



UNIVERSIDADE DE SÃO CARLOS – UFSCAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE – PPGAA

OBTENÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA FERTILIDADE E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM ÁREAS DE PASTAGEM, INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA E EUCALIPTO

Paulo Daniel Filho

16 de maio de 2025

Araras – SP

UNIVERSIDADE DE SÃO CARLOS – UFSCAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE – PPGAA

OBTENÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA FERTILIDADE E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM ÁREAS DE PASTAGEM, INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA E EUCALIPTO

DISSERTAÇÃO

Paulo Daniel Filho

Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo

Araras - SP, 2025

AGRADECIMENTOS

A secretaria e coordenação do curso por todo apoio e auxílio apresentado, tirando sempre minhas dúvidas prontamente, sempre cordiais e de bom grado, em particular a Profa. Dra. Roberta Cornélio Ferreira Nocelli e a Sirlene Lima.

Aos professores por toda paciência e ensinamentos em todas as matérias, ensinando sempre e dando várias dicas que busquei seguir ao máximo para obter êxito.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo, que me recebeu no meio da trajetória desse projeto, abraçou a ideia e juntos pensamos na melhor estratégia para se seguir. Foi muito importante as colocações dele e tentei me dedicar ao máximo para seguir tudo o que conversávamos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Um agradecimento especial para minha noiva Maísa, que sempre esteve ao meu lado, com muita paciência e me apoiando nos momentos mais difíceis desse projeto.

Agradeço aos meus familiares, por sempre estarem junto comigo, entender e me apoiar nas horas que mais precisei.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram com dúvidas durante todo o percurso. Além dos momentos de lazer para relaxar a cabeça e seguir firme com o projeto.

A empresa Agrorobótica – Fotônica em Certificações Ambientais, na qual eu trabalhava no início desse projeto, e que forneceu os dados para esse projeto, em especial ao CEO Fábio Angelis e a CTO Aínda Magalhães.

A empresa Eixo SP Concessionária de Rodovias S.A., onde trabalho atualmente, por disponibilizar meus horários de serviço para que possa fazer as aulas e finalizar meu mestrado.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	10
2. Objetivos.....	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. Fundamentação Teórica	14
3.1 Introdução à Agricultura de Precisão.....	14
3.2 Tecnologias Utilizadas na Agricultura de Precisão.....	15
3.2.1 Sensoriamento Remoto.....	15
3.3 Sistemas de informação geográfica (SIG) e GPS.....	15
3.4 Geoestatística.....	17
3.5 Agricultura de baixo carbono.....	21
3.5.1 Conservação dos Solos.....	22
3.6 Técnica de Nivelamento de Valores Fuzzy.....	23
3.7 Classificação da Fertilidade do Solo.....	24
4. Material e Métodos.....	25
4.1 Características da área de estudo.....	25
4.1.1 Descrição dos sistemas produtivos avaliados.....	29
4.1.2 Definição dos Pontos Amostrais e Coleta de Solo.....	31
4.2 Preparo de amostra de solo e análise.....	34
4.2.1 Descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados.....	34

4.2.2	Preparação de amostras de solo para análise LIBS.....	35
4.3	Método de referência para o sistema LIBS.....	36
4.4	Variáveis avaliados no presente estudo.....	36
4.5	Mapas de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo.....	37
4.5.1	Aplicação da lógica Fuzzy nos mapas de padrões de variabilidade espacial de fertilidade do solo e estoque de carbono no solo.....	38
4.5.2	Sobreposição dos mapas de Fertilidade do solo.....	38
4.5.3	Criação das zonas de manejo com a reclassificação dos mapas de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo.....	39
4.5.4	Conversão dos Mapas Raster para Vetor (Polígonos).....	39
4.6	Método de Análise dos Mapas de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo.....	40
4.7	Análises.....	40
4.7.1	Correlação de Pearson.....	40
4.7.2	Importância do Uso do Python nas Análises Estatísticas.....	41
5.	Resultados e Discussão.....	41
5.1	Análise das propriedades químicas do solo para diferentes usos e manejos.....	42
5.1.2	Análise do estoque de carbono no solo para diferentes usos e manejos.....	45
5.2	Mapas de padrões de variabilidade espacial de fertilidade do solo e estoque de carbono no solo.....	47
5.2.1	Mapa de Sobreposição da Fertilidade do Solo.....	53
5.2.2	Estoque de Carbono no Solo.....	56
5.2.3	Correlação entre estoque de carbono no solo e fertilidade do solo.....	60

5.3 Relações entre o mapa de fertilidade do solo e o mapa de estoque de carbono no solo.....	62
6. Conclusão.....	64
7. Referências Bibliográficas.....	66
APÊNDICE A.....	81
APÊNDICE B.....	82
APÊNDICE C.....	83
APÊNDICE D.....	84
APÊNDICE E.....	85
APÊNDICE F.....	86
APÊNDICE G.....	87
APÊNDICE H.....	88
APÊNDICE I.....	89
APÊNDICE J.....	90
APÊNDICE K.....	91
APÊNDICE L.....	92
APÊNDICE M.....	93
APÊNDICE N.....	94
APÊNDICE O.....	95
APÊNDICE P.....	96
APÊNDICE Q.....	97
APÊNDICE R.....	98

APÊNDICE S.....	99
APÊNDICE T.....	100

RESUMO

A definição de zonas de manejo é uma estratégia fundamental para aprimorar a eficiência produtiva e ambiental na agricultura. Este estudo teve como objetivo identificar zonas de manejo específicas para fertilidade do solo e estoque de carbono, avaliando quatro diferentes sistemas de uso da terra no Cerrado goiano: pastagem monocultura (P1), pastagem policultiva (P2), integração pecuária-floresta (IPF) e silvicultura com eucalipto (EM). Foram coletadas 996 amostras de solo, sendo 830 destinadas à análise de carbono e 166 à fertilidade. Os dados foram processados via interpolação geoestatística (krigagem ordinária), utilizando o modelo esférico, e padronizados por lógica fuzzy para geração dos mapas temáticos. Os resultados revelaram que o IPF apresentou o maior valor médio de CTC ($3,28 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e de saturação por bases (38,58%), enquanto a silvicultura apresentou o menor V% (25,81%). Para o fósforo, a silvicultura também destacou-se com a maior média ($6,83 \text{ mg dm}^{-3}$), e a pastagem monocultura apresentou os menores valores em diversos atributos. Observou-se correlação significativa entre fertilidade do solo e estoque de carbono, com destaque para as áreas mais férteis apresentando maiores teores de C. A metodologia adotada demonstrou eficácia na definição de zonas de manejo diferenciadas, promovendo um uso mais racional dos recursos e contribuindo para práticas agrícolas sustentáveis e adaptadas às condições edafoclimáticas locais.

Palavras-chave: Geoprocessamento; agricultura de precisão; sustentabilidade agrícola; modelagem computacional; variabilidade espacial.

ABSTRACT

The definition of management zones is a key strategy to enhance both productive and environmental efficiency in agriculture. This study aimed to identify specific management zones based on soil fertility and carbon stock, evaluating four different land-use systems in the Brazilian Cerrado: monoculture pasture (P1), diversified pasture (P2), livestock-forestry integration (IPF), and eucalyptus monoculture (EM). A total of 996 soil samples were collected, with 830 analyzed for carbon and 166 for fertility. Data processing involved ordinary kriging interpolation using the spherical model and fuzzy logic standardization to generate thematic maps. The results showed that IPF had the highest average values of cation exchange capacity (CTC, 3.28 cmolc dm⁻³) and base saturation (V%, 38.58%), while the eucalyptus system recorded the lowest V% (25.81%). Phosphorus levels were highest in the silviculture system (6.83 mg dm⁻³), whereas the monoculture pasture presented the lowest values for several attributes. A significant correlation between soil fertility and carbon stock was observed, with more fertile areas tending to show higher carbon levels. The adopted methodology proved effective for delineating differentiated management zones, promoting more rational resource use and contributing to sustainable agricultural practices suited to local edaphoclimatic conditions.

Keywords: Geoprocessing, precision agriculture, agricultural sustainability, computational modeling, spatial variability.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, proveniente das alterações significativas nos padrões climáticos causadas principalmente por atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas intensivas. Essas ações aumentam as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, intensificando o efeito estufa natural e resultando no aquecimento global. Segundo o Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2023), a temperatura média global já aumentou 1,1 °C acima dos níveis pré-industriais, colocando em risco ecossistemas, biodiversidade e a qualidade de vida humana.

Esse aumento tem provocado o derretimento acelerado de geleiras, elevação do nível do mar e uma maior frequência de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e tempestades intensas (IPCC, 2023). Esses fenômenos impactam diretamente na segurança alimentar, na saúde pública e na economia global, exacerbando desigualdades sociais, especialmente em comunidades vulneráveis. O relatório enfatiza a urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aquecimento global a 1,5 °C, prevenindo consequências mais severas para os sistemas naturais e humanos. A adoção de energias renováveis, práticas agrícolas sustentáveis e a restauração de ecossistemas são medidas prioritárias para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover um futuro mais sustentável (IPCC, 2023).

Diante das mudanças climáticas, a agricultura convencional, com práticas intensivas de uso do solo, desmatamento e aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas, contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Por outro lado, a agricultura sustentável, com práticas como o manejo integrado do solo, a rotação de culturas, a adoção de sistemas agroflorestais e a recuperação de terras degradadas, apresenta soluções que alinham a produção de alimentos à mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Nesse contexto, a definição de zonas de manejo configura-se como uma estratégia eficaz para otimizar o uso dos recursos naturais, promovendo uma produção agrícola mais eficiente e sustentável. Ao considerar as variações espaciais do solo, como a fertilidade e a capacidade produtiva, essa abordagem possibilita a aplicação localizada de insumos, o que reduz desperdícios, minimiza os impactos ambientais e aumenta tanto a produtividade quanto a

rentabilidade. Além disso, estudos recentes indicam que a adoção dessas zonas contribui diretamente para a conservação dos solos e para a redução dos impactos negativos da atividade agrícola (SOUZA et al., 2021).

Práticas agrícolas regenerativas que promovem o sequestro de carbono no solo têm o potencial de remover grandes quantidades de carbono da atmosfera, enquanto melhoram a fertilidade do solo e aumentam a resiliência das culturas a eventos climáticos extremos. Essas práticas, combinadas com políticas de incentivo à conservação de ecossistemas naturais em paisagens agrícolas, não apenas reduzem as emissões, mas também garantem a segurança alimentar em um contexto de clima em transformação (IPCC, 2023).

A agricultura de precisão tem se destacado globalmente pelos resultados positivos, principalmente quanto à implementação de práticas sustentáveis, obtidos com a aplicação de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto, GPS e sistemas de informação geográfica (SIG), oferecendo potencial para revolucionar a gestão agrícola (CHERUBIN et al., 2022). No Brasil, apesar dos avanços já alcançados, ainda persistem desafios significativos, como a falta de infraestrutura adequada e o acesso limitado a essas tecnologias em regiões rurais, o que dificulta sua ampla adoção e limita os benefícios potenciais que poderiam ser obtidos (BEM, 2024).

A agricultura tradicional enfrenta diversos desafios, entre eles a degradação do solo, que compromete a produtividade e a saúde dos ecossistemas agrícolas, e a necessidade urgente de implementar práticas mais sustentáveis. Esses problemas são agravados pela utilização intensiva e inadequada dos recursos naturais, levando à exaustão do solo e à emissão de gases de efeito estufa. Diante disso, a adoção de abordagens inovadoras, como a agricultura de precisão, surge como uma solução promissora para mitigar esses impactos, otimizando o uso de recursos e promovendo uma gestão agrícola mais sustentável e eficiente (BEM, 2024).

A implementação de práticas mais precisas, baseadas em dados e tecnologia, não apenas aumenta a eficiência produtiva, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental. Assim, considerar a adoção dessas inovações torna-se essencial ao discutir os modelos agrícolas do futuro capazes de enfrentar os desafios impostos pelo crescimento populacional global e pela demanda por alimentos (BRITO, 2023).

O uso das geotecnologias no mapeamento e análise da gestão de diferentes culturas

agrícolas, possibilita avaliar estudos de caso com economia de tempo e a análise de uma grande área de interesse de forma multitemporal, bem como relacionar os resultados com a ocorrência de processos de produção agrícola (PIRES et al., 2017). Portanto, a partir dos dados obtidos nessas análises, é viável estabelecer as quantidades apropriadas de corretivo agrícola e fertilizante para assegurar um rendimento mais elevado e rentável para o seu cultivo, sendo fundamental coletar as amostras de maneira correta, para alcançar resultados mais satisfatórios, com a análise dos dados (MONTANARI et al., 2012).

No sistema convencional de agricultura, as variações nas características do solo e da vegetação ao longo da área cultivada, como fertilidade, umidade, compactação, disponibilidade de nutrientes, textura, pH e presença de pragas e doenças, são frequentemente ignoradas nas decisões de manejo. Isso resulta em práticas inadequadas, levando à aplicação excessiva ou insuficiente de insumos, o que pode gerar desperdício financeiro, uso ineficiente dos recursos e impacto ambiental negativo (BERNARDI et al., 2014). A agricultura de precisão, por outro lado, busca tratar cada parcela da área de forma individualizada, considerando essas variações para otimizar a aplicação de insumos e melhorar a eficiência produtiva (MOLIN, 2014).

Este estudo investiga o uso de tecnologias para obtenção de zonas de manejo específico na agricultura, auxiliando na sustentabilidade, por meio da delimitação de áreas específicas para manejo diferenciado do solo e uso eficiente de insumos. O objetivo é identificar zonas de manejo com variação espacial nos estoques de carbono no solo e fertilidade do solo em diferentes sistemas produtivos, como pastagens, integração pecuária-floresta e monocultura de eucalipto (AGUIAR et al., 2020; BASSO; ANTLE, 2020).

A utilização de satélites, drones e geotecnologias avançadas no monitoramento agrícola possibilita a obtenção de zonas de manejo de forma precisa e dinâmica, trazendo benefícios como a redução de custos, aumento da produtividade, otimização do uso de insumos e mitigação dos impactos ambientais. Essas tecnologias permitem a coleta de dados em tempo real, identificação precoce de problemas nas plantações e melhor planejamento agrícola, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável (CUNHA; MONTEIRO, 2021; SOUZA et al., 2022).

Além disso, este projeto busca contribuir para o avanço tecnológico e acadêmico na agronomia, ao integrar conhecimentos de áreas multidisciplinares, como meio ambiente, eletrônica, software e engenharia de comunicações. O uso dessas tecnologias possibilita que os

agricultores tomem decisões mais assertivas, otimizando a produção, aumentando a rentabilidade e fortalecendo o setor agrícola. Já em nível global, a disseminação dessas práticas pode impulsionar a inovação nos meios de produção, tornando a agricultura mais eficiente e ambientalmente responsável (BASSO; ANTLE, 2020).

Para análise e definição das zonas de manejo, este estudo emprega a lógica fuzzy, uma metodologia eficaz para interpretar e classificar os atributos físico-químicos do solo. Essa técnica representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais, pois permite uma abordagem mais flexível e adaptativa na tomada de decisões agrícolas, promovendo a transição para um modelo de produção mais sustentável e tecnologicamente avançado (ZIMBACK, 2001; SANTOS; CAMARGO, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

- Determinar zonas de manejo para a fertilidade do solo e zonas de manejo para os estoques de carbono no solo, para quatro áreas de manejo diferentes, no estado de Goiás, Brasil. 1) Pastagem monocultura (P1), 2) Pastagem policultiva (P2), 3) Integração Pecuária-Floresta (IPF) e 4) Eucalipto Monocultura – Silvicultura (EM).

2.2. Objetivos Específicos:

- Avaliar as propriedades físicas e químicas do solo em quatro diferentes usos do solo (Pastagem monocultura - P1, Pastagem policultiva - P2, Integração Pecuária Floresta – IPF e Eucalipto Monocultura – Silvicultura – EM);
- Verificar a relação entre fertilidade do solo e estoque de carbono no solo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Introdução à Agricultura de Precisão

O setor do agronegócio passa por constantes mudanças para aumentar sua produtividade e competitividade, bem como para atender às necessidades de consumidores cada vez mais exigentes. O resultado é o estímulo à inovação que sustenta a velocidade dessas mudanças (ZAMBON et al., 2019). A agricultura de precisão envolve um conjunto de ferramentas e tecnologias que permitem aos profissionais rurais gerenciarem o uso de insumos em suas lavouras de maneira específica e mais racional, visando otimizar a produção, aumentar o retorno financeiro e reduzir o impacto ambiental. Esse modelo enfrenta grandes desafios, pois os conhecimentos e tecnologias utilizados anteriormente não consideravam as variabilidades espaciais das propriedades físicas e químicas dos solos, agora identificadas nos fatores de produção.

A agricultura de precisão não se resume apenas ao uso de máquinas modernas e tecnologias sofisticadas; ela se constitui em um sistema de práticas destinado a aprimorar a gestão dos fatores de produção em ambientes agrícolas diversos. Ao implementar práticas de manejo que considerem a variabilidade das condições edafoclimáticas em uma área agrícola, é possível permitir que as culturas expressem seu potencial genético de forma mais ampla, abrangendo toda a área de cultivo e não apenas as zonas com condições mais favoráveis. As ferramentas oferecidas pela agricultura de precisão são projetadas para atender às demandas e situações específicas dos agricultores, podendo ser utilizadas de forma combinada ou individualmente. As perspectivas da agricultura de precisão são otimistas em relação aos resultados, uma vez que a compreensão e o mapeamento dos fatores que influenciam a variabilidade das áreas agrícolas estão em constante evolução (MONTEIRO; INAMASU, 2016).

Além de proporcionar benefícios importantes para a gestão eficiente dos recursos agrícolas, a agricultura de precisão também pode vir a desempenhar um papel fundamental para maximizar a produtividade das culturas (JANSEN; VELLEMA, 2014). Os autores seguem dizendo que, os chamados mercados globais estimulam o setor a buscar novas tecnologias para serem incluídas na produção e no comércio e, assim, reduzir os custos incorridos nesse setor.

3.2 Tecnologias Utilizadas na Agricultura de Precisão

3.2.1 Sensoriamento Remoto

Segundo Paranhos Filho et al. (2016), o sensoriamento remoto é a obtenção de dados ou informações de um objeto que está distante do sensor de amostragem. Essas imagens e dados são obtidas por meio de captação do registro de energia refletida pela superfície do objeto. Com as imagens obtidas com o conjunto de sensores embarcados em um satélite ou VANT (veículo aéreo não tripulado), podemos obter os dados e estudar as interações que ocorrem na superfície da Terra.

Segundo Novo (2010), a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações podemos estudar fenômenos da superfície do planeta. De acordo com Tostô et al. (2014) seriam considerados sensores remotos os sensores que operam com energia acústica (sonares, sismógrafos, sismômetros etc.), com energia gravitacional (gravímetros) e com energia eletromagnética (radiômetros). Porém, o uso do termo ficou restrito aos equipamentos que operam apenas pela detecção da energia eletromagnética ou radiação eletromagnética.

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias de Sensoriamento Remoto permitiu a ampliação das suas aplicações e a melhoria da precisão dos dados coletados. Além dos sensores que operam com radiação eletromagnética, destacam-se o uso do LiDAR (Light Detection and Ranging), que possibilita a obtenção de modelos digitais de elevação com alta resolução, e o radar de abertura sintética (SAR), que permite a aquisição de dados mesmo em condições de nuvens ou baixa iluminação (NASA, 2022). Outra inovação relevante é o sensoriamento hiperespectral, que captura informações detalhadas sobre a composição química dos solos e da vegetação, tornando-se uma ferramenta essencial para a agricultura de precisão e o monitoramento ambiental (JENSEN, 2016). Essas novas abordagens expandem significativamente as possibilidades de análise, permitindo um diagnóstico mais preciso das condições ambientais e aprimorando a gestão do uso da terra.

3.3 Sistemas de informação geográfica (SIG) e GPS

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) consiste em uma combinação de softwares e hardwares que permite a produção, armazenamento, processamento, análise e representação de uma vasta quantidade de informações sobre o espaço geográfico. O resultado desse trabalho inclui mapas temáticos, imagens de satélite, cartas topográficas, gráficos e tabelas. Esses produtos são fundamentais para a análise das evoluções espaciais e temporais de fenômenos geográficos, bem como para entender as inter-relações entre diferentes fenômenos espaciais (ESRI, 2008; BURROUGH; McDONNELL, 1998).

Uma das principais utilizações do Sistema de Informações Geográficas (SIG) é no planejamento e ordenamento territorial, abrangendo áreas como o planejamento urbano e ambiental. Exemplos de ferramentas associadas ao SIG incluem Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e GPS, cada uma com sua função específica. O Sensoriamento Remoto, por exemplo, envolve técnicas para captar imagens por meio de sensores em satélites equipados com dispositivos fotográficos e scanners. Esta técnica permite a obtenção de informações sobre um objeto sem a necessidade de contato físico direto (SUN; XIONG, 2023).

O GPS, sigla para Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*), é uma ferramenta que possibilita determinar a localização de uma pessoa ou objeto no espaço por meio de suas coordenadas geográficas, latitude e longitude. Atualmente, o GPS é amplamente utilizado em vários setores econômicos, como na agricultura e no rastreamento de veículos de carga. Devido aos problemas de trânsito nas grandes cidades, o GPS tem se tornado um item essencial para a navegação e orientação dos motoristas (OPPONG et al., 2023).

As técnicas geoespaciais são amplamente reconhecidas como componentes essenciais do processamento geográfico, compreendendo um conjunto de métodos nos quais são adquiridos, processados, interpretados e disponibilizados dados relacionados ao espaço. Esse campo, derivado da tecnologia da informação, é empregado em disciplinas como geografia, cartografia, topografia e outras áreas voltadas ao estudo do espaço geográfico. Dessa maneira, a análise geoespacial consiste na identificação de elementos que serão integrados ao processamento ou à análise, caracterizados como informação georreferenciada, com acesso a dados e imagens em tempo real, garantindo maior precisão (GHOSH; KUMPATLA, 2022).

O uso das geotecnologias pode ser entendido como uma nova tecnologia ligada às geociências que traz grande avanço no desenvolvimento da pesquisa, nas práticas de planejamento, nos processos administrativos e gerenciais, e em muitos outros aspectos

relacionados à estrutura da área. Essa consideração torna-se importante, pois especialistas de áreas muito diferentes trabalham diretamente com questões locais (FAVRIN, 2009). No entanto, a interação necessária para trabalhar com o ambiente como um todo, de diversas formas, torna necessária a busca de ferramentas e técnicas adequadas para alcançá-lo. A inclusão de especialistas de diferentes áreas do conhecimento torna-se essencial para um resultado positivo do trabalho aprimorado (FAVRIN, 2009).

O geoprocessamento é uma técnica essencial utilizada para a coleta e o processamento de dados espaciais, integrando informações provenientes do sensoriamento remoto e de sistemas de posicionamento global (GPS), o que possibilita uma análise mais precisa e detalhada das características do espaço geográfico (LI et al., 2015).

3.4 Geoestatística

A Agricultura de Precisão se baseia na aplicação de tecnologias de modo localizado, de acordo com a variabilidade espacial das características de interesse em uma determinada área (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014), visando desse modo reduzir os impactos ambientais das práticas agrícolas, bem como aumentar a lucratividade das lavouras. Aliado a este contexto, a maneira mais correta que se tem conhecimento para analisar a variabilidade espacial de determinadas variáveis é por meio da análise geoestatística (VIEIRA, 2000).

Segundo Oliveira e Grego (2015), a geoestatística refere-se ao estudo de um fenômeno natural que pode ser caracterizado pela distribuição no espaço/tempo de uma ou mais variáveis, chamadas de “variáveis regionalizadas”. A geoestatística não se limita apenas a obter um modelo de dependência espacial das variáveis de interesse, mas tem também a intenção de estimar valores das variáveis em locais não amostrados, tendo por base, para isso, dados dos vizinhos mais próximos do local a ser estimado (GOOVAERTS, 1997).

A geoestatística surgiu na África do Sul, quando o Engenheiro de Minas Krige, em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro, percebeu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias se não levasse em consideração a distância entre as amostras. Mais tarde, Matheron (1963), colocando essa ideia em termos matemáticos, desenvolveu uma teoria, denominada de Teoria das Variáveis Regionalizadas, que contém os fundamentos da Geoestatística (FARIAS et al., 2003).

Embora tenha surgido nos anos 50, a análise espacial de dados, utilizando a Geoestatística, ganhou impulso em diversas áreas a partir dos anos 80, o que pode ter sido motivado pela facilidade computacional que viabilizou alguns cálculos relativamente trabalhosos nessa metodologia (GUIMARÃES, 2001). A Geoestatística teve as suas primeiras aplicações em mineração, hidrologia, estudos em ciência do solo e estudos de sensoriamento remoto (SILVA, 2011).

Um fator importante para a aplicação da Geoestatística é a obtenção de dados com as devidas coordenadas geográficas. Os dados georreferenciados podem ser obtidos por meio de coleta *in loco*, mapas temáticos, imagens de satélite ou fotografias aéreas, por exemplo. É fundamental analisar e planejar o número de coletas de dados, levando em consideração, para isso, o seu custo/benefício. Além disso, se a área em análise já possuir imagens aéreas, por exemplo, a depender da variável a ser analisada, isso pode ajudar a identificar as áreas onde a variabilidade é maior e, assim, é possível direcionar as coletas de dados, concentrando-se nas regiões onde a variabilidade é maior e diminuindo-se a densidade nos lugares mais uniformes (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

O semivariograma é o gráfico das semivariâncias em função da distância a um determinado ponto. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semivariâncias menores para distâncias menores e semivariâncias maiores para distâncias maiores. Para que a variável avaliada tenha dependência espacial é necessário que o semivariograma seja crescente com a distância. Além disso, é exigido que a hipótese intrínseca seja válida ou seja, que o semivariograma, após ter um aumento com a distância, se estabilize no valor da variância dos dados, dando a esta região o nome de silo ou patamar ($C=C_0+C_1$).

Ao extrapolarmos a curva do semivariograma para a distância zero, podemos chegar a um valor não nulo de semivariância. Este valor recebe o nome de efeito pepita ou nugget effect (C_0). Para a distância igual a zero ($h = 0$), é comum imaginarmos que o semivariograma deveria apresentar variabilidade nula, porém, vários fatores tais como erros de amostragens, erros de medidas ou, ainda, microregionalizações da variável em estudo, causam uma descontinuidade na origem do semivariograma, denominado de efeito pepita.

Ainda, a diferença entre o patamar e o efeito pepita fornece o valor da variância estrutural (C_1), a qual representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada

em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores. Além disso, a projeção do ponto onde a semivariância se estabiliza ao eixo das abcissas nos dá o valor do alcance da dependência espacial (a), a partir da qual as amostras são independentes.

McBratney e Webster (1986) indicam que os modelos mais adequados para os mais variados tipos de situações, na maior parte dos casos, são o modelo esférico, o modelo exponencial ou o modelo gaussiano. O modelo teórico deve representar bem o comportamento do semivariograma empírico e, na tentativa de se escolher o melhor modelo, os valores do Critério de Informação de Akaike (AIC) e do Critério de Informação Bayesiano (BIC) para cada modelo espacial teórico podem ser utilizados, por exemplo. Além disso, o cálculo da raiz quadrada do erro médio também pode ser empregado como critério. A decisão da escolha do melhor modelo é realizada avaliando qual apresentou menor valor para o critério escolhido.

