



## Lógica Fuzzy Aplicada ao Planejamento Sustentável do Uso da Terra em Bacia Hidrográfica com Base em Indicadores Locais de Aptidão

### *Lógica Fuzzy Aplicada a la Planificación Sostenible del Uso de la Tierra en Cuencas Hidrográficas Basada en Indicadores de Aptitud Local*

### *Fuzzy Logic Applied to Sustainable Land Use Planning in a Watershed Based on Local Suitability Indicators*

**Frederico Belfort Poletti<sup>1</sup>**

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.  
fb.poletti@unesp.br | 0000-0002-0653-9299

**Arthur Pereira dos Santos<sup>2</sup>**

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.  
Arthur.p.santos@unesp.br | 0000-0002-1913-3562

**Ana Laura de Paula<sup>3</sup>**

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.  
al.paula@unesp.br | 0000-0001-5851-3800

**Darllan Collins da Cunha e Silva<sup>4</sup>**

<sup>4</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.  
darllan.collins@unesp.br | 0000-0003-3280-0478

**Roberto Wagner Lourenço<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP/Sorocaba - 2010), com MBA em Gestão e Tecnologias Ambientais pela Universidade de São Paulo (USP/2013). No momento doutorando em Ciências Ambientais na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.

<sup>2</sup> Doctor en Geoprocuremento y Modelado Matemático Ambiental por el Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales de la Universidad Estatal Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP). Máster en la línea de investigación de Gestión y Monitoreo Ambiental por el Programa de Posgrado en Medio Ambiente y Calidad Ambiental de la Universidad Federal de Uberlândia (UFU) (2020), e Ingeniería Ambiental y Sanitaria por la Universidad del Oeste Paulista (2018), con especialización en Ingeniería de Producción por la Universidad Federal de Juiz de Fora (UFJF) (2024). No momento doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.

<sup>3</sup> Professor Assistente Doutor da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Doutor em Ciências Ambientais pela UNESP – Campus Sorocaba. No momento, professor Doutor da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil.

<sup>5</sup>Graduado pela UNESP em Geografia (1995), com mestrado e doutorado em Geociências e Meio Ambiente



Esta obra está bajo licencia internacional [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



**Correspondencia:** Ana Laura de Paula. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia. Av. Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, 18087-180. Sorocaba, Brasil. Correo-e: al.paula@unesp.br

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil. roberto.lourenço@unesp.br | 0000-0002-5234-8944

**Para citar este artigo:** Polett, F., Dos Santos, A., De Paula, A., Silva, D. e Lourenço, R. (2025). Lógica Fuzzy Aplicada ao Planejamento Sustentável do Uso da Terra em Bacia Hidrográfica com Base em Indicadores Locais de Aptidão. *Entorno Geográfico*, (30), e20214851. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i30.14851>

**Resumo:** A conversão de áreas naturais em outros usos tem contribuído para a degradação ambiental, sobretudo quando desconsidera características do relevo, solo, vegetação e vocação socioeconômica. Diante disso, este estudo propõe uma metodologia para mapear a aptidão de uso da terra com base na lógica *Fuzzy*, integrando parâmetros morfométricos e classes de uso na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (BHRS). As métricas foram obtidas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE), com sub-bacias hierarquizadas segundo o método de Strahler, enquanto o uso da terra foi mapeado e validado em campo. A análise *Fuzzy* classificou a aptidão em três níveis, comparados ao uso atual da terra. Das 115 sub-bacias analisadas, 63 apresentaram uso compatível com a aptidão natural, enquanto 52 revelaram conflitos. Assim, a metodologia mostrou-se eficaz ao identificar incongruências e contribuir para o planejamento territorial sustentável, a gestão ambiental e a formulação de políticas públicas baseadas em indicadores locais.

**Palavras-chave:** aptidão de uso da terra, planejamento territorial sustentável, gestão ambiental e indicadores locais

**Resumen:** La conversión de áreas naturales en otros usos ha contribuido a la degradación ambiental, especialmente cuando se desestiman las características del relieve, suelo, vegetación y la vocación socioeconómica. Ante esto, este estudio propone una metodología para mapear la aptitud del uso del suelo basada en lógica Fuzzy, integrando parámetros morfométricos y clases de uso en la Cuenca Hidrográfica del Río Sorocabaçu (BHRS). Las métricas se obtuvieron a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), con subcuencas jerarquizadas según el método de Strahler, mientras que el uso del suelo fue mapeado y validado en campo. El análisis Fuzzy clasificó la aptitud en tres niveles, comparados con el uso actual del suelo. De las 115 subcuencas

---

obtidos em 1998 e 2002 respectivamente, ambos pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Atuou como Pós-doc no ano de 2003 pelo Departamento de Saúde Coletiva da Faculdade de Medicina de Botucatu (UNESP). No momento professor Adjunto da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) Campus de Sorocaba, Brasil.

analisadas, 63 mostraron uso compatible con su aptitud natural, mientras que 52 revelaron conflictos. Así, la metodología demostró ser eficaz para identificar incongruencias y contribuir a la planificación territorial sostenible, la gestión ambiental y la formulación de políticas públicas basadas en indicadores locales.

**Palabras clave:** aptitud del uso del suelo, planificación territorial sostenible, gestión ambiental e indicadores locales

**Abstract:** The conversion of natural areas to other land uses has contributed to environmental degradation, especially when ignoring terrain, soil, vegetation, and local socioeconomic suitability. This study proposes a methodology for mapping land use suitability based on Fuzzy logic, integrating morphometric parameters and land use classes in the Sorocabuçu River Watershed (BHRS). Metrics were derived from Digital Elevation Models (DEM), with sub-watersheds hierarchized according to the Strahler method, while land use was mapped and field-validated. Fuzzy analysis classified suitability into three levels, compared to current land use. Among the 115 sub-watersheds analyzed, 63 showed compatibility with natural suitability, while 52 revealed use conflicts. Thus, the methodology proved effective in identifying inconsistencies and supporting sustainable territorial planning, environmental management, and the formulation of public policies based on local indicators.

**Keywords:** land use suitability, sustainable territorial planning, environmental management and local indicators

**Recebido:** 22 de abril de 2025

**Aceito:** 15 de junho de 2025

**Publicado:** 1º de julho de 2025

## 1. Introdução

A ocupação desordenada do território tem gerado impactos significativos nas dinâmicas ambientais e socioeconômicas, principalmente em virtude da conversão acelerada de áreas naturais para usos urbanos e agrícolas sem o planejamento adequado (Fruehauf et al. 2025). Essa expansão, quando desassociada de critérios técnicos, intensifica processos como erosão, degradação dos recursos hídricos e uso incompatível do solo, elevando a vulnerabilidade ambiental e comprometendo a sustentabilidade das atividades produtivas (De Oliveira et al. 2024; Dos Santos et al. 2025).

No Brasil, o histórico de ocupação desarticulada em relação ao planejamento territorial tem provocado conflitos de uso e uso inadequado do solo, frequentemente sem considerar as limitações naturais impostas pelo relevo, drenagem e capacidade de suporte do meio, conforme abordado por Al Mazroa et al. (2024), García et al. (2024), Nery et al. (2022) e Rizzo et al. (2024). Essa realidade é observada inclusive em áreas rurais, onde a expansão agropecuária exige estratégias de uso que conciliem produtividade com conservação ambiental, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 15 (Vida Terrestre) (ONU, 2015).

Nesse contexto, torna-se essencial identificar, com base em critérios ambientais e geomorfológicos, as áreas mais adequadas para diferentes usos da terra, orientando práticas de manejo compatíveis com as condições naturais da paisagem. Ademais, a análise da aptidão de uso, ao considerar variáveis como declividade, densidade de drenagem (DD) e rugosidade do relevo (DM), permite inferir a vocação natural do território e subsidiar decisões de ordenamento territorial com maior precisão, promovendo ações alinhadas com os compromissos assumidos na Agenda 2030 da ONU (Ettazarini, 2021; Jancewicz et al. 2022).

Todavia, a identificação de áreas com maior aptidão ao uso da terra demanda a integração de tecnologias capazes de representar, com fidelidade, a complexidade espacial da paisagem. Nesse sentido, o uso de metodologias baseadas em Sensoriamento Remoto (SR) e geoprocessamento tem se mostrado essencial para gerar informações de alta resolução espacial e temporal (Dos Santos e Simionato, 2023), permitindo a análise detalhada de parâmetros físicos, bióticos e antrópicos que influenciam a ocupação territorial (Menezes et al. 2024; Silva et al. 2023).

Em paralelo ao exposto, a aplicação de técnicas de modelagem por lógica *Fuzzy* tem se destacado na análise de dados ambientais por sua capacidade de lidar com incertezas e transições graduais entre classes, pois essa abordagem possibilita uma representação mais realista das condições ambientais, especialmente em contextos onde os limites entre áreas aptas e não aptas não são nítidos, como em zonas de transição topográfica ou áreas com uso consolidado, porém ambientalmente sensível (Tang et al. 2024).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia baseada em lógica *Fuzzy* para avaliar a aptidão de uso da terra e sua conformidade com o uso atual

em uma bacia hidrográfica, considerando variáveis morfométricas e classes de uso e cobertura da terra, com o intuito de subsidiar o planejamento territorial, promovendo o uso eficiente da terra e a conservação dos recursos naturais em áreas com intensa atividade agropecuária.

