

Modelagem espacial da disponibilidade de micronutrientes do solo e sua relação com atributos físicos para a sustentabilidade agrícola

Spatial modeling of soil micronutrient availability and its relationship with physical attributes for agricultural sustainability

Arthur Pereira dos Santos¹

Alessandro Xavier da Silva Junior²

Ana Laura de Paula³

Darllan Collins da Cunha e Silva⁴

Roberto Wagner Lourenço⁵

Resumo

Este estudo analisa a distribuição e correlação entre micronutrientes e atributos físicos do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabuçu (BHRS), em Ibiúna, São Paulo (SP), em área de 202,67 km². Foram realizadas análises granulométricas e químicas de amostras do solo em diferentes classes de uso, com ênfase na quantificação dos micronutrientes Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn). A modelagem foi realizada pelo método *Inverse Distance Weighted* (IDW) e o fator de erodibilidade (fator K) foi calculado para avaliar a suscetibilidade à erosão. Os resultados indicam variações nas concentrações médias dos micronutrientes: B de 0,15 mg/dm³ a 0,24 mg/dm³, Cu de 0,22 mg/dm³ a 1,49 mg/dm³, Fe de 36,98 mg/dm³ a 127,49 mg/dm³, Mn de 1,92 mg/dm³ a 8,22 mg/dm³ e Zn de 0,34 mg/dm³ a 1,67 mg/dm³, refletindo a dispersão dos valores e indicando diferentes níveis de disponibilidade. A correlação entre micronutrientes e frações físicas revela que a textura do solo influencia a retenção dos micronutrientes. Solos argilosos retêm mais nutrientes, enquanto a fração de silte também contribui, evidenciando a importância das propriedades físicas na disponibilidade de micronutrientes, com implicações na fertilidade e erosão, tornando imprescindível a adoção de práticas de manejo que integrem conservação e fertilização para garantir a sustentabilidade agrícola.

Palavras-Chave: Textura do Solo; Retenção dos Micronutrientes; Sustentabilidade Agrícola.

- 1 Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), arthur.p.santos@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0002-1913-3562>.
- 2 Mestrando em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), alessandro.junior@unesp.br, <https://orcid.org/0009-0005-5592-7684>.
- 3 Doutoranda em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS) al.paula@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0001-5851-3800>.
- 4 Dr. Professor Assistente do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), darllan.collins@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0003-3280-0478>.
- 5 Dr. Professor Adjunto do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), roberto.lourenco@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0002-5234-8944>.

Abstract

This study analyzes the distribution and correlation between micronutrients and soil physical attributes in the Sorocabuçu River Basin (SRB), located in Ibiúna, São Paulo (SP), covering an area of 202.67 km². Granulometric and chemical analyses were performed on soil samples from different land use classes, focusing on the quantification of the micronutrients boron (B), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn). Spatial modeling was conducted using the Inverse Distance Weighted (IDW) method, and the soil erodibility factor (K factor) was calculated to assess erosion susceptibility. The results indicate variations in the average concentrations of micronutrients: B from 0.15 mg/dm³ to 0.24 mg/dm³, Cu from 0.22 mg/dm³ to 1.49 mg/dm³, Fe from 36.98 mg/dm³ to 127.49 mg/dm³, Mn from 1.92 mg/dm³ to 8.22 mg/dm³, and Zn from 0.34 mg/dm³ to 1.67 mg/dm³, reflecting spatial heterogeneity and different levels of availability. The correlation between micronutrients and soil texture reveals that clayey soils retain higher amounts of micronutrients, while the silt fraction also plays a role, emphasizing the influence of physical properties on micronutrient availability. These findings have implications for soil fertility and erosion risk, reinforcing the need for management practices that integrate soil conservation and fertilization to ensure agricultural sustainability.

Keywords: Soil Texture; Micronutrient Retention ; Agricultural Sustainability.

Introdução

A qualidade do solo é um fator determinante para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, impactando diretamente a produtividade e a preservação ambiental (Al-Shammary et al., 2024; Borges et al., 2025). A compreensão dos processos que regulam sua fertilidade requer uma abordagem integrada, considerando tanto os atributos físicos do solo, como textura, estrutura e capacidade de retenção de água, quanto os aspectos químicos relacionados à disponibilidade de nutrientes, incluindo os micronutrientes (Xing et al., 2025; Ahmed et al., 2024).

A integração dessas propriedades permite compreender de forma mais ampla os fatores que influenciam a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes no solo, uma vez que características físicas, como estrutura, porosidade e textura, exercem papel fundamental no armazenamento, na mobilidade e na absorção dos elementos químicos pelas plantas (Duarte et al., 2024). Dessa forma, a análise conjunta dos atributos físicos e químicos do solo contribui para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis, favorecendo tanto a produtividade agrícola quanto a conservação dos recursos naturais (Shepherd e Oliverio, 2024; Santos et al., 2025a).

No cenário atual, caracterizado pela intensificação agrícola, a adoção de práticas baseadas em diagnósticos técnicos é essencial para garantir a sustentabilidade produtiva e ambiental (Rizzo et al., 2023; Nery et al., 2024). Diante desse desafio, estratégias que integram a análise física e química do solo tornam-se fundamentais para orientar ações corretivas e preventivas, promovendo um manejo mais eficiente e preciso (Arantes et al., 2024b; Poletti et al., 2025).

Entre essas estratégias, as geotecnologias destacam-se como ferramentas eficazes para avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo em diferentes escalas, pois sua aplicação permite identificar áreas críticas, estabelecer correlações entre parâmetros físicos e químicos e gerar recomendações específicas para o manejo agrícola. Dessa forma, seu uso contribui para a gestão sustentável do solo, otimizando a alocação de recursos e minimizando impactos ambientais (Sales et al., 2024; Gomes et al., 2025).

Convém destacar que as metas definidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) reforçam a necessidade de adotar práticas agrícolas que conciliem produtividade e conservação ambiental. O ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e o ODS 15 (Vida Terrestre) destacam a importância da preservação dos solos e da recuperação de áreas degradadas, enquanto o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) incentiva o uso racional de insumos agrícolas (ONU, 2015). Essas diretrizes evidenciam a necessidade em se aprimorar as estratégias de manejo do solo para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Apesar desses avanços normativos, o alcance pleno das metas ainda possui limitações, especialmente relacionadas à escassez de informações detalhadas sobre as características físicas e químicas dos solos em escalas locais e regionais, dificultando a adoção de práticas de manejo adequadas às particularidades de cada local, resultando em intervenções generalizadas que podem comprometer a eficiência produtiva e a conservação dos recursos naturais. Essa lacuna, além de limitar a fertilidade agrícola, reduz a eficácia das estratégias de manejo, ao desconsiderar variações locais que influenciam diretamente a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Nesse contexto, o geoprocessamento emerge como uma ferramenta estratégica para mapear a variabilidade dos atributos do solo, proporcionando diagnósticos precisos que auxiliam na

formulação de manejos específicos para atender às demandas locais e promover o uso racional dos recursos naturais, conforme apontado por Ribeiro et al. (2021), Carrillo et al. (2022) e AbdelRahman e Metwaly (2023), que evidenciam que a integração dessas tecnologias possibilita análises multivariadas, identificação de padrões espaciais e otimização do planejamento agrícola, favorecendo a proposição de medidas corretivas e preventivas mais eficazes, potencializando a produtividade agrícola e minimizando os impactos ambientais negativos.

Nesse sentido, este estudo objetiva modelar a distribuição espacial dos micronutrientes em relação às características físicas do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocabaçu (BHRS), a fim de fornecer subsídios para o desenvolvimento de práticas de manejo mais eficientes, que promovam a conservação do solo, o uso sustentável dos recursos naturais e a formulação de políticas públicas para a sustentabilidade agrícola.

Metodologia

Área de estudo

O estudo foi realizado na BHRS (Figura 1), localizada no município de Ibiúna, estado de São Paulo (SP), com uma área total de 202,67 km², correspondente a aproximadamente 19% do território municipal, que abriga cerca de 75 mil habitantes (IBGE, 2022).