Sendo mais frequentemente utilizado, o esférico é o modelo formado entre o gaussiano e o exponencial, tendo duas estruturas. A primeira estrutura, que varia entre zero e o alcance, e a segunda, sendo maior que o alcance, chegando ao patamar. Aproximadamente até um terço do seu alcance, o modelo esférico é linear.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

$$0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \tag{1}$$

A partir do conhecimento da dependência espacial, caso esta venha a ser aceita, pode-se estimar pontos desconhecidos dentro da área em estudo, pois estes serão muito semelhantes a seus vizinhos, utilizando para isso a técnica geoestatística da krigagem. Segundo Burgess e Webster (1980), a krigagem estima valores sem tendência e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima, o que proporciona uma estimativa mais precisa do atributo de interesse.

De acordo com Soares (2006), o algoritmo mais usual de estimativa em locais não amostrados é a krigagem ordinária. Nesta metodologia, descrita por Trangmar, Yost e Uehara (1985). O valor estimado de uma variável regionalizada $Z^{(x_0)}$, em um ponto não amostrado x_0 , pode ser calculado por meio de uma combinação linear dos valores amostrados em pontos vizinhos. Essa estimativa é obtida por meio da seguinte expressão:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i \times Z(x_i)], \quad (2)$$

onde:

- $Z(x_0)$ é o valor interpolado da variável no ponto x_0 ;
- $Z(x_i)$ representa o valor observado da variável no ponto amostrado x_i ;
- λ_i é o peso atribuído ao ponto x_i , determinado com base na distância entre os pontos e na estrutura espacial da variabilidade da variável (definida pelo modelo de variograma);
- n é o número total de pontos amostrados utilizados na interpolação.

A soma dos pesos λ_i é usualmente igual a 1, garantindo que a interpolação seja uma estimativa não tendenciosa. Esse método é amplamente utilizado na geoestatística e é a base da técnica de Krigagem, por exemplo, que busca fornecer a melhor estimativa linear não tendenciosa para valores em locais não amostrados, considerando a autocorrelação espacial dos dados.

Os pesos utilizados na krigagem são calculados pela equação: $\lambda = A^{(-1)} \times b$, sendo $A^{(-1)}$ a inversa da matriz de variâncias entre as localidades da vizinhança de um ponto, determinada pelo modelo de semivariograma com base nas distâncias euclidianas entre os locais, b é a matriz de variâncias entre as localidades vizinhas (com a variável estimada) e o ponto para o qual a variável será interpolada, também determinado pelo modelo de semivariograma, com base nas distâncias entre as localidades vizinhas e o ponto a ser interpolado, e λ é a matriz de pesos da krigagem. É indicado que se adote como vizinhança de krigagem distâncias menores ou iguais ao alcance obtido por meio do semivariograma (ANDRIOTTI, 2005).

Os mapas construídos com os valores obtidos por meio da krigagem são importantes para a verificação e interpretação da variabilidade espacial das variáveis em estudo. A análise geoestatística dos dados, então, é completada com as informações mostradas nos mapas, que são visualmente comparadas para o entendimento da variabilidade das variáveis estudadas.

A interpretação dos mapas derivados da interpolação de dados por krigagem possibilita ao pesquisador identificar as regiões no campo onde o fenômeno estudado é mais uniforme do que em outras. Assim, é possível concluir que a utilização de tecnologias como a Geoestatística

permite amparar tecnicamente decisões estratégicas e complexas em relação ao sistema de manejo adotado, seus possíveis efeitos ambientais e na produtividade de diferentes culturas, e essa é a contribuição da Geoestatística para o desenvolvimento de uma produção agrícola sustentável em Agricultura de Precisão (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

3.5 Agricultura de baixo carbono

No Brasil, a adoção da agricultura de baixa emissão de carbono pode ser fundamentada por duas razões principais. Primeiramente, há a necessidade de reduzir a contribuição do setor agrícola nas emissões totais de gases de efeito estufa do país, alinhando-se aos compromissos internacionais de redução de emissões. Além disso, existe a percepção de que as mudanças climáticas podem provocar impactos significativos no setor agrícola, apresentando desafios ao seu crescimento e à segurança alimentar. Portanto, investir em práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias de baixa emissão de carbono é essencial para enfrentar esses desafios e garantir a resiliência do setor agrícola diante das mudanças climáticas (CHERUBIN et al., 2022). O uso de tecnologias de agricultura de precisão podem contribuir para identificar mecanismos de manejo específico do solo com menores emissões de GEE.

O Plano ABC+ (2020-2030) é uma iniciativa do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) que busca consolidar a agropecuária brasileira como um setor de baixa emissão de carbono, promovendo práticas sustentáveis e incentivando a mitigação dos impactos ambientais. Além de dar continuidade ao Plano ABC (2010-2020), essa nova fase expande as metas e aprimora as estratégias para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor agropecuário. Entre as principais ações do Plano ABC+ estão a recuperação de pastagens degradadas, o fortalecimento dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), o aumento da adoção do plantio direto e da fixação biológica de nitrogênio, além da expansão do uso de florestas plantadas e do manejo adequado de dejetos animais, práticas que contribuem diretamente para a captura e redução de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O (MAPA, 2021).

As metas do Plano ABC+ incluem a recuperação de 30 milhões de hectares de pastagens degradadas e a ampliação de 10 milhões de hectares sob sistemas ILPF até 2030, iniciativas que podem evitar a liberação de grandes quantidades de CO₂ na atmosfera. Segundo estimativas do próprio MAPA, a implementação dessas práticas sustentáveis poderá resultar na mitigação

de até 1,1 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente ao longo da década. Além disso, o Plano incentiva o manejo adequado do solo e da matéria orgânica, reduzindo as emissões de metano (CH₄) provenientes da pecuária e promovendo técnicas de manejo de fertilizantes que diminuem as emissões de óxido nitroso (N₂O), um dos GEE mais potentes em termos de impacto no aquecimento global (MAPA, 2022).

Além da mitigação, o Plano ABC+ também foca na adaptação da agropecuária às mudanças climáticas, garantindo maior resiliência dos sistemas produtivos frente a eventos climáticos extremos. O programa prevê incentivos financeiros e linhas de crédito especiais para produtores que adotam práticas sustentáveis, além de investimentos em pesquisa e capacitação técnica para ampliar a adoção das tecnologias de baixa emissão de carbono. Essas medidas não só reforçam o compromisso do Brasil com as metas do Acordo de Paris, como também posicionam o país como referência global em produção agropecuária sustentável, equilibrando crescimento econômico e conservação ambiental (MAPA, 2023).

3.5.1 Conservação dos Solos

O solo desempenha um papel essencial na regulação do ciclo do carbono e, conseqüentemente, no equilíbrio climático global. Ele é o maior reservatório terrestre de carbono, armazenando aproximadamente 4,5 vezes mais carbono do que a biota e 3,3 vezes mais do que a atmosfera (SANTOS; CAMARGO, 2019). Esse estoque de carbono do solo é um componente fundamental das funções ecossistêmicas, pois influencia diretamente a fertilidade do solo, a disponibilidade de nutrientes e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (LAL, 2004).

A conservação do estoque de carbono no solo é crucial para manter a estabilidade da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. O manejo sustentável do solo pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Práticas como a rotação de culturas, o plantio direto e o uso de compostos orgânicos favorecem o sequestro de carbono e aumentam a resiliência dos solos agrícolas (RAIJ et al., 1997; LAL, 2018). Além disso, a adoção de sistemas agroflorestais e a preservação da matéria orgânica do solo são estratégias eficazes para prolongar o armazenamento do carbono e melhorar a qualidade do solo (FAO, 2021).

Diante da importância do solo como reservatório de carbono, diversas iniciativas globais vêm sendo implementadas para promover práticas agrícolas sustentáveis e melhorar a saúde dos solos. A FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) desenvolveu a iniciativa Recarbonização dos Solos (RECSOIL), que busca restaurar os níveis de carbono orgânico por meio do manejo sustentável dos solos. Essa iniciativa já conta com projetos-piloto no México, aplicados a cultivos de milho, limão e agave, além da Costa Rica, onde agricultores recebem incentivos financeiros para implementar práticas agrícolas regenerativas (FAO, 2023).

Outra iniciativa de grande relevância é o SOILFER, que visa mapear os solos da América Central para promover sistemas agroalimentares resilientes. Diante da crise de fertilizantes e dos impactos das mudanças climáticas, o projeto busca recuperar a fertilidade do solo, otimizando a produtividade agrícola de maneira sustentável (FAO, 2022). Já no Caribe, o programa SOILCARE trabalha na recuperação de terras degradadas e no incentivo à gestão sustentável do solo, promovendo a segurança alimentar e contribuindo para a adaptação dos sistemas agrícolas às novas condições climáticas (FAO, 2023).

A manutenção da fertilidade e do estoque de carbono do solo deve ser incorporada às práticas de manejo agrícola, garantindo a sustentabilidade da produção e a mitigação dos impactos ambientais. O uso de tecnologias avançadas, como sensores remotos, modelagem geoestatística e inteligência artificial, pode auxiliar na identificação de áreas críticas para a fertilidade do solo e conservação do carbono no solo e na adoção de estratégias personalizadas para diferentes sistemas produtivos (BASSO; ANTLE, 2020). Dessa forma, a combinação de iniciativas globais e inovações tecnológicas pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e a segurança alimentar mundial.

3.6 Técnica de Nivelamento de Valores Fuzzy

Diante dos desafios enfrentados atualmente pela sociedade em setores como agricultura, indústria, comércio e vida cotidiana, torna-se evidente a presença de incertezas que dificultam a obtenção de respostas exatas e imediatas. A lógica fuzzy surge como uma ferramenta eficaz para lidar com esse tipo de problema, por permitir a modelagem de informações imprecisas, subjetivas ou incertas, de forma mais próxima ao raciocínio humano. Ao contrário da lógica

clássica binária — que admite apenas verdadeiro ou falso —, a lógica fuzzy introduz o conceito de grau de pertencimento, possibilitando a representação de valores intermediários entre 0 e 1, conforme proposto por Zadeh (1965) em seu trabalho pioneiro sobre conjuntos fuzzy.

Essa abordagem permite que variáveis linguísticas sejam tratadas de maneira contínua, proporcionando análises mais flexíveis e contextualizadas em cenários complexos, como os encontrados em sistemas ambientais e agrícolas (MCBRATNEY; DEGRUIJTER, 1992). Em aplicações de solo, por exemplo, ela tem sido utilizada para classificar propriedades físicas e químicas sem o uso de limites rígidos, permitindo a identificação de zonas de transição e a representação gradual da variabilidade (HANESCH; SCHOLGER; DEKKERS, 2001).

Neste trabalho, a lógica fuzzy foi aplicada para normalizar os valores de todos os mapas interpolados — pH do solo, fósforo (P), saturação por bases (V%), capacidade de troca catiônica (CTC) e estoque de carbono no solo — convertendo os dados para uma escala comum de 0 a 1. Esse procedimento foi fundamental para integrar as variáveis sem viés, evitando distorções oriundas de escalas distintas. A normalização fuzzy contribuiu para garantir uma avaliação qualitativa e mais precisa da variabilidade espacial dos atributos edáficos, conforme demonstrado por Filipini et al. (2014) e validado por metodologias amplamente consolidadas na literatura científica.

3.7 Classificação da Fertilidade do Solo

De acordo com Rajj et al. (1997), a análise da fertilidade do solo é amplamente reconhecida como uma abordagem sistemática essencial para a interpretação de variáveis que influenciam diretamente a qualidade e a produtividade agrícola. Essa metodologia considera fatores fundamentais, como o pH, a matéria orgânica, os níveis de fósforo e potássio, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases. Cada uma dessas variáveis desempenha um papel crucial na definição das condições do solo e na necessidade de correções para garantir um ambiente propício ao desenvolvimento das plantas.

Os critérios estabelecidos por Rajj et al. (1997) organizam a fertilidade do solo em faixas classificatórias que variam de "muito baixo" a "muito alto" para cada variável do solo analisada, proporcionando uma avaliação objetiva da disponibilidade de nutrientes e facilitando a tomada

de decisões para o manejo adequado. Esse sistema de classificação tem sido amplamente utilizado na agronomia para orientar estratégias de fertilização e correção do solo.

Neste estudo, a metodologia de Raij et al. (1997) foi utilizada como referência para a classificação da fertilidade do solo. No entanto, a categorização proposta aqui será adaptada para melhor atender às especificidades da área de estudo e dos objetivos da pesquisa. As adaptações foram realizadas com o objetivo de simplificar o método de análise, adotando divisões em classes iguais, o que facilita a interpretação dos resultados e a aplicação prática dos dados. Essa abordagem permite uma organização mais uniforme dos valores analisados, tornando o processo de classificação mais acessível e aplicável ao manejo agrícola.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Características da área de estudo

Os sítios experimentais estão localizados no município de Serranópolis, no estado de Goiás (Figura 1). As coordenadas geográficas do local são Latitude $-18^{\circ}09'10,14''$ e Longitude $-52^{\circ}09'03,96''$. A área dos sítios experimentais abrange 2.972,42 ha, oferecendo um espaço considerável para a realização das pesquisas e experimentações planejadas. Este local foi escolhido devido às suas características diferenciadas de manejo da produção agropecuária e condições ambientais, que permitem a análise de diferentes fatores relacionados ao solo, à fertilidade e ao manejo agrícola.

A área de estudo está inserida no bioma Cerrado, que ocupa aproximadamente 22% do território brasileiro e é reconhecido como a segunda maior formação vegetal do país (SANO et al., 2008). O Cerrado é caracterizado por uma grande diversidade de formações vegetacionais, que variam desde campos limpos até matas de galeria, e apresenta um regime climático tropical sazonal, com períodos bem definidos de seca e chuva (RATTER et al., 2003). Os solos do Cerrado, em sua maioria, são ácidos e de baixa fertilidade natural, exigindo a adoção de práticas como a calagem e a adubação corretiva para viabilizar sistemas agrícolas produtivos (HARIDASAN, 2000).

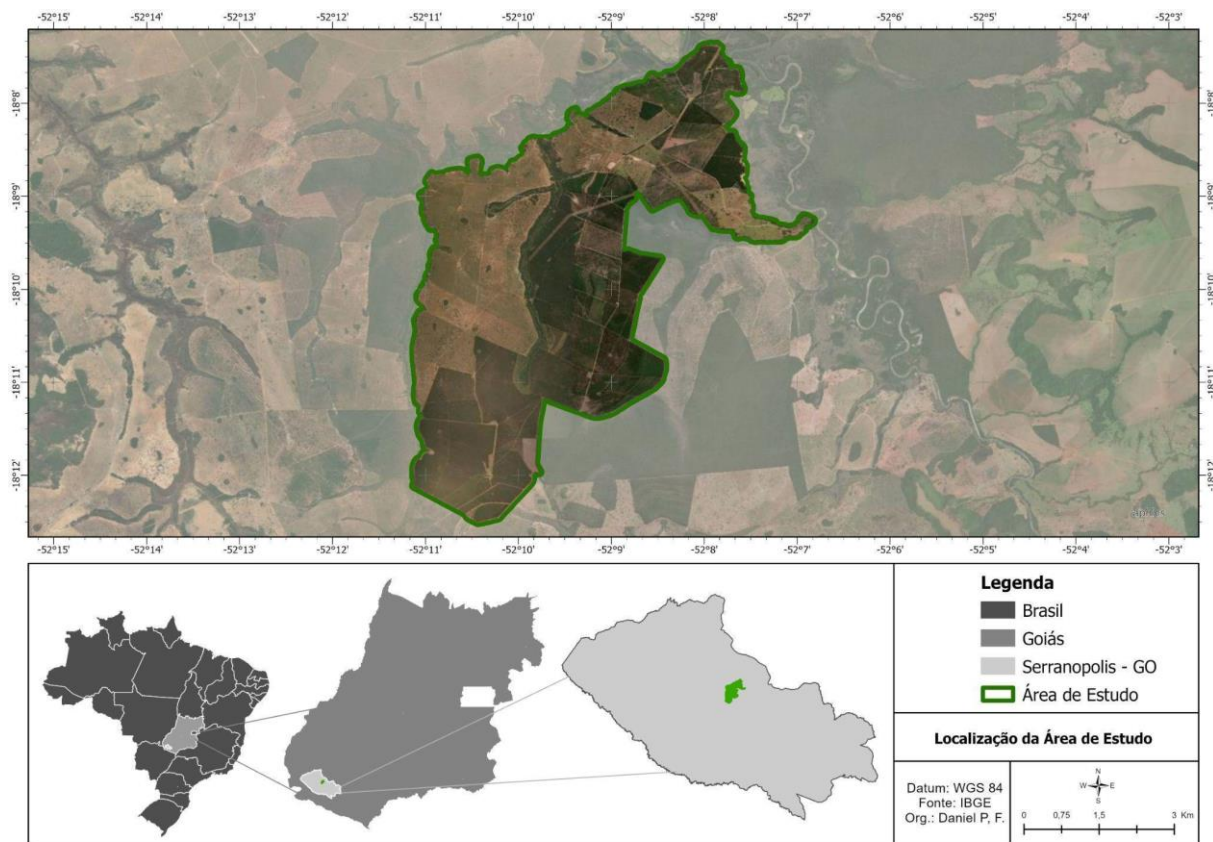


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Serranópolis, estado de Goiás.

Na área de estudo, os solos predominantes são classificados como Argissolo Vermelho Eutrófico e Argissolo Vermelho Distrófico (Figura 2), formações típicas de regiões tropicais e subtropicais. O Argissolo Vermelho Eutrófico se destaca por apresentar maior fertilidade natural, devido à presença de bases trocáveis em níveis adequados, favorecendo a disponibilidade de nutrientes essenciais para as culturas. Além disso, sua estrutura bem desenvolvida e capacidade moderada de retenção de água permitem um melhor aproveitamento dos insumos aplicados, reduzindo a necessidade de intervenções frequentes no solo (EMBRAPA, 2018).

Por outro lado, o Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico possui baixa fertilidade natural, com reduzido teor de bases trocáveis e maior acidez. Esse tipo de solo requer um manejo mais criterioso, incluindo práticas como calagem e adubação equilibrada para garantir a produtividade agrícola. Além disso, a menor capacidade de retenção de nutrientes pode aumentar a lixiviação, exigindo estratégias que minimizem a perda de elementos essenciais para as culturas (SANTOS et al., 2018).

A presença desses diferentes tipos de solo influencia diretamente as práticas agrícolas da região, exigindo estratégias específicas para cada condição edafoclimática. No Cerrado, a conversão de áreas naturais para a agricultura deve ser realizada com atenção às práticas de manejo sustentável, considerando o risco de degradação do solo e a necessidade de reposição de matéria orgânica para manter sua estrutura e fertilidade (LAL, 2018).

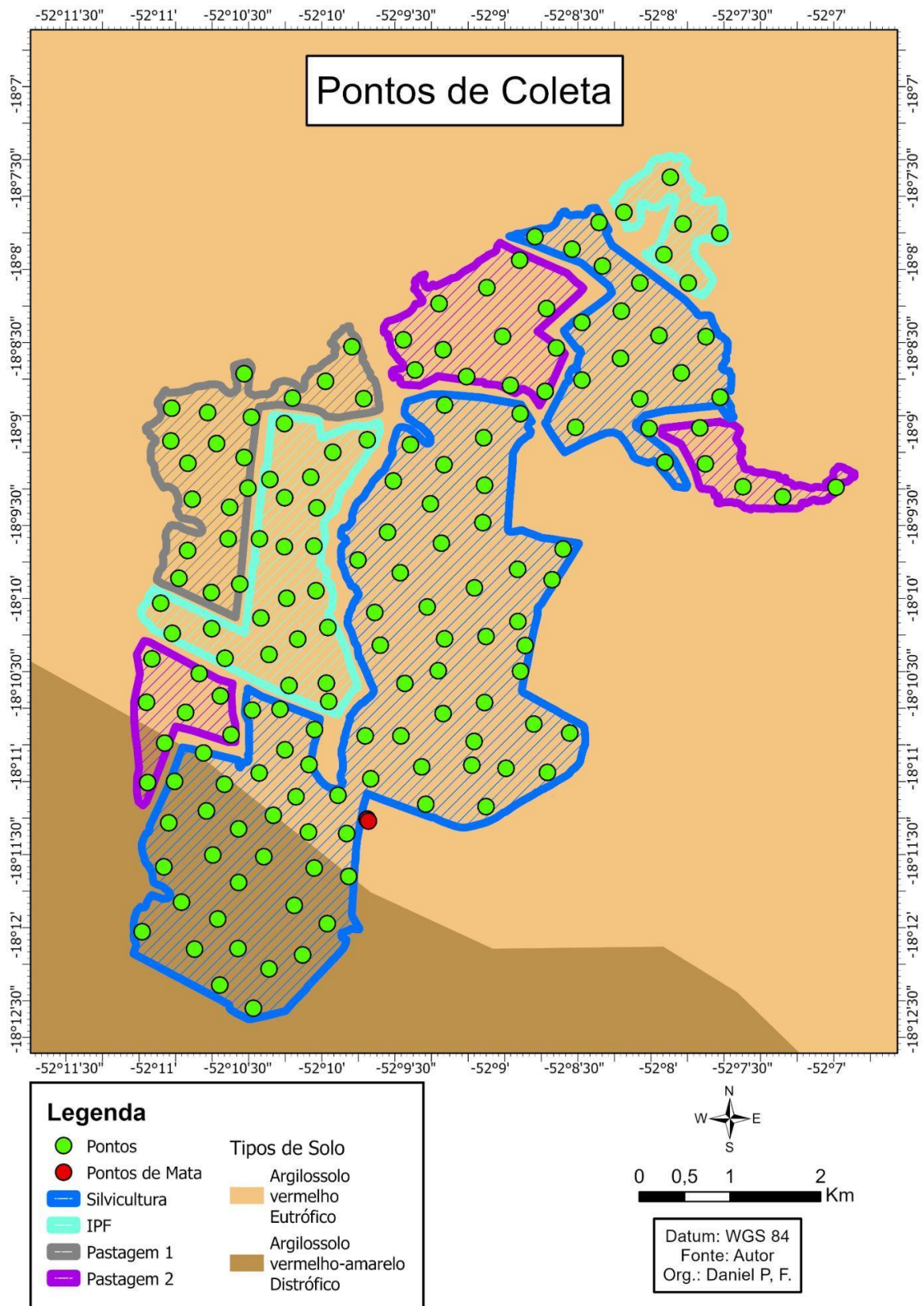


Figura 2. Mapa com os pontos amostrais georreferenciados com a localização da área de estudo localizada em Serranópolis - GO, de acordo com a pedologia presente no local da área de

estudo, tendo os 4 usos do solo avaliados: Eucalipto monocultura - Silvicultura (EM), Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem monocultura (P1) e Pastagem policultiva (P2),

4.1.1 Descrição dos sistemas produtivos avaliados

Este estudo foi conduzido considerando os quatro diferentes usos do solo, representativos das principais práticas agrícolas e florestais da região. Cada um desses sistemas apresenta características próprias que influenciam a fertilidade do solo, o estoque de carbono e a sustentabilidade do manejo.

O primeiro cenário, denominado Integração Pecuária-Floresta (IPF), ocupa uma área de 419,52 ha, cerca de 14% da área total e consiste na associação de eucalipto e forrageiras, um modelo de produção que busca conciliar a exploração econômica com a conservação ambiental. Neste sistema, foi cultivada a gramínea *Urochloa decumbens*, amplamente utilizada em pastagens devido à sua rusticidade e boa adaptação a diferentes condições de solo. Em consórcio com a pastagem, foram implantados plantios de eucalipto da variedade VM01 (híbrido de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis*), proporcionando benefícios como sombreamento para o gado, melhoria das condições microclimáticas e aumento do sequestro de carbono no solo. Além disso, este sistema promove a recuperação de áreas degradadas e melhora a eficiência do uso dos recursos naturais, tornando-se uma alternativa sustentável para a pecuária extensiva.

O segundo cenário, denominado Pastagem monocultura (P1), abrange uma área de 305,25 ha, cerca de 10% da área total e representa um sistema tradicional de pastagem composto exclusivamente por *Urochloa decumbens*. Este modelo de uso do solo é amplamente adotado no Brasil devido à sua capacidade de fornecer forragem de qualidade para o gado, com boa resistência ao pisoteio e adaptação a solos de baixa fertilidade.

O terceiro tratamento, Pastagem policultiva (P2), com uma área de 454,02 ha, cerca de 16% da área total, diferencia-se do primeiro por apresentar um consórcio de diferentes espécies de gramíneas, incluindo *Urochloa brizantha* MG5, *Panicum maximum* ‘Massai’ e *Urochloa decumbens* ‘Basilisk’. A diversificação das forrageiras neste sistema busca aumentar a produtividade da pastagem, melhorar a qualidade nutricional do pasto e otimizar a fixação de carbono no solo. O uso de diferentes espécies permite uma melhor adaptação às variações climáticas e ao tipo de solo da região, além de contribuir para a resiliência do sistema produtivo.

Esse modelo de pastagem mista também favorece a estruturação do solo e reduz a degradação ao minimizar os efeitos do superpastejo.

Por fim, o quarto cenário corresponde ao sistema de Silvicultura - Monocultura de Eucalipto (EM), que ocupa a maior área do estudo, totalizando 1.751,85 ha cerca de 60% da área total. Neste ambiente, foram cultivados diferentes híbridos de *Eucalyptus*, incluindo as variedades VM01, I144, GG100/I1224, I144/GG100 e *Corymbia citriodora*. A silvicultura baseada em eucalipto é amplamente utilizada para produção de madeira, celulose e biomassa energética, sendo um setor estratégico para a economia brasileira. No entanto, a monocultura florestal pode impactar as características químicas e físicas do solo, exigindo estratégias adequadas de manejo.

O clone VM01 é um híbrido de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis*, conhecido por sua resistência ao estresse hídrico e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, sendo amplamente utilizado para a produção de madeira e biomassa. Já o clone I144 é frequentemente derivado do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, apresentando rápido crescimento e alta produtividade, características essenciais para o setor de celulose e papel. Os materiais genéticos GG100/I1224 e I144/GG100 seguem um padrão de nomenclatura utilizado em melhoramentos clonais e podem incluir combinações entre *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla* e outras espécies, visando maximizar a resistência a doenças e otimizar o rendimento florestal.

Além dos híbridos, também foi cultivado *Corymbia citriodora*, espécie conhecida por sua madeira densa e pelo óleo essencial extraído de suas folhas, amplamente utilizado na indústria química e farmacêutica. A escolha dessas variedades reflete a busca por um sistema produtivo eficiente, adaptado às condições da área de estudo e com potencial para atender a diferentes demandas comerciais.

A distribuição espacial dessas áreas dentro do território analisado foi calculada em relação à área total de estudo, permitindo uma avaliação detalhada do impacto de cada uso do solo na fertilidade, no estoque de carbono e na sustentabilidade ambiental da região. Essa segmentação facilita a compreensão das dinâmicas agropecuárias e florestais, auxiliando no planejamento de práticas de manejo mais eficientes e na formulação de políticas ambientais voltadas à conservação dos recursos naturais (Figura 2).

4.1.2 - Definição dos Pontos Amostrais e Coleta de Solo

Após o estudo inicial da área de interesse, foi necessário delimitar os pontos amostrais, garantindo que todos estivessem georreferenciados para que a coleta in situ ocorresse de maneira precisa e eficiente. Todo o planejamento amostral foi realizado utilizando Softwares GIS e técnicas de sensoriamento remoto.

O primeiro passo foi o desenvolvimento do shapefile da área de estudo para delimitação do local. Em seguida, os pontos amostrais foram distribuídos de forma aleatória e equitativa ao longo de toda a extensão da área, totalizando 166 pontos de coleta distribuídos nos 2.972 hectares das fazendas, além de 4 pontos adicionais em áreas de vegetação nativa (Mata). Essa distribuição resultou na criação de um mapa de pontos georreferenciados e numerados, garantindo que a equipe de campo tivesse acesso a uma referência clara para a realização das coletas (Figura 2).