## 2. Materiais e Método

### 2.1 Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu (BHRS) (Figura 1), situada no município de Ibiúna, no estado de São Paulo (SP), Brasil. O local abrange uma área de 202,67 km<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente 19% do território municipal (IBGE, 2025). Suas coordenadas estão compreendidas entre 7361229 m e 7383723 m de latitude sul e entre 267591 m e 289048 m de longitude leste, utilizando-se o sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. A altitude da BHRS varia entre 854 m e 1199 m (Dos Santos et al. 2025).

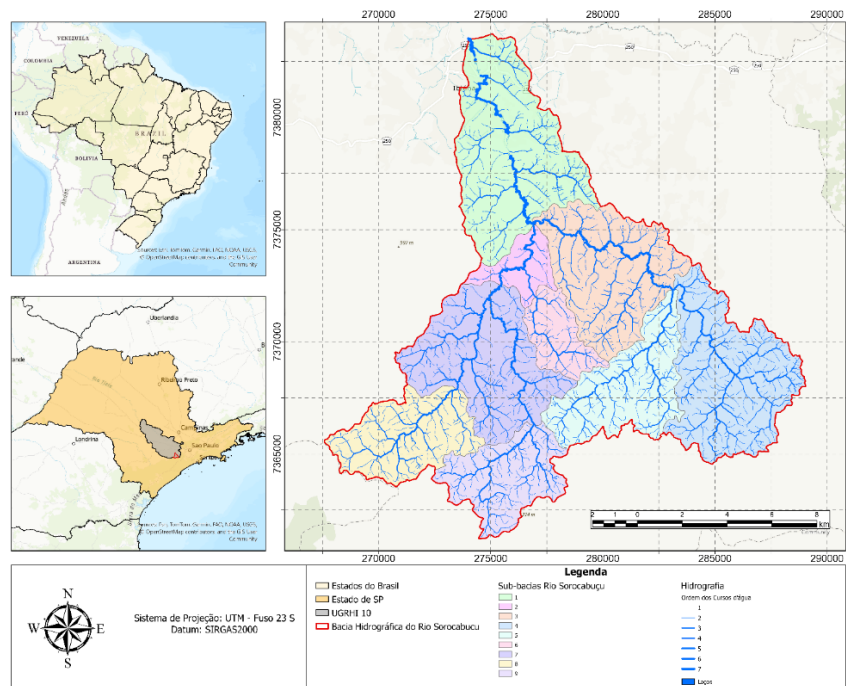


Figura 1. Localização da área de estudo - Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu (BHRS)

Fonte: Elaborado pelos autores

A BHRS integra uma das principais sub-bacias hidrográficas da Unidade de

Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI) do Rio Sorocaba e Médio Tietê, estando totalmente inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga, o que reforça sua relevância ecológica (Dos Santos et al. 2024). A área de estudo também exerce um papel estratégico no abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), além de contribuir significativamente para a conservação da biodiversidade remanescente da Mata Atlântica e para a geração de energia (Maia Júnior e Lourenço, 2021).

Adicionalmente, o município de Ibiúna, onde se insere a bacia hidrográfica, é reconhecido como estância turística e apresenta expressiva atividade agrícola de base familiar (IBGE, 2023; Dos Santos et al. 2025), evidenciando a sobreposição entre influências antrópicas e características naturais, acentuando os conflitos de uso da terra e, conseqüentemente, a necessidade de estudos que subsidiem o ordenamento do território e a gestão eficiente dos recursos naturais.

A caracterização textural da BHRS indica a predominância de solos com textura argilosa, conforme identificado por Dos Santos (2024). Todavia, de maneira localizada, observam-se teores mais elevados de areia e silte, especialmente em áreas de maior altitude. A distribuição espacial dessas classes, apresentada na Figura 2, complementa a compreensão das condições edafotopográficas da área de estudo.

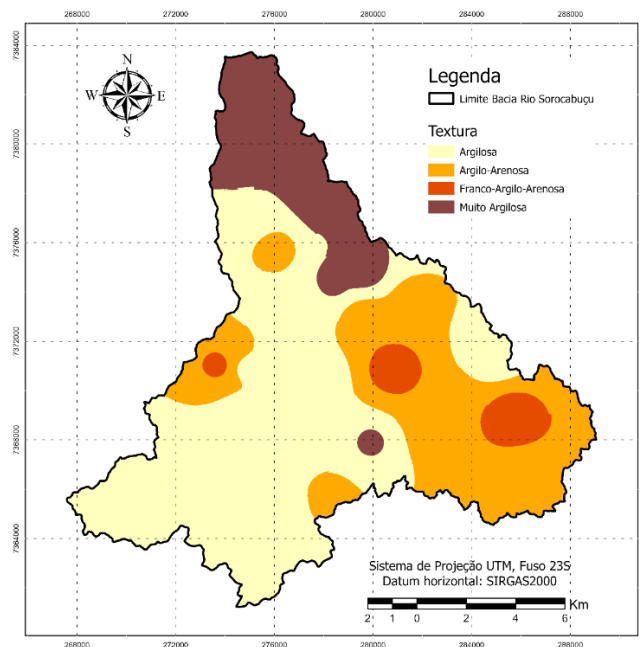


Figura 2. Classificação textural do solo na BHRS.

Fonte: Adaptado de Dos Santos (2024)

### **2.1.1. Procedimentos metodológicos**

A elaboração do mapa de aptidão de uso da terra foi realizada a partir da integração de dados topográficos, hidrológicos e de cobertura da terra em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), estruturando-se em três etapas principais: (a) obtenção e processamento dos dados topográficos e hidrográficos, (b) classificação da cobertura da terra a partir de imagens orbitais e (3) modelagem da aptidão com base em regras de lógica *Fuzzy*.

### **2.1.2. Obtenção e processamento dos dados topográficos e hidrográficos**

Para a caracterização física da bacia hidrográfica em estudo, foram inicialmente reunidas informações altimétricas e da rede de drenagem por meio das Cartas Topográficas disponibilizadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), na escala 1:10.000 (IGC, 1979). A partir disso, foram coletadas as curvas de nível, os pontos cotados e a malha hidrográfica, os quais foram analisados em ambiente SIG. Essa etapa inicial permitiu a estruturação de uma base cartográfica georreferenciada, essencial para a derivação de variáveis morfométricas e para a análise da organização espacial da rede de drenagem da BHRS.

### **2.1.3. Classificação da cobertura da terra a partir de imagens orbitais**

Para a obtenção dos dados de cobertura da terra, foram utilizadas imagens de satélite de alta resolução captadas pelo sensor MSI, embarcado no satélite Sentinel-2A, correspondente à órbita T23KKP. Inicialmente, essas cenas passaram por procedimentos de correção geométrica e radiométrica, fundamentais para assegurar a qualidade e a fidelidade dos dados espaciais.

Em seguida, foi realizada a classificação das imagens utilizando *machine learning*, por meio de ferramentas disponíveis no software ArcGIS Pro (ESRI, s.f.), com o objetivo de identificar e mapear as diferentes classes de uso e cobertura da terra na BHRS. A acurácia da classificação foi verificada por meio da matriz de confusão e do índice *Kappa*, garantindo a confiabilidade das informações geradas para as etapas subsequentes da análise.

### 2.1.4. Modelagem da aptidão de uso da terra

A modelagem da aptidão de uso da terra baseou-se na abordagem proposta por Rocha e Kurtz (2001), a qual considera o cálculo do Coeficiente de Rugosidade (RN), obtido pelo produto entre a DD e a declividade média da bacia ( $RN = Dd \times \bar{D}$ ). Os valores de RN foram posteriormente reclassificados em quatro classes de aptidão, conforme demonstrado na Tabela 1, refletindo diferentes níveis de adequação ao uso da terra.

Além disso, empregou-se um sistema de regras baseado em lógica *Fuzzy*, o qual possibilitou representar de forma mais contínua e realista a transição entre os diferentes níveis de aptidão, evitando classificações abruptas e promovendo uma modelagem espacial mais coerente com a natureza gradativa dos atributos ambientais, conforme discutido por Lughofer (2024), Khan et al. (2021) e Wang et al. (2021).

Tabela 1. Classes de aptidão de uso da terra

Tipos de classes	Aptidão de uso dos solos
A = menores valores RN da 1ª classe	Agricultura
B = acima dos RN de A + 01 faixa	Pecuária/Pastagem
C = acima dos RN de B + 01 faixa	Reflorestamento
D = acima dos RN de C + 01 faixa	Florestamento

Fonte: Rocha e Kurtz (2001)

A DD, que expressa a eficiência do escoamento superficial, foi calculada por meio da razão entre o comprimento total dos cursos d'água ( $L_{Tot}$ ) e a área das sub-bacias da BHRS ( $A_{sb}$ ). Para isso, os cursos d'água foram hierarquizados conforme o sistema de ordens de Strahler (1952), sendo consideradas, na delimitação das sub-bacias hidrográficas, apenas as drenagens de terceira ordem ou superiores. Essa segmentação permitiu a obtenção de métricas morfométricas, como área e perímetro das sub-bacias da BHRS, utilizadas na composição do RN.