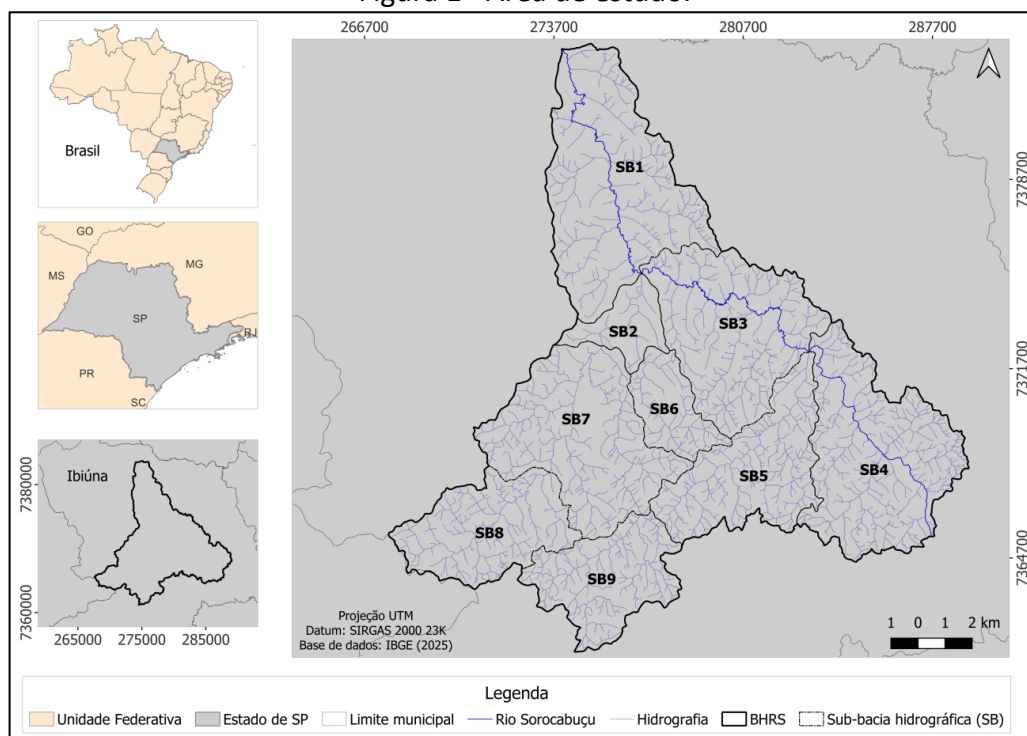
Geograficamente, a área está posicionada entre as coordenadas UTM 7.361.229 m e 7.383.723 m de latitude sul e 267.591 m e 289.048 m de longitude leste, no sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM zona 23S, com altitude variando entre 854 m e 1.199 m.

A BHRS está inserida no bioma Mata Atlântica e abrange parte da Área de Preservação Ambiental (APA) de Itupararanga, que ocupa 22% da sua extensão (Arantes et al., 2024a). Em termos climáticos, a área é caracterizada como subtropical de inverno seco, conforme a classificação de Köppen (1948), atualizada por Dubreuil (2017), com verões quentes e precipitações elevadas, especialmente entre dezembro e março, e invernos com temperaturas médias abaixo de 18 °C e precipitação reduzida.

Apesar da baixa densidade populacional, a região é composta por diversas propriedades rurais, com destaque para a olericultura, predominantemente conduzida por agricultores familiares (Santos et al., 2025a). Tal atividade abastece a Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), uma das principais distribuidoras de hortaliças, pescados e flores no Brasil (BRASIL, 2024).

Essa centralidade econômica da BHRS, aliada à sua importância ecológica, confere à bacia hidrográfica um papel crucial tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para o abastecimento alimentar regional e nacional.

Figura 1 - Área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Procedimentos metodológicos

Plano de amostragem e análise física do solo

A análise física do solo foi realizada com base na metodologia descrita no Boletim Técnico 106 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), utilizando a análise de granulometria (IAC, 2009). Foram selecionados 27 pontos de amostragem, distribuídos espacialmente de acordo com as classes de uso da terra e as variações de declividade da BHRS, assegurando que a variabilidade textural do solo fosse adequadamente contemplada. A seleção dos pontos foi supervisionada, visando garantir a adequação dos locais amostrados aos objetivos do estudo.

Ressalta-se que o número de amostras foi definido considerando a extensão da área de estudo, a escala de análise adotada e a representatividade das diferentes classes de uso da terra presentes na BHRS. Ademais, a distribuição espacial das amostras buscou contemplar a heterogeneidade ambiental da bacia hidrográfica, permitindo avaliar variações edáficas associadas às condições topográficas e aos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.

Ainda assim, convém destacar que a densidade amostral adotada mostrou-se adequada para a aplicação de métodos de interpolação espacial, possibilitando a análise da variabilidade espacial dos atributos do solo na área de estudo, conforme adotado nos estudos de Santos et al. (2025a) e Silva Junior et al. (2025).

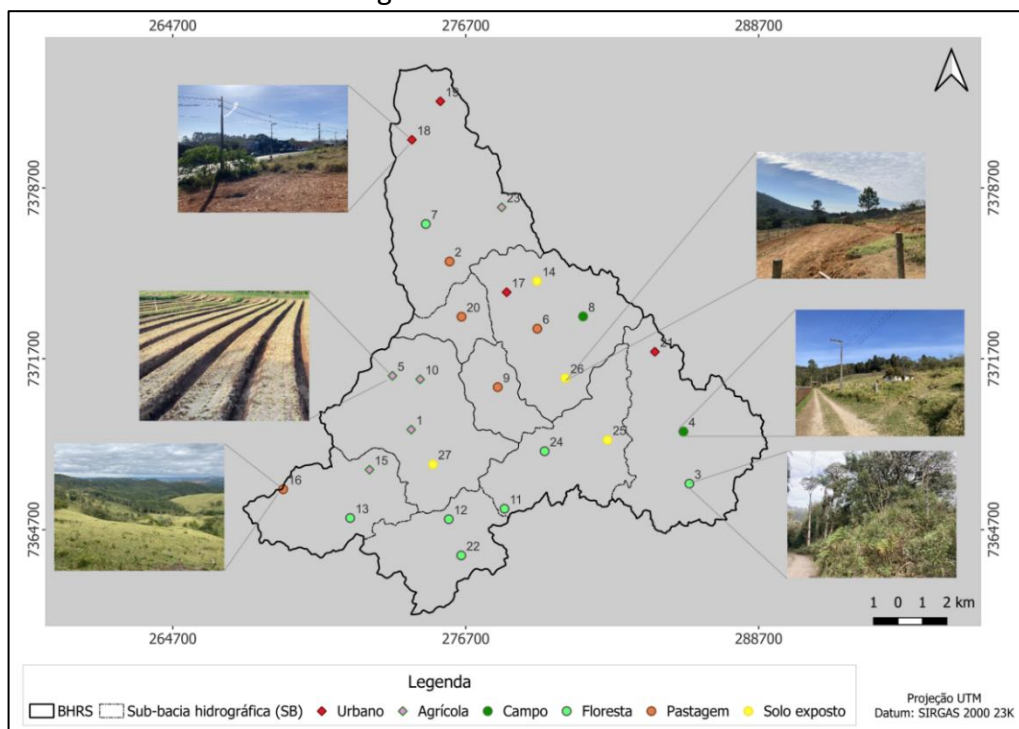
Paralelamente, a validação dos locais de amostragem foi realizada com base no conhecimento prévio da área de estudo e complementado pela análise de uma imagem de satélite CBERS-4A, com resolução espacial de 2 metros, em conjunto com a fusão da banda pancromática.