Na etapa seguinte, esse mapa de pontos foi repassado às equipes responsáveis pela coleta de solo, que se deslocaram até os locais definidos para a amostragem. As coletas foram realizadas até a profundidade de 0,60 m, com amostras estratificadas nos intervalos de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 2). No entanto, para este projeto específico, foram utilizados apenas os dados referentes à camada de 0 a 0,20 cm, considerada a mais representativa para análises de fertilidade do solo e para comparações com a dinâmica de carbono do solo. Para cada amostra, aproximadamente 300 g de solo foram coletados, com ferramentas tradicionais como trado e cavadeira, garantindo material suficiente para as análises laboratoriais.

As amostras foram então enviadas ao laboratório da Agrorobótica, uma empresa privada especializada em análises de solo e carbono, localizada em São Carlos - SP. A Agrorobótica atua em parceria com a EMBRAPA no desenvolvimento de pesquisas voltadas para a inovação no monitoramento da fertilidade do solo e da dinâmica do carbono, utilizando tecnologias avançadas de espectroscopia e inteligência artificial.

Na área em cultivo, foram coletadas 996 amostras deformadas, dentre elas, 166 amostras de fertilidade e 830 de carbono do solo, enquanto na área de vegetação nativa (mata), foram obtidas 20 amostras de carbono do solo. Em cada ponto amostral, foram retiradas quatro

amostras indeformadas para a densidade do solo, cinco amostras deformadas para o carbono do solo e mais uma para fertilidade do solo (Figura 3). As amostras de cada profundidade foram inicialmente separadas em baldes, onde passaram por um processo de homogeneização. Após essa etapa, o material foi acondicionado em sacos plásticos devidamente identificados com as informações correspondentes a cada amostra.

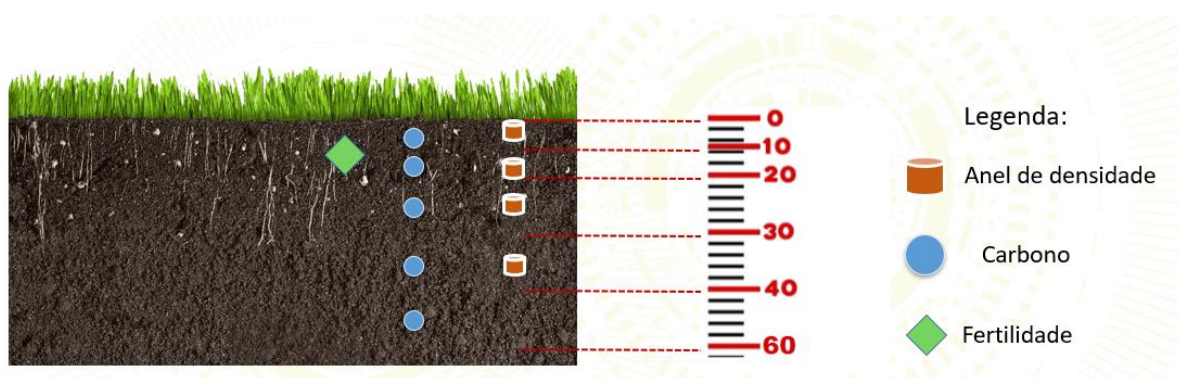


Figura 3. Figura esquemática dos modelos de amostragem para coleta de amostras para densidade, carbono e fertilidade do solo nas áreas de estudo.

A coleta de amostras volumétricas para determinar a densidade do solo foi realizada nos estratos de 0-0,10m, 0,10-0,20m, 0,20-0,30m e 0,30-0,40 m (Figura 3), utilizando cilindros de aço inox com volume de 0,91 m³ (Figura 4). Ao todo, foram obtidas cerca de 664 amostras indeformadas na área agricultável e 16 na área de vegetação nativa, com aproximadamente 150 g de solo por amostra. As amostras deformadas foram previamente secas e peneiradas em uma malha de 2 mm antes das análises. O teor de carbono foi determinado utilizando a técnica LIBS, seguido pela determinação do estoque de carbono (EC) do solo com base na metodologia descrita na equação:

$$C_{stock} = \frac{OC \times D_{soil} \times E}{10} \quad (3)$$

Onde:

C_{stock} é o estoque de carbono no solo (mg ha⁻¹);

OC é o teor de carbono do solo (g kg⁻¹);

D_{soil} é a densidade do solo (kg dm^{-3});

E é a espessura da camada de solo (cm).



Figura 4. Anel volumétrico para coleta de amostras indeformadas.

A densidade do solo foi avaliada com amostras indeformadas, coletadas utilizando um anel volumétrico com dimensões médias de 0,048 m de diâmetro interno e 0,05 m de altura. Para os cálculos, foi considerada a massa equivalente da área de vegetação nativa (mata), desconsiderando os dados analisados da área de cultivo, por conta dos efeitos de compactação presentes (Claessen et al., 1997).

A Equação 1 é amplamente utilizada para calcular o estoque de carbono no solo (EC); no entanto, apresenta limitações por considerar apenas uma profundidade fixa (Sisti et al., 2004). Isso pode levar a distorções em áreas onde há variação na compactação do solo, pois camadas mais compactadas terão uma maior massa de solo em relação às menos compactadas. A fórmula para o cálculo da massa de solo é:

$$M_{\text{solo}} = D_s \times L \times 10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \quad (4)$$

Onde:

M_{solo}: Massa de solo por unidade de área (mg ha^{-1});

D_s: Densidade do solo (mg m^{-3});

L: Espessura da camada (m).

De acordo com a literatura de Sisti et al. (2004) e os objetivos estabelecidos no protocolo da rede PECUS (Pecuária Sustentável), os estoques de carbono precisam ser ajustados considerando como referência a massa de solo equivalente sob vegetação nativa para cada sistema avaliado. Assim, a densidade do solo coletada na área de vegetação nativa (mata), é utilizada como parâmetro de referência.

4.2 - Preparo de amostra de solo e análise LIBS

4.2.1 - Descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados

A Figura 5 ilustra o sistema LIBS (laser induced-breakdown spectroscopy) empregado neste estudo. O sistema é composto por um laser pulsado de alta energia, operando no modo fundamental a 1064 nm, com intensidade de 20 MJ e frequência de 10 Hz, e um espectrômetro de faixa espectral que abrange desde o ultravioleta profundo (UV) até o infravermelho médio (IR), variando entre 180 nm e 950 nm. O espectrômetro possui resolução de 0,1 nm e é equipado com um dispositivo acoplado à carga (CCD) para detecção.

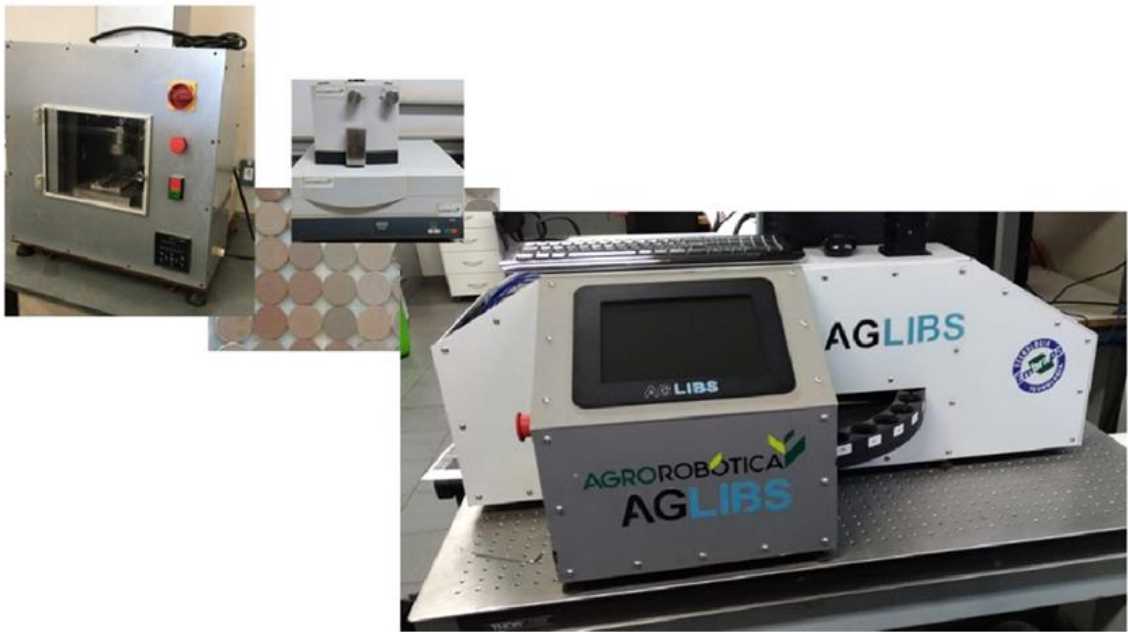


Figura 5. Sistema LIBS utilizado no estudo.

O método de espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) foi utilizado para determinar a fertilidade do solo, identificando os elementos presentes na amostra. O processo consiste na aplicação de pulsos de laser de alta energia sobre a amostra, gerando um plasma que excita os átomos a níveis de energia mais elevados. Conforme o plasma esfria, os átomos emitem radiação eletromagnética, que é capturada e analisada por um espectrômetro.

Cada medição das amostras utilizadas neste estudo envolveu três pulsos consecutivos: o primeiro para remover impurezas da superfície e os dois seguintes para obtenção dos dados espectrais. Para minimizar incertezas devido à heterogeneidade do solo, cada amostra foi medida cerca de 60 vezes. Todas as análises foram realizadas em condições atmosféricas normais, garantindo precisão na avaliação dos teores de macronutrientes e micronutrientes essenciais para o manejo agrícola.

4.2.2 - Preparação de amostras de solo para análise LIBS

A determinação quantitativa por meio de LIBS é altamente dependente da matriz da amostra, tornando a preparação das amostras uma etapa crucial em todo o processo de análise. Neste estudo, as amostras foram secas ao ar, em local aberto, com cobertura do sol e arejado,

até atingirem peso constante, um processo que durou 48 horas. Após a secagem, as amostras foram trituradas e homogeneizadas em um moinho automatizado, reduzindo as partículas para um tamanho de até 2 mm. Em seguida, foi realizado um processo de remoção de resíduos vegetais. Por fim, os pellets de solo foram produzidos por prensagem automatizada em poucos segundos. Esses pellets foram então inseridos no sistema LIBS automatizado. O tamanho, peso e altura dos pellets foram ajustados e seguiram protocolos rigorosos, garantindo a reprodutibilidade das medições em larga escala. Além disso, a preparação das amostras possibilita a produção de até 300 amostras por dia.

4.3 - Método de referência para o sistema LIBS

Todas as amostras de solo analisadas neste estudo tiveram seu teor de carbono (g kg^{-1}) determinado utilizando o analisador de combustão seca CHNS/O Perkin Elmer 2400 Série II, fornecido pela Embrapa Instrumentação, seguindo métodos estabelecidos e padronizados. As variáveis físicas (% de argila, % de silte e % de areia) das amostras foram caracterizados pelo método da pipeta e classificados de acordo com as cinco categorias comumente utilizadas pela Embrapa (Claessen et al., 1997): arenoso, silte, médio, argiloso e muito argiloso, com base na quantificação das frações de areia, argila e lodo de areia. Conforme os resultados obtidos pelos métodos de referência, os teores de carbono nas amostras variaram de 3,5 a 50 g kg^{-1} . As texturas dos solos apresentaram valores variando de 635 a 919 g kg^{-1} de areia e de 9 a 360 g kg^{-1} de argila.

4.4 – Variáveis avaliadas no presente estudo

Para a análise dos dados, foram considerados o pH, P, CTC, V% e EC, para toda a área de estudo (2.972,42 ha). O pH do solo influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana. Solos muito ácidos podem apresentar toxicidade por alumínio e manganês, enquanto solos alcalinos podem reduzir a disponibilidade de micronutrientes essenciais. Ajustar o pH dentro da faixa ideal (5,5 a 6,5) melhora a fertilidade e maximiza a absorção de nutrientes pelas plantas.

O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento vegetal, mas sua disponibilidade é limitada em solos tropicais devido à fixação química com ferro e alumínio. O monitoramento desse elemento é fundamental para garantir a produtividade agrícola.

A capacidade de troca catiônica (CTC) reflete o potencial do solo de reter e fornecer nutrientes essenciais. Solos argilosos possuem maior CTC, garantindo melhor retenção e liberação gradual de cátions, enquanto solos arenosos apresentam menor capacidade de retenção, aumentando o risco de lixiviação.

A saturação por bases indica a proporção de cátions básicos no solo, sendo um fator importante para avaliar a fertilidade. Valores superiores a 50% são considerados ideais para a maioria das culturas, pois garantem maior disponibilidade de cálcio, magnésio e potássio, reduzindo os efeitos da acidez.

Por fim, o estoque de carbono no solo foi determinado por análise laboratorial direta, pois as variáveis químicas do solo não são suficientes para quantificar sua concentração. No entanto, esses fatores auxiliam na compreensão das condições que influenciam a dinâmica do carbono.

Para facilitar a interpretação espacial dos dados, os teores analisados foram reclassificados em cinco classes iguais, seguindo como exemplo o modelo de Raji et al. (1997), resultando na elaboração de mapas temáticos de fertilidade do solo e estoque de carbono do solo (Figuras 13 e 14).

4.5 – Mapas de fertilidade do solo e estoque de carbono no solo

Todo o processamento foi realizado no software de código aberto QGIS 3.34, cuja utilização permitiu a integração eficiente de diversas ferramentas e técnicas para a análise espacial dos dados coletados, garantindo um fluxo de trabalho robusto e reproduzível.

A geração dos mapas iniciou-se com a interpolação dos dados por meio da krigagem ordinária, sem exclusão de outliers, utilizando os resultados laboratoriais de cada ponto de coleta. A modelagem foi realizada com a função esférica (Spherical) disponível no Plugin Smart-Map, instalado no QGIS. Esse procedimento resultou na criação de mapas individuais para cada variável analisada: pH, CTC, P, V% e EC.

Essa etapa foi fundamental para a organização espacial das informações, assegurando que cada variável fosse adequadamente representada antes das análises subsequentes (Apêndices).

4.5.1 – Aplicação da lógica Fuzzy nos mapas de padrões de variabilidade espacial de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo

A primeira etapa do processamento para a construção dos mapas de fertilidade do solo e estoque de carbono do solo, consistiu na padronização dos valores dos mapas interpolados por meio da lógica *fuzzy*, utilizando a ferramenta "Raster Fuzzify (associação linear)" no software GIS. Esse método ajustou os valores de cada mapa para uma escala de 0 a 1, com base nos limites mínimo e máximo presentes nos dados, garantindo comparabilidade entre os mapas e eliminando distorções que poderiam comprometer as análises.

A função linear foi construída a partir de dois valores definidos, o limite inferior, correspondente à ausência de associação (resultado igual a 0), e o limite superior, que representa associação total (resultado igual a 1). Aplicando assim esse método a todos os mapas, indicando em cada procedimento os valores mínimos e máximos de cada um dos cinco mapas interpolados (pH, CTC, P, V% e EC), gerados anteriormente. Esse processo permite modelar conjuntos nebulosos, ajustando a relação entre os limites superior e inferior.

A aplicação da lógica *fuzzy* foi essencial para unificar diferentes escalas de valores das variáveis analisadas, possibilitando a sobreposição e comparação coerente dos mapas. Dessa forma, os dados foram integrados de maneira padronizada, facilitando análises mais precisas e representativas (QGIS, 2023).

4.5.2 – Sobreposição dos mapas de Fertilidade do solo

Após o nivelamento dos valores, procedeu-se à sobreposição dos mapas de fertilidade. Utilizando a "Calculadora Raster", ferramenta presente no QGIS, onde os mapas interpolados e nivelados das quatro classes de fertilidade (pH, Fósforo, CTC e Saturação por Bases), foram somados de modo sobrepostos para gerar um único mapa de fertilidade integrado. Destaca Filipini et al. (2014), que esse processo de sobreposição é essencial para integrar diferentes variáveis e identificar padrões espaciais que não seriam perceptíveis em mapas isolados, permitindo uma melhor compreensão da distribuição dos nutrientes e da qualidade do solo.

Esse novo mapa criado de sobreposição de fertilidade do solo, passou novamente pela ferramenta "Raster Fuzzify (associação linear)", para ter seus resultados nivelados novamente.

4.5.3 – Criação das zonas de manejo com a reclassificação dos mapas de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo

Com os valores nivelados, a próxima etapa consistiu na reclassificação dos mapas (Sobreposto de fertilidade do solo e estoque de carbono no solo). Sendo uma etapa importante, pois aqui é onde as zonas de manejo são criadas, na reclassificação dos mapas criando cinco zonas de manejo diferenciadas pela fertilidade do solo e respectivas propriedades químicas analisadas.

Utilizando a ferramenta "Reclassificar por tabela", presente no software GIS, definimos que os valores de 0 a 1 foram redistribuídos em cinco classes iguais, conforme a metodologia de exemplo de RAIJ et al. (1997), categorizando as áreas para fertilidade do solo e as características químicas analisadas em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto (Tabela 1).

Tabela 1. Reclassificação dos valores de 0 a 1 para a criação das zonas de manejo para fertilidade do solo e as características químicas analisadas na área de estudo.

Classe	Valor
Muito baixo	0 a 0,2
Baixo	0,2 a 0,4
Médio	0,4 a 0,6
Alto	0,6 a 0,8
Muito alto	0,8 a 1

Assim foram gerados dois mapas reclassificados, um mapa de sobreposição de fertilidade e outro mapa de estoque de carbono no solo. Essa reclassificação permite uma análise mais objetiva e padronizada, facilitando a identificação de regiões que necessitam de intervenções específicas, como correção do solo ou ajuste de práticas agrícolas específicas.

4.5.4 – Conversão dos Mapas Rasters para Vetor (Polígonos)

A etapa final do processamento envolveu a conversão dos mapas raster reclassificados para o formato vetorial (polígono). Para isso, foi utilizada a ferramenta "Raster para vetor (poligonizar)", permitindo que cada classe fosse representada por polígonos distintos. Essa conversão possibilitou o cálculo das áreas correspondentes a cada classe e a obtenção de informações percentuais sobre a distribuição dos diferentes níveis de fertilidade e estoque de carbono no solo. A transformação em vetores permite análises espaciais mais detalhadas, como o cruzamento com outros dados geográficos e a extração de estatísticas mais precisas sobre a ocupação de cada classe dentro da área de estudo (Filipini et al., 2014).

4.6 - Método de Análise dos Mapas de Fertilidade do solo e Estoque de Carbono no solo

Com base nas considerações acima, este projeto adotará uma abordagem que visa criar um mapa de composição de dados a partir da análise dos quatro elementos de fertilidade do solo (pH, Fósforo, CTC e Saturação por Bases), tendo como objetivo visualizar e observar a correlação entre os níveis de fertilidade do solo e a concentração de estoque de carbono no solo.

As análises foram feitas com o mapa sobreposto de fertilidade do solo e um mapa que representa o estoque de carbono no solo para a área total do estudo. Isso permitirá uma avaliação direta da correlação entre os níveis de fertilidade do solo e o estoque de carbono no solo, fornecendo uma compreensão mais completa da relação entre esses itens, contribuindo para tomadas de decisão informadas em projetos ambientais e de agricultura sustentável.

4.7 - Análise

4.7.1 - Correlação de Pearson

A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a relação linear entre a fertilidade do solo e o estoque de carbono no solo nos diferentes usos da terra (IPF - Integração pecuária-floresta, Silvicultura, Pastagem monocultura P1 e Pastagem policultiva P2). Este método é adequado para dados contínuos que apresentam distribuição aproximadamente normal, garantindo a precisão dos resultados (MARTINS, 2012).

O coeficiente de correlação de Pearson quantifica a intensidade e a direção da associação linear entre duas variáveis contínuas. Seu valor varia entre -1 e 1, onde: $r = 1$:

correlação positiva perfeita; $r = -1$: correlação negativa perfeita; $r = 0$: ausência de correlação linear. Valores próximos a 1 ou -1 indicam uma forte correlação, enquanto valores próximos a 0 sugerem uma correlação fraca ou inexistente (COHEN, 1988).

Para avaliar a significância estatística das correlações, foi utilizado o valor-p. Um valor-p menor que 0,05 indica que a correlação observada é estatisticamente significativa, ou seja, há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de ausência de correlação (HILL; LEVIN; SCHNEIDER, 2013). É importante ressaltar que a correlação de Pearson mede apenas relações lineares e não implica causalidade. Ou seja, mesmo que duas variáveis apresentem uma correlação significativa, isso não significa que uma cause interferência na outra. Portanto, os resultados devem ser interpretados com cautela, considerando o contexto ambiental e outros fatores que possam influenciar as variáveis analisadas (MARTINS, 2012).

A aplicação da correlação de Pearson nesta análise foi feita de modo que os valores dos 166 pontos de coletas em fertilidade do solo e estoque de carbono do solo, fosse feita a correlação entre cada tipo de uso do solo no dois diferentes mapas. fornecendo uma visão preliminar das associações entre a fertilidade do solo e o estoque de carbono nos diferentes usos da terra, servindo como base para investigações mais aprofundadas (COHEN, 1988).

4.7.3 - Importância do Uso do Python nas Análises Estatísticas

O uso do Python nas análises estatísticas de correlação de Pearson, oferece inúmeras vantagens, incluindo a automação de cálculos, maior flexibilidade e a capacidade de lidar com grandes volumes de dados de forma eficiente. O Python possui diversas bibliotecas, como SciPy, NumPy e Pandas, que são amplamente utilizadas em pesquisas científicas devido à sua precisão, facilidade de uso e ampla documentação. Para este projeto todos os dados provenientes dos mapas, com os valores de cada ponto do mapa de fertilidade do solo e do mapa de estoque de carbono no solo, foram coletados e analisados com a linguagem python para elaborar as análises estatísticas e os gráficos desejados (MCKINNEY, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Análise das propriedades químicas do solo para diferentes usos e manejos

Ao analisar as médias dos valores das propriedades químicas e físicas (pH, V%, P, CTC e EC do solo), utilizadas no presente estudo para caracterizar a fertilidade do solo em diferentes tipos de uso (Pastagem monocultura P1, Pastagem policultiva P2, IPF e Eucalipto), observa-se que, apesar das variações no uso e manejo, os níveis dos atributos analisados não apresentam grandes discrepâncias para pH, CTC e EC (Figura 6).

A tendência de estabilidade nos níveis de acidez do solo entre os diferentes usos pode ser observada nos dados de pH. A maior média foi registrada em P2, com valor de 4,95, seguida pela área de IPF com 4,70, e pela Silvicultura com 4,69. O menor valor médio foi encontrado na P1, com 4,34 (Figura 6). A variação entre os valores extremos foi de apenas 0,61, o que indica uma relativa uniformidade na acidez do solo entre os diferentes sistemas de uso analisados.

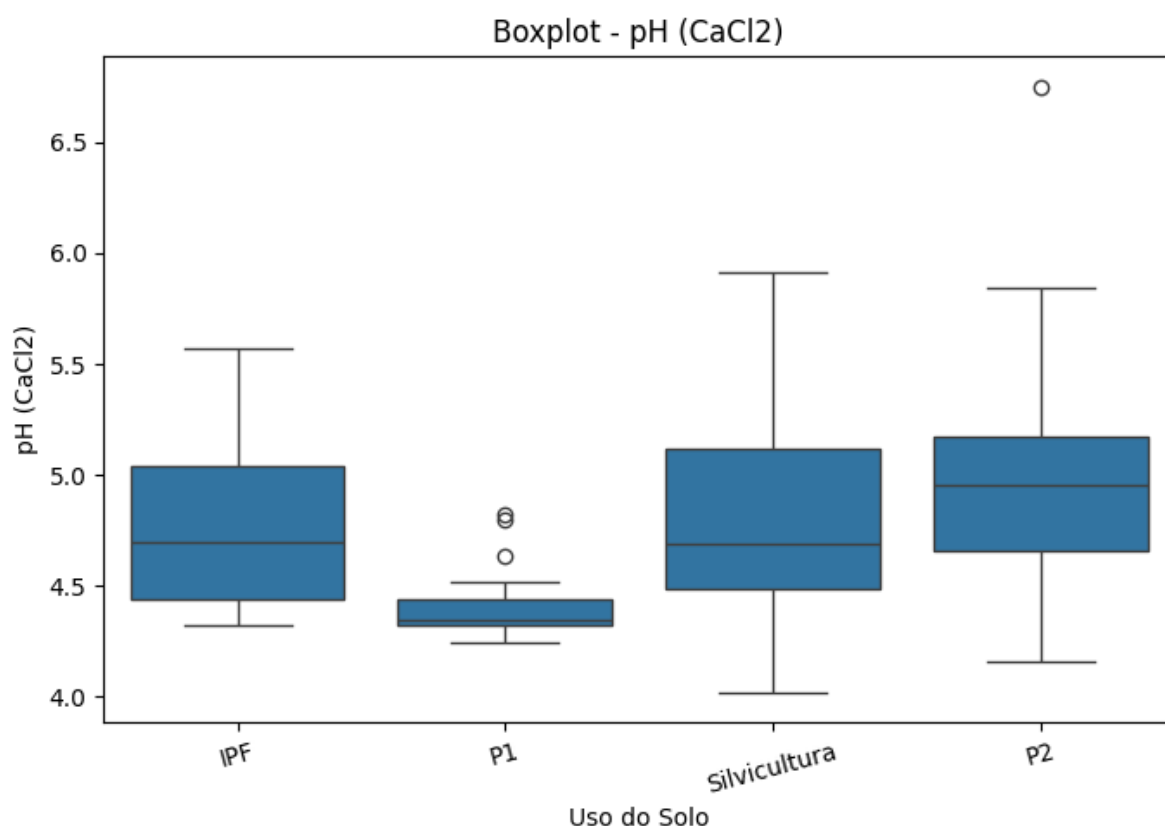


Figura 6. Boxplot dos valores de pH (CaCl₂), pelo tipo de uso do solo da área de estudo (IPF, silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2).

A variação nos teores de fósforo entre os diferentes usos do solo é mais expressiva quando comparada a outros atributos. A menor média foi observada em P1, com 4,11 mg dm⁻³

— valor semelhante ao menor pH registrado. Em contraste, a maior concentração foi encontrada na área de Silvicultura, com $6,83 \text{ mg dm}^{-3}$, seguida pela área de IPF, com $5,95 \text{ mg dm}^{-3}$, e pela P2, com $4,80 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 7). Esses dados sugerem que fatores como o tipo de solo, especialmente a presença de Argissolo Vermelho Eutrófico, podem estar influenciando positivamente a disponibilidade de fósforo em algumas áreas.