Convém destacar que a análise da DD contribui para inferir sobre as condições do relevo e das características hidrológicas locais, pois valores reduzidos indicam regiões com baixa eficiência de escoamento, geralmente associadas a topografia plana ou solos com baixa permeabilidade. Por outro lado, valores mais elevados refletem áreas com maior eficiência de drenagem, frequentemente associadas a terrenos declivosos ou solos mais permeáveis (Msilini et al. 2022; Oyedotun, 2021; Toniolo et al. 2024).

Complementarmente, foi calculada a DM das sub-bacias da BHRS, obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado por meio da ferramenta *Topo to Raster* no ambiente ArcGIS Pro (ESRI, s.f.), onde foi possível derivar atributos topográficos essenciais à caracterização das feições morfológicas da bacia hidrográfica, além de compor o cálculo do RN, utilizado na classificação da aptidão ao uso da terra.

### **2.1.5. Construção do sistema e da base de regras para elaboração do mapa de aptidão de uso da terra**

O mapa de aptidão foi desenvolvido com base em um sistema de regras *Fuzzy*, estruturado a partir dos parâmetros DM, DD e RN. A escolha dessas variáveis deve-se à capacidade complementar que possuem para representar os principais fatores topográficos e hidrológicos que influenciam o uso da terra, conforme abordado por Costa e Guimarães (2005), Guidolini et al. (2020), Silva et al. (2016), Sousa e Rocha (2023), Villela e Mattos (1975).

Convém destacar que a DM foi selecionada por representar o gradiente médio do terreno, um fator diretamente relacionado à suscetibilidade à erosão e à adequação para práticas agrícolas, sendo considerada como parâmetro essencial para avaliação da aptidão da terra (Talukdar et al. 2022), enquanto a DD expressa a eficiência do escoamento superficial, refletindo o potencial de perda de solo e nutrientes (Meshram et al. 2022).

Por sua vez, o RN sintetiza a energia do relevo associada ao padrão de drenagem, sendo amplamente aplicado na identificação de diferentes níveis de aptidão territorial (Lu et al. 2022). Portanto, a combinação desses parâmetros é compatível com abordagens em lógica Fuzzy, pois permite representar, de maneira gradual e coerente, as transições entre os diferentes níveis de aptidão (Talukdar et al. 2022; Lu et al. 2022).

As funções de pertinência (Figura 3) foram definidas com base em critérios da literatura, ajustados ao contexto local: a) para DM, consideraram-se os limites legais estabelecidos pela Lei 12.651 de 2012; b) os intervalos de DD seguiram Villela e Mattos (1975); c) enquanto os de RN foram definidos entre 20 e 200, conforme observado por Rocha e Kurtz (2001).

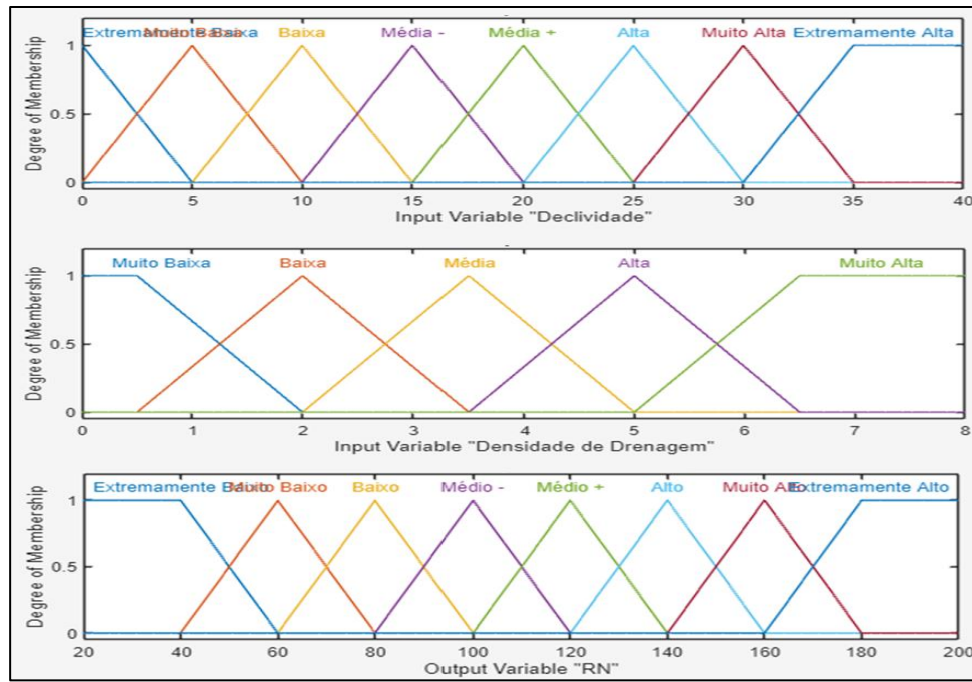


Figura 3. Funções de pertinência do Sistema de Inferência *Fuzzy*.

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir das funções de pertinência definidas para os parâmetros de entrada, foi estruturada a base de regras *Fuzzy* (Tabela 2), posteriormente processada por meio do sistema de inferência de *Mamdani*. Esse procedimento gerou uma superfície contínua de valores *Fuzzy*, considerando os limites máximos e mínimos das variáveis envolvidas.

Tabela 2: Base de regras do sistema de inferência *Fuzzy*.

D	Dd	RN	D	Dd	RN	D	Dd	RN	D	Dd	RN	D	Dd	RN
Ext.	M.	Ext.	Ext.		Ext.	Ext.			Ext.		Ext.	Ext.	M.	M.
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Média	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Baixo
M.	M.	Ext.	M.		M.	M.			M.			M.	M.	Médio
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Média	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Alto	-
Baixo	M.	M.	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Média	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	M.	Médio
Médio	M.	M.	Médio		Médio	Médio			Médio			Médio	M.	
-	Baixo	Baixo	-	Baixo	-	-	Média	+	-	Alto	Alto	Médio -	Alto	Alto
Médio	M.	M.	Médio		Médio	Médio			Médio			Médio	M.	M.
+	Baixo	Baixo	+	Baixo	-	+	Média	+	+	Alto	Alto	+	Alto	Alto
Alto	M.		Alto		Médio	Alto			Alto			Alto	M.	Ext.
	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	+	Alto	Média	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
M. alto	M.		M.		Médio	M.			M.			M. Alto	M.	Ext.
	Baixo	Baixo	alto	Baixo	+	alto	Média	Alto	Alto	Alto	Alto	M. Alto	Alto	Alto

Ext. Alto	M. Baixo	Baixo	Ext. Alto	Baixo	Alto	Ext. Alto	Média	M. Alto	Ext. Alto	Alto	Ext. Alto	Ext. Alto	Ext. Alto	M. Alto	Ext. Alto
--------------	-------------	-------	--------------	-------	------	--------------	-------	------------	--------------	------	--------------	--------------	--------------	------------	--------------

Fonte: Elaborado pelos autores

Concluído o processo de *fuzzificação*, procedeu-se à *defuzzificação*, etapa responsável por converter os valores *Fuzzy* em valores numéricos *crisp* (Lourenço et al. 2015). Os resultados foram, então, reclassificados com base nas faixas de aptidão propostas por Rocha e Kurtz (2001), resultando na categorização das sub-bacias hidrográficas em classes de aptidão de uso da terra. Para isso, foi inicialmente calculada a amplitude dos valores *defuzzificados* ( $A_{Dfuzzy}$ ) e o intervalo entre classes (IC), conforme a Equação 1 e Equação 2.

$$(1) A_{Dfuzzy} = Dfuzzy_{Maior} - Dfuzzy_{Menor}$$

$$(2) IC = \frac{A_{Dfuzzy}}{4}$$

Sendo:

$A_{Dfuzzy}$  – Amplitude dos valores defuzzificados.

$Dfuzzy_{Maior}$  – Maior valor encontrado para os valores defuzzificados na sub-bacia hidrográfica.

$Dfuzzy_{Menor}$  – Menor valor encontrado para os valores defuzzificados na sub-bacia hidrográfica.

IC – Intervalo entre Classes.

Considerando que valores *defuzzificados* mais elevados indicam maior risco de ocorrência de processos erosivos, recomenda-se a manutenção de cobertura florestal nas áreas correspondentes (Benaiche et al. 2024). Portanto, a Tabela 2 apresenta as classes de aptidão de uso da terra, definidas com base nos intervalos estabelecidos por Rocha e Kurtz (2001), a partir dos valores *defuzzificados* obtidos pelo sistema *Fuzzy*. Essas classes foram aplicadas na geração do mapa de aptidão de uso da terra, por meio da ferramenta *Calculate Field* do ArcGIS Pro (ESRI, s.f.).