As amostras foram coletadas em seis classes de uso da terra: agrícola (5 amostras), pastagem (5 amostras), ambiente urbano (4 amostras), floresta (7 amostras), campo (2 amostras) e solo exposto (4 amostras), conforme a Figura 2. A classificação dessas categorias seguiu o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), que estabelece critérios detalhados para a identificação e categorização de diferentes tipos de uso da terra, permitindo uma classificação padronizada das amostras coletadas.

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar até perderem a umidade, alcançando a condição necessária para a análise granulométrica. A análise física foi realizada pelo método da pipeta, utilizando a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), com moagem e secagem das amostras para garantir

o tamanho de partícula adequado (IAC, 2021). Para dispersar os aglomerados, foi utilizada uma solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio, com agitação por 16 horas a 30 rpm em um agitador rotatório Wagner (IAC, 2009).

Figura 2 - Plano amostral.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A fração areia foi obtida por meio de uma peneira de 0,053 mm, e as frações argila e silte foram separadas por pipetagem, durante períodos de sedimentação, conforme a Lei de Stokes (Stokes, 1851), apresentado na Equação 1.

$$v = \frac{2}{9} \frac{(\rho_s - \rho_f)gr^2}{\eta} \tag{1}$$

Onde: v é a velocidade de sedimentação (m/s); ρ_s é a densidade da partícula (kg/m^3); ρ_f é a densidade do fluido (kg/m^3); g é aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$); r é raio da partícula (m) e η é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa·s).

A adoção da peneira de 0,053 mm para a determinação da fração areia segue a recomendação do Boletim Técnico 106 do IAC, procedimento utilizado em análises granulométricas de solos para fins agrônômicos no Brasil. Convém ressaltar ainda que, embora a ABNT NBR 6502 estabeleça o limite inferior da fração areia em 0,06 mm, essa norma é direcionada principalmente à classificação geotécnica de solos. Portanto, neste estudo, adotou-se o critério metodológico recomendado pelo IAC, mais apropriado para análises físicas de solos em contexto agrônômico e pedológico.

Para a fração argila+silte, foi considerada uma profundidade de 10 cm após um período de sedimentação de 4 minutos e 28 segundos. Já para a argila, a profundidade considerada foi de 5 cm, após 3 horas e 43 minutos de sedimentação (IAC, 2009).

Cálculo do fator de erodibilidade do solo (fator k) da BHRS

O fator de erodibilidade do solo (fator K), disposto na Equação 2, foi determinado com base na análise física das frações do solo, utilizando o método indireto conforme descrito por Bouyoucos e adaptado por Mannigel et al. (2002) e Bertoni e Lombardi Neto (2012).

Esse procedimento calcula o fator K a partir das proporções relativas de areia, silte e argila, sendo utilizado por sua precisão na quantificação da suscetibilidade à erosão em diferentes contextos edafoclimáticos (Delgado et al., 2025; Taloor et al., 2025; Rohit et al., 2025).

$$K = \left(\frac{\%Areia + \%Silte}{\%Argila} \right) \times \frac{1}{100} \quad (2)$$

Onde: K é o fator de erodibilidade do solo ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); % areia, % silte e % argila representam as porcentagens das respectivas frações de uma amostra de solo.

Vale destacar que esse parâmetro foi calculado visando identificar áreas críticas em relação ao potencial de perda de solo, especialmente relevantes para a análise da distribuição de micronutrientes, pois, considerando que o arraste de partículas finas durante processos erosivos pode influenciar significativamente a concentração e disponibilidade desses nutrientes no solo (Li et al., 2023), a avaliação do fator K se torna essencial para compreender os impactos da erodibilidade

sobre a fertilidade e a qualidade do solo na região analisada, conforme abordado por Silva Junior et al. (2025) e Santos et al. (2025a).

Avaliação de micronutrientes e fertilidade do solo nas sub-bacias da BHRS

As análises químicas do solo foram conduzidas no Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, campus de Botucatu (SP), com a quantificação dos teores de Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn), expressos em mg/dm³.

A seleção desses micronutrientes baseou-se em sua relevância para a nutrição vegetal e na influência direta que exercem sobre a fertilidade do solo, especialmente em áreas de olericultura, onde o manejo intensivo pode acentuar desequilíbrios nutricionais (Zewide e Sherefu, 2021; Saleem et al., 2023).

A análise em escala de sub-bacia hidrográfica foi escolhida para identificar padrões na distribuição dos micronutrientes no solo da BHRS, correlacionando-os com as características físicas e condições naturais que afetam sua disponibilidade. Além do mais, os resultados obtidos contribuem para o diagnóstico de desequilíbrios nutricionais e auxiliam na formulação de estratégias de manejo agrícola mais eficientes e sustentáveis, além de avaliar o risco de mobilização de nutrientes para corpos hídricos adjacentes.

Interpolação espacial e análise da variabilidade dos parâmetros físico-químicos do solo na BHRS

Com base nos resultados obtidos nas análises físico-químicas do solo, os dados foram incorporados à tabela de atributos dos 27 pontos de amostragem, permitindo a realização da interpolação espacial dos parâmetros. Para esse procedimento, utilizou-se o software ArcGIS (versão 10.5), aliado ao método *Inverse Distance Weighted* (IDW), representado pela Equação 3.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (3)$$

Onde: Z_p valor estimado dos parâmetros analisados; Z_i o valor do resíduo entre o ponto amostrado mais próximo vizinho ao valor estimado; h_{ij} a distância entre o valor estimado e o valor amostrado; β o expoente de ponderação (peso) e; n o número de pontos amostrados utilizados para estimar cada valor.

Convém destacar que o IDW é utilizado para estimar valores em pontos não amostrados com base nas medições dos pontos vizinhos, atribuindo maior peso àqueles localizados mais próximos, ou seja, a contribuição de cada ponto para a estimativa de um valor diminui conforme a distância entre os pontos aumenta, sendo essa relação inversamente proporcional (Landim, 2004; Benmoshe, 2025).

O valor do expoente de ponderação (β) foi definido como 2, pois esse valor tem se mostrado eficiente na literatura Santos et al. (2025b), Vélez et al. (2024), Bărbulescu et al. (2021), garantindo uma estimativa equilibrada entre a proximidade e a variação dos pontos amostrados.

Vale ressaltar que a escolha do IDW se dá pelo fato de que esse é um método de interpolação que garante um bom ajuste aos dados amostrais e é particularmente indicado quando se busca uma solução única, com contornos fiéis à distribuição original dos dados. Por sua natureza, o interpolador assegura que as estimativas sejam condizentes com as informações fornecidas pelas amostras, ao mesmo tempo em que suaviza variações espaciais abruptas (Bărbulescu et al., 2024; Landim, 2004).

Após a interpolação, foi realizada a extração do valor mínimo, médio, máximo e desvio padrão ($DvP \pm$) de cada pixel dos *rasters* gerados em cada sub-bacia da BHRS, de forma a quantificar a variabilidade espacial dos atributos do solo, fornecendo subsídios para a interpretação dos padrões de distribuição e a definição de estratégias de manejo mais acuradas. Os dados extraídos foram organizados em planilhas para posterior análise.