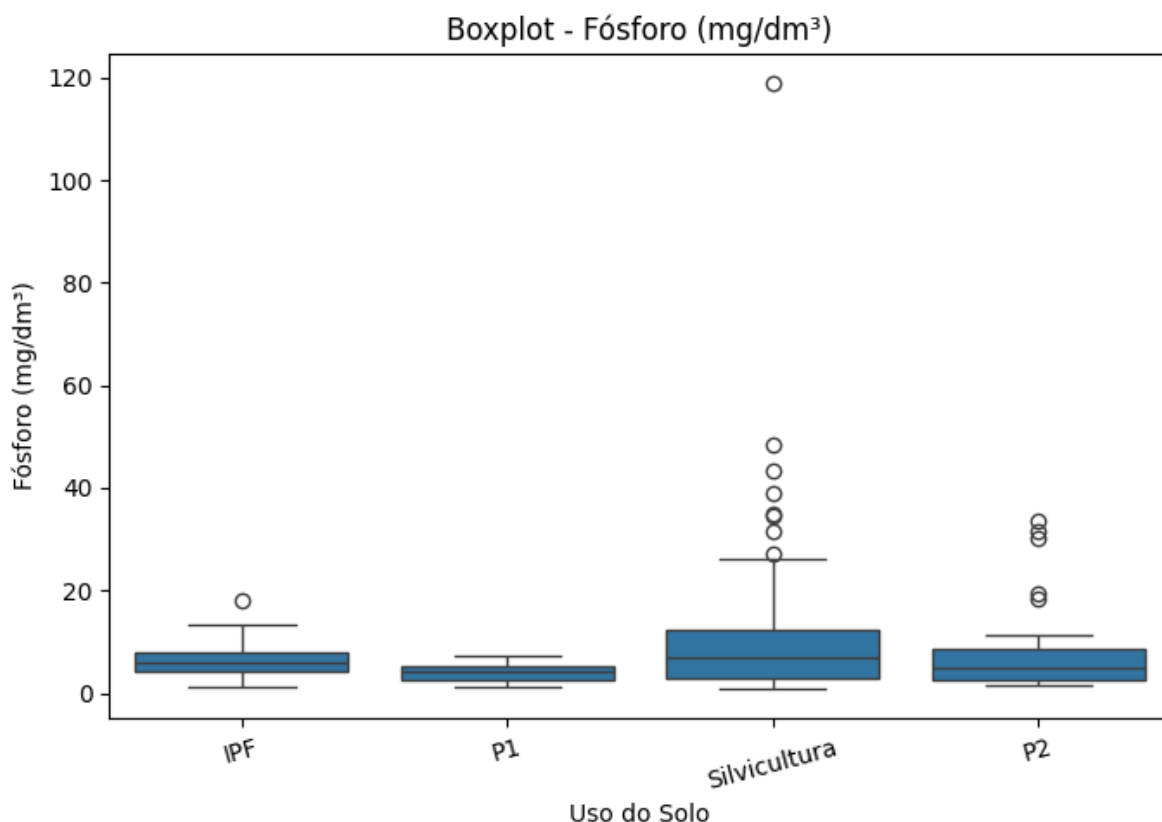


Figura 7. Boxplot dos valores de fósforo (mg dm^{-3}), pelo tipo de uso do solo da área de estudo (IPF, silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2).

A Saturação por Bases (V%) apresentou a maior amplitude de variação entre as variáveis analisadas. O valor médio mais elevado foi observado na área de IPF, alcançando 38,58%. Em contraste, a menor média foi registrada na área de Silvicultura, com 25,81%. As demais áreas apresentaram valores intermediários, com 35,73% em P2 e 32,09% em P1, conforme ilustrado na Figura 8. Esses resultados evidenciam a influência do tipo de manejo e do uso do solo na disponibilidade de bases trocáveis, refletindo diretamente na fertilidade química do solo. Essa diferença pode estar associada a fatores como tipo de solo (Eutrófico ou distrófico e aplicação de calcário diferenciada para cada área ao longo dos anos). De qualquer forma, todos os resultados de V% para todas as áreas estão abaixo de 50%, indicando a

necessidade de correção via calagem, sendo possível a aplicação diferenciada em taxa variável, reduzindo custos e diminuindo emissões relativas de CO₂ devido à aplicação de calcário.

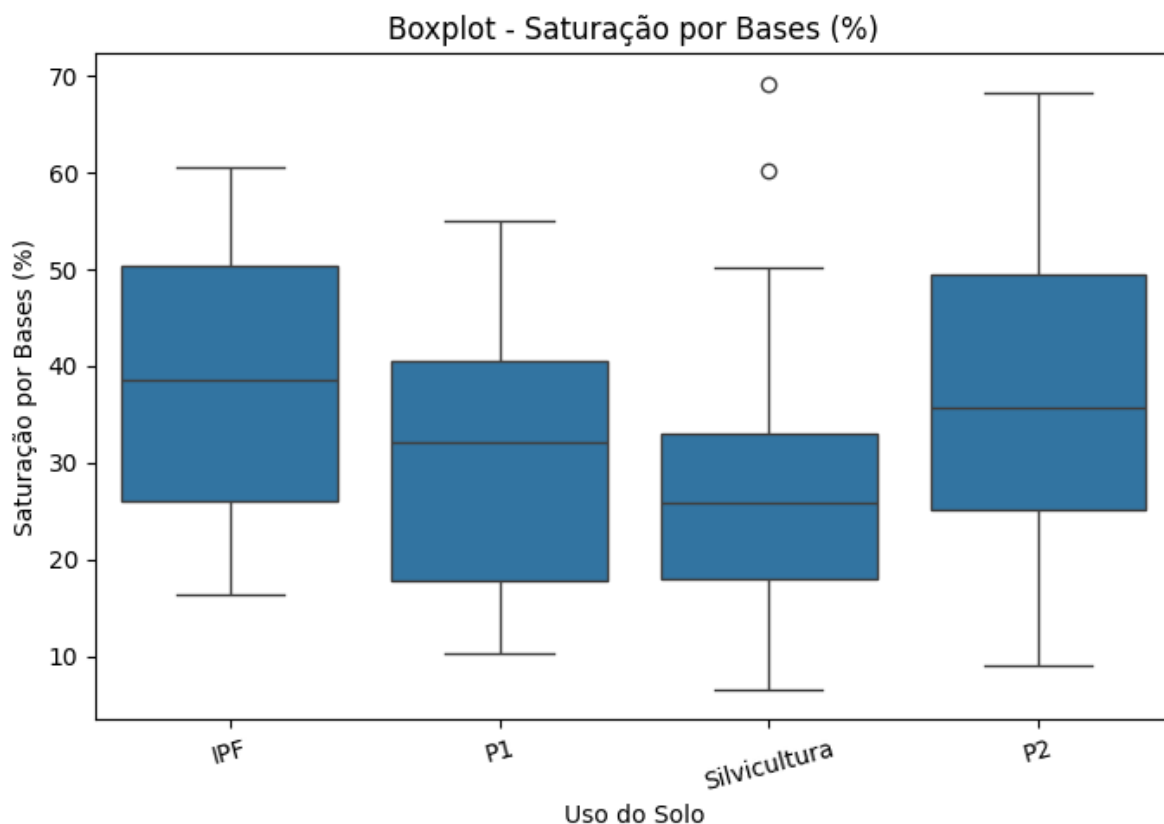


Figura 8. Boxplot dos valores de saturação por bases (V%), pelo tipo de uso do solo da área de estudo (IPF, silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2).

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) apresentou variações discretas entre os diferentes usos do solo, sendo estas menos acentuadas do que as observadas na Saturação por Bases. O maior valor médio foi registrado na área de IPF, com 3,28 cmolc dm⁻³, seguido pela P2, com 3,07 cmolc dm⁻³. A Silvicultura apresentou valor intermediário de 2,81 cmolc dm⁻³, enquanto o menor valor foi observado em P1, com 2,75 cmolc dm⁻³, conforme ilustrado na Figura 9. Esses resultados indicam uma relativa estabilidade na CTC entre os diferentes sistemas de uso do solo, ainda que variações sutis possam refletir as condições químicas e a qualidade do manejo adotado em cada área.

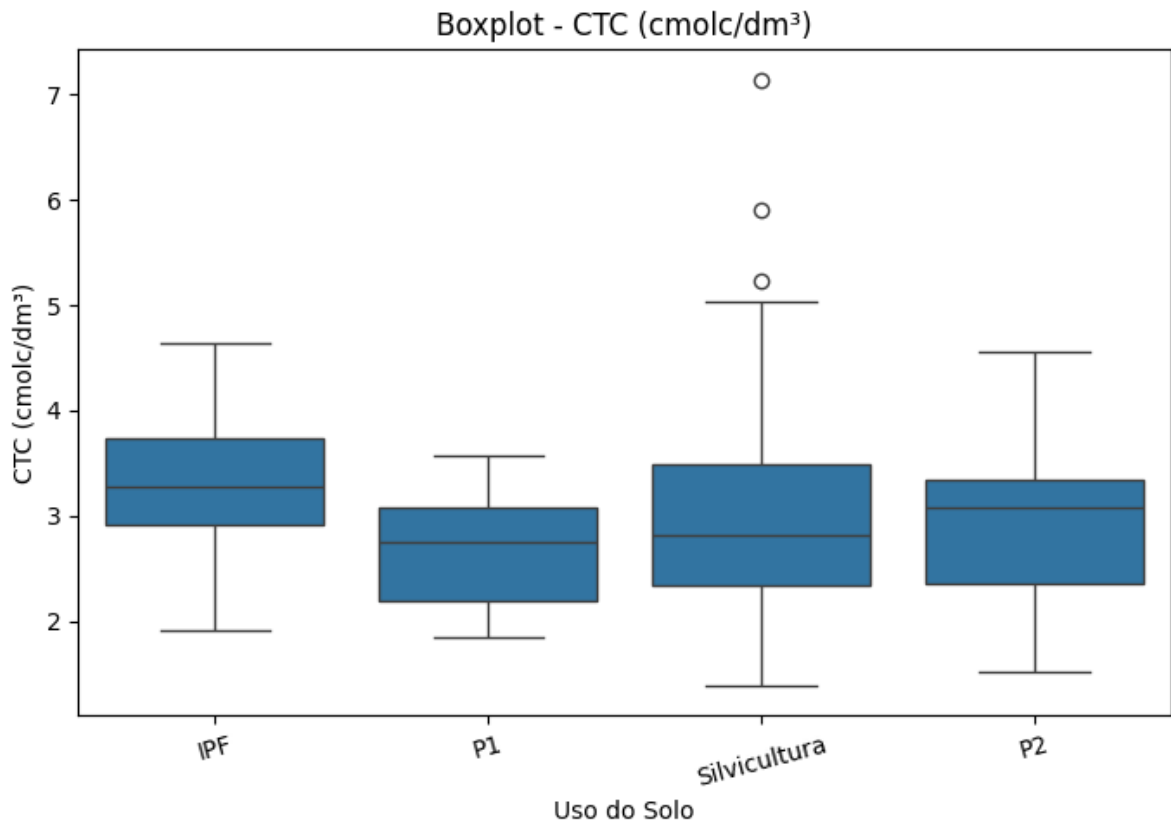


Figura 9. Boxplot dos valores de CTC (cmol_c dm⁻³), pelo tipo de uso do solo da área de estudo (IPF, silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2).

Maiores teores de P foram observados em EM e menores valores para P1, sugerindo que práticas de reposição de fósforo em taxa variável podem ser aplicadas nestas áreas, com o objetivo de reduzir custos e aumentar a eficiência do uso do solo nessas áreas (Figura 7). Esses resultados indicam que a disponibilidade de P no solo pode ser influenciada pelas práticas de manejo, pelo tipo de solo ou pela correção através da aplicação de fertilizante fosfatado.

5.1.2 – Análise do estoque de carbono no solo para diferentes usos e manejos

O estoque de carbono no solo (EC) para camada de solo avaliada de 0-0,20 m apresentou pequena variação entre os diferentes tipos de uso do solo. Verificou-se que os maiores valores de estoque de carbono foram registrados nas áreas P2, com 5,01 t ha⁻¹ e P1, com 4,67 t ha⁻¹, enquanto as áreas com menores valores são a de IPF, com 4,36 5,01 t ha⁻¹ e a de Silvicultura com 4,53 5,01 t ha⁻¹ (Figura 10). Essa diferença pode estar relacionada à dinâmica da matéria

orgânica no solo, às práticas de manejo adotadas, à maior entrada de biomassa aérea e de raízes nas áreas de pastagem e a essas áreas de pastagens não terem realizado preparo do solo.

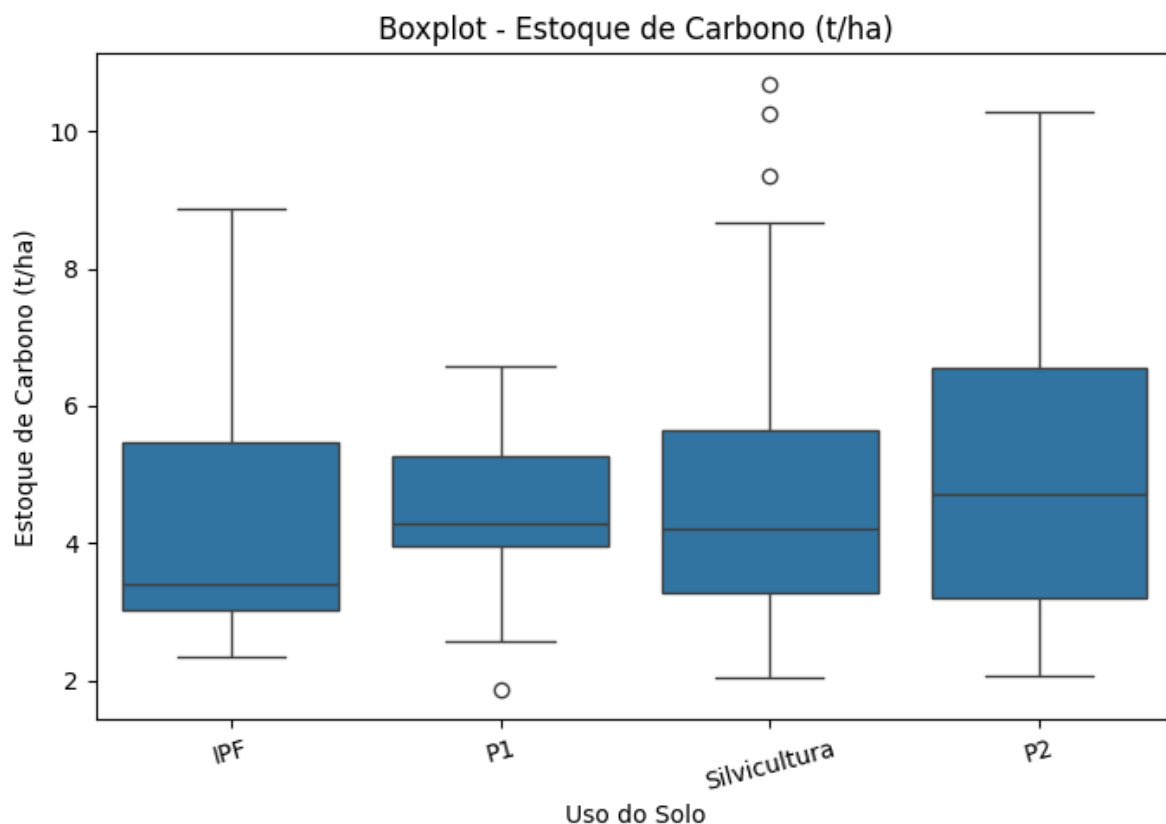


Figura 10. Boxplot dos valores de estoque de carbono no solo ($t\ ha^{-1}$), pelo tipo de uso do solo da área de estudo (IPF, silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2).

Analisando as áreas de P1 e P2, é possível identificar que apresentam características favoráveis ao acúmulo de carbono no solo, posicionando-as como importantes alternativas para estratégias de manejo sustentável do solo, favorecendo a entrada de C da biomassa e reduzindo perdas devido à não realização de preparo do solo por longos períodos. Juntas, essas áreas ocupam uma parcela limitada do território em estudo, com a P1 representando cerca de 305 hectares, correspondendo a 10% da área total e a P2 com cerca de 454,02 hectares, correspondendo a 16% da área total.

Segnini et al. (2019) sugere que, mesmo sendo áreas menores, aliada ao fato de serem regiões onde o manejo pecuário é inexistente, cria condições propícias para o sequestro de carbono no solo. Como regiões de pastagem sem movimentação intensa do solo, tanto a P1 quanto a P2 apresentam uma dinâmica favorável para o acúmulo de matéria orgânica, composta

por raízes e biomassa aérea em decomposição. Este que é um processo importante para a formação e manutenção dos estoques de carbono no solo, especialmente nas camadas mais superficiais, sendo que a ausência de distúrbios frequentes no solo contribui para preservar a estrutura física e os estoques de carbono, tornando essas áreas mais eficientes no sequestro de CO₂ (carbono), em comparação a sistemas agrícolas intensivos (Segnini et al., 2019).

O acúmulo de matéria orgânica é um indicador direto da qualidade do solo, sendo influenciado pelas práticas de manejo adotadas. Segundo Favoretto et al. (2008), o teor de carbono no solo é essencial para avaliar o impacto do manejo sobre a sustentabilidade dos ecossistemas. Em áreas como as pastagens manejadas, a combinação de baixa perturbação do solo com o aporte contínuo de resíduos orgânicos forma uma base estável para o acúmulo de carbono a longo prazo, melhorando a fertilidade e a resiliência do solo. No contexto do Cerrado, a adoção de pastagens de braquiária é uma alternativa eficaz para incrementar os estoques de carbono no solo em comparação ao solo exposto. As pastagens de brachiaria apresentam resultados que, em muitos casos, superam os sistemas agrícolas convencionais, devido à sua capacidade de produzir grande quantidade de biomassa radicular, que contribui para o sequestro de carbono e a melhoria da estrutura do solo. Tanto a P1 quanto a P2, ao serem manejadas com práticas conservacionistas e espécies adaptadas como a braquiária, desempenham um papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas com o sequestro de CO₂ atmosférico, além de promoverem a sustentabilidade no uso da terra (Bayer et al., 2011).

Dessa forma P1 e P2, não apenas evidenciam o potencial do manejo sustentável para a melhoria da qualidade do solo, mas também reforçam a importância de adotar práticas que maximizem o sequestro de carbono e a preservação dos recursos naturais, especialmente em ecossistemas sensíveis como o Cerrado.

5.2 – Mapas de padrões de variabilidade espacial de fertilidade do solo e estoque de carbono no solo

A Tabela 3 apresenta os parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais para os atributos químicos do solo analisados neste estudo. Esses parâmetros são essenciais para a modelagem geoestatística, pois descrevem a estrutura da dependência espacial de cada variável. Todos os atributos foram ajustados utilizando o modelo esférico, o que é comum em estudos

de variabilidade de solo devido à sua boa capacidade de representar comportamentos espaciais típicos (GOMES et al., 2007). Os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar ($C_0 + C_1$) indicam a proporção de variabilidade aleatória em relação à variabilidade total. Observa-se que todos os atributos apresentaram coeficientes de dependência espacial ($C_1 / (C_0 + C_1)$) superiores a 80%, o que revela forte estrutura espacial para os dados, permitindo a interpolação por krigagem com alto grau de confiança. Os alcances variaram entre 95 m e 125 m, indicando a distância média a partir da qual os dados deixam de estar espacialmente correlacionados. Já os valores de R^2 , todos acima de 0,87, indicam um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Esses resultados reforçam a consistência dos semivariogramas utilizados na construção dos mapas de fertilidade e estoque de carbono do solo.

Tabela 3. Parâmetros ajustados dos semivariogramas experimentais para os atributos do solo.

Atributo	Modelo	C_0 (Efeito Pepita)	$C_0 + C_1$ (Patamar)	Alcance (m)	$C_1 / (C_0 + C_1)$ (%)	R^2
Estoque de Carbono (t/ha)	Esférico	0,22	1,30	110	83,1	0,89
pH (CaCl₂)	Esférico	0,03	0,27	95	88,9	0,91
Fósforo (mg dm⁻³)	Esférico	0,70	6,00	100	88,3	0,87
Saturação por bases (V%)	Esférico	28,0	180,0	125	84,4	0,90

CTC	(cmolc	Esférico	0,08	0,48	105	83,3	0,9
dm⁻³)							2

Com base na interpolação dos dados obtidos em cada ponto amostral da área de estudo, foram gerados mapas de padrão espacial para cada atributo do solo analisado. Utilizou-se a krigagem ordinária (KO) como método de interpolação, permitindo estimar valores em locais não amostrados e, assim, representar a variabilidade espacial das propriedades do solo. Inicialmente, foram elaborados cinco mapas interpolados: quatro referentes às propriedades químicas do solo — pH (CaCl₂), fósforo (P), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) — e um mapa adicional para o estoque de carbono no solo. Esses mapas formam a base para a posterior análise integrada e a definição das zonas de manejo (Figura 11).

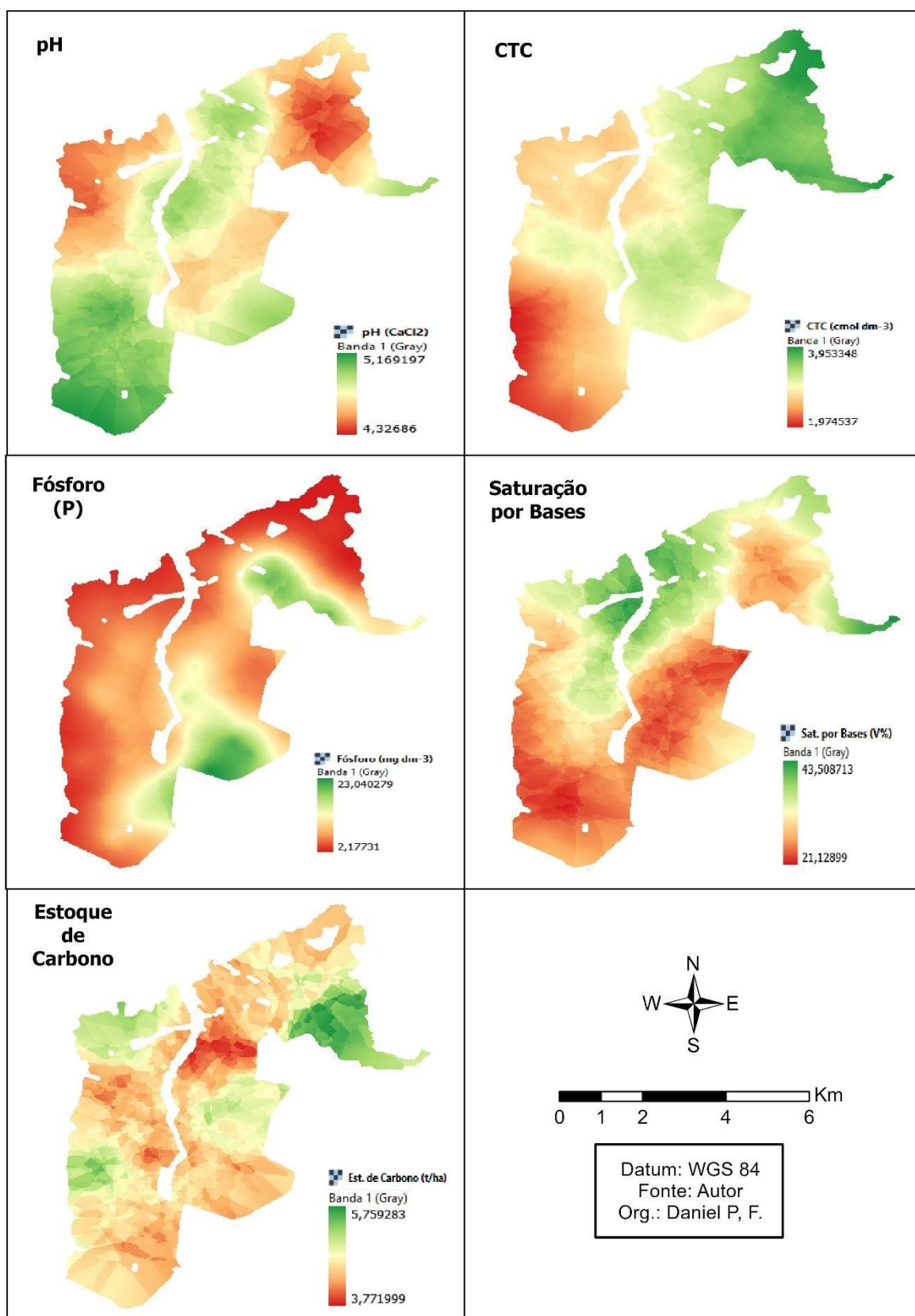


Figura 11. Mapas interpolados resultados da krigagem do plugin smart-map: I - pH (CaCl₂); II - capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³); III - fósforo (mg dm⁻³); IV - saturação por bases (V%) e V - estoque de carbono (t há⁻¹), sendo cada mapa em dados matriciais (rasters).

A aplicação da lógica fuzzy para normalizar os valores dos cinco mapas interpolados (pH, capacidade de troca de cátions, fósforo, saturação por bases e estoque de carbono no solo), é essencial para uma análise integrada (Figura 12). De acordo com Souza et al. (2010) converter os dados de cada mapa para uma escala comum de zero (mínimo) a um (máximo), permitindo uma interpretação mais coerente dos resultados.

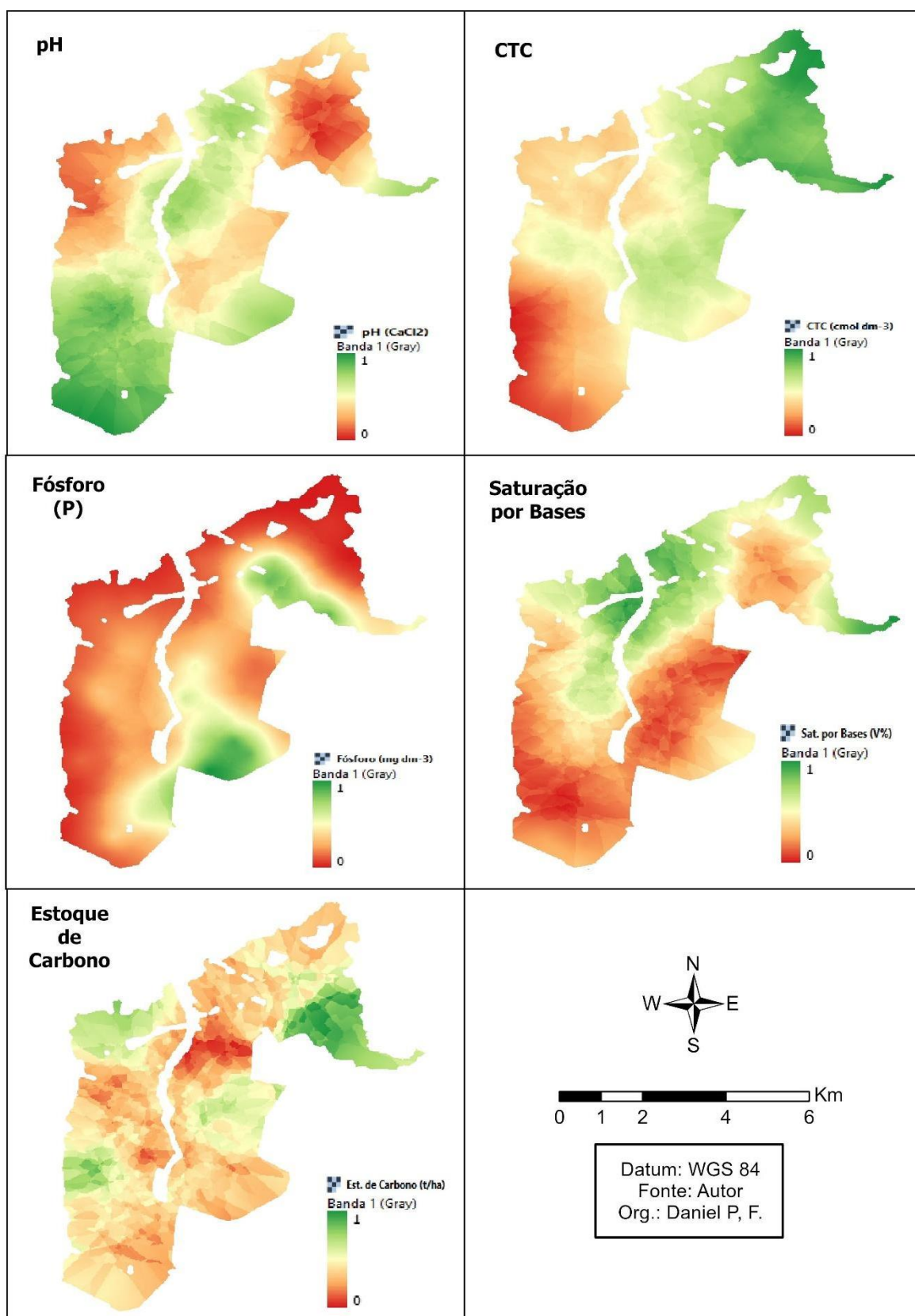


Figura 12. Mapas interpolados e nivelados: I - pH (CaCl_2); II - capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); III - fósforo (mg dm^{-3}); IV - saturação por bases (V%) e V - estoque de carbono no solo (t ha^{-1}), após aplicação da lógica *fuzzy*.