Tabela 3. Classes de aptidão de uso da terra segundo o sistema baseado em regra Fuzzy

Tipos de Classe	Intervalo	Aptidão
A	$x < Dfuzzy_{Menor} + IC$	Agricultura
B	$Dfuzzy_{Menor} + IC \leq x < Dfuzzy_{Menor} + 2 * IC$	Pecuária/Pastagem
C	$Dfuzzy_{Menor} + 2 * IC \leq x < Dfuzzy_{Menor} + 3 * IC$	Reflorestamento
D	$x \geq Dfuzzy_{Menor} + 3 * IC$	Floresta

Fonte: Elaborado pelos autores

### 2.1.6. Elaboração do mapa de conformidade de uso da terra

O mapa de conformidade de uso da terra foi gerado por meio da sobreposição entre o mapa de aptidão de uso da terra e o mapa de uso e cobertura da terra atual. Essa etapa envolveu a aplicação de álgebra de mapas com base em critérios lógicos de compatibilidade entre o uso atual e o uso mais adequado, conforme a aptidão previamente definida.

O mapa de uso e cobertura da terra atual foi realizado a partir de imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, com correções radiométricas e geométricas aplicadas (nível de processamento L2A). A classificação dessas imagens foi conduzida por meio do algoritmo supervisionado *Support Vector Machine* (SVM), reconhecido por sua robustez na distinção de classes espectralmente semelhantes, conforme discutido por Islam et al. (2024) e Lim e Ardekani (2024).

Foram empregadas 340 áreas de treinamento, selecionadas de forma supervisionada com base nas validações de campo descritas por Dos Santos et al. (2025), bem como em imagens de satélite de alta resolução devidamente georreferenciadas e em registros históricos da área de estudo. A classificação resultante abrangeu as seguintes classes de uso e cobertura da terra: urbano, floresta, água, pastagem, solo exposto, culturas agrícolas e reflorestamento, conforme tipologia estabelecida no Manual Técnico de Uso da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013).

A avaliação da acurácia da classificação foi realizada por meio do coeficiente estatístico *Kappa*, a partir de 658 polígonos de validação com uso e cobertura da terra reconhecidos. Para o aprimoramento da análise de acurácia, esses pontos amostrais foram subdivididos

em 9.999 subáreas, o que possibilitou uma verificação mais precisa acerca da performance do modelo de classificação empregado.

Com base nos dados validados, realizou-se o cálculo do percentual de conformidade entre o uso e cobertura da terra atual e a aptidão de uso da terra estimada pelo modelo de inferência baseado em lógica *Fuzzy*, considerando individualmente cada sub-bacia da BHRS. Essa operação foi implementada diretamente na tabela de atributos do banco de dados geográfico, por meio da aplicação da ferramenta *Calculate Field*, disponibilizada no ambiente do software ArcGIS Pro (ESRI, s.f.). O resultado consistiu na geração do mapa de conformidade de uso da terra, o qual sintetiza espacialmente a correspondência entre o uso atual e o uso potencialmente mais adequado segundo os parâmetros definidos pelo modelo.

### 3. Resultados e discussões

A Figura 4 apresenta o MDE com a rede de drenagem derivada da topografia. A distribuição da DD é exibida na Figura 5. Já a Figura 6 ilustra a variação espacial da DM na BHRS.

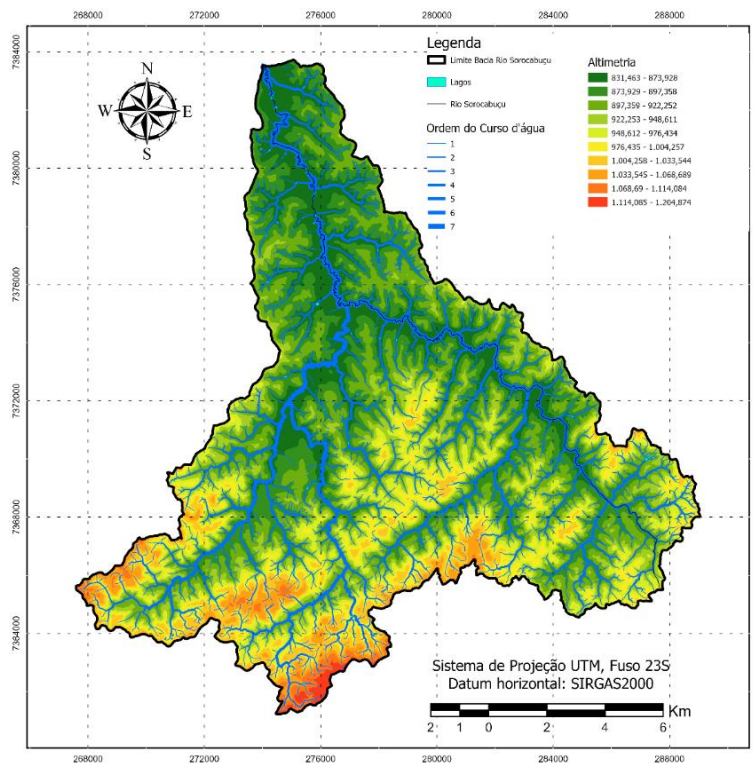


Figura 4. Modelo Digital de Elevação e hidrografia da BHRS

Fonte: Elaborado pelos autores

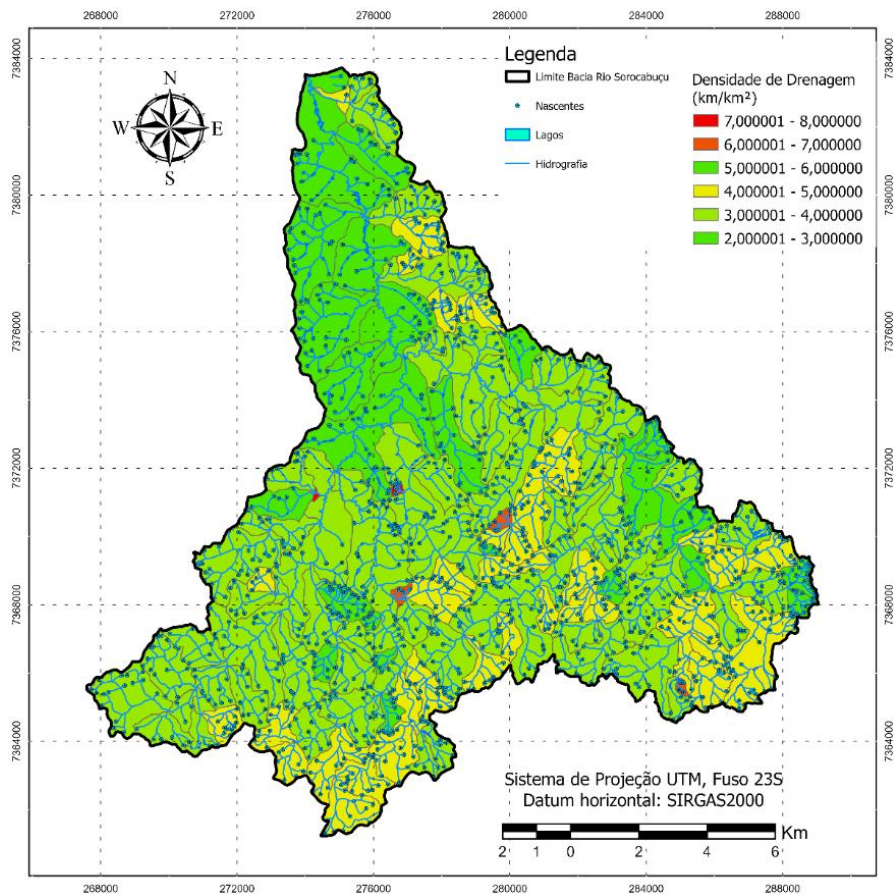


Figura 5. Densidade de drenagem da BHRs.