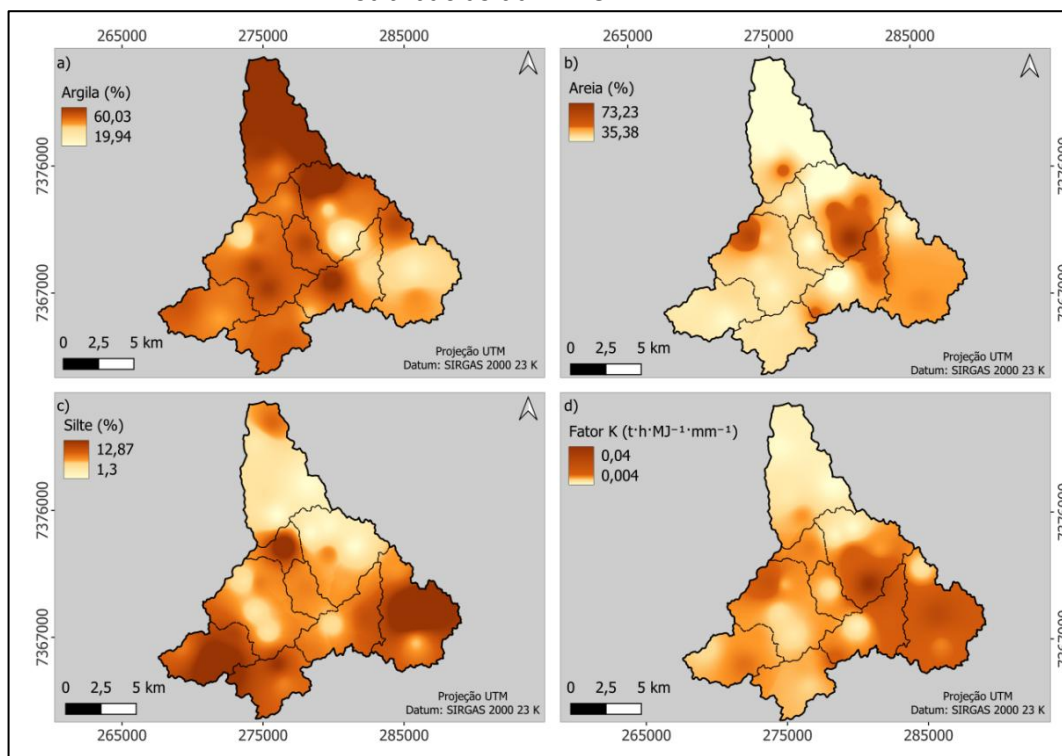
Adicionalmente, para avaliar as interações entre os parâmetros analisados, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis, a fim de identificar relações estatisticamente significativas e possíveis influências entre os diferentes atributos do solo.

A distribuição espacial de cada variável foi então representada por meio de mapas elaborados no software QGIS (versão 3.36.0), que permitiu visualizar e analisar a espacialidade dos parâmetros no contexto da área estudada.

Resultados e discussões

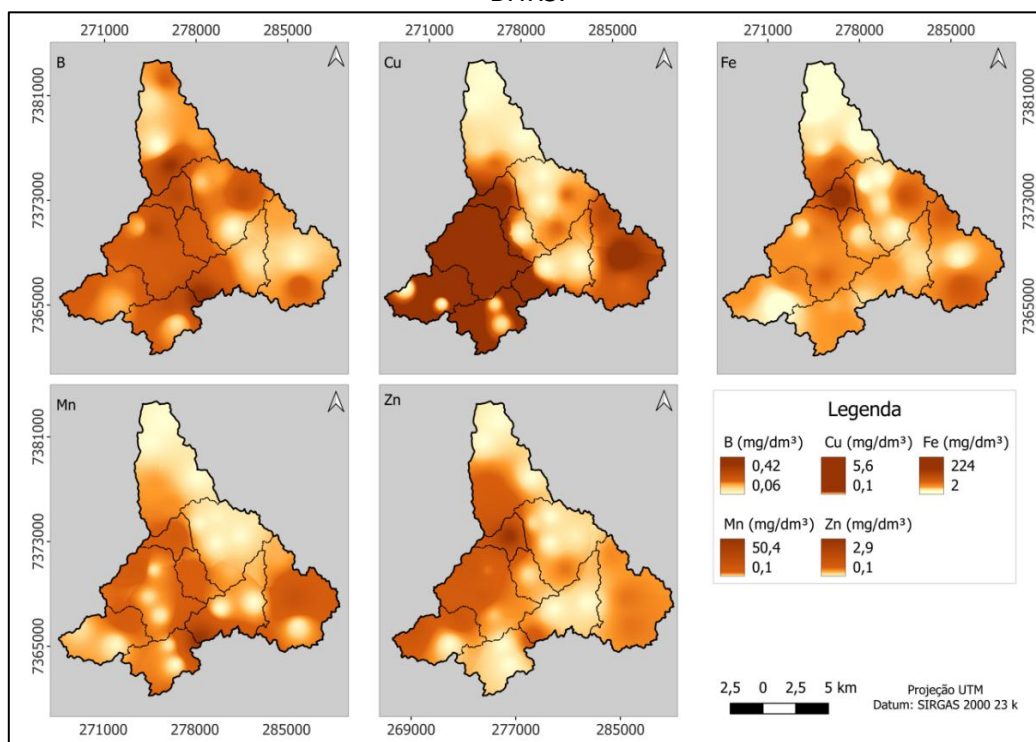
A análise espacial das propriedades físicas do solo permite compreender a dinâmica textural e sua influência na suscetibilidade à erosão nas sub-bacias da BHRS. Nesse contexto, a Figura 3 apresenta a distribuição espacial das frações granulométricas (argila, areia e silte) e do fator K, evidenciando padrões texturais e áreas potencialmente mais suscetíveis à perda de solo. Complementarmente, a Figura 4 ilustra a distribuição espacial dos micronutrientes analisados, permitindo avaliar a variabilidade de sua disponibilidade e sua relação com as propriedades físicas do solo na área de estudo.

Figura 3 - Distribuição espacial de argila (a), areia (b), silte (c) e do fator K (d) no solo das sub-bacias da BHRS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 - Distribuição espacial e concentrações dos micronutrientes no solo das sub-bacias da BHRS.

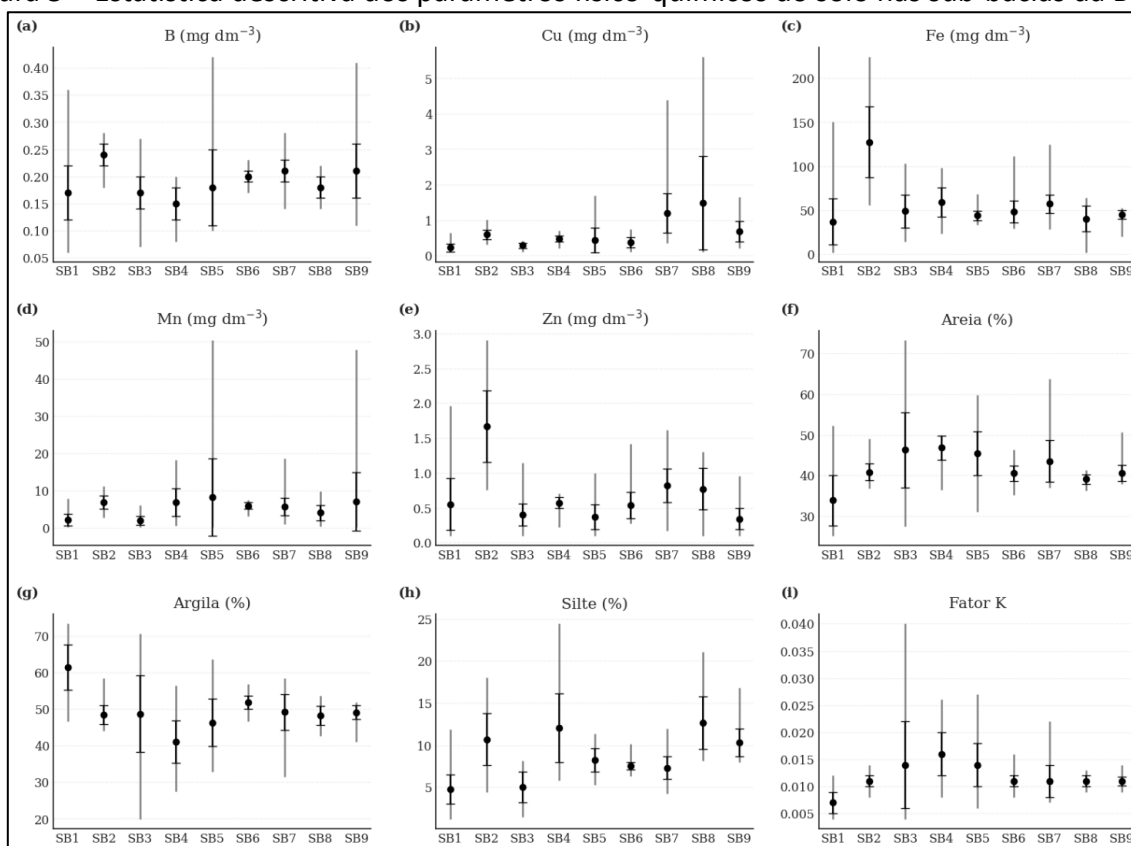


Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 5 apresenta as variações estatísticas dos parâmetros físico-químicos do solo nas sub-bacias da BHRS, incluindo média (mg/dm⁻³), desvio padrão (Dvp ±) e valores mínimos (mg/dm⁻³) e máximos (mg/dm⁻³). Esses parâmetros são importantes para caracterizar a variabilidade das propriedades químicas e texturais do solo, contribuindo para a compreensão da fertilidade, da dinâmica dos nutrientes e da suscetibilidade à erosão na área de estudo.