5.2.1 – Mapa de Sobreposição da Fertilidade do Solo

Os quatro indicadores de fertilidade do solo apresentados anteriormente - pH (CaCl₂), capacidade de troca de cátions (CTC, cmolc dm⁻³), Fósforo (mg dm⁻³) e Saturação por Bases (V%), foram combinados para gerar um único mapa integrado de fertilidade do solo (Figura 13). Em seguida, esse mapa foi reclassificado em cinco categorias (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto), criando assim as zonas de manejo no mapa de fertilidade do solo. Essa reclassificação permitiu quantificar a distribuição da fertilidade em toda a área de estudo, expressando os resultados em hectares para cada uma das classes das zonas de manejo (Tabela 4).

Com os dados analisados neste projeto, foi possível notar que o percentual do mapa sobreposto de teores de Fertilidade do Solo, de toda a área de estudo (2.972,42 ha), vemos que sua maior parte está classificado como “Baixo”, tendo 41% da área total com 1.233,07 hectares. Enquanto a menor área é a de classe “Muito Alto”, com 1% de área e tendo apenas 21,57 hectares, mostrando assim os baixos níveis de fertilidade do solo presentes no local de estudo (Figura 13).

Tabela 4. Classes de fertilidade do solo em todo o local de estudo, na profundidade de 0 a 0,20 m, com a sua área em hectares.

Classificação	Área (ha)
1 - Muito Baixo	519,64
2 - Baixo	1.233,07
3 - Médio	952,58
4 - Alto	245,89
5 - Muito Alto	21,57

Ao comparar o mapa sobreposto das Classes de Fertilidade do solo com os diferentes tipos de Uso do Solo na área de estudo, observa-se que a pastagem policultiva P2 apresenta a maior porcentagem de área classificada com os níveis mais altos de fertilidade, sendo respectivamente 29% "Alto" e 5% "Muito Alto", conforme ilustrado na Figura 13. Esse resultado sugere que o tipo de manejo adotado nessa área desempenha um papel fundamental

na qualidade do solo. De acordo com Favoretto et al. (2008), os teores de fertilidade do solo são essenciais para avaliar os impactos das práticas de manejo e sua influência na manutenção da qualidade do solo.

A distribuição das classificações de fertilidade pode ser observada mais detalhadamente nas imagens a seguir. No uso do solo destinado à Integração Pecuária-Floresta (IPF), 58% da área foi classificada como "Médio" (Figura 13). Essa informação é relevante para a definição de estratégias de manejo, pois permite otimizar a produtividade agrícola e pecuária ao compreender melhor a fertilidade do solo nesse tipo de uso.

Já na área destinada à Silvicultura, mais especificamente à Monocultura de Eucalipto (EM), observa-se que 50% da região possui fertilidade classificada como "Baixo" (Figura 13). Esse dado indica que metade da área apresenta limitações na disponibilidade de nutrientes, o que pode comprometer o crescimento e o desenvolvimento adequado das árvores. Assim, torna-se necessário adotar práticas de correção do solo, como a adubação e a calagem, para melhorar as condições químicas e físicas do solo e garantir maior sustentabilidade para a cultura do eucalipto.

Por outro lado, na Pastagem monocultura P1, a situação é ainda mais preocupante, uma vez que 58% da área apresenta fertilidade classificada como "Muito Baixa" (Figura 13). Esse cenário aponta para uma degradação significativa do solo, exigindo intervenções urgentes, como a reposição de nutrientes e melhorias no manejo, a fim de reverter o esgotamento da fertilidade e possibilitar um uso mais produtivo da terra.

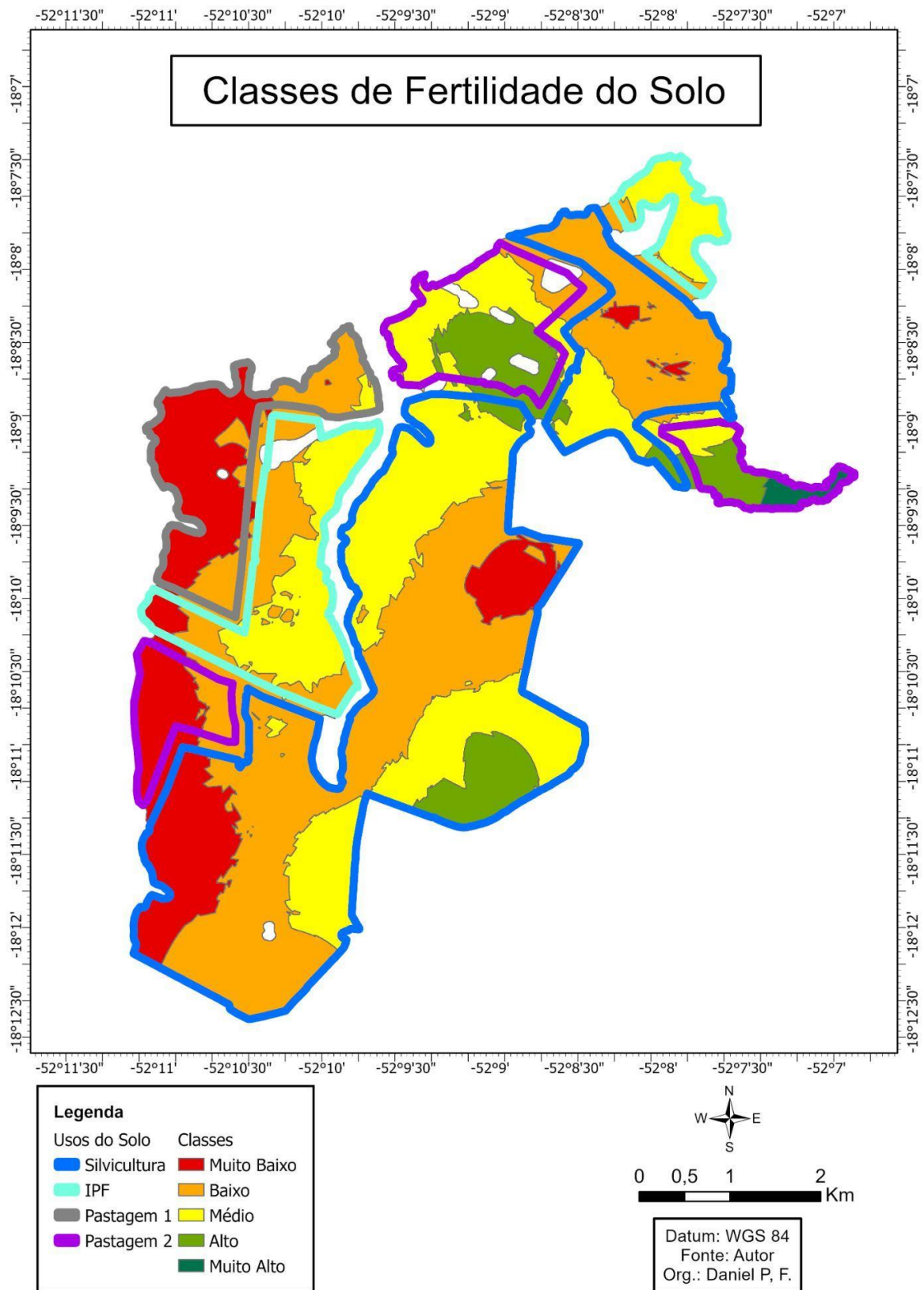


Figura 13. Mapa das zonas de manejo de fertilidade do solo de acordo com cada tipo de uso do solo, gerado a partir da sobreposição dos teores de fertilidade nivelados; I: pH (CaCl_2); II: Capacidade de Troca de Cátions (cmolc dm^{-3}); III: Fósforo (mg dm^{-3}); IV: Saturação por Bases

(V%) e reclassificados em 5 classes iguais.

A baixa fertilidade observada em áreas como P1, pode ser atribuída à ausência de manejo adequado, resultando na degradação progressiva dos nutrientes disponíveis no solo. A falta de práticas corretivas, como a adubação ou a reposição de cátions básicos (cálcio e magnésio), intensifica o problema, especialmente em solos tropicais sujeitos à lixiviação e acidez. Segundo Moreira e Siqueira (2006), solos que não recebem manejo adequado apresentam severas limitações nutricionais devido à contínua exportação de biomassa sem reposição de nutrientes essenciais. Além disso, Raij (2011) destaca que a acidez excessiva do solo reduz sua fertilidade ao imobilizar o fósforo em formas insolúveis e ao provocar a perda de cátions básicos, prejudicando a absorção de nutrientes pelas plantas.

Diante desse cenário, a adoção de práticas de manejo equilibradas é essencial para a recuperação e manutenção da fertilidade do solo. Conforme sugerido por Malavolta (2006), estratégias que integram o acúmulo de matéria orgânica com a reposição adequada de nutrientes são fundamentais para garantir a sustentabilidade do solo a longo prazo. Essas práticas não apenas melhoram a produtividade agrícola e pecuária, mas também contribuem para a conservação ambiental e a manutenção da qualidade dos solos ao longo do tempo.

5.2.2 - Estoque de Carbono no Solo

Comparando os dados de Estoque de Carbono no Solo com os mostrados anteriormente de Fertilidades, grande parte de todo o EC de nossa área de estudo encontra-se em “Médio”, 49% de toda a área em hectares (Tabela 5), mostrando assim uma distribuição mais igualitária em toda a nossa área de estudo.

Tabela 5. Classes de estoque de carbono no solo em todo o local de estudo, na profundidade de 0 a 0,20 m, com a sua área em hectares.

Classificação	Área (ha)
1 - Muito Baixo	162,11
2 - Baixo	1.238,25
3 - Médio	1.031,18
4 - Alto	368,92
5 - Muito Alto	171,09

Diferente do mapa de fertilidade do solo, que foi elaborado por meio da sobreposição de diferentes variáveis, o mapa de Estoque de Carbono no solo foi gerado a partir da interpolação dos dados coletados. Após essa etapa, foi aplicada a lógica *fuzzy* para nivelar os valores e garantir a padronização das variáveis, permitindo uma análise mais coerente (Figura 14). Em seguida, foi realizada a reclassificação dos dados em cinco classes, criando assim as zonas de manejo do mapa de estoque de carbono no solo.

A categorização seguiu dividindo os valores de maneira igual, usando como exemplo o modelo proposto por Raij et al. (1997), que estabelece cinco classes para avaliar a qualidade e a fragilidade do solo: 1 - Muito Baixa, 2 - Baixa, 3 - Média, 4 - Alta e 5 - Muito Alta. Esse processo possibilitou a criação do mapa de zonas de manejo do estoque de carbono no solo, representando de forma especializada a distribuição dos diferentes níveis de carbono na área de estudo (Figura 14).

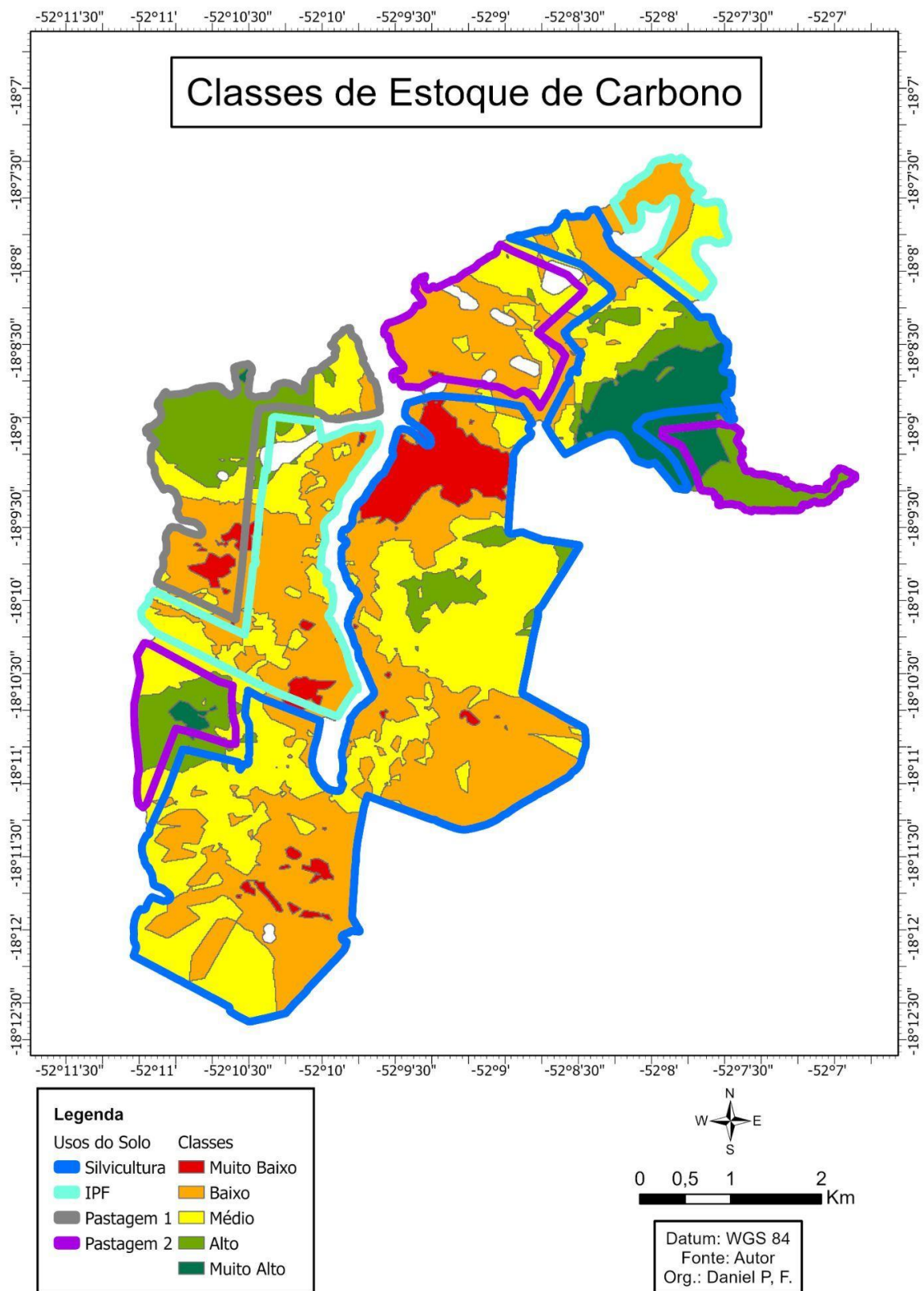


Figura 14. Mapa das zonas de manejo do estoque de carbono no solo com 5 classes, gerado a partir da reclassificação do mapa nivelado de estoque de carbono no solo para cada tipo de uso do solo.

Ao analisar os diferentes tipos de uso do solo e o estoque de carbono presente em cada um, observou-se que, na pastagem monocultura P1, 40% da área é classificada com estoque de carbono como "Alto", enquanto apenas 6% da área apresenta classificação "Muito Baixo" (Figura 14). Esse dado indica que a P1 possui um elevado potencial de sequestro de carbono, o que pode estar associado a práticas de manejo mais eficazes para o aumento do armazenamento de carbono no solo. Estudos apontam que áreas de pastagem manejadas adequadamente podem contribuir para o acúmulo de matéria orgânica e melhorar a retenção de carbono no solo (SOUZA et al., 2019).

Na pastagem policultiva P2, observa-se que 27% da área é classificada como "Alto" em relação ao estoque de carbono, enquanto que 35% apresenta classificação "Baixo" (Figura 14). Esse resultado sugere que, embora a P2 tenha um estoque de carbono razoavelmente elevado, a predominância da categoria inferior indica possíveis variações nas práticas de manejo ou nas características do solo que influenciam a capacidade de armazenamento de carbono. De acordo com Carvalho et al. (2017), a disponibilidade de matéria orgânica no solo e a dinâmica do carbono são diretamente impactadas pelo tipo de manejo adotado e pela qualidade da vegetação existente.

Na área de Integração Pecuária Floresta (IPF), verificou-se que 59% da região apresenta classificação "Baixo", enquanto 35% foram classificadas como "Médio" (Figura 14). Esses dados indicam que, embora essa prática combine pecuária e floresta, seu potencial de sequestro de carbono ainda se encontra em níveis intermediários e baixo, o que pode estar relacionado ao estágio de desenvolvimento da vegetação e à densidade da cobertura florestal. Segundo Costa et al. (2020), os sistemas de integração apresentam um potencial variável de fixação de carbono, dependendo da interação entre os componentes arbóreo, pastagem e solo, além das práticas de manejo empregadas.

Na Silvicultura de Eucalipto Monocultura (EM), 41% da área apresenta classificação "Baixo" em relação ao estoque de carbono e 39% como "Médio" (Figura 14). Esse dado sugere que, apesar do eucalipto possuir um potencial de sequestro de carbono relativamente alto devido ao seu rápido crescimento, a maior parte da área estudada apresenta valores baixos, possivelmente em função do ciclo de corte e reposição das árvores. Conforme indicado por Silva et al. (2018), a dinâmica do carbono em sistemas de silvicultura pode ser influenciada pelo manejo da biomassa, pela rotação das plantações e pelas condições do solo, impactando diretamente a retenção de carbono ao longo do tempo.

5.2.3 - Correlação entre estoque de carbono no solo e fertilidade do solo

A correlação de Pearson entre a fertilidade do solo e o estoque de carbono foi calculada para os diferentes tipos de manejo analisados: IPF (Integração pecuária floresta), silvicultura, pastagem monocultura P1 e pastagem policultiva P2. Os resultados indicaram diferentes intensidades e direções de correlação entre as variáveis.

No manejo IPF, o coeficiente de correlação de Pearson foi de $-0,21$, indicando uma correlação negativa fraca entre fertilidade e estoque de carbono. No entanto, o valor de p igual a $0,2710$ está acima do nível de significância de $0,05$, sugerindo que essa associação não é estatisticamente significativa e pode ter ocorrido ao acaso (COHEN, 1988).

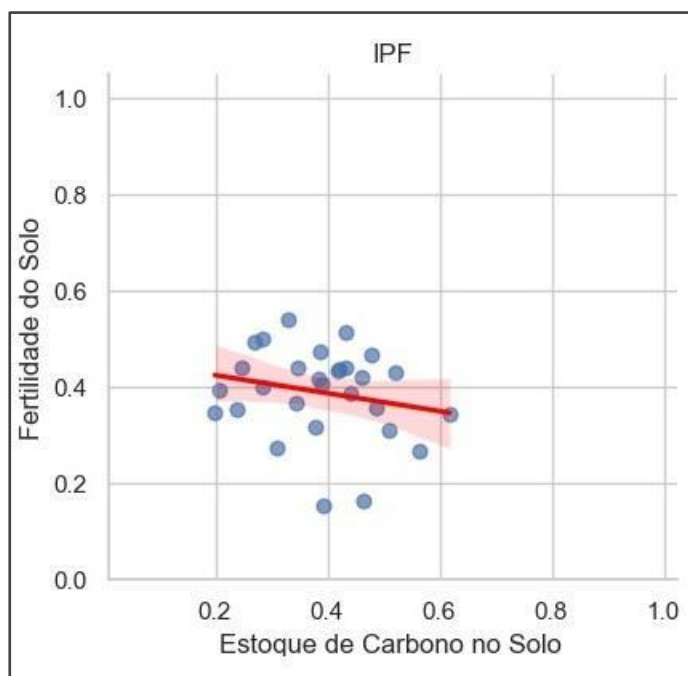


Figura 15. Correlação entre todos os pontos de coleta no uso do solo da área de integração pecuária-floresta.

Para o uso do solo classificado como Silvicultura, observou-se uma correlação negativa moderada, com $r = -0,32$. Diferentemente dos demais manejos, o valor- p foi de $0,0017$, abaixo do limiar de significância de $0,05$, indicando que a correlação é estatisticamente significativa. Isso sugere que, neste tipo de manejo, existe uma associação linear significativa entre os teores de fertilidade e os estoques de carbono no solo (Fisher, 1992).

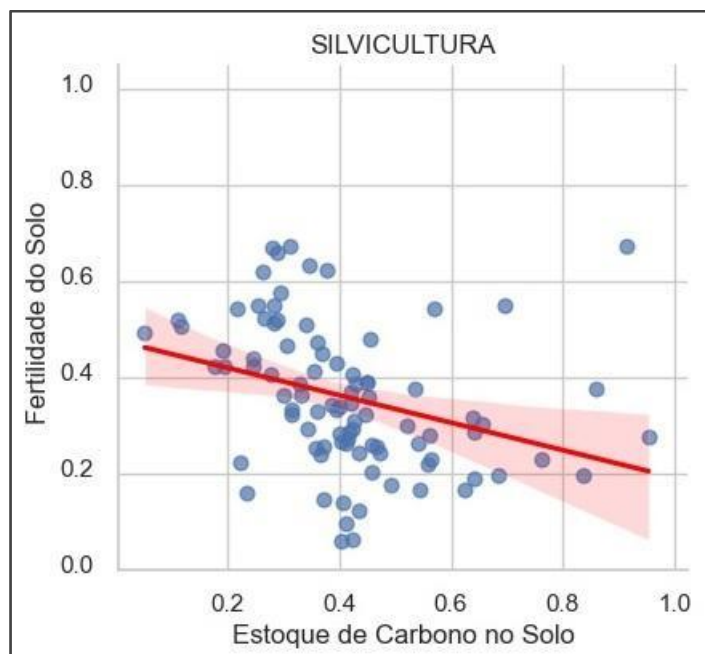


Figura 16. Correlação entre todos os pontos de coleta no uso do solo da área de silvicultura.

Em P1, o coeficiente de correlação foi de $-0,05$, revelando uma correlação praticamente nula entre as variáveis. O valor-p de $0,8301$ reforça a ausência de significância estatística, o que indica que não há evidência de uma relação linear entre fertilidade e carbono neste tipo de uso (Siegel & Castellan, 1988).

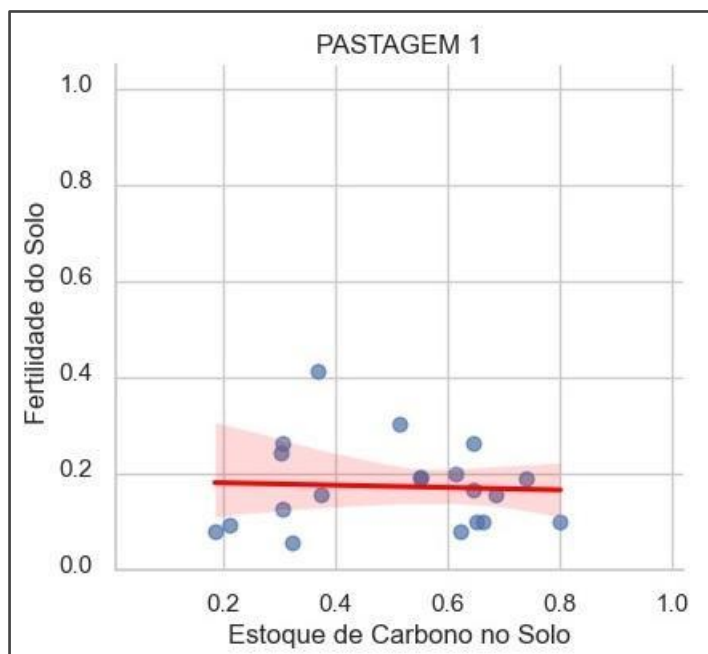


Figura 17. Correlação entre todos os pontos de coleta no uso do solo da área de pastagem monocultura.

Por fim, na P2, a correlação foi de -0,20, também negativa e fraca. Com um valor-p de 0,3171, a relação entre as variáveis também não se mostrou estatisticamente significativa, não permitindo inferências confiáveis sobre uma possível associação entre as variáveis analisadas (Tabachnick & Fidell, 2007).

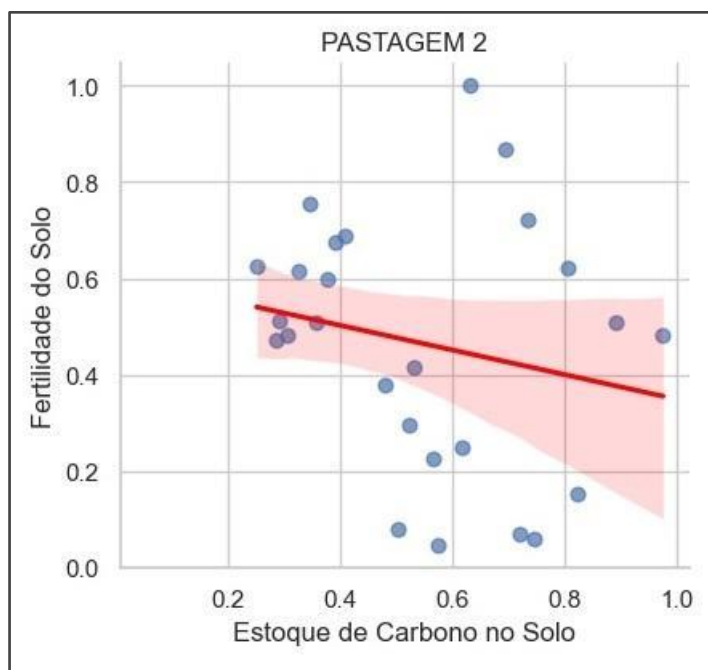


Figura 18. Correlação entre todos os pontos de coleta no uso do solo da área de pastagem policultiva.

Esses resultados demonstram que, apesar da presença de correlações negativas em todos os tipos de manejo, apenas a classe Silvicultura apresentou uma associação estatisticamente significativa entre fertilidade do solo e estoque de carbono. Ainda assim, é importante destacar que a correlação mede apenas a associação linear entre variáveis, não implicando necessariamente uma relação causal (Cohen, 1988; Fisher, 1992; Siegel & Castellan, 1988; Tabachnick & Fidell, 2007).

5.3 – Relações entre o mapa de fertilidade do solo e o mapa de estoque de carbono no solo

A análise dos mapas que representam a fertilidade do solo e o estoque de carbono no solo evidenciam possíveis correlações, reforçando a interdependência das características do solo na determinação de sua qualidade e funcionalidade (Figura 19). Apesar das variações discutidas anteriormente no estudo, é notável que os padrões apresentados pelos diferentes

mapas se assemelham em vários aspectos. Um exemplo claro é que as áreas com as classificações mais elevadas no mapa de estoque de carbono no solo, frequentemente correspondem às regiões com altos valores no mapa de fertilidade do solo, sugerindo que locais com propriedades físicas e químicas favoráveis também tendem a possuir maior fertilidade e estoques de carbono mais elevados (DONAGEMA et al., 2011).

Além disso, Donagema, Santos e Montanari (2011), seguem dizendo que observa-se uma forte consistência nos pontos com as menores classificações. As regiões menos favoráveis em termos de propriedades físicas, como baixa capacidade de retenção de água e maior compactação do solo, coincidem com áreas de baixa fertilidade e menores estoques de carbono. Essa relação evidencia que as limitações em um parâmetro tendem a repercutir em outros, criando um padrão de vulnerabilidade ambiental (Figura 20). No mapa de pedologia, verifica-se que essas áreas de menor qualidade coincidem com a ocorrência de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, um solo que, devido às suas características, apresenta menor fertilidade natural e maior suscetibilidade à degradação, o que contribui diretamente para a redução da produtividade agrícola (SANTOS et al., 2018).