Fonte: Elaborado pelos autores

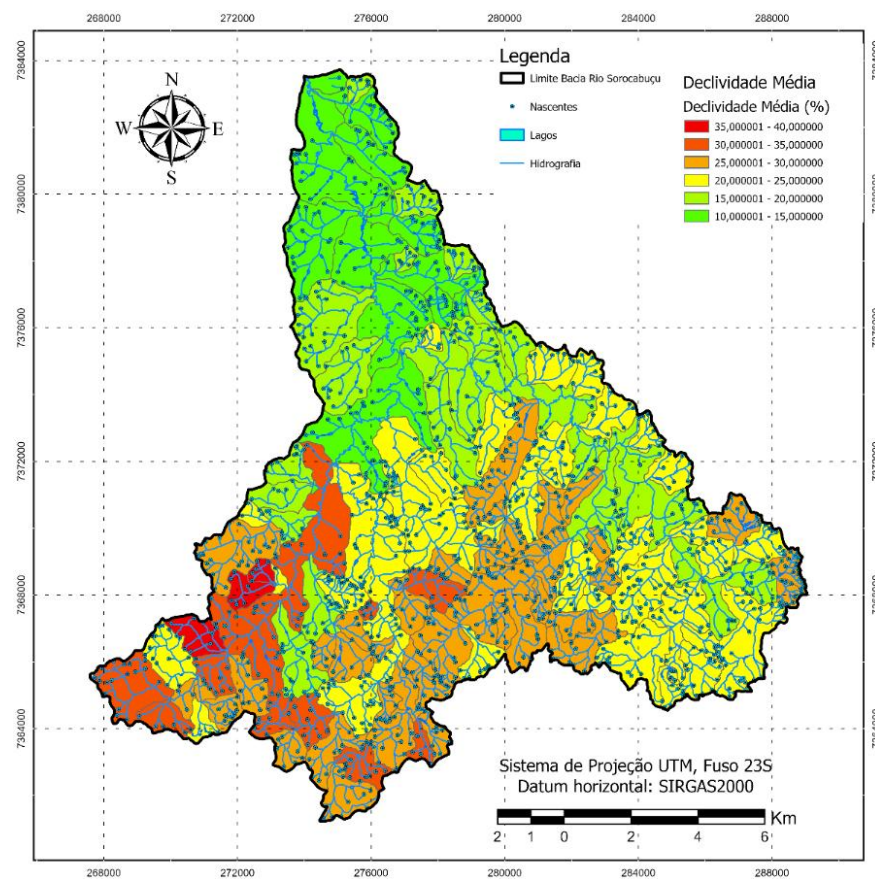


Figura 6. Declividade média da BHRs.

Fonte: Elaborado pelos autores

A análise da DD na área de estudo revela um padrão hídrico predominantemente elevado, caracterizando uma rede de drenagem bem estruturada e funcional. De acordo com os parâmetros definidos por Villela e Mattos (1975), bacias hidrográficas com valores inferiores a 0,5 km/km<sup>2</sup> são consideradas mal drenadas, enquanto aquelas com valores superiores a 3,5 km/km<sup>2</sup> apresentam drenagem altamente eficiente. Na BHRS, os valores obtidos situam-se, em sua maioria, acima de 1,5 km/km<sup>2</sup>, mostrando uma condição hidrológica favorável para o uso agrícola e práticas de irrigação.

Vale destacar que essa característica é essencial para as atividades agropecuárias, pois solos em áreas bem drenadas tendem a apresentar menor risco de saturação, favorecendo o enraizamento profundo, reduzindo a compactação e limitando perdas por erosão e lixiviação de nutrientes (Couic et al. 2022; Simonetti et al. 2022). Além disso, conforme evidenciado por Dos Santos (2024), a variável relacionada à distância entre cultivos agrícolas – especialmente olerícolas – e os corpos hídricos na BHRS foi uma das mais influentes na modelagem de aptidão agrícola conduzida com *Random Forest*, reforçando a importância dos aspectos hidromorfológicos sobre a produtividade.

A presença de uma drenagem natural eficiente também favorece a estabilidade hidrológica das áreas cultivadas, condição essencial para a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Essa estabilidade contribui para o planejamento adequado das práticas agrícolas e aumenta a resiliência frente a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas ou estiagens prolongadas (Liu et al. 2021; Nery et al. 2022; Sun et al. 2021).

A análise espacial também demonstra que as menores áreas de DD concentram-se na porção centro-norte da bacia hidrográfica, especialmente nas proximidades do exutório. Ainda assim, esses valores permanecem dentro de faixas consideradas adequadas, sem indícios de comprometimento funcional da drenagem. Assim, mesmo nas áreas com menor densidade de canais, a dinâmica hidrológica local se mantém estável, favorecendo o aproveitamento agrícola.

Complementarmente, a análise da DM evidencia que os maiores níveis de declividades estão localizados nas regiões oeste e centro-oeste da BHRS, indicando setores com relevo mais acidentado e maior potencial para processos erosivos. Em contrapartida, as menores DM concentram-se no setor norte, onde predominam superfícies mais planas e, portanto, mais propícias ao uso agrícola mecanizado.

Convém destacar que a combinação entre DD elevada e DM variando de forma

especialmente coerente permite inferir que a BHRS apresenta condições hidromorfológicas diversificadas, mas em geral compatíveis com o desenvolvimento sustentável de atividades agropecuárias, assim como destacado por Arantes (2024). Ademais, a adoção de práticas de manejo conservacionistas, adaptadas à realidade edafoclimática de cada setor da bacia hidrográfica, é fundamental para potencializar a produtividade sem comprometer os recursos naturais. Nesse sentido, a Figura 8 apresenta o RN da BHRS.

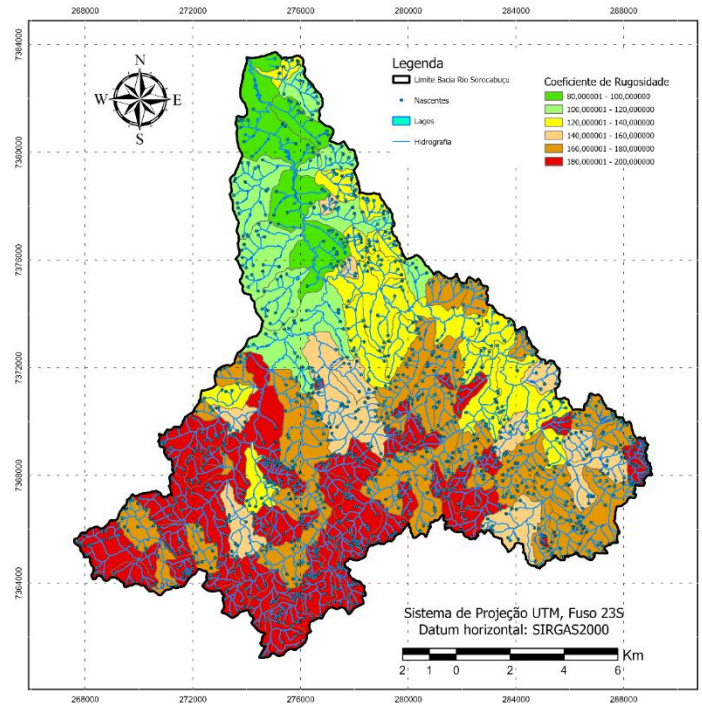


Figura 7. Coeficiente de rugosidade da BHRS.

Fonte: Elaborado pelos autores

A análise espacial do RN revela a predominância de valores elevados na porção norte da bacia hidrográfica, refletindo maior complexidade topográfica e indicando áreas naturalmente menos propícias à ocupação e ao uso agrícola intensivo, assim como apontados nos estudos de Dos Santos et al (2025) e Arantes et al. (2024).

Ademais, valores mais altos do índice estão associados a maior irregularidade do relevo, o que dificulta o acesso, o preparo do solo e a mecanização (Herodowicz-Mleczak et al. 2022; Meira et al. 2016), haja vista que a variação observada (de 92,53 a 198,8) reflete a heterogeneidade geomorfológica da BHRS, apontando a necessidade de considerar as limitações impostas pelo relevo no planejamento do uso e manejo da terra. Nessa perspectiva, a Figura 9 apresenta o mapa de uso da terra e cobertura vegetal.