Inicialmente, convém destacar que os resultados demonstram variações significativas nos teores de micronutrientes entre as sub-bacias da BHRS (SB1 a SB9), sendo essas diferenças influenciadas pelas práticas agrícolas específicas de cada área, como os tipos de cultivo, a aplicação de fertilizantes e as abordagens de manejo do solo. Tais variações também refletem as condições edáficas distintas e os impactos das atividades antrópicas nas propriedades químicas do solo, assim como destacado por Timilsina et al. (2025).

Figura 5 – Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos do solo nas sub-bacias da BHRS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As concentrações médias de B variam de 0,15 mg/dm⁻³ (SB4) a 0,24 mg/dm⁻³ (SB2), com valores próximos de 0,20 mg/dm⁻³ predominando nas sub-bacias hidrográficas. A baixa variabilidade (DvP entre ±0,01% e ±0,07%) indica uma distribuição uniforme do parâmetro, que pode influenciar a disponibilidade do micronutriente, especialmente em áreas com maior argilosidade, que possuem maior capacidade de retenção de água e nutrientes (Vera-Maldonado et al., 2024).

É relevante destacar que o padrão espacial do B possui implicações significativas para o manejo agrícola sustentável da BHRS, uma vez que a absorção desse micronutriente é influenciada pela textura do solo, demandando a adoção de estratégias de manejo diferenciadas, ajustadas às características específicas de cada tipo de solo, com o objetivo de otimizar a disponibilidade do B e assegurar a sustentabilidade da produtividade agrícola.

No caso do Cu, a análise revelou uma maior heterogeneidade nas concentrações, com valores médios variando de $0,22 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB1) a $1,49 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB8). A SB8 apresentou a maior concentração de Cu, enquanto a SB1 foi caracterizada pelos menores valores.

A ampla variação no DvP, entre $\pm 0,08\%$ e $\pm 1,32\%$, indica a necessidade de um manejo específico em áreas com concentrações mais elevadas, a fim de evitar efeitos tóxicos para as plantas. Ademais, essa variabilidade pode estar relacionada a diferenças no processo de mineralização e na interação do Cu com as frações do solo (Gonzaga et al., 2020).

O Fe apresentou variações consideráveis nas sub-bacias hidrográficas, com valores médios que oscilaram entre $36,98 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB1) e $127,49 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB2), e um DvP que variou de $\pm 5,00\%$ a $\pm 40,31\%$. As altas concentrações desse parâmetro podem estar associadas à mineralogia do solo e à sua capacidade de troca catiônica, conforme destacado por Murgia et al. (2022), haja vista que essas variações podem influenciar diretamente a disponibilidade de Fe para as plantas, afetando seu crescimento e produtividade, particularmente em solos mais ricos em argila, como na BHRS, que apresentam maior capacidade de retenção de nutrientes (Aung e Masuda, 2020).

O Mn demonstrou uma variabilidade significativa, com concentrações médias variando de $1,92 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB3) a $8,22 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB5), o que reflete a interação complexa desse parâmetro com a matéria orgânica do solo e sua potencial influência nos processos biogeoquímicos nas sub-bacias da BHRS, conforme destacado por Li et al. (2021). Essa variabilidade, conforme os autores, também pode ser atribuída a dinâmicas como a lixiviação ou a oxidação, que afetam a disponibilidade do Mn nas diferentes áreas.

O DvP, que chegou a $\pm 10,40\%$, indica uma distribuição não uniforme desse micronutriente, sugerindo que certas áreas podem ser mais propensas à sua mobilização ou à formação de associações organo-minerais (Timofeeva et al., 2025). Esses fatores sublinham a importância de estratégias de manejo adaptadas às condições locais, de forma a otimizar a disponibilidade do Mn para as plantas.

Em relação ao Zn, as concentrações médias variaram entre $0,34 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB9) e $1,67 \text{ mg/dm}^{-3}$ (SB2), com DvP de $\pm 0,08\%$ a $\pm 0,51\%$. Embora a variabilidade seja moderada, os valores

mais altos desse parâmetro, observados na SB2, indicam que a composição do solo, incluindo sua textura e capacidade de troca iônica, pode ter influenciado a distribuição desse micronutriente, pois em solos com maior teor de argila, como na BHRS, a maior capacidade de retenção de Zn pode resultar em uma maior disponibilidade para as plantas, refletindo diretamente na fertilidade do solo (Saleem et al., 2023).

A interpretação dos teores de micronutrientes observados na BHRS pode ser realizada com base nos critérios de fertilidade estabelecidos para solos tropicais. De acordo com as faixas de interpretação propostas por Raij (1997), os teores de B observados situam-se predominantemente entre níveis baixos e médios de disponibilidade, indicando possível limitação nutricional em determinadas áreas agrícolas.

Para o Cu, as concentrações variam entre níveis médios e elevados, sugerindo disponibilidade adequada na maioria das sub-bacias. No caso do Fe, os valores observados encontram-se acima das faixas críticas de deficiência, condição comum em solos tropicais altamente intemperizados ricos em óxidos de ferro. Os teores de Mn variam entre níveis médios e altos, indicando disponibilidade satisfatória para o desenvolvimento das culturas, embora fatores como pH e condições redox possam influenciar sua dinâmica no solo.

Por fim, as concentrações de Zn situam-se predominantemente entre níveis médios e elevados, sugerindo condições adequadas de fertilidade para esse micronutriente. Dessa forma, embora a disponibilidade geral dos micronutrientes seja considerada satisfatória na maior parte da área de estudo, a variabilidade espacial observada reforça a necessidade de estratégias de manejo nutricional adaptadas às condições edáficas específicas de cada sub-bacia hidrográfica.

Convém destacar que essa interpretação agrônômica reforça a importância da análise espacial apresentada neste estudo, uma vez que a variabilidade na distribuição dos micronutrientes pode resultar em diferentes condições de fertilidade entre as sub-bacias da BHRS.

As características físicas do solo, como a composição das frações texturais e o fator K, também desempenharam um papel fundamental na variação das concentrações de micronutrientes.

A análise das frações de areia, argila e silte apontam que as sub-bacias hidrográficas apresentaram diferenças substanciais em suas texturas.

A SB1, por exemplo, caracterizou-se como um solo predominantemente argiloso, com 61,35% de argila, o que proporciona maior capacidade de retenção de água e nutrientes, mas é o local predominantemente urbano. Em contraste, a SB3, com 46,30% de areia, apresentou um solo com maior drenagem e menor capacidade de retenção de nutrientes, o que pode resultar em menores concentrações de micronutrientes disponíveis para as plantas.