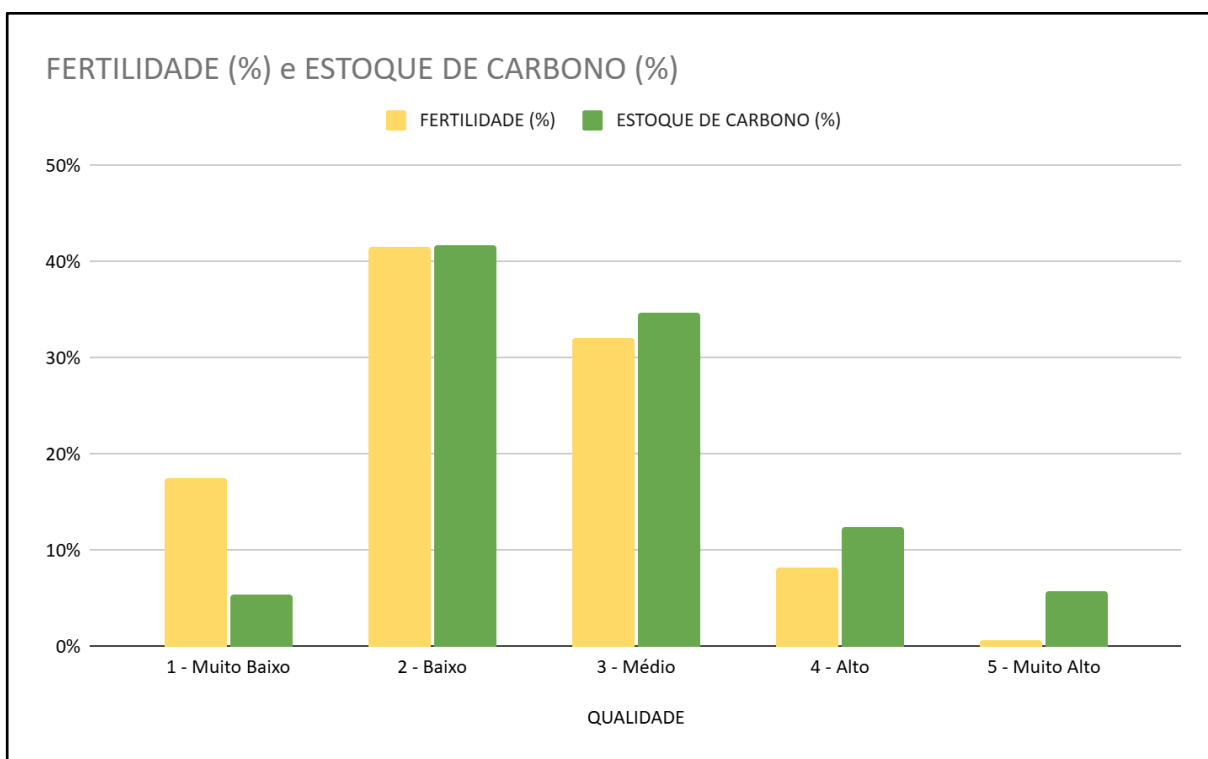


Figura 19. Gráfico comparativo da porcentagem das áreas em hectares da fertilidade do solo e estoque de carbono no solo.

Salton, Mielniczuk e Bayer (2010) enfatizam que essas semelhanças apontam para a necessidade de um manejo integrado, onde estratégias que melhorem as condições químicas e físicas do solo também contribuam para aumentar os estoques de carbono e a fertilidade. O alinhamento entre os mapas destaca a relevância de se analisar esses fatores de forma conjunta, permitindo uma abordagem mais precisa e eficiente na identificação de áreas prioritárias para intervenções, seja para mitigar perdas de carbono, corrigir deficiências de fertilidade ou melhorar propriedades físicas. Em suma, os padrões identificados reforçam a visão de que a saúde do solo deve ser abordada de maneira holística, considerando suas múltiplas dimensões interconectadas (Figura 20).

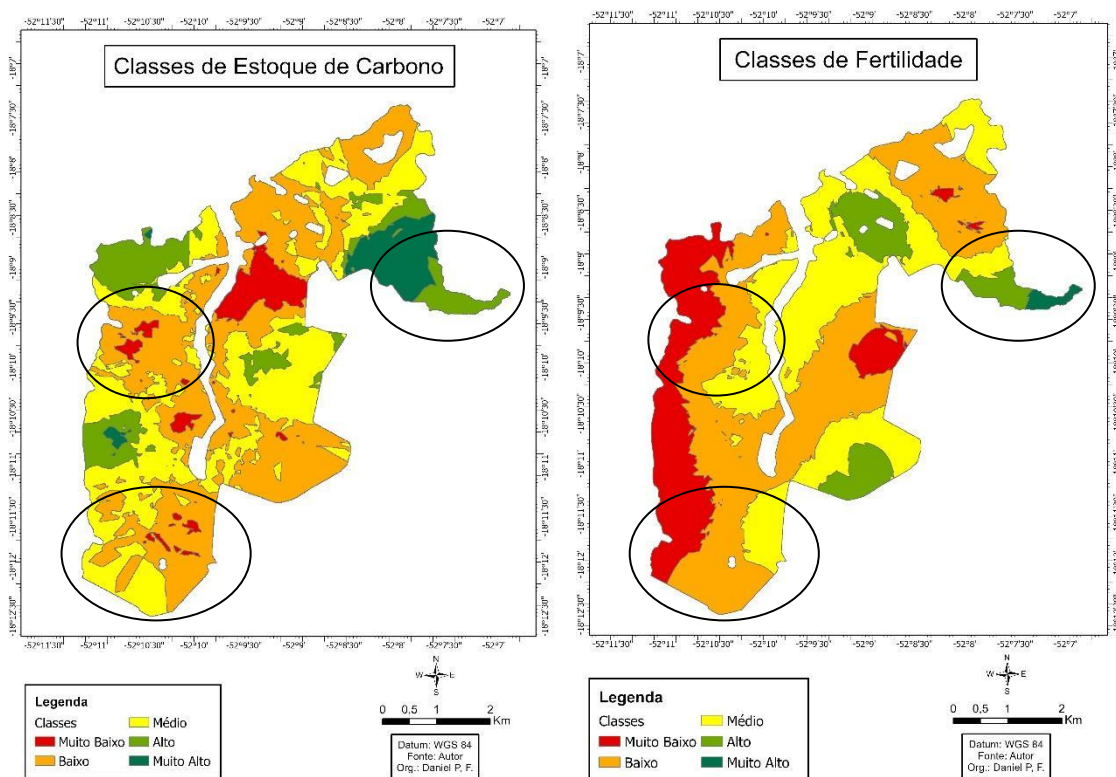


Figura 20. Pontos comparativos, entre o mapa de estoque de carbono no solo e o mapa de sobreposição com os teores de fertilidade no solo.

6. CONCLUSÃO

Por meio da aplicação de técnicas de agricultura de precisão e geoprocessamento, foram gerados mapas reclassificados que evidenciam as diferenças espaciais nas classes de manejo do

solo, levando em conta as propriedades químicas da fertilidade do solo e o estoque de carbono entre os diferentes sistemas de uso do solo avaliados. A análise integrada das propriedades químicas e do estoque de carbono possibilitou a criação de zonas de manejo específicas para cada variável analisada.

Com base nas zonas de manejo determinadas, é recomendado um manejo mais intensivo para as áreas com menor qualidade de solo, com maior aplicação de calcário e fósforo, a fim de melhorar a fertilidade do solo, elevar o pH do solo e conseqüentemente podendo contribuir para aumentar o estoque de carbono no solo. Para as zonas de maior qualidade de solo, o manejo pode ser mais econômico, com a redução da aplicação de insumos, visando a maior eficiência no uso de recursos e a sustentabilidade das práticas agrícolas.

A análise estatística da correlação entre fertilidade do solo e estoque de carbono indicou que, para a maioria dos usos do solo analisados, a relação entre as variáveis foi fraca e não estatisticamente significativa. Apenas no manejo de Silvicultura observou-se uma correlação negativa moderada e estatisticamente significativa, sugerindo uma possível associação linear entre as variáveis. Ainda assim, é importante destacar que a correlação indica apenas uma relação estatística, não implicando necessariamente uma relação causal entre as variáveis analisadas.

Aplicação de técnicas agrícolas, como a adubação em taxa variável com calcário e fósforo, pode resultar na redução do custo com a adubação de fósforo e na aplicação de calcário para correção da acidez do solo, o que, por sua vez, contribuiu para a redução das emissões de gases de efeito estufa, provenientes da aplicação de calcário. Esses resultados demonstram o potencial das ferramentas geoespaciais e das técnicas de agricultura de precisão para promover ganhos econômicos e ambientais no manejo de pastagens e áreas agrícolas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. P. L. et al. **Geotecnologias aplicadas à delimitação de zonas de manejo**. Revista Geográfica Acadêmica, v. 14, n. 1, p. 77-89, 2020.

AGUIAR, A. P. D. et al. **Agricultura de precisão: conceitos e aplicações**. São Paulo: Embrapa Meio Ambiente, 2020.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. Rome: FAO, 2012. (ESA working paper no 12-03).

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2005. 165p.

BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. **Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**. Planaltina: Embrapa Cerrados; Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 52p.

BASSO, B.; ANTLE, J. **Digital agriculture to design sustainable agricultural systems**. Nature Sustainability, v. 3, p. 254-256, 2020. DOI: 10.1038/s41893-020-0510-0.

BAYER, C. et al. **Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista**. In: KLAUBERG FILHO, O. et al. (Ed.). Tópicos em ciência do solo, v. 7. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-118.

BEM, T. P. **Agricultura sustentável e resiliência climática: uma abordagem integrada**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

BERNARDI, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Embrapa Instrumentação, 2014. 66 p.

BESSANT, J; PAVITT, K. **Gestão da Inovação**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BHATTI, AU, MULLA, DJ, & FRAZIER, BE (2011). **Estimativa de propriedades do solo e produtividade de trigo em colinas erodidas complexas usando geoestatística e imagens de mapeamento temático**. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, 37 (3), 181–191. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90080-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90080-P).

BIAU, D. J. **The Mann-Whitney U test is not just a test of medians: An assessment of the ability of the U test to detect differences between groups of non-normal distributions**. *Statistics in Medicine*, v. 29, n. 20, p. 2265-2277, 2010.

BITTENCOURT, B. A; SALLES, A. C; DANIEL, V. M; BARCELLOS, M. D. Inovação no agronegócio: um estudo sobre os tipos de inovação presentes na cadeia produtiva da ovinocultura no Rio Grande do Sul. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 1, n. 3, p. 103-128, set-out, 2016.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**. London, v.26, n.2, p.211-252, 1964.

BRITO, R. S. **Monitoramento agrícola por satélites: avanços e desafios**. Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, v. 9, p. 88-95, 2023.

BRUNNER, J. J. **Educação no encontro com as novas tecnologias**. In: Tedesco, J. C. (Org.). *Educação e novas tecnologias: esperança ou incerteza?* São Paulo: Cortez, 2014.

BRUINSMA, J. **World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective**. Rome: FAO; London: Earthscan, 2003.
Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-y4252e.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping, of soil properties. II. Block kriging. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, p.333-341, 1980.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CALOU, V. **Utilização de drones aplicados à Agricultura de Precisão**. 2017.

CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, J. L. N.; et al. **Dinâmica do carbono em solos manejados sob diferentes sistemas de uso**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 41, n. 2, p. 1-10, 2017.

CARVALHO, M. M. L. A. **A identidade cultural e sua [re]significação: o bordado filé de Alagoas na trama da indicação geográfica**. 2017. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPE_85612229106498efa064e392c657a17c. Acesso em: 10 abr. 2025.

CHERUBIN, M. R.; DAMIAN, J. M.; TAVARES, T. R.; TREVISAN, R. G.; COLAÇO, A. F.; EITELWEIN, M. T.; MARTELLO, M.; INAMASU, R. Y.; PIAS, O. H. D. C.; MOLIN, J. P. **Precision Agriculture in Brazil: The Trajectory of 25 Years of Scientific Research**. Agriculture, v. 12, n. 11, p. 1882, 2022.

CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 1997.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

CORREA, J. A. B. L. Faria. Considerações sobre o tratamento de segredo de negócio – os efeitos da nova Lei de Propriedade Industrial. **Revista da abpi**, Associação Brasileira da Propriedade Intelectual. Rio de Janeiro, n. 27, p. 31-38, mar.-abr., 2017.

COSTA, F. S.; et al. **Sequestro de carbono em sistemas integrados de produção agropecuária**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 55, n. 3, p. 1-12, 2020.

COSTA, G. H. et al. **Conservação de ecossistemas naturais em paisagens agrícolas: políticas e práticas.** Revista de Política Agrícola, v. 29, n. 3, p. 112-125, 2020.

CUNHA, A. B.; MONTEIRO, C. D. **Uso de geotecnologias no monitoramento agrícola.** Revista Brasileira de Agricultura Sustentável, v. 11, n. 2, p. 45-58, 2021.

CUNHA, E. R.; MONTEIRO, J. A. F. **Uso de drones na agricultura de precisão.** Revista Brasileira de Agricultura Sustentável, v. 10, n. 2, p. 78-90, 2021. DOI: 10.1590/1984-7033.

DIEZ, D. M.; BARR, C. D.; ÇETINKAYA-RUNDEL, M. **Introductory Statistics with Randomization and Simulation.** OpenIntro, 2019.

DONAGEMA, G. K.; SANTOS, H. G.; MONTANARI, R. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

EMBRAPA. **Reconhecimento facial pode baratear exportações de gado.** 2021.

EMBRAPA. **Sistema faz contagem automática de plantas na lavoura por imagens de drones.** 2021.

ENGEL, J. F; BLACKWELL, R. D; MINIARD, P. W. **Comportamento do consumidor.** Rio de Janeiro: LTC. 2010.

Environmental Systems Research Institute – ESRI. **What is a geographic information system (GIS)?** Redlands, ESRI, 2008.

FAO. **Recarbonization of Global Soils (RECSOIL): Enhancing soil health and climate action.** Rome: FAO, 2021.

FAO. **SOILFER: Mapping soils for resilient agri-food systems.** Rome: FAO, 2022.

FAO. **SOILCARE: Sustainable soil management in the Caribbean**. Rome: FAO, 2023.

FARIAS, P.R.L; NOCITI, L.A.S; BARBOSA, J.C; PERECIN, D. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.235-241, 2003.

FAVORETTO, C. M., Gonçalves, D., Milori, D. M. B. P., Rosa, J. A., Leite, W. C., Brinatti, A. M., & Saab, S. C. (2008). **Determination of humification degree of organic matter of an Oxisol and of its organic mineral fractions**. *Química Nova*, 31, 1994-1996. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800015>

FAVRIN, V. G. **As geotecnologias como instrumento de gestão territorial integrada e participativa**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FILIPINI, A. L. et al. **Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos e aplicações**. In: BASSOI, L. H. (Ed.) *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-100.

FILIPINI, A. L. et al. **Geotecnologias aplicadas à agricultura de precisão: integração de dados de solos, SIG e lógica fuzzy para delineamento de zonas de manejo**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 418–425, 2014.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. 12. ed. New York: Hafner Press, 1992.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. 14. ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1992.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. **Precision Agriculture and food security**. *Science*, v. 327, p. 828-831, 2015.

GHOSH, P.; KUMPATLA, S. **GIS Applications in Agriculture**. In: A Review: The application of Remote Sensing, GIS and GPS in Precision Agriculture. 2022.

GODRONES ENGENHARIA. **Agricultura**. 2021.

GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010. DOI: 10.1126/science.1185383.

GOMES, N. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, M. S. **Adjustment of variograms for spatial continuity study of soil physical characteristics**. Irriga, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 92–107, 2007.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476p.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. **Conceitos básicos da Geoestatística**. In: Oliveira, R. P.; grego, C. R.; Brandao, Z. N. (org.). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, df: Embrapa, 2015. p. 41-62.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014, p.74-83.

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia; Departamento de Produção Mineral, 1988. 145p.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada**. UFU/FAMAT. Núcleo de estudos estatísticos e biométricos, 2001. 48p.

GURGEL, Angelo Costa; MANZATTO, Celso Vsiner; VICENTE, Luiz Eduardo; PEROSA, Bruno. **Agricultura de baixo carbono no Brasil: desafios para o crédito e monitoramento de emissões**. In: 61º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), 2023, Piracicaba. Anais [...]. Piracicaba: ESALQ/USP, 2023.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R.; DEKKERS, M. J. **The application of fuzzy c-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites**. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 26, n. 11–12, p. 885–891, 2001.

HARIDASAN, M. **Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils**. *Scientia Agricola*, v. 57, n. esp., p. 631–640, 2000.

HILL, T.; LEVIN, B.; SCHNEIDER, M. **Statistical Methods for the Social Sciences**. 5. ed. Boston: Pearson Education, 2013.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação (AR6): Mudança do Clima 2023**. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-doipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

ISAAKS, H.E.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANSEN, K; VELLEMA, S. **Agribusiness and society: Corporate responses to environmentalism, market opportunities and public regulation**. London: Zed Books Ltd. 2014.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2016.

LAL, R. **Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security**. *Science*, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LAL, R. **Managing soil carbon for climate change adaptation and mitigation**. *Geoderma*, v. 337, p. 1-10, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.034.

LANDIM, P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas. **TERRÆ DIDÁTICA**, v.2, n.1, p.19-33, 2006.

LI, S.; DRAGICEVIC, S.; ANTON, F.; SESTER, M.; WINTER, S.; COLTEKIN, A.; PETTIT, C.; JIANG, B.; HAWORTH, J.; STEIN, A.; CHENG, T. **Geospatial Big Data Handling Theory and Methods: A Review and Research Challenges**. arXiv, 2015.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 179-204, 2009. DOI: 10.1146/annurev.environ.041008.093740.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano ABC+: Estratégia para Agricultura de Baixa Emissão de Carbono 2020-2030**. Brasília: MAPA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano ABC+: Metas e Diretrizes para uma Agropecuária Sustentável**. Brasília: MAPA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relatório de Implementação do Plano ABC+**. Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MARTINS, F. R. **Análise de Dados para Ciências Ambientais: Aplicações e Métodos Estatísticos**. São Paulo: Ed. Atlas, 2012.

MASSETO, M.T. **Mediação Pedagógica e Tecnologias de Informação e Comunicação**. In: Moran J.M., Masetto M.T., Behrens M.A. (Org.). *Novas tecnologias e mediação pedagógica*. 21a Ed. Campinas (SP): Papirus, 2013.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, El Paso, v.58, p.1246-1266, 1963.

MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for the semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

MCBRATNEY, A. B.; DEGRUIJTER, J. J. **A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades**. *Journal of Soil Science*, v. 43, n. 1, p. 159–175, 1992.

MCKINNEY, Wes. **Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2018.

MENDONÇA R.A.M., BERNASCONI P., SANTOS R., Scaranello M. **Uso das Geotecnologias para Gestão Ambiental: Experiências na Amazônia Meridional 2011**. Disponível em:

<https://www.icv.org.br/drop/wp-content/uploads/2013/08/usodasgeocnologiasparagest%C3%A3oambiental.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2023.

MILORI, D. M. P. B.; SEGNINI, A.; DA SILVA, W. T. L.; POSADAS, A.; MARES, V.; QUIROZ, R.; MARTIN-NETO, L. **Emerging techniques for soil carbon measurements**. In: WOLLENBERG, E.; NIHART, A.; TAPIO-BISTRÖM, M.-L. e GRIEG-GRAN, M. (Ed.). *Climate change mitigation and agriculture*. London: Earthscan, 2011b. v.2, p.1-30.

MILORI, D.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZALEZ-PEREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. **Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy**. Soil Science Society of America Journal, v. 70, n. 1, p. 57-63, 2006.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão**. In: SANTOS, F. C.; BORÉM, A. (Orgs.). Tecnologia de produção agrícola. Viçosa: UFV, 2014. p. 189–210.

MONTANARI, R. et al. **Agricultura de precisão: amostragem do solo e recomendação de calagem e adubação**. Embrapa Solos, Circular Técnica, n. 14, 2012.

MONTEIRO, Leonardo de Souza; INAMASU, Ricardo Yukio. **Agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Jaguariúna: Embrapa Instrumentação, 2016. 318 p. ISBN 978-85-7035-607-6.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. John Wiley & Sons, 2012.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, INPE, 2019, 23p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.

MOURA, E. G. et al. **Patents on perphety of the Amazon rainforest**. Recents Patents on Food Nutrition & Agriculture, v. 1, p. 142-148, 2019a.

NASA. **Advances in Remote Sensing Technologies**. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2022. Disponível em: <https://www.nasa.gov/>. Acesso em: 29 jan. 2025.

NOVO, E. M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações**. São Paulo, Bucher, 2018. p363.

OLIVEIRA, R.P.; GREGO, C.R. Adoção da Agricultura de Precisão. In: OLIVEIRA, R.P.; GREGO, C.R.; BRANDÃO, Z.N. (Ed.). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p.19-28.

OPPONG, J.; NING, Z. H.; TWUMASI, Y.; et al. **The Integration of Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) in Managing Urban Ecosystems**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-3, p. 169–175, 2023.

OZAKI, V. Análise espacial da produtividade agrícola no Estado do Paraná: implicações para o seguro agrícola. **RESR**, Piracicaba, v.46, n.3, p.869-886, 2008.

PARANHOS FILHO, A. C.; MIOTO, C. L.; MARCATO JR, J.; CATALANI, T. G. **Geotecnologias em aplicações ambientais**. Campo Grande: UFMS, 2016.

PESQUISA FAPESP. Agricultura 4.0. Fazendas Conectadas. 2020. **Revista Pesquisa Fapesp**. São Paulo, ano 21, n. 287, 2020.

PIRES, L. F. et al. **Uso de geotecnologias aplicadas à agricultura de precisão: estado da arte e perspectivas**. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 47, n. 4, p. 409–417, 2017.

PIXFORCE. **Drones na Agricultura: tudo sobre a tecnologia que está mudando o setor**. 2020.

PRINGLE, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; TAYLOR, J. A. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using a yield monitor. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 1, p. 273-292, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00005-7).

QGIS. **Documentação oficial do QGIS 3.34: Análises raster e lógica fuzzy**. 2023. Disponível em:

https://docs.qgis.org/3.34/pt_BR/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html.
Acesso em: 14 fev. 2025.

RAIJ, B. van et al. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: Instituto Agronômico, 1997.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 2011.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e ampl. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 285 p.

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. **Analysis of the floristic composition of the Brazilian Cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetation of 376 areas**. *Edinburgh Journal of Botany*, v. 60, n. 1, p. 57–109, 2003.

RIBEIRO, Josiana Gonçalves; MARINHO, Douglas Yusuf; ESPINOSA, José Waldo, **Tecnologia de precisão**. 2018.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais (2ª edição)**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 35. Embrapa Territorial, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Campinas, SP. 2020.

TÔSTO, S. G. et al. **Geotecnologias e Geoinformação: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília - DF: Embrapa, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. **Teores e estoques de carbono e nitrogênio no solo em sistemas agropecuários do Mato Grosso do Sul**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1759-1773, 2010.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. **Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 52 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, 215).

SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 2019.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

SANTOS, J. A. G. **Efeitos do treinamento autógeno na atividade cerebral e sobre a ansiedade em indivíduos com altos níveis ansiogênicos**. 2018. Disponível em: https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/BRCRIS_282852a9a282f63ea9dd36706f3cbb3c. Acesso em: 10 abr. 2024.

SEGNINI, Aline et al. **Estoque de carbono e humificação do solo em pastagens sob diferentes níveis de intensificação no Brasil**. Scientia Agrícola, v. 76, p. 33-40, 2019.

SEGNINI, Aline et al. **Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil**. Scientia Agrícola, v. 76, p. 33-40, 2019.

SIEGEL, S.; CASTELLAN, N. J. **Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

SILVA, A. C.; et al. **Impacto da silvicultura no sequestro de carbono em diferentes tipos de solo**. Ciência Florestal, v. 28, n. 4, p. 1-15, 2018.

SILVA, A.F. **Geoestatística e sensoriamento remoto na classificação de imagens em áreas cultivadas com citrus**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 82p. 2011.

SILVA, Juliane Maíra Pedro; CAVICHIOLI, Fabio Alexandre. **O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo**. 2020.

Sisti, C. P. J.; Dos Santos, H. P.; Kohhann, R.; Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M. **Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil.** Soil & Tillage Research, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente.** Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. 214p.

SOUSA, L. M. et al. **Práticas agrícolas regenerativas e sequestro de carbono no solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, n. 2, p. e0150234, 2016.

SOUZA, C. M. et al. **Aplicação de geotecnologias na delimitação de zonas de manejo agrícola.** Revista Brasileira de Geoprocessamento, v. 19, n. 1, p. 12-25, 2022.

SOUZA, E. D.; et al. **Efeito do manejo de pastagens na dinâmica do carbono do solo.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 12, n. 5, p. 1-14, 2019.

SOUZA, E. F. et al. **Implementação de zonas de manejo e eficiência no uso de insumos agrícolas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 56, n. 4, p. 321-330, 2021.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M.; MONTANARI, R. **Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon.** Revista Ciência Agronômica, v. 41, n. 1, p. 1-9, 2010.

SUN, S.; XIONG, T. **Application of Remote Sensing Technology in Sustainable Urban Planning and Development.** Applied and Computational Engineering, v. 3, p. 283–288, 2023.

USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Robôs no campo: máquinas inteligentes ajudam produtores.** 2020.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics.** 5. ed. Boston: Pearson, 2007.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, p.45-94, 1985.

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. **Yieldgap analysis with local to global relevance: a review**. *Field Crops Research*, v. 143, p. 4-17, Mar. 2013. DOI:10.1016/j.fcr.2012.09.009.

VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P.; HUNT, J.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: prospects for further improvement. **Field Crops Research**, v. 164, p. 1-11, Aug. 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.04.018.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.

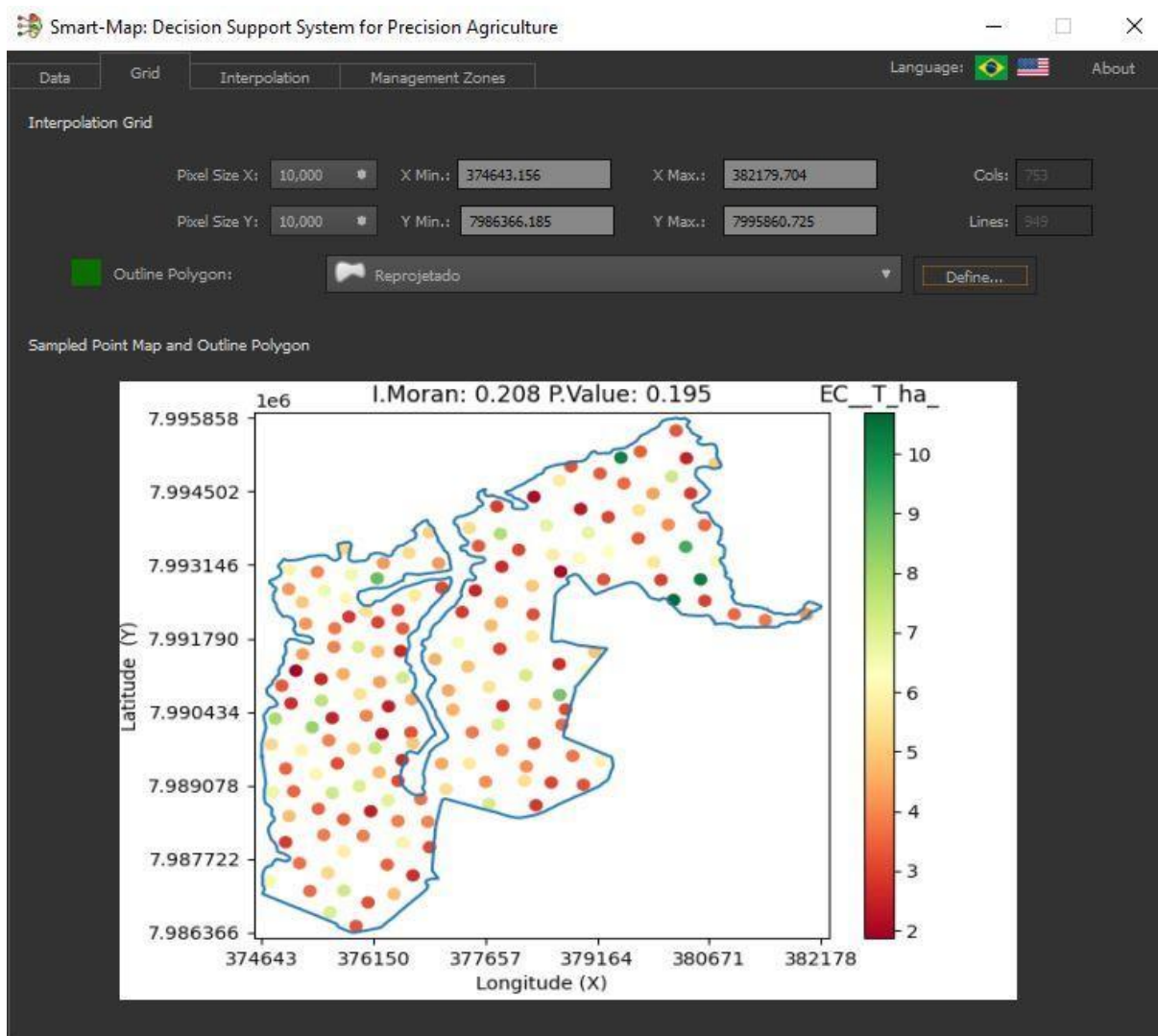
ZAMBON, I.; CECCHINI, M.; EGIDI, G.; SAPORITO, M. G.; COLANTONI, A. **Revolution 4.0: industry vs. agriculture in a future development for SMEs**. *Processes*, Basel, v. 7, n. 1, p. 36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7010036>.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)-Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2001.