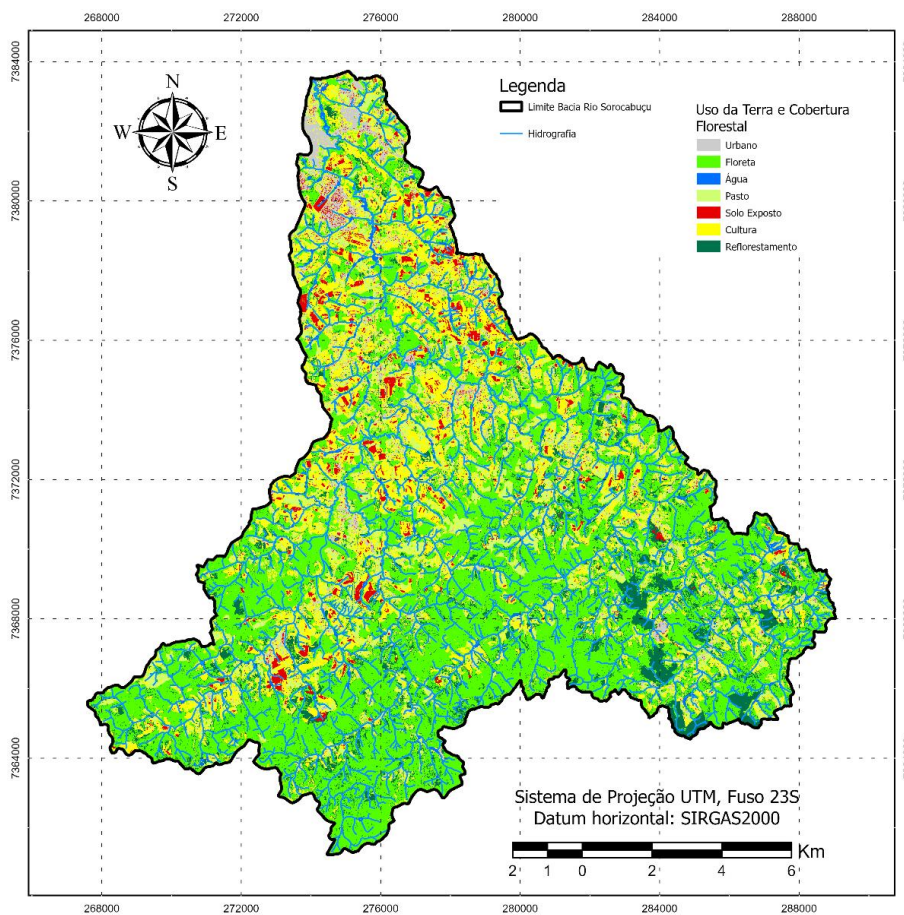


Figura 8. Mapa de uso da terra e cobertura vegetal da BHRS

Fonte: Elaborado pelos autores

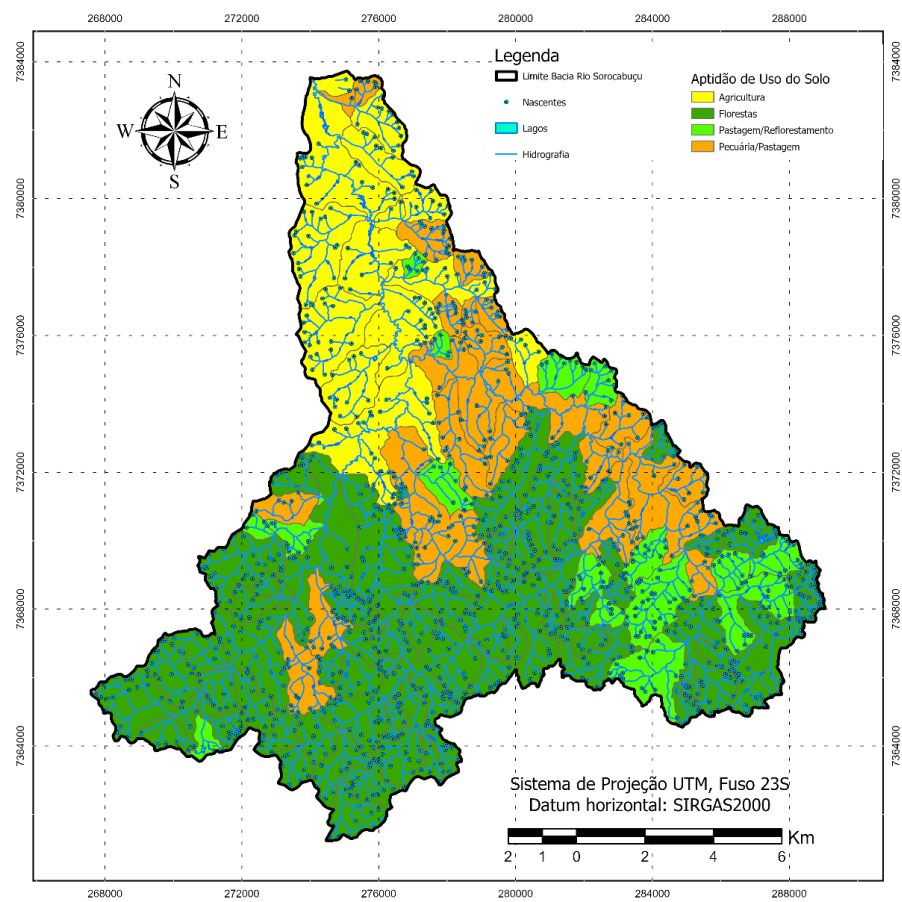


Figura 9. Mapa de aptidão de uso da terra

Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, a Tabela 4 apresenta os resultados do índice *Kappa*.

Tabela 4: Matriz de Confusão e Índice Kappa após a revisão manual do modelo

Classe	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Total	Acc.U	Kappa
C1	784	0	1	0	23	0	0	726	0,96832	-
C2	0	6872	0	0	0	0	4	6893	0,998259	-
C3	0	0	101	0	0	0	0	101	1	-
C4	5	16	0	225	0	33	0	281	0,807829	-
C5	97	0	0	0	352	0	0	521	0,675624	-
C6	41	29	0	35	6	206	0	316	0,658228	-
C7	0	248	0	0	0	0	922	1161	0,787252	-
Total	927	7165	101	260	381	239	926	9999	-	-
Acc.P	0,84574	0,95911	0,990	0,86539	0,92389	0,86193	0,999	-	0,93869	-
			10				57			
Kappa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,89211

Fonte: Elaborado pelos autores

O mapa de aptidão de uso da terra apresentou índice *Kappa* de 0,89, indicando alta acurácia na classificação das zonas de uso. Os resultados evidenciaram uma compartimentação espacial bem definida das potencialidades da BHRS, pois as áreas mais favoráveis à agricultura localizam-se nas regiões centrais e leste, onde predominam condições morfopedológicas propícias ao cultivo. Já o setor norte da BHRS demonstrou maior aptidão para pastagens, enquanto as porções sul e sudeste destacaram-se pela vocação à preservação florestal e reflorestamento. A distribuição espacial observada reflete a influência direta de variáveis como declividade, rugosidade e distância de corpos hídricos, assim como obtido na modelagem de aptidão agrícola no estudo de Dos Santos et al. (2025), reforçando a importância de um planejamento territorial alinhado às características naturais da paisagem.

Esses resultados também ressaltam a importância da integração entre aptidão e uso atual da terra, haja vista que se observa, em diversas porções da BHRS, a ocorrência de uso agrícola em áreas com baixa aptidão, o que pode indicar conflitos de uso e potencial degradação dos recursos naturais. Por outro lado, áreas com alta aptidão agrícola ainda mantêm cobertura florestal, o que evidencia oportunidades para o desenvolvimento rural sustentável com base em critérios técnicos. Tais padrões destacam a necessidade de políticas de ordenamento territorial que promovam a compatibilidade entre vocação natural e uso efetivo, evitando a intensificação

de pressões sobre ecossistemas sensíveis.

É importante destacar que o uso estratégico dessas informações no contexto do planejamento territorial permite a delimitação de zonas prioritárias para conservação, agricultura e pecuária com base em evidências ambientais. A manutenção das áreas indicadas para preservação florestal contribui diretamente para a conservação da biodiversidade, proteção dos recursos hídricos e controle de processos erosivos, garantindo maior resiliência às atividades produtivas diante das variações climáticas e edáficas. Já a definição de áreas aptas à intensificação agrícola possibilita uma alocação mais eficiente de investimentos e práticas agropecuárias, promovendo produtividade sem comprometer a integridade da paisagem.

Nesse sentido, a Figura 11 apresenta o mapa de conformidade de aptidão de uso da terra, permitindo visualizar espacialmente os níveis de adequação entre o uso atual e o uso potencial da terra na BHRS.

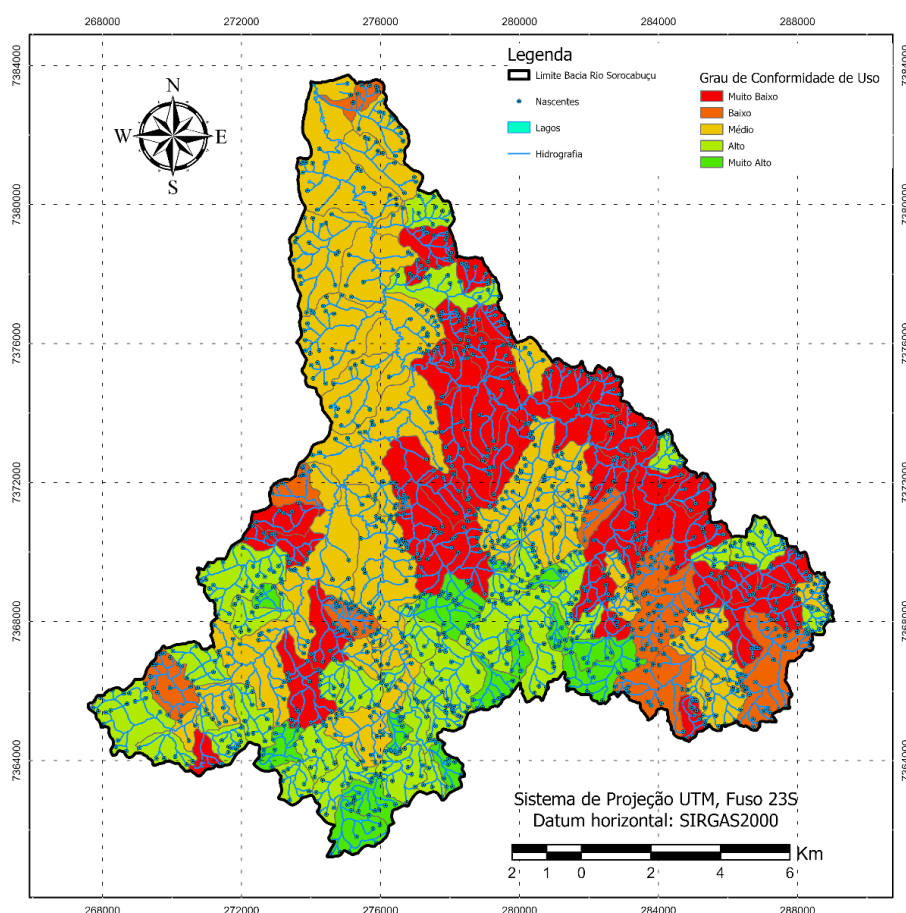


Figura 11. Mapa de conformidade de aptidão de uso da terra da BHRS.