Adicionalmente, o fator K variou entre as sub-bacias hidrográficas com valores médios que oscilaram de 0,007 (SB1) a 0,016 (SB4). As áreas com maior erodibilidade, especialmente aquelas com maiores concentrações de areia, podem sofrer maior perda de nutrientes por erosão, afetando a qualidade do solo e a disponibilidade de micronutrientes (Holanda et al., 2025), reforçando a importância de práticas de conservação do solo para mitigar a erosão e minimizar a lixiviação de nutrientes, garantindo a sustentabilidade da agricultura (Lackoóvá et al., 2023).

Diante do exposto, vale destacar que esses resultados são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola mais eficiente, capazes de promover a conservação do solo e melhorar a produtividade de forma sustentável, com foco na otimização do uso de recursos naturais e na implementação de práticas agrícolas adequadas às condições locais (Santos et al., 2026).

Nessa perspectiva, a Tabela 1 apresenta a correlação entre os componentes do solo analisados. Os valores de r indicam a intensidade da associação linear entre os pares de variáveis, juntamente com a equação do modelo de ajuste correspondente a cada combinação de componentes.

Tabela 1 - Correlação entre os componentes do solo avaliados.

Componentes	Correlação (r²)	Equação do modelo
B x Areia	-0,21	$y = -0,0013x + 0,2467$
B x Argila	0,13	$y = 0,0006x + 0,1588$
B x Silte	0,06	$y = 0,0005x + 0,1855$
B x Fator K	-0,35	$y = -3,3487x + 0,2302$

Componentes	Correlação (r²)	Equação do modelo
Cu x Areia	-0,06	y = -0,006x + 0,8884
Cu x Argila	-0,24	y = -0,0196x + 1,603
Cu x Silte	0,54	y = 0,0809x - 0,069
Cu x Fator K	-0,09	y = -13,255x + 0,7951
Componentes	Correlação (r²)	Equação do modelo
Fe x Areia	0,10	y = 0,6441x + 29,419
Fe x Argila	-0,23	y = -1,1841x + 114,86
Fe x Silte	0,29	y = 2,8153x + 31,835
Fe x Fator K	0,13	y = 1295,6x + 40,954
Componentes	Correlação (r²)	Equação do modelo
Mn x Areia	0,38	y = 0,2086x - 3,35
Mn x Argila	-0,59	y = -0,2487x + 17,668
Mn x Silte	0,56	y = 0,4403x + 1,5498
Mn x Fator K	0,39	y = 315,28x + 1,6313
Componentes	Correlação (r²)	Equação do modelo
Zn x Areia	-0,17	y = -0,0167x + 1,3714
Zn x Argila	-0,04	y = -0,0032x + 0,8292
Zn x Silte	0,32	y = 0,0457x + 0,2716
Zn x Fator K	-0,12	y = -17,782x + 0,8828

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados indicam que o fator K influencia diretamente a disponibilidade de B no solo, com uma correlação negativa moderada ($r = -0,35$), sugerindo que, em áreas com maior erodibilidade, a concentração de B tende a ser menor (EMBRAPA, 2023), o que exige atenção no manejo da erosão e na fertilização. Em contraste, a fraca correlação entre B e as frações de areia, silte e argila indica que a textura do solo tem impacto limitado na disponibilidade de B, orientando práticas de manejo focadas principalmente no controle da erosão do solo.

A correlação moderada entre Cu e a fração de silte ($r = 0,54$) sugere que partículas de menor tamanho podem favorecer a adsorção desse micronutriente, uma vez que apresentam maior área superficial e maior capacidade de retenção de cátions no solo. Por outro lado, as correlações fracas e negativas com argila ($r = -0,24$) e areia ($r = -0,06$), além da baixa associação com o fator K ($r = -0,09$), sugerem que esses têm impacto limitado nas variações de Cu. Esses resultados indicam que,

no manejo do solo na BHRS, práticas que favoreçam a retenção de silte devem ser consideradas para otimizar a disponibilidade Cu no solo, conforme destacado por Chang et al. (2024).

O Fe apresentou correlações fracas com a fração de silte ($r = 0,29$) e o fator K ($r = 0,13$), indicando uma influência moderada da retenção de silte e da erodibilidade nas concentrações desse micronutriente no solo. Em contraste, a correlação com a argila ($r = -0,23$) foi negativa e com a areia ($r = 0,10$) foi positiva, mas igualmente fraca, sugerindo que essas frações não impactam significativamente o teor de Fe no solo da BHRS.

A correlação mais expressiva para o Mn foi com a fração de argila ($r = -0,59$), indicando que solos com maior teor de argila tendem a ter menores concentrações do micronutriente. A fração de silte também apresentou correlação relevante ($r = 0,56$), sugerindo que sua presença facilita a retenção de Mn.

A correlação moderada e positiva com o fator K ($r = 0,39$) sugere que solos mais erodíveis podem ter maior mobilidade do Mn, o que poderia aumentar suas concentrações superficiais, ressaltando a necessidade de considerar as características texturais e os potenciais de erosividade no manejo, uma vez que o arraste de partículas pode afetar a distribuição e a disponibilidade de Mn no solo (Liu e Han, 2021).

Por fim, o Zn apresentou correlações relativamente fracas com todas as variáveis. A maior correlação foi com o silte ($r = 0,32$), indicando uma leve tendência de aumento nas concentrações desse parâmetro à medida que a fração sílica do solo aumenta. A correlação com o fator de erodibilidade foi negativa ($r = -0,12$), embora fraca, indicando que o aumento na erodibilidade do solo pode estar associado a uma leve diminuição nas concentrações do micronutriente (Chen et al., 2025).

Dada a complexidade das interações entre a textura do solo, o fator K e a disponibilidade de nutrientes na BHRS, é fundamental a implementação de estratégias de manejo integrado, com foco na sustentabilidade agrícola da bacia hidrográfica.

Além do mais, a adoção de práticas conservacionistas específicas pode aprimorar a eficiência do solo na absorção dos micronutrientes, contribuindo para o seu potencial de fertilidade.

Ademais, a adoção de um manejo adaptativo, que considere as variações edáficas específicas de cada sub-bacia hidrográfica, é imprescindível para assegurar a sustentabilidade agrícola de longo prazo na BHRS, em conformidade com os ODS da ONU.

Apesar das contribuições apresentadas, este estudo possui algumas limitações que devem ser consideradas. O número de pontos amostrais, embora suficiente para análises exploratórias de variabilidade espacial, pode não capturar todas as microvariações edáficas presentes na área de estudo. Além disso, a aplicação do método IDW, embora eficiente para estimativas espaciais, não considera explicitamente a estrutura de dependência espacial dos dados, como ocorre em métodos geoestatísticos baseados em variogramas.

Dessa forma, pesquisas futuras podem ampliar a densidade amostral e aplicar técnicas geoestatísticas mais avançadas, como krigagem ou modelos de aprendizado de máquina, permitindo melhorar a precisão da modelagem espacial e aprofundar a compreensão da dinâmica dos micronutrientes em sistemas agrícolas tropicais.

Considerações finais

Os resultados obtidos destacam a importância de se avaliar a interação entre as características físicas e a distribuição dos micronutrientes em bacias hidrográficas ocupadas por atividades agrícolas, pois a variação das frações granulométricas e do fator K exerce influência direta na disponibilidade dos micronutrientes, o que, por sua vez, impacta tanto o potencial produtivo do solo quanto sua suscetibilidade a processos erosivos, reforçando a importância de considerar essas interações no planejamento e manejo agrícola em áreas de bacias hidrográficas.

A correlação negativa entre B e o fator K indica que solos mais suscetíveis à erosão tendem a apresentar concentrações mais baixas desse elemento, o que pode prejudicar o equilíbrio nutricional das culturas em áreas com alta erodibilidade. Em contrapartida, as relações positivas entre Cu e Mn com a fração de silte evidenciam o papel dessa fração textural na retenção desses micronutrientes no solo.

A correlação negativa entre Mn e a argila sugere que solos com maior teor de argila podem restringir sua disponibilidade, enquanto o Fe apresentou sensibilidade moderada às variações

texturais, ao passo que o Zn apresentou menor influência das características físicas do solo, indicando maior estabilidade em sua distribuição.