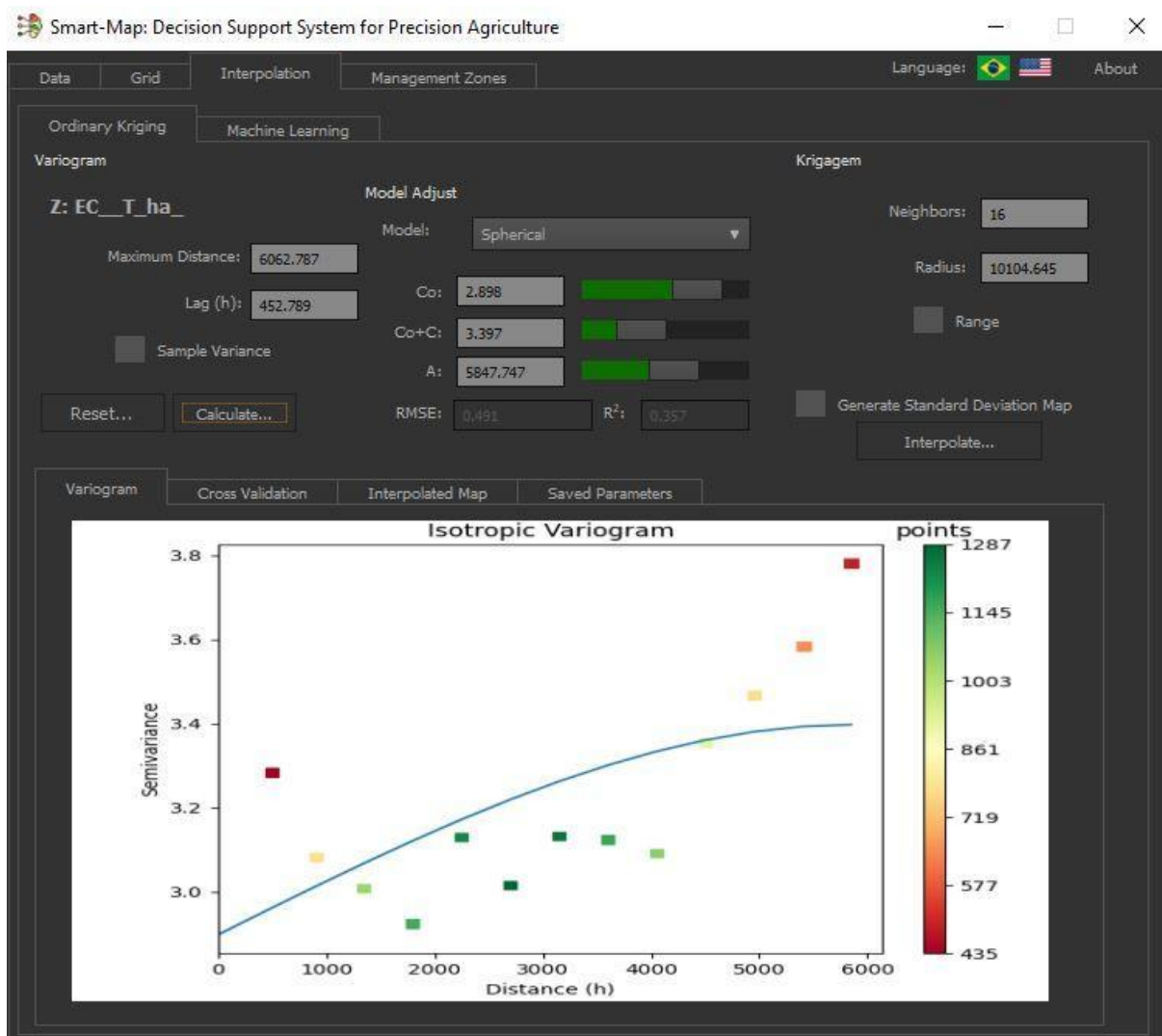
ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística aplicada à agricultura de precisão**. Botucatu: UNESP, 2001.

APÊNDICE A – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Estoque de Carbono no Solo na etapa de Grid Amostral



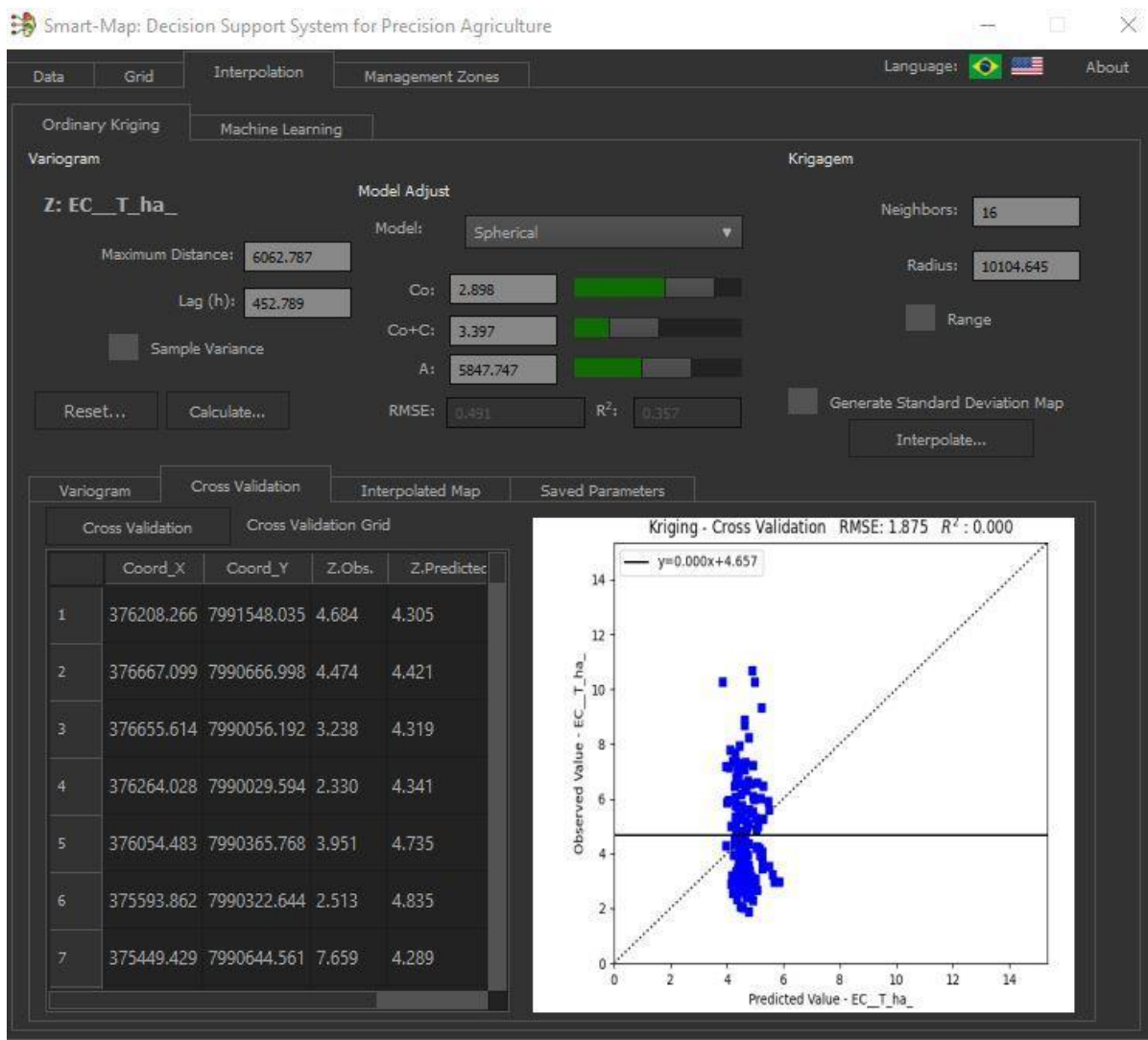
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B - Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Estoque de Carbono no Solo no Modelo Esférico



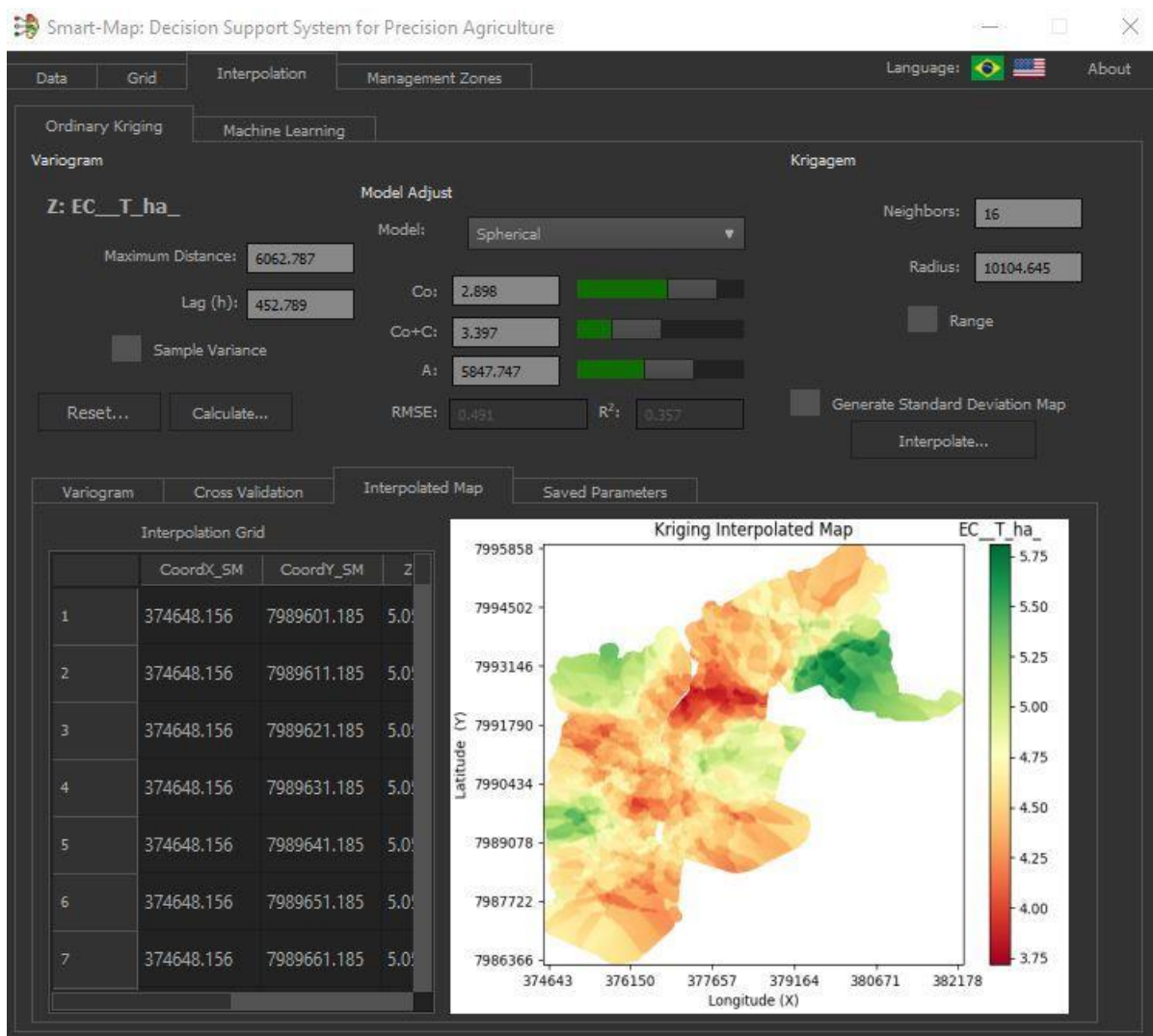
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C - Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Estoque de Carbono no Solo na Validação Cruzada



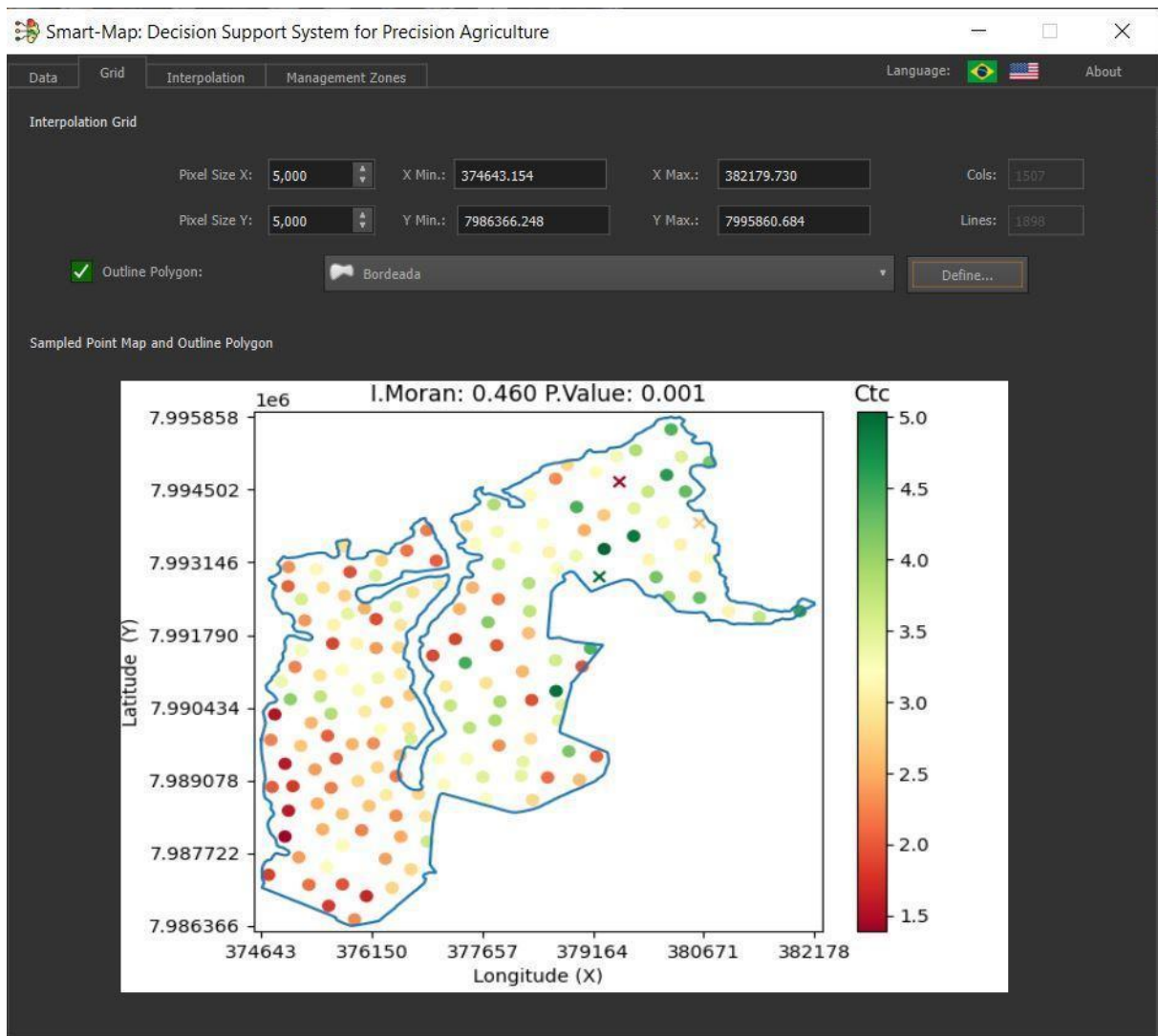
Fonte: Aatoria própria

APÊNDICE D - Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Estoque de Carbono no Solo na etapa de Krigagem



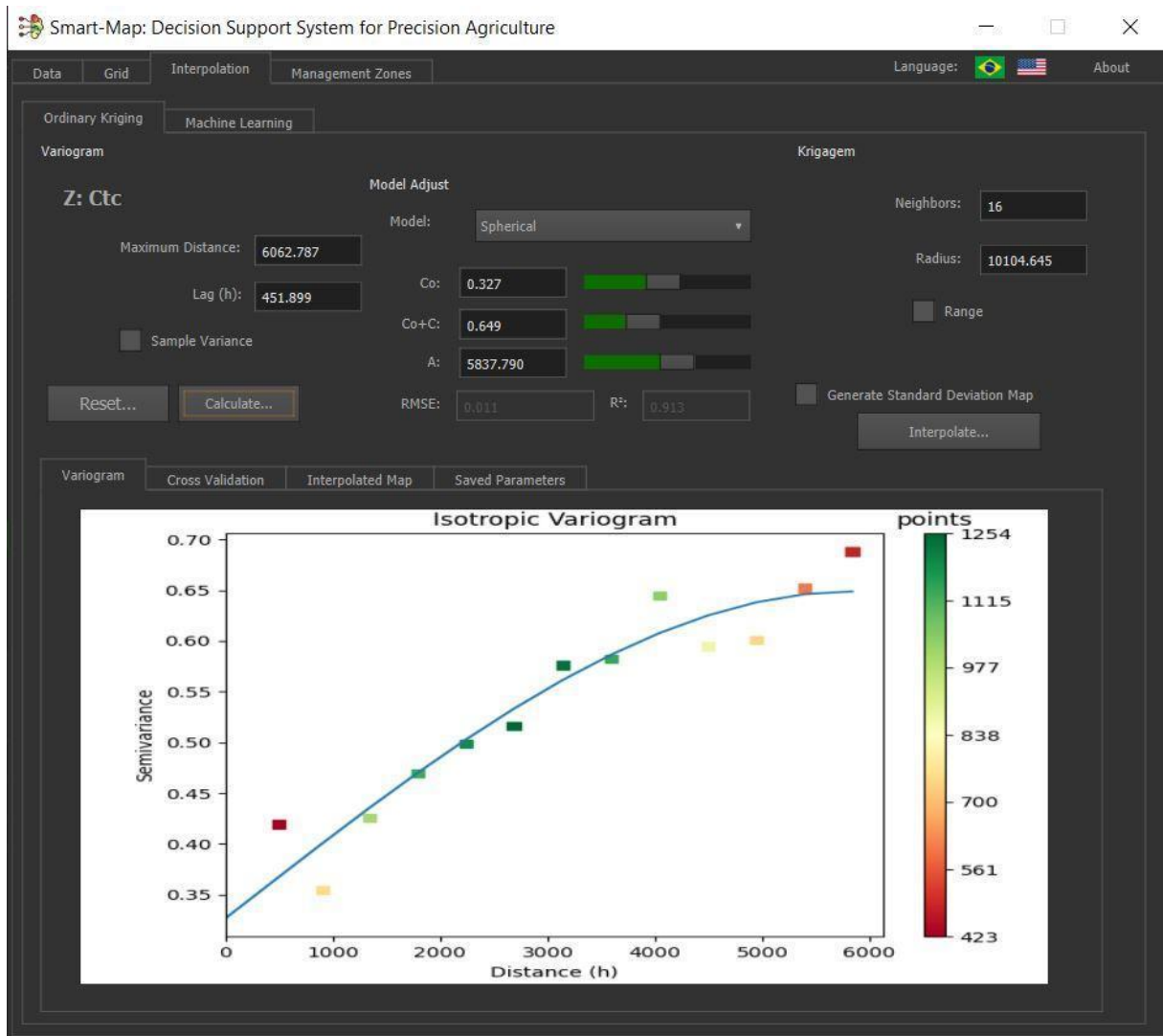
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE E – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) na etapa de Grid Amostral



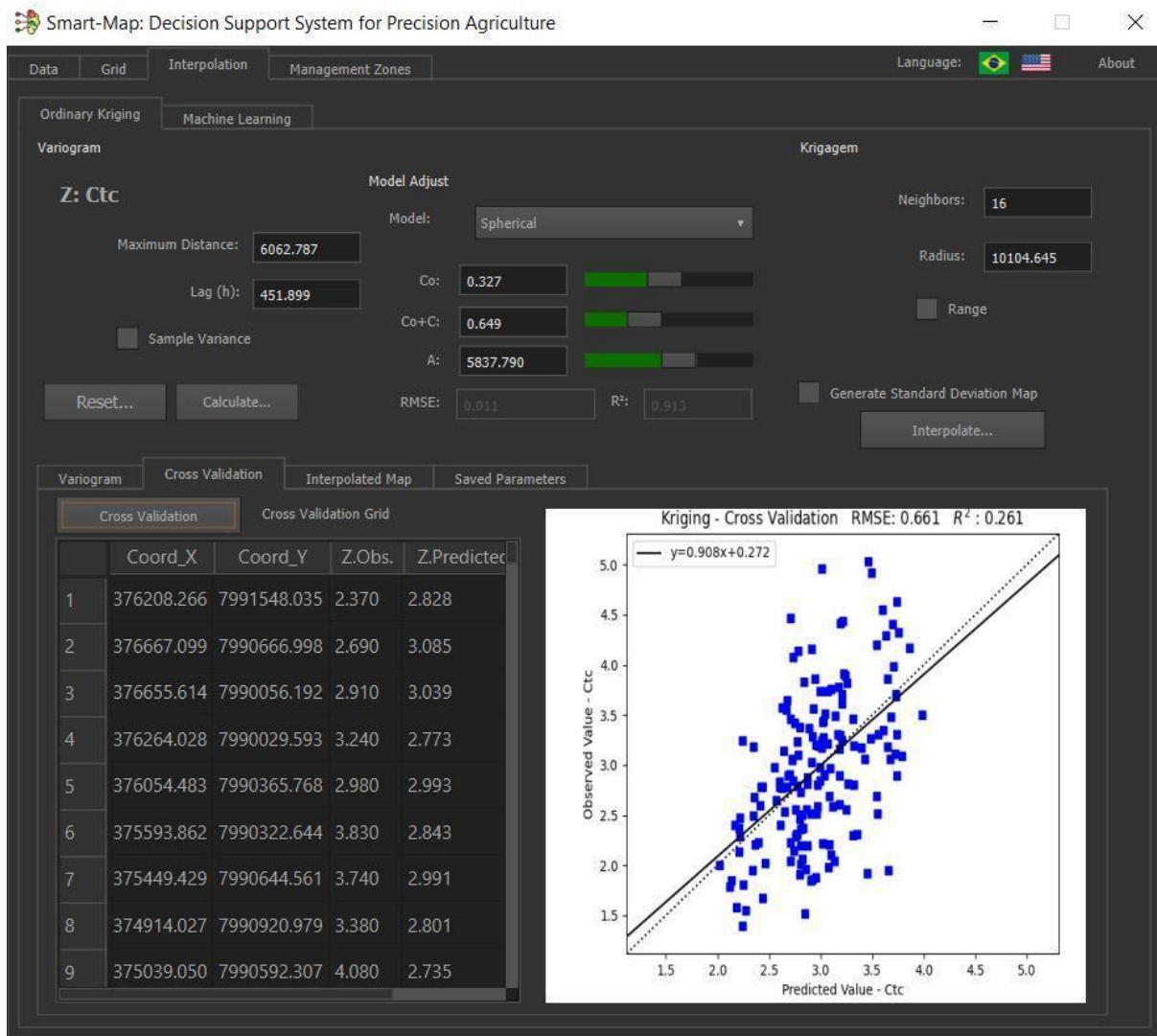
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE F – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) no Modelo Esférico



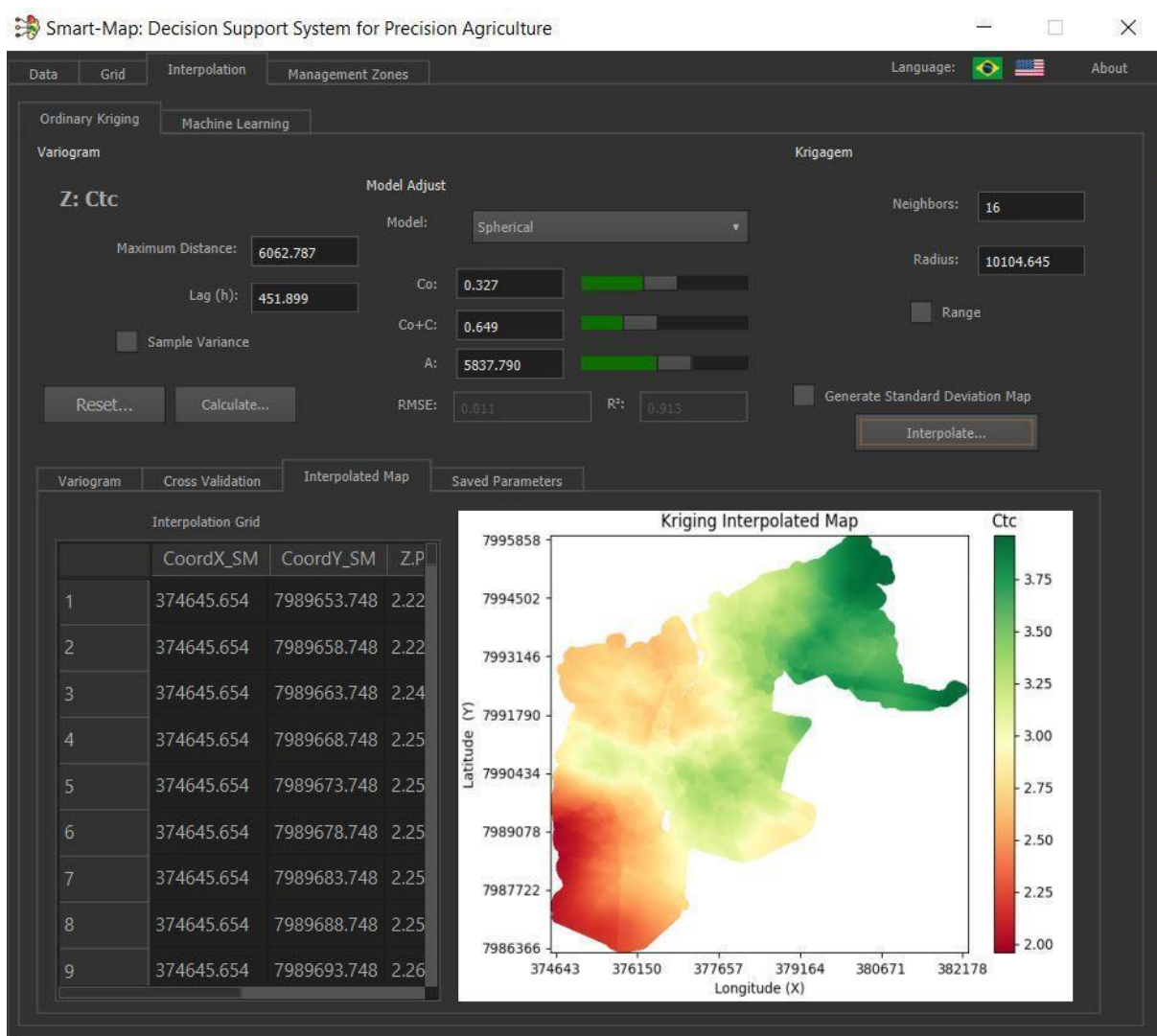
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE G – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) na Validação Cruzada