Fonte: Elaborado pelos autores

De um total de 115 sub-bacias hidrográficas analisadas, 63 apresentaram uso compatível com sua aptidão natural, enquanto 52 estão sendo utilizadas em desacordo com suas potencialidades, evidenciando a necessidade de intervenções específicas em quase metade da BHRS, reforçando a importância de estratégias de ordenamento territorial baseadas em critérios técnico-ambientais.

As maiores porcentagens de conformidade foram observadas nas porções sul da BHRS, coincidentes com áreas de relevo mais acidentado e maiores declividades (Arantes et al. 2024; Dos Santos et al. 2025). Nesses setores, o uso da terra tende a condizer com a aptidão natural, concentrando-se em atividades de menor impacto ambiental ou voltadas à conservação, como reflorestamento e manutenção de cobertura florestal, pois a presença de limitações físicas mais expressivas nesses locais pode estar atuando como barreira natural à ocupação intensiva.

Por outro lado, as menores taxas de conformidade, situadas entre 0 e 0,2%, concentram-se principalmente no centro-leste da bacia. Essa região se caracteriza pela maior concentração de silte no solo (Dos Santos et al. 2025), fator que aumenta a suscetibilidade à erosão e demanda a implementação de práticas conservacionistas específicas. A baixa conformidade nesses trechos pode indicar a ocorrência de usos inadequados ou intensivos em áreas com baixa aptidão, o que requer atenção no planejamento agrícola e na gestão ambiental para evitar a degradação dos recursos naturais.

Apesar dessas diferenças regionais, estudos prévios apontam que as taxas de erodibilidade da BHRS são, em geral, consideradas baixas (Arantes et al. 2024), e tal condição pode estar relacionada à adoção de práticas de manejo adequadas em áreas críticas, reforçando a hipótese de que o uso da terra, mesmo em regiões de menor conformidade, pode estar sendo conduzido de forma tecnicamente aceitável. Esse resultado é positivo e sugere que, embora existam pontos de atenção, há uma gestão territorial eficaz e capaz de conciliar produção e conservação.

Por fim, vale frisar que a análise espacial da conformidade de uso da terra permite compreender o grau de alinhamento entre o uso real e a aptidão natural da terra na BHRS, e os padrões identificados apontam avanços no uso sustentável dos recursos, mas também indicam a necessidade de ações direcionadas, principalmente nas áreas de menor conformidade.

#### **4. Conclusão**

A metodologia proposta mostrou elevada eficácia na identificação das aptidões naturais de uso da terra e no diagnóstico da conformidade entre o uso atual e o uso potencial mais sustentável BHRS. A aplicação integrada do sistema de base de regras *Fuzzy*, aliada à análise de variáveis morfométricas, permitiu a geração de um modelo altamente acurado (índice *Kappa* = 0,89), capaz de representar com precisão a complexidade ambiental e geomorfológica da paisagem.

Os resultados revelaram uma compartimentação espacial coerente com as características naturais da BHRS, na qual as variáveis morfométricas DM, DD e RN foram determinantes para a definição das aptidões de uso da terra. As porções centrais e leste, com menores valores de DM e RN e elevada DD ( $>1,5 \text{ km/km}^2$ ), apresentaram maior aptidão agrícola, favorecendo a irrigação e o desenvolvimento sustentável. O setor norte, com valores intermediários dessas variáveis, revelou condições mais favoráveis à pecuária extensiva, enquanto as regiões sul e sudeste, marcadas por relevo acidentado e maior rugosidade, apresentaram vocação para uso florestal e conservação.

A análise da DM e da RN evidenciou a heterogeneidade geomorfológica da BHRS, pois as áreas com relevo mais acidentado, especialmente ao sul, tendem a apresentar maior conformidade entre o uso atual e a aptidão natural, indicando ocupação compatível com as limitações físicas locais. Por outro lado, as regiões centro-leste, com solos mais siltosos e baixa aptidão agrícola, apresentaram as menores taxas de conformidade, apontando a necessidade de estratégias específicas de conservação e manejo.

Dentre as 115 sub-bacias hidrográficas analisadas, 63 apresentaram uso compatível com sua aptidão natural, enquanto 52 foram classificadas como em desconformidade. Essa proporção expressiva (45%) evidencia a importância da incorporação de critérios técnico-ambientais no ordenamento territorial e na formulação de políticas públicas.

Conclui-se, por fim, que a metodologia adotada constitui uma ferramenta eficaz e replicável para subsidiar o planejamento territorial sustentável em bacias hidrográficas, ao permitir a identificação espacializada de zonas prioritárias para conservação, agricultura e pastagens com base em atributos ambientais mensuráveis.

Contudo, a adequação do uso da terra não se restringe à sua vocação natural, sendo imprescindível a adoção de práticas de manejo compatíveis com as condições edafotopográficas

locais. Nas áreas classificadas como aptas à agricultura, indicam-se técnicas conservacionistas, tais como terraceamento, plantio em nível, cobertura do solo e rotação de culturas, especialmente em setores com declividades moderadas. Para as zonas destinadas à pastagem, recomenda-se a implementação de sistemas de manejo rotacionado, a manutenção da cobertura vegetal e o controle da taxa de lotação, a fim de reduzir impactos ambientais e assegurar a sustentabilidade produtiva. Assim, os resultados obtidos não apenas orientam a alocação espacial das atividades, mas também reforçam a necessidade de práticas de manejo condizentes com os atributos físicos e ecológicos da paisagem.

## 5. Declarações finais

### **Financiao:**

Os autores declaram que não receberam recursos para a redação ou publicação deste artigo.

### **Contribuições de cada autor**

Frederico Belfort Poletti: Conceituação, Metodologia, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Validação, Visualização, Redação (rascunho original); Arthur Pereira dos Santos: Análise Formal, Investigação, Softwares, Validação, Redação (rascunho original), Redação (revisão do rascunho e edição/correção); Ana Laura de Paula: Supervisão, Redação (revisão do rascunho e edição/correção); Darllan Collins da Cunha e Silva: Redação (revisão do rascunho e edição/correção); Roberto Wagner Lourenço: Conceituação, Aquisição de Recursos, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Redação (revisão do rascunho e edição/correção).

### **Conflito de interesses:**

Os autores declaram não haver conflitos de interesse na redação ou publicação deste artigo.

### **Implicações éticas:**

Os autores não têm implicações éticas que devam ser declaradas na redação ou publicação deste artigo.

## 6. Referências bibliográficas

- Al Mazroa, A., Maashi, M., Kouki, F., Othman, K., Salih, N., Elfaki, M. e Begum, S. (2024). An analysis of urban sprawl growth and prediction using remote sensing and machine learning techniques. *Journal of South American Earth Sciences*, 142, 104988. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104988>.
- Arantes, L., Dos Santos, A., Silva, C., Nery, L., Toledo, M., Simonetti, V., Silva, D. e Lourenço, R. (2024). Socioeconomic spatial analysis through fuzzy system as a tool for territorial planning applied to watersheds. *International Journal of River Basin Management*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/15715124.2024.2387579>
- Arantes, L., Dos Santos, A., Silva, D. e Lourenço, R. (2024). Indicador de vulnerabilidade ao carreamento de sedimentos integrado ao SIG e ao SR. *Geo UERJ*, (45). <https://doi.org/10.12957/geouerj.2024.74164>
- Benaiche, M., Mokhtari, E., Berghout, A., Abdelkebir, B. e Engel, B. (2024). Identification of soil erosion-susceptible areas using revised universal soil loss equation, analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach in sub-watersheds Boussellam and K'sob Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 83(34), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11339-7>
- Costa, T. e Guimarães, S. (2005). *Delineamento e parametrização ambiental de sub-bacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro* (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n.º 84). Embrapa. <https://tinyurl.com/2rahhxaa>
- Couic, E., Gruau, G., Gu, S. e Casquin, A. (2022). Variability of phosphorus sorption properties in hydromorphic soils: Consequences for P losses in agricultural landscapes. *European Journal of Soil Science*, 73(6), e13326. <https://doi.org/10.1111/ejss.13326>.
- De Menezes, G., Maciejewski, N., De Carvalho, E. e Bazzo, T. (2024). A Thorough Procedure to Design Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generators. *Machines*, 12(6), 384. <https://doi.org/10.3390/machines12060384>

De Oliveira, R., Nery, L., Andrade, E., Simonetti, V., Arantes, L., Dos Santos, A., Martins, A. e Silva, D. (2024). Methodological proposal for an ecological corridor and financial cost estimate: a way to help conserve biodiversity. *Journal for Nature Conservation*, 79, 126606. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126606>

Dos Santos, A. (2024). *Integração de parâmetros ambientais e machine learning na modelagem do solo para agricultura sustentável* [Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório institucional - Universidade Estadual Paulista.