Essas dinâmicas ressaltam a importância de um manejo do solo que leve em consideração as particularidades texturais e a suscetibilidade à erosão, a fim de otimizar a disponibilidade de micronutrientes essenciais. A adequação das práticas agrícolas às condições edáficas específicas, especialmente em áreas vulneráveis à erosão, é fundamental para garantir a eficiência nutricional das culturas e mitigar os impactos da degradação do solo.

Por fim, estratégias de manejo que integrem a conservação do solo com a fertilização adequada são essenciais para garantir a estabilidade dos níveis de nutrientes, promovendo maior produtividade agrícola e sustentabilidade a longo prazo. Nessa perspectiva, o uso do geoprocessamento para a modelagem espacial dos atributos físico-químicos do solo permitiu uma análise eficiente, identificando áreas prioritárias para intervenções conservacionistas e manejo da fertilidade. Dessa forma, os resultados deste estudo oferecem subsídios técnicos para o aprimoramento de estratégias agrícolas sustentáveis na BHRS, contribuindo para o planejamento territorial, a conservação dos solos e a formulação de políticas públicas alinhadas aos ODS da ONU.

Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações devem ser consideradas. A densidade amostral utilizada pode não representar completamente a heterogeneidade edáfica da bacia hidrográfica. Além disso, o método de interpolação IDW, embora utilizado em análises espaciais, não considera explicitamente a dependência espacial entre as amostras. Dessa forma, estudos futuros podem ampliar a densidade de amostragem e aplicar métodos geoestatísticos, como a krigagem, bem como integrar técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar a modelagem espacial dos atributos do solo e aumentar a precisão das estimativas.

Referências

- ABDELRAHMAN, M. A. E.; METWALY, M. M. Digital soil characteristics mapping for aiding site-specific management practices in the West Nile Delta, Egypt. **Discover Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 47, 2023. <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00162-6>
- AHMED, N.; ZHANG, B.; CHACHAR, Z.; LI, J.; XIAO, G.; WANG, Q.; HAYAT, F.; LANSHENG DENG, L.; NAREJO, M. N.; BOZDAR, B.; Tu, P. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality,

productivity and sustainability. **Scientia Horticulturae**, v. 323, p. 112512, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>

AL-SHAMMARY, A. A. G.; AL-SHIHMANI, L. S. S.; FERNANDEZ-GALVEZ, J.; CABALLERO-CALVO, A. Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. **Journal of Environmental Management**, v. 364, p. 121487, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>

ARANTES, L. T.; SANTOS, A. P.; SILVA, C. V.; NERY, L. M.; TOLEDO, M. V. L.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Socioeconomic spatial analysis through fuzzy system as a tool for territorial planning applied to watersheds. **International Journal of River Basin Management**, p. 1-17, 2024a. <https://doi.org/10.1080/15715124.2024.2387579>

ARANTES, L. T.; SANTOS, A. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Indicador de vulnerabilidade ao carreamento de sedimentos integrado ao SIG e SR. **Geo UERJ**, v. 45, 2024b. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2024.74164>

AUNG, M. S.; MASUDA, H. How does rice defend against excess iron?: Physiological and molecular mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1102, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01102>

BĂRBULESCU, A.; SALIBA, Y. Sensitivity Analysis of the Inverse Distance Weighting and Bicubic Spline Smoothing Models for MERRA-2 Reanalysis PM2. 5 Series in the Persian Gulf Region. **Atmosphere**, v. 15, n. 7, p. 748, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15070748>

BĂRBULESCU, A.; ŞERBAN, C.; INDRECAN, M. L. Computing the beta parameter in IDW interpolation by using a genetic algorithm. **Water**, v. 13, n. 6, p. 863, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13060863>

BENMOSHE, N. A Simple Solution for the Inverse Distance Weighting Interpolation (IDW) Clustering Problem. **Sci**, v. 7, n. 1, p. 30, 2025. <https://doi.org/10.3390/sci7010030>

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo** 8.ed. São Paulo: Ícone, 2012.

BORGES, C. C.; COSTA, H. F.; TOLEDO, M. V. L.; SILVA, D. C. C. Identificación de áreas prioritarias de recuperación a través del estudio de la dinámica de erosión en la cuenca hidrográfica del Río Carapiranga. **Anales De Geografia De La Universidad Complutense**, v. 45, p. 1-34, 2025. <https://doi.org/10.5209/aguc.99093>

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar. Maior rede de abastecimento da América do Sul, CEAGESP completa 55 anos. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mda/pt-br/noticias/2024/05/maior-rede-de-abastecimento-da-america-do-sul-ceagesp-completa-55-anos>. Acesso em: 9 mar. 2026.

CARRILLO, V. C.; HEENKENDA, M. K.; NELSON, R.; SAHOTA, T. S.; SERRANO, L. S. Deep learning in land-use classification and geostatistics in soil pH mapping: a case study at Lakehead University

Agricultural Research Station, Thunder Bay, Ontario, Canada. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 16, n. 3, p. 034519-034519, 2022. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.034519>

CHANG, M.; LIU, Y.; XU, M.; LI, H.; LI, S. W. Particle morphology and soil properties affect the retention of copper oxide nanoparticles in agricultural soils. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 46, n. 8, p. 281, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02057-5>

CHEN, J.; FAN, P.; ZHANG, F.; TAI, L.; FANG, N.; NIU, Y.; WU, Z.; FU, Z.; WANG, K. Heavy metal (loid) s migration mechanisms during soil erosion: A systematic quantitative review. **International Soil and Water Conservation Research**, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.02.002>

DELGADO, D.; SADAQUI, M.; LUDWIG, W.; MENDEZ, W.; ORTIZ-HERNANDEZ, E.; FARFAN-INTRIAGO, P. Assessment of soil erosion by RUSLE in the Ecuadorian basins (2001– 2020) based on GIS and high-resolution satellite data: Main drivers and changes on soil erosion. **Geomorphology**, v. 469, p. 109515, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109515>

DUARTE, M. L.; SILVA, D. C. C.; BARBOSA, R. L.; LOURENÇO, R. W. Modeling of soil organic matter using Sentinel-1 SAR and partial least squares (PLS) regression. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 17, p. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11844-w>

DUBREUIL, V.; PECHUTTI FANTE, K.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. A. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, n. 41, 2017. <http://dx.doi.org/10.4000/echogeo.15017>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo de Feijão – Boro**, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/feijao/producao/micronutrientes/boro>. Acesso em: 15 nov. de 2023.

GOMES, G.; NERY, L. M.; NICOMEDES, N. P.; SANTOS, A. P.; TONIOLO, B. P.; COSTA, R. V. F.; SILVA, D. C. C. Impact of land use and land cover changes on sensible heat variability in a fragment of the Atlantic Forest Biome. **International Journal of Remote Sensing**, v. 46, p. 1-27, 2025. <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2580584>

GONZAGA, M. I. S.; MATIAS, M. I. D. A. S.; ANDRADE, K. R.; JESUS, A. N.; COSTA CUNHA, G.; ANDRADE, R. S.; JESUS SANTOS, J. C. Aged biochar changed copper availability and distribution among soil fractions and influenced corn seed germination in a copper-contaminated soil. **Chemosphere**, v. 240, p. 124828, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124828>

HOLANDA, S. F.; VARGAS, L. K.; GRANADA, C. E. Challenges for sustainable production in sandy soils: A review. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 1, p. 53-66, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03895-6>

IAC – Instituto Agronômico de Campinas. **Métodos de Análise Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas: Boletim Técnico Análise Granulométrica**. Org: MARIA, I. C; COELHO, R. M.; ABREU, M. F.; CANTARELLA H. Campinas, versão II, 2021. Disponível em:

<https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/BoletimTecnicoAnaliseGranulometricaAbr2021.pdf> Acesso em: 15 nov. 2023.