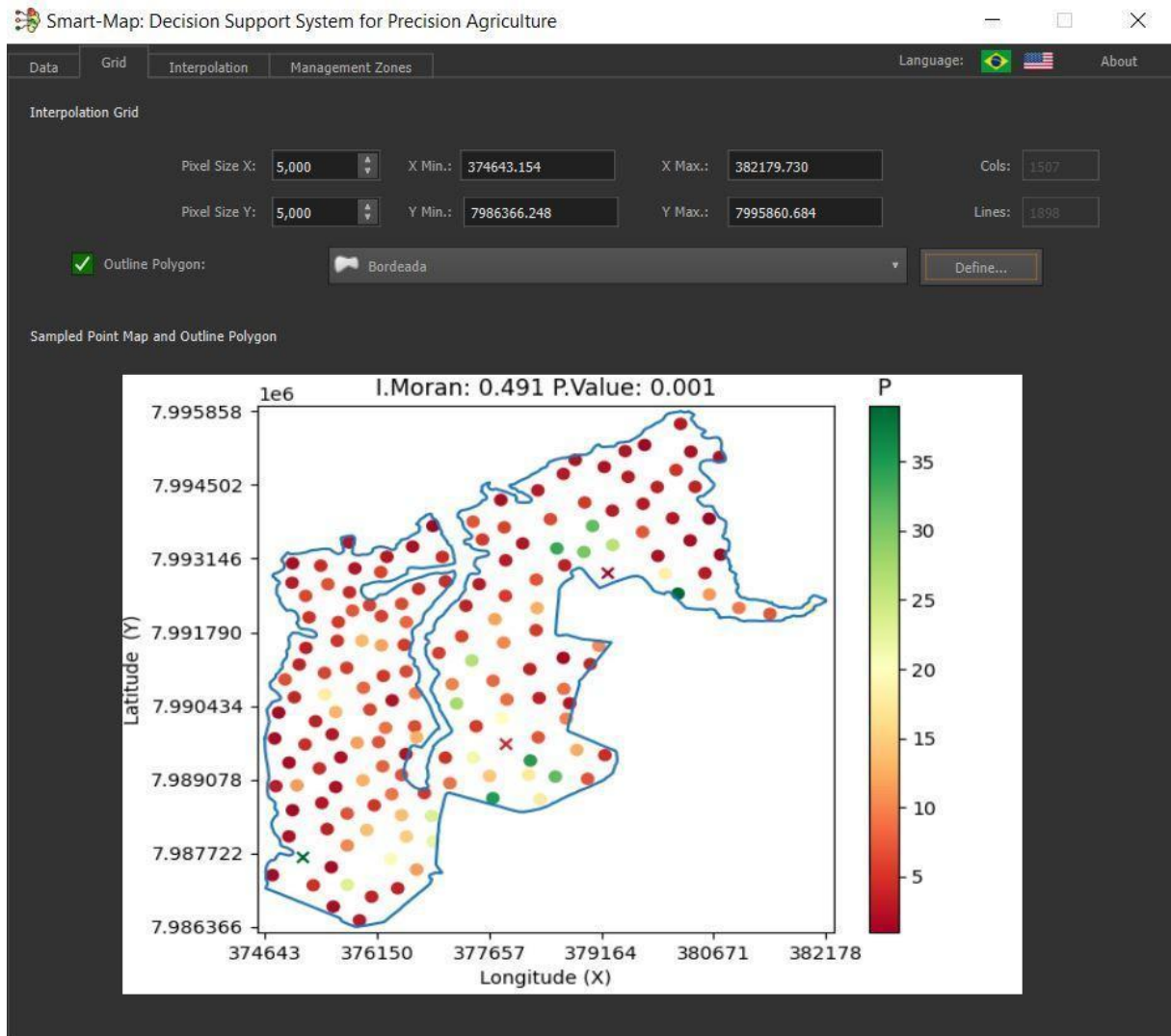
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE H – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) na etapa de Krigagem



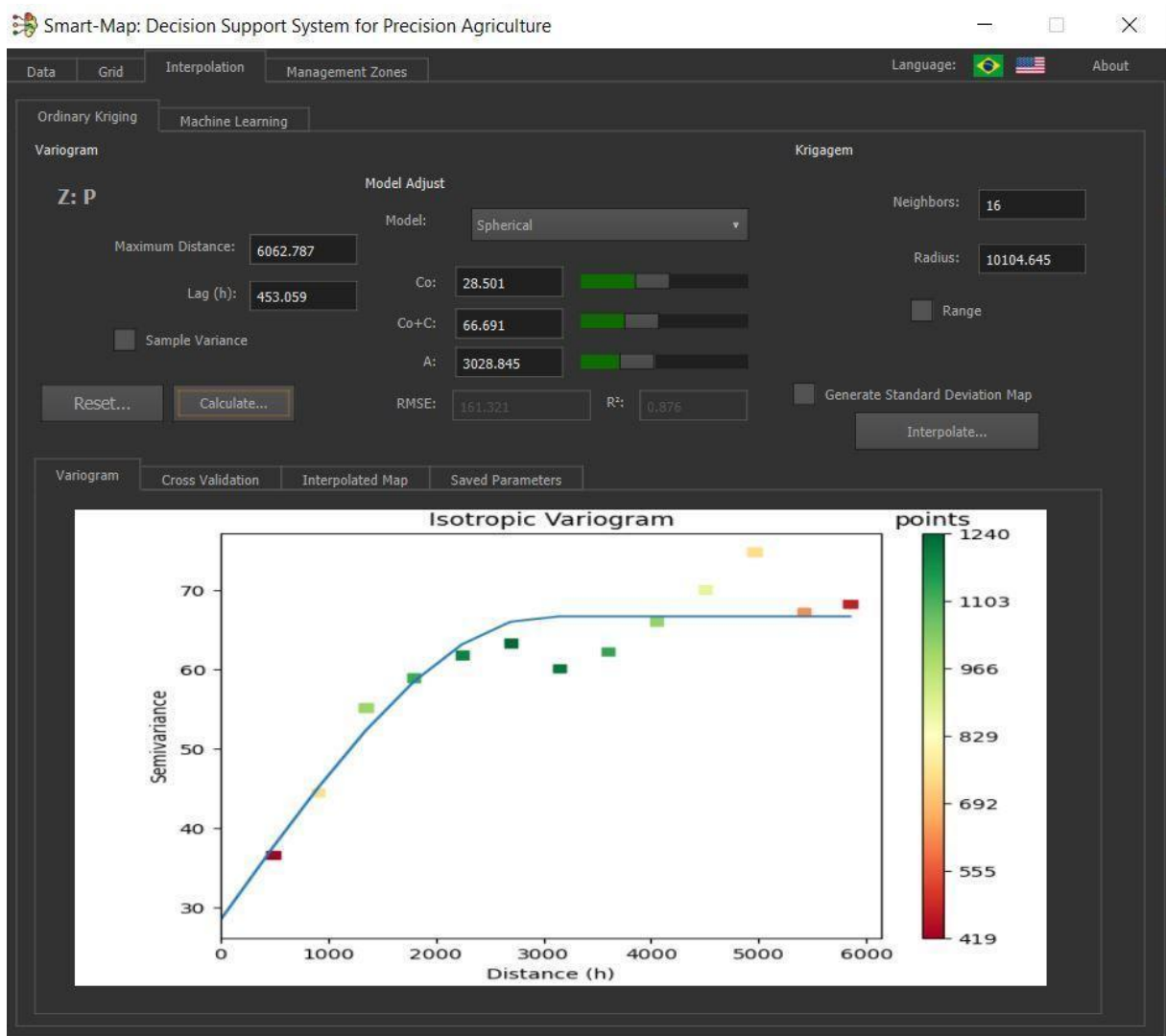
Fonte: Aatoria própria

APÊNDICE I – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Fósforo (P) na etapa de Grid Amostral



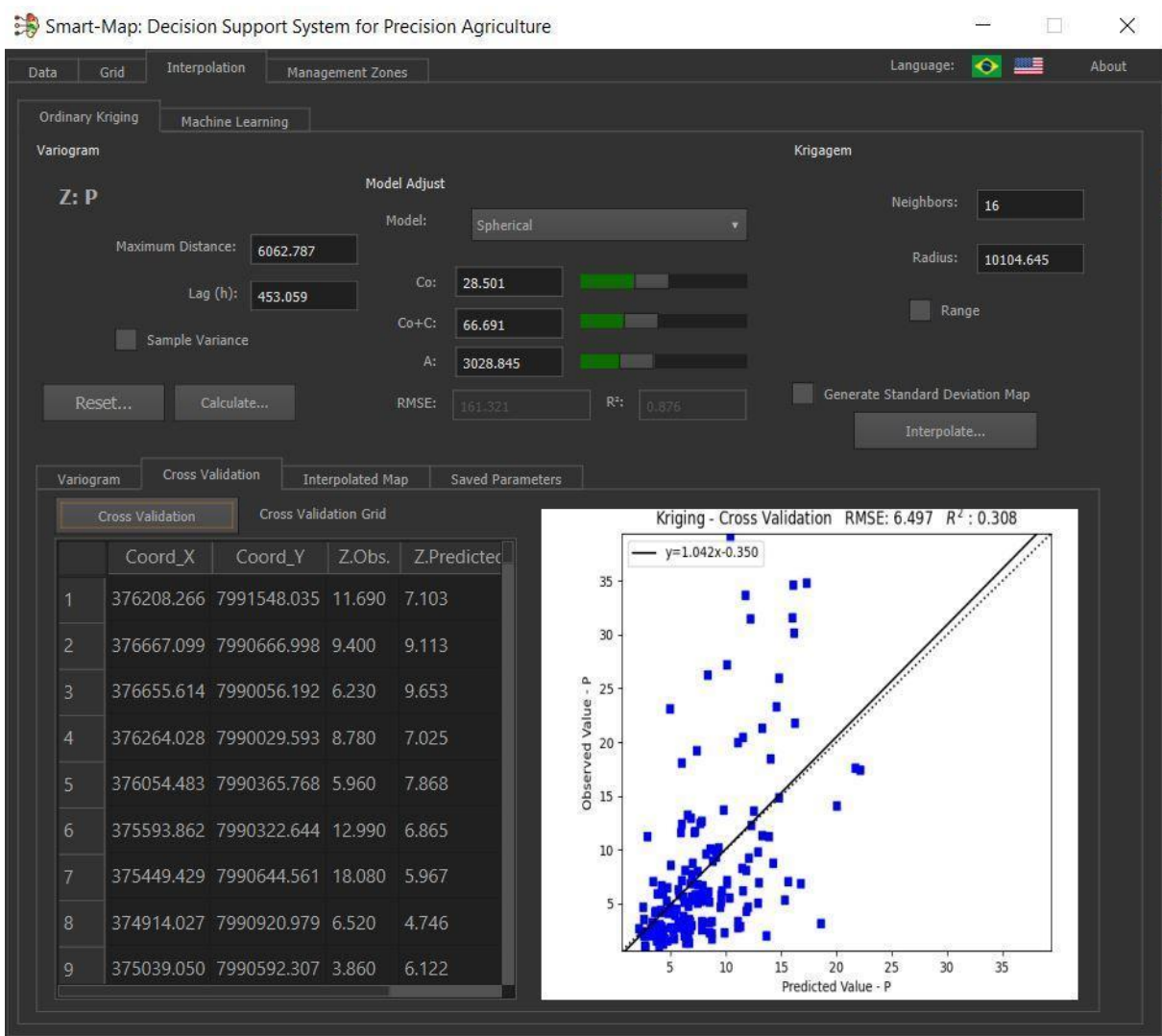
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE J – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Fósforo (P) no Modelo Esférico



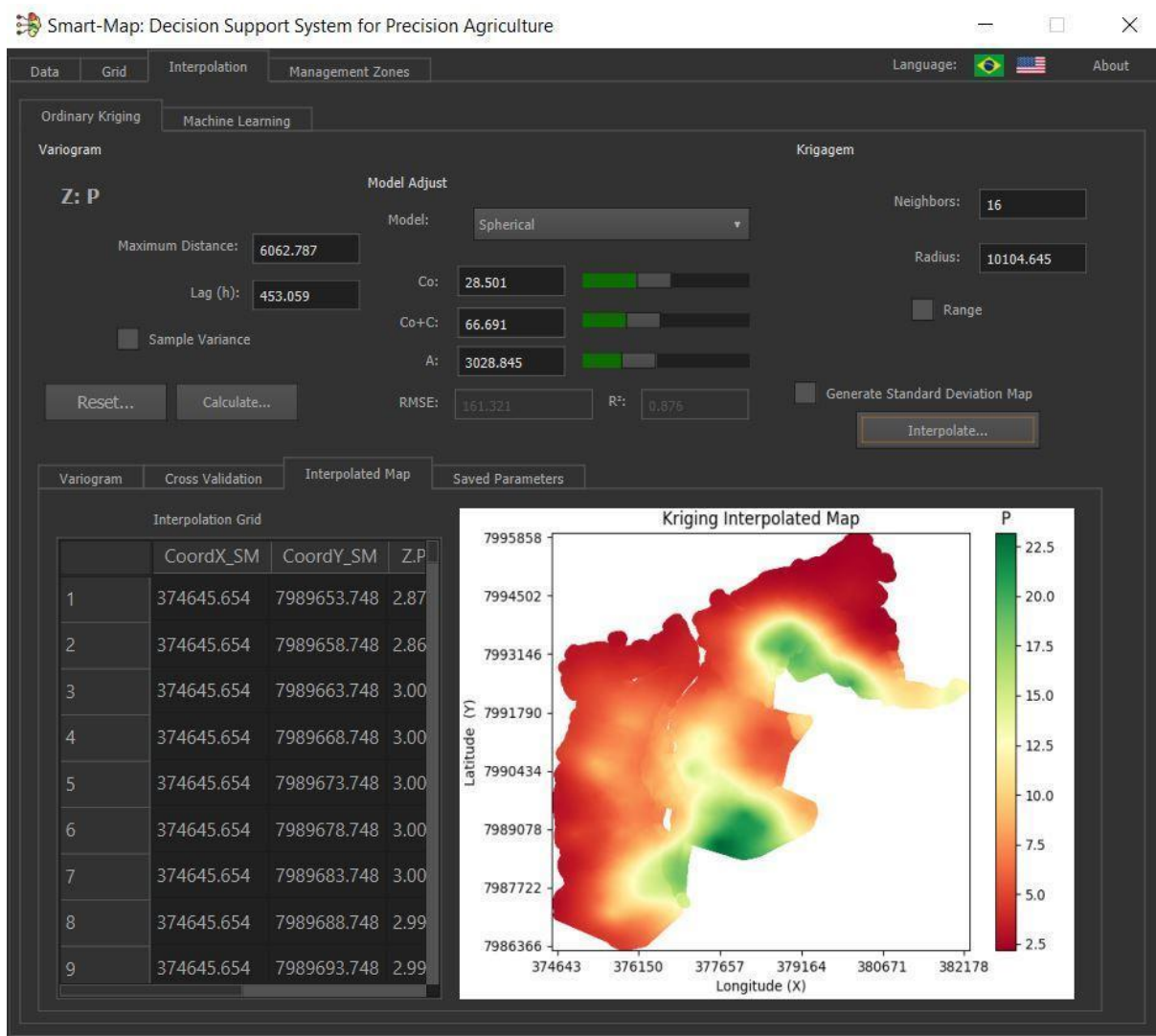
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE K – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Fósforo (P) na Validação Cruzada



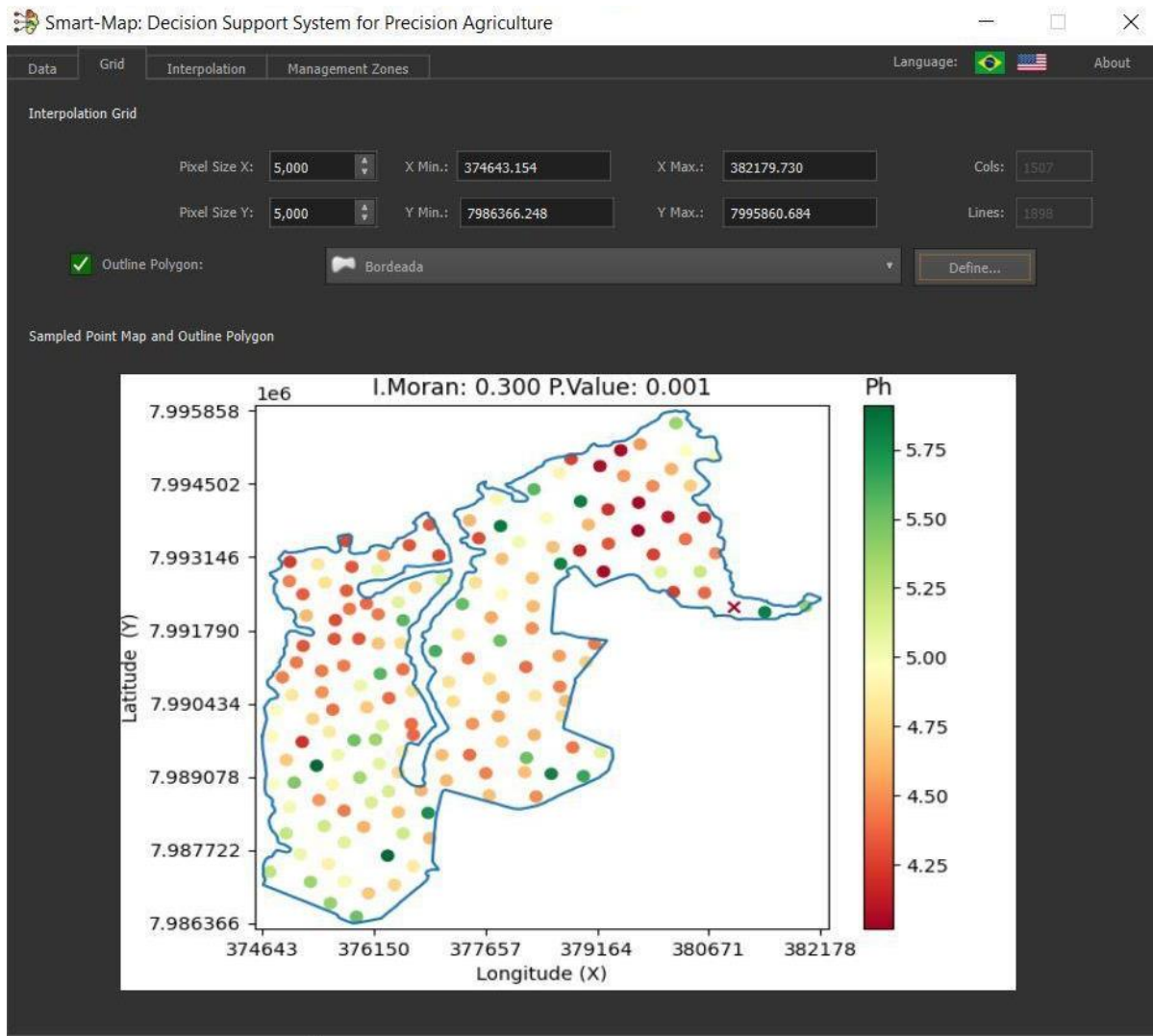
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE L – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Fósforo (P) na etapa de Krigagem



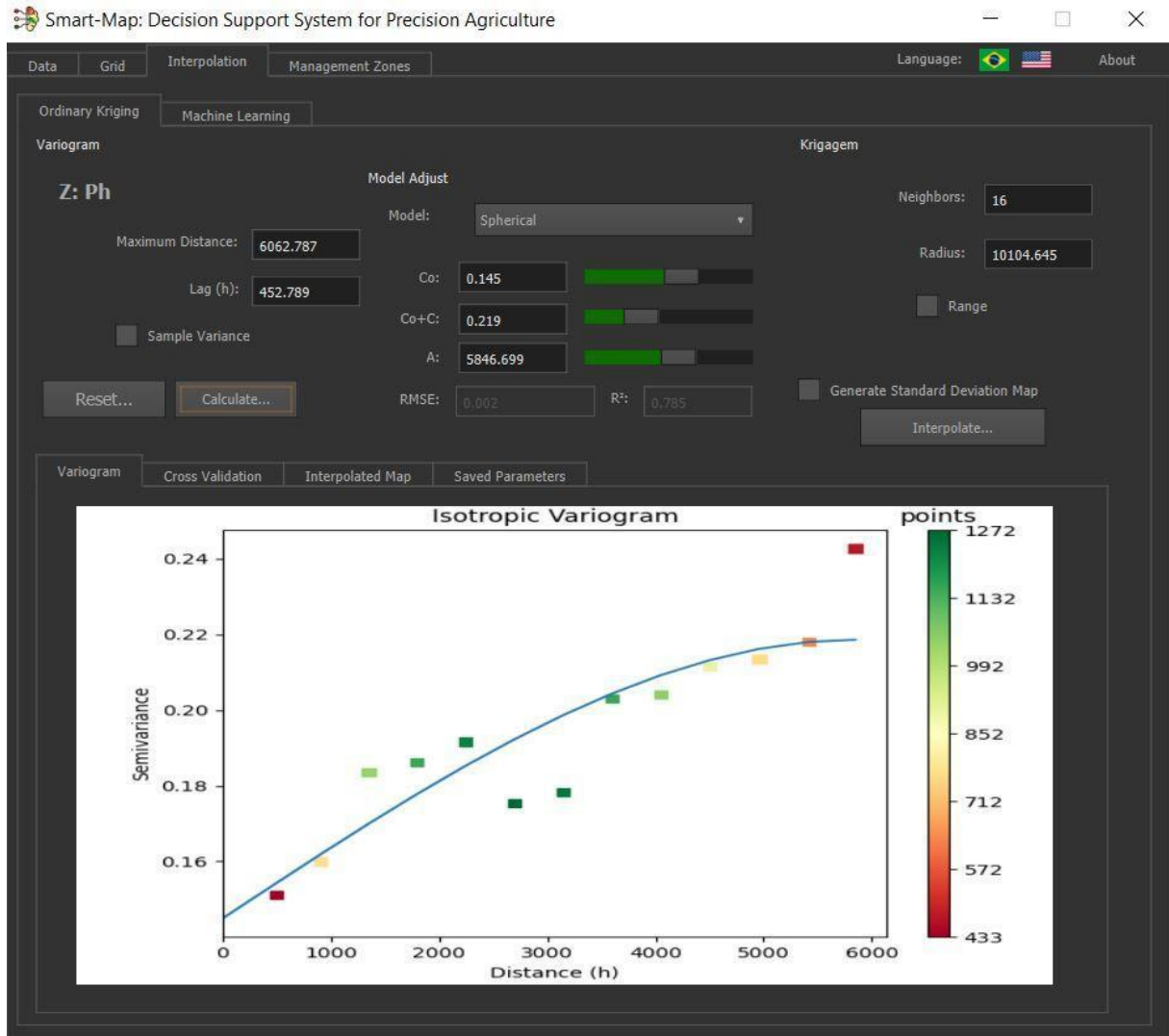
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE M – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de pH na etapa de Grid Amostral



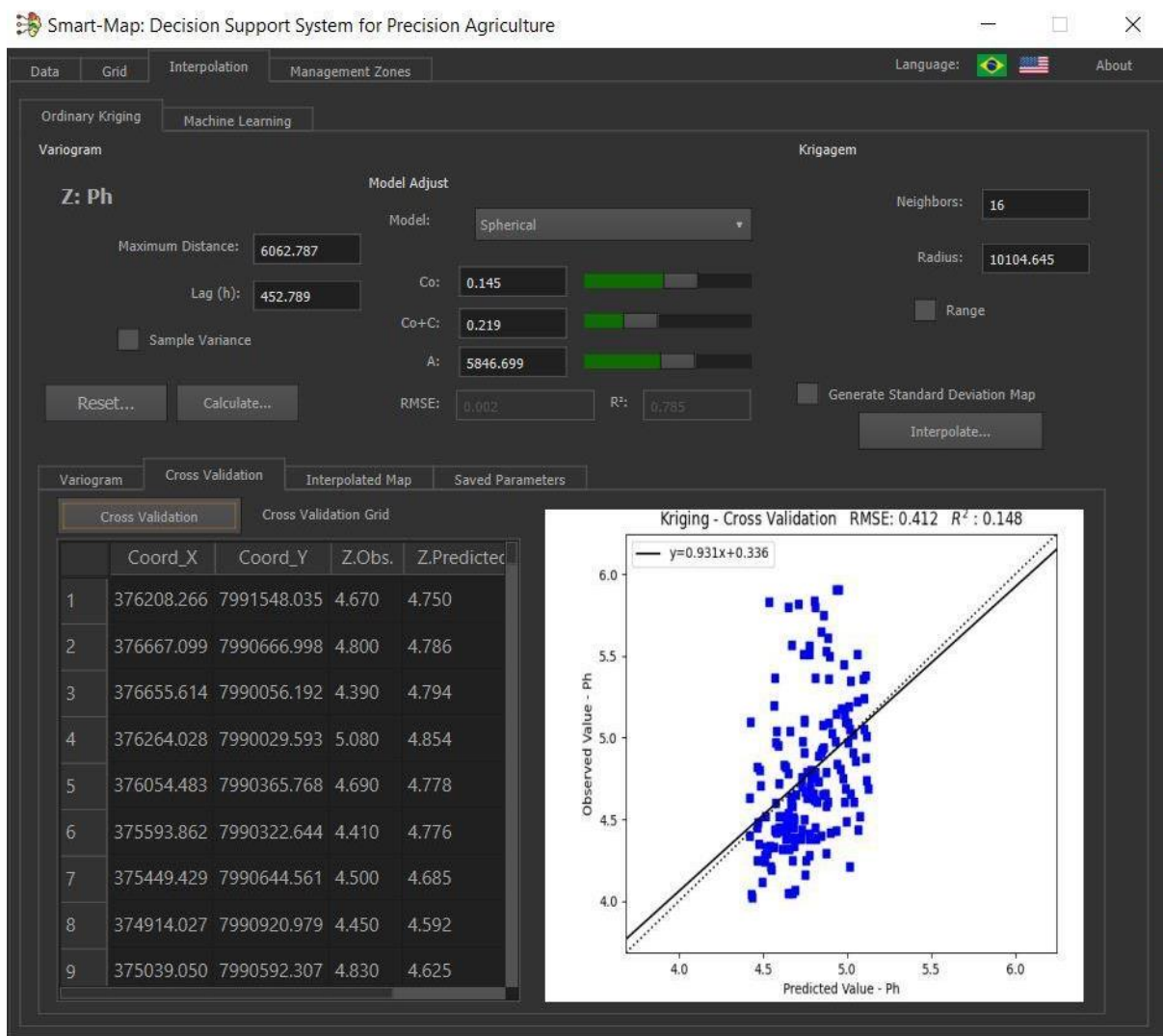
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE N – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de pH no Modelo Esférico



