASTMAN, J. R. Idrisi Selva Manual, Worcester: Clark Labs, ClarkUniversity, 222 p., 2012.

FROEHLICH, F. S. et al. **Geotechnical aspects of tailings dam safety**. *Journal of Cleaner Production*, v. 234, p. 226-237, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619306971>. Acesso em: 15 abr. 2023.

FERREIRA, A.S. **Uso de geoprocessamento e geotecnologias no mapeamento de áreas de vulnerabilidade à inundação no perímetro urbano do município de Humaitá, Sudoeste da Amazônia.** In: Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2018.

Fernandes, L. C., Barbosa, F. F., Filho, P. B. S., Guerra, A. J. T., & Curi, N. (2019). **Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.** Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 14(2), e5716.

FRANCISCO, C. E. S et al. **Espacialização de análise multicriterial em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação Permanente.** XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE Anais, 2007, p. 2643-2650.

FINKLER, Raquel. **Planejamento, manejo e gestão de bacias.** Agência Nacional de Águas – ANA.

GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil; PINHEIRO, Adilson. **Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2, p. 242-253, 2015.

Silveira, A. L. L., & Mello, C. R. (2020). **Hidrologia: Princípios e Aplicações.** Local de publicação: UFLA.

SCHWALM, Hugo; CRICIÚMA, S. C. **Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do Rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina. Criciúma: Ed. do autor, 2008**

Pereira, A. A., & Sentelhas, P. C. (2007). **Irrigação: Princípios e Métodos.** Piracicaba: Os autores.

KONDO, M. K. et al. **Evaluation of soil water storage capacity in different agricultural soils in the São Francisco River Basin, Brazil.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 24, n. 7, p. 505-511, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S14153662020000700505&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 abr. 2023.

STEPEHSNS, T. **Manual sobre pequenas barragens de terra Guia para a localização, projecto e construção.** ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. Roma, 2011.

- MOREIRA, M. C., SILVA, D. D. **Análise de Métodos para estimativa das vazões da bacia do rio Paraopeba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n.2, abril/junho, 2014.
- MALCZEWSKI, J. GIS -based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning. v. 62, n. 1, p. 3-65, jul. 2004.
- Marques, L., Costa, L., Menezes, S., & Dias, J. (2021). **Water Quality and Quantity in Dams Reservoirs—Case Study of the Azibo Reservoir in Portugal**. Water, 13(5), 625.
- MELO, Mauro Santos. **Avaliação de potencial hidroelétrico com aplicação de sistema de informações geográficas**. 2013. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.
- Nunes, A. A., & Pruski, F. F. (2015). **O efeito de reservatórios na disponibilidade de água**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 20, no. 1, p. 7-15. Porto Alegre, jan./mar. 2015. ISSN 2318-0331.
- PETTS, G. & FOSTER, I. **Rivers and Landscape**. The Athenaeum Press, 3 ed., New Castle, Great Britain, 1990
- Pacheco, F. F., Souza, J. J. L. L., & Faria, A. L. L. (2016). **Análise multicritério aplicada na seleção de áreas aptas a construção de barraginhas em relevo forte ondulado**. Irriga, 21(2), 302-314.
- RODRIGO, T. C. et al (2018). **Zoneamento Ambiental Produtivo da Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Isabel - MG**. Belo Horizonte: Editora Ambiental, 2023.
- Rocha, F. F., Fontes, R. L., Vieira, A. P., Rodrigues, C. T., & Sousa, A. (2022). **A multi-criteria spatial decision support system for reservoir site selection in small watersheds**. Environmental Monitoring and Assessment, 194(2), 75.
- ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C. (1999). **Balço hídrico normal por Thornthwaite e Matter (1955)**. Piracicaba. ESALQ. CD-ROM.
- ROCHA, Juliano Marcos da. **Caracterização da bacia hidrográfica Rio Piracicaba – MG utilizando ferramentas de geoprocessamento**. Revista Engenharia Ambiental, v. 11, n. 4, p. 446-455, 2014.
- ROSA, Roberto; BRITO, Jorge Luis Silva. **Introdução ao geoprocessamento**. Uberlândia: Universidades Federais de Uberlândia, (1996-2013).
- ROCHA, Paulo Cesar; SANTOS, Aline Aparecida dos. **Análise hidrológica em bacias hidrográficas**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, v. 14, n. 1, p. 457-472, 2016.
- RIBEIRO, Thiago Barboza. **Estimativa e regionalização das vazões mínimas de referência para a bacia do rio Branco-RR, como suporte à gestão dos recursos hídricos**. 2018. 127 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2018.

Ribeiro, R. B., Pruski, F. F., & Ramos, M. C. A. (2018). **Disponibilidade Hídrica em Condições de Regularização de Vazão**. Periódico da Universidade Vale do Rio Verde, v. 2, n. 2, ISSN: 2526-690X. Revista Sustentare.

STEPHENS, T. FAO - **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para localização, projeto e construção**. Roma: Organização das Nações Unidas para a alimentação e agricultura, 2011. 120p. (Publicação de FAO sobre rega e drenagem, 64).

Silva, M. C., Silva, T. S., Dantas, J. R., & Silva, J. A. (2018). **Estudo da Qualidade da Água do Açude Santa Isabel em Caruaru/PE**. Research, Society and Development, 7(10), e1510748.

Souza, F. M., Ferreira, A. G., & Giongo, P. R. (2019). **Aplicação de geoprocessamento no estudo de vulnerabilidade ambiental de áreas de bacias hidrográficas**. Revista Geonorte, 40(1), 17-32.

SILVA, A. R. da et al. **Plano de manutenção e operação em Barragens: um estudo de caso no Semiárido nordestino**. Irriga, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 442-452, 2018.

Souza, G. V. de, & Oliveira, L. E. C. de. (2015). **Estimativa de vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(8), 793-798. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p793-798.

SOUSA, H. T. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. Viçosa, MG: UFV, 2009. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

Tagliarini, F. S. N., Rodrigues, M. T., Rodrigues, B. T., Leme, M. C., & Campos, S. (2018). **Análise multicritério aplicada na obtenção de perdas de solo em bacia hidrográfica**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22(8), 559-564.

TUCCI, C.E.M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre, Ed. ABRH/ UFRGS, 2002. 256 p.

Ernesto, C. G. R. S. et al. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM - Banco de Solos de Minas Gerais>.



UFVJM