IAC – Instituto Agrônômico de Campinas. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônômico de Campinas**. Org.: CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Campinas, São Paulo (SP). 2009. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/docs/Boletim_Tecnico_106_rev_atual_2009.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. Ibiúna. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ibiuna/panorama>. Acesso em: 27 dez. 2023.

IBGE – instituto brasileiro de geografia e estatística. **Manual técnico de uso da terra**. Org.: Diretoria de Geociências. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. 3ª ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ). 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>. Acesso em: 04 set. 2024.

KOEPPEN, W. **Climatologia con un estudio de los climas de la tierra**. 1948.

LACKOOVA, L.; LIESKOVSKÝ, J.; NIKSERESHT, F.; HALABUK, A.; HILBERT, H.; HALASZOVA, K.; BAHREINI, F. Unlocking the potential of remote sensing in wind erosion studies: a review and outlook for future directions. **Remote Sensing**, v. 15, n. 13, p. 3316, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15133316>

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. Unesp, 2004.

LI, J.; LUO, B.; WEI, X.; CI, E.; NI, J.; WEI, C.; ZHONG, S. Transportation of fine particles controlled by particles flocculation is a key feature of soil erosion on gentle slope land. **Catena**, v. 232, p. 107382, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107382>

LIU, M.; HAN, G. Distribution of soil nutrients and erodibility factor under different soil types in an erosion region of Southeast China. **PeerJ**, v. 9, p. e11630, 2021. <https://doi.org/10.7717/peerj.11630>

MANNIGEL, A. R.; PASSOS, M.; MORETI, D.; ROSA MEDEIROS, L. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002. <http://eduemojs.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2374/1787>

MURGIA, I.; MARZORATI, F.; VIGANI, G.; MORANDINI, P. Plant iron nutrition: The long road from soil to seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 73, n. 6, p. 1809-1824, 2022. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab531>

NERY, L. M.; PERUCELLO, J. L.; CUNHA-LIGNON, M.; MACHADO, L. P.; SILVA, D. C. C. Retrato ambiental do Complexo Estuarino Lagunar Cananea-Iguape: a influência do canal Valo Grande. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 82, p. 1-20, 2024. <https://doi.org/10.5380/geo.v82i1.91877>

ONU - Organização das Nações Unidas. General Assembly Resolution A/RES/70/1. Transforming Our World, the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Disponível em:

https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf. Acesso em: 23 dez. 2023.

POLETTI, F. B.; SANTOS, A. P.; PAULA, A. L.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Lógica fuzzy aplicada à planificación sostenible del uso de la tierra en cuencas hidrográficas basada en indicadores de aptitud local. **Entorno Geográfico**, Cali, n. 30, jul./dez. 2025. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i30.14851>

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2ª ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997.

RIBEIRO, W. R.; GONÇALVES, M. S.; FERREIRA, D. S.; COSTA GONÇALVES, D.; ALMEIDA, S. L. H.; SALES, R. A.; SIMAN, F. C.; VENANCIO, L. P.; REIS, E. F. Water demand of central pivot-irrigated areas in Bahia, Brazil: management of water resources applied to sustainable production. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 10, p. 12340-12366, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01950-8>

RIZZO, F. A.; SACRAMENTO, B. H.; TONELLO, P. S.; SILVA, D. C. C. Proposta metodológica de identificação de áreas prioritárias para recuperação da bacia hidrográfica do córrego Pequiá (MA). **Revista Tecnologia E Sociedade**, v. 19, p. 33-54, 2023. <https://doi.org/10.3895/rts.v19n57.15589>

ROHIT, T. S.; VILLURI, V. G. K. Impact of Slope Cutoff Factor on Soil Erosion Estimates: A Hilltop Mine-Based Comparative Geospatial Study. **Land Degradation & Development**, v. 36, n. 6, p. 2010-2021, 2025. <https://doi.org/10.1002/ldr.5478>

SALEEM, S.; MUSHTAQ, N. U.; RASOOL, A.; SHAH, W. H.; TAHIR, I.; REHMAN, R. U. Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: **Sustainable plant nutrition**. Academic Press, 2023. p. 23-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>

SALES, J. C. A.; ARANTES, L. T.; NERY, L. M.; SANTOS, A. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Análise espacial do carreamento de sedimentos por área de contribuição de afluentes sem cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Rio Una. **GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology**, n. 34, p. 45-62, 2024. <https://doi.org/10.21138/GF.856>

SANTOS, A. P.; NERY, L. M.; ARANTES, L. T.; TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Performance of Random Forest in predicting soil loss based on values calculated by USLE. **Earth Sciences Research Journal**, Bogotá, v. 29, n. 4, 2025a. <https://doi.org/10.15446/esrj.v29n4.121271>

SANTOS, A. P.; SILVA JUNIOR, A. X.; ARANTES, L. T.; TONIOLO, B. P.; NICOMEDES, N. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Machine learning and geoprocessing in the modeling of agricultural suitability in a River Basin for sustainable agricultural management. **Environment, Development and Sustainability**, n. 18, p. 1-30, 2026. <https://doi.org/10.1007/s10668-026-07377-3>

SANTOS, A. P.; SILVA JUNIOR, A. X.; NERY, L. M.; GOMES, G.; TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Random Forest algorithm applied to model soil textural classification in a river

basin. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 197, n. 3, p. 330, 2025b. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13786-0>

SHEPHERD, R. M.; OLIVERIO, A. M. Micronutrients modulate the structure and function of soil bacterial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 192, p. 109384, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109384>

SILVA JUNIOR, A. X.; SANTOS, A. P.; SILVA, D. C. C. Aplicações do geoprocessamento na gestão e conservação do solo: análise integrada da granulometria do solo e do fator K em sub-bacias hidrográficas. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 19, n. 3, p. 349–376, 2025. <https://doi.org/10.5216/ag.v19i3.81589>

STOKES, G. G. **On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums**. 1851.

TALLOOR, A. K.; KHAJURIA, V.; PARSAD, G.; BANDRAL, S.; MAHAJAN, S.; SINGH, S.; SHARMA, M.; KOTHYARI, G. C. Geospatial assessment of soil erosion in the Basantar and Devak watersheds of the NW Himalaya: A study utilizing USLE and RUSLE models. **Geosystems and Geoenvironment**, p. 100355, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100355>

TIMILSINA, B.; KHAREL, M.; SHRESTHA, R.; SAQR, A. M.; PANT, R. R. Assessment of soil quality along the elevation gradient of the Seti River watershed in Pokhara Metropolitan City, Nepal. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 197, n. 3, p. 296, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13716-0>

TIMOFEEVA, Y. O.; KARABTISOV, A. A.; BURDUKOVSKII, M. L.; PURTOVA, L. N.; MARTYNYENKO, E. S. Iron-Manganese Nodules in Soils of Natural Landscapes in the South of the Russian Far East. **Eurasian Soil Science**, v. 58, n. 1, p. 13, 2025. <https://doi.org/10.1134/S0032181025010105>

VELEZ, S.; ARIZA-SENTIS, M.; PANIC, M.; IVOSEVIC, B.; STEFANOVIC, D.; KAIVOSOJA, J.; VALENTE, J. Speeding up UAV-based crop variability assessment through a data fusion approach using spatial interpolation for site-specific management. **Smart Agricultural Technology**, v. 8, p. 100488, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100488>

VERA-MALDONADO, P.; AQUEA, F.; REYES-DIAZ, M.; CARCAMO-FINCHEIRA, P.; SOTO-CERDA, B.; NUNES-NESE, A.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. Role of boron and its interaction with other elements in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1332459, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>

XING, Y.; WANG, X.; MUSTAFA, A. Exploring the link between soil health and crop productivity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 289, p. 117703, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117703>

ZEWIDE, I.; SHEREFU, A. Review paper on effect of micronutrients for crop production. **Nutrition and Food Processing**, v. 4, p. 1-8, 2021. <https://doi.org/10.31579/2637-8914/063>