Dos Santos, A., Junior, A., Nery, L., Gomes, G., Toniolo, B., Silva, D. e Lourenço, R. (2025). Random forest algorithm applied to model soil textural classification in a river basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, 330. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13786-0>.

Dos Santos, A., Simionatto, H., Toledo, M., Nery, L. e Silva, D. (2025). Análisis espaciotemporal de indicadores de temperatura superficial como forma de evaluar áreas con preservación forestal. *Revista Geográfica de América Central*, (74). <https://tinyurl.com/32jf2z6d>

Dos Santos, A. e Simionatto, H. (2023). Methodological proposal for evaluating the transformation of urban microclimate in medium-sized cities: a case study in the urban mesh of the municipality of Paracatu, Minas Gerais. *RAEGA - O Espaço Geográfico Em Análise*, 57, 46–65. <https://doi.org/10.5380/raega.v57i0.88156>

Esri. (s.f.). ArcGIS Pro. <https://tinyurl.com/25z87x2d>

Ettazarini, S. (2021). GIS-based land suitability assessment for check dam site location using topography and drainage information: a case study from Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 80, 567. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09881-3>.

Fruehauf, A., Pellegrino, P. e Lombardo, M. (2025). The importance of urban greenery in the construction of a smart landscape to reduce negative environmental and climate

impacts". *Environmental Science and Sustainable Development*, 10(1), 53–60.  
<https://doi.org/10.21625/essd.v10i1.1111>

García, L., Mungaray-Moctezuma, A., Montoya-Alcaraz, M., Sánchez-Atondo, A., Calderón Ramírez, J. e Gutiérrez-Moreno, J. (2024). Analysis of socio-environmental vulnerability in areas with overpopulation and natural risks induced by their urban-territorial conditions. *Applied Sciences*, 14(15), 6535.  
<https://doi.org/10.3390/app14156535>

Guidolini, J., Ometto, J., Arcoverde, G. e Giarolla, A. (2020). Environmental land use conflicts in a macroscale river basin: a preliminary study based on the ruggedness number. *Water*, 12(5), 1222. <https://doi.org/10.3390/w12051222>

Herodowicz-Mleczak, K., Piekarczyk, J., Kaźmierowski, C., Nowosad, J. e Mleczak, M. (2022). Estimating soil surface roughness with models based on the information about tillage practices and soil parameters. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(3), e2021MS002578. <https://doi.org/10.1029/2021MS002578>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2013). Manual técnico de uso da terra (3ª ed.). <https://tinyurl.com/yc7pw9kh>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2023). *Panorama: Ibiúna (SP)*. <https://tinyurl.com/msp4rhzz>

Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC). (1979). *Carta topográfica [escala 1:10.000]*.

Islam, T., Islam, R., Uddin, P. e Ulhaq, A. (2024). Spectrally Segmented-Enhanced Neural Network for Precise Land Cover Object Classification in Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 16(5), 807. <https://doi.org/10.3390/rs16050807>.

Jancewicz, K., Różycka, M., Szymanowski, M., Kryza, M. e Migoń, P. (2022). Topographic Characteristics of Drainage Divides at the Mountain-Range Scale—A Review of

DTM-Based Analytical Tools. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(2), 116. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020116>

Júnior, L. e Lourenço, R. (2021). Impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a variabilidade do albedo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP). *Revista Brasileira de Climatologia*, 27, 443–462. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14280>

Khan, N., Elizondo, D., Deka, L. e Molina-Cabello, M. (2021). Fuzzy logic applied to system monitors. *IEEE Access*, 9, 56523–56538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072239>

Lei 12.651 de 2012, dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União, 25 de maio de 2012. <https://tinyurl.com/3um4vd85>

Lim, K. e Ardekani, A. (2024). Hyperspectral enhanced imaging analysis of nanoparticles using machine learning methods. *Nanoscale Advances*, 20. <https://doi.org/10.1039/D4NA00205A>.

Liu, L., Ouyang, W., Liu, H., Zhu, J., Fan, X., Zhang, F., Ma, Y., Chen, J., Hao, F. e Lian, Z. (2021). Drainage optimization of paddy field watershed for diffuse phosphorus pollution control and sustainable agricultural development. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 308, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107238>

Lourenço, R., Silva, D., Martins, A., Sales, J., Roveda, S. e Roveda, J. (2015). Use of fuzzy systems in the elaboration of an anthropic pressure indicator to evaluate the remaining forest fragments. *Environmental Earth Sciences*, 74, 2481–2488. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4253-6>

Lu, A., Tian, P., Mu, X., Zhao, G., Feng, Q., Guo, J. e Xu, W. (2022). Fuzzy Logic Modeling of Land Degradation in a Loess Plateau Watershed, China. *Remote Sensing*, 14(19), 4779. <https://doi.org/10.3390/rs14194779>

- Lughofer, E. (2022). Evolving Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems: Fundamentals, Stability, Explainability, Useability, and Applications. Em P Angelov (Ed.), *Handbook on Computer Learning and Intelligence* (pp. 133-234). World Scientific.
- Meira, R., Sabonaro, D. e Silva, D. (2016). Elaboração de Carta de Adequabilidade Ambiental de uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(1), 77–84. <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100133687>
- Meshram, S., Hasan, M., Meshram, C., Ilderomi, A., Tirivarombo, S. e Islam, S. (2022). Assessing vulnerability to soil erosion based on fuzzy best–worst multi-criteria decision-making method. *Applied Water Science*, 12, 219. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01714-3>
- Msilini, A., Ouarda, T. e Masselot, P. (2022). Evaluation of additional physiographical variables characterising drainage network systems in regional frequency analysis, a Quebec watersheds case-study. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02109-7>
- Nery, L., Silva, D. e Sabonaro, D. (2022). Perfil tecnológico dos pecuaristas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 11(1), e20468. <https://doi.org/10.5585/geas.v11i1.20468>
- Organização das Nações Unidas (ONU). (15 de setembro de 2015). *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. <https://tinyurl.com/yx7vj9nd>
- Oyedotun, T. (2021). Quantitative assessment of the drainage morphometric characteristics of Chaohu Lake Basin from SRTM DEM Data: a GIS-based approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6(3), 174–187. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1812147>
- Rizzo, F., Dos Santos, A. e Silva, D. (2024). Técnicas de geoprocessamento aplicadas para

- análise temporal do microclima na bacia hidrográfica do Córrego do Pequiá, Maranhão. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, 44(1). <https://doi.org/10.5216/bgg.v44i1.78032>
- Rocha, J. e Kurtz, S. (2001). *Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas* (4<sup>a</sup> ed.). Universidade Federal de Santa Marta. <https://tinyurl.com/528xhmjv>
- Silva, D., Filho, J., Sales, J. e Lourenço, R. (2016). Uso de Indicadores Morfométricos como Ferramentas para Avaliação de Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2) 627–642. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p627-642>
- Silva, D., Nery, L. e Simonetti, V. (2023). Gestão espacial das rotas de coleta de material reciclável com suporte de SIG e indicadores de produtividade. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 19(55), 366–386. <https://doi.org/10.3895/rts.v19n55.15340>
- Simonetti, V., Silva, D. e Rosa, A. (2022). Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1), p. 1134–1154. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2037>
- Sousa, R. e Rocha, G. (2023). Erodibilidade do solo (K) e uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Camurupim, Piauí, Brasil. *Geoconexões*, 3(17), 159–182. <https://doi.org/10.15628/geoconexes.2023.14996>
- Strahler, A. (1952). Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S. e Shen, Z. (2021). New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment. *Water Research*, 196, 117015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117015>

- Talukdar, S., Naikoo, M., Mallick, J., Praveen, B., Shahfahad, Sharma, P., Islam, A., Pal, S. e Rahman, A. (2022). Coupling geographic information system integrated fuzzy logic-analytical hierarchy process with global and machine learning based sensitivity analysis for agricultural suitability mapping. *Agricultural Systems*, 196, 103343. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103343>
- Tang, H. e Ahmad, N. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1), 2394429. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2394429>
- Toniolo, B., Simonetti, V., Lourenço, R. e Silva, D. (2024). Análise da interferência antrópica na qualidade das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (SP). *Revista de Gestão Ambiental E Sustentabilidade*, 13(1), e23004. <https://doi.org/10.5585/2024.23004>
- Villela, T. e Mattos, L. (1975) *Manual de classificação de drenagem para bacias hidrográficas*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Wang, J., Han, S. e Li, X. (2021). 3D fuzzy ergonomic analysis for rapid workplace design and modification in construction. *Automation in Construction*, 123, 103521. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103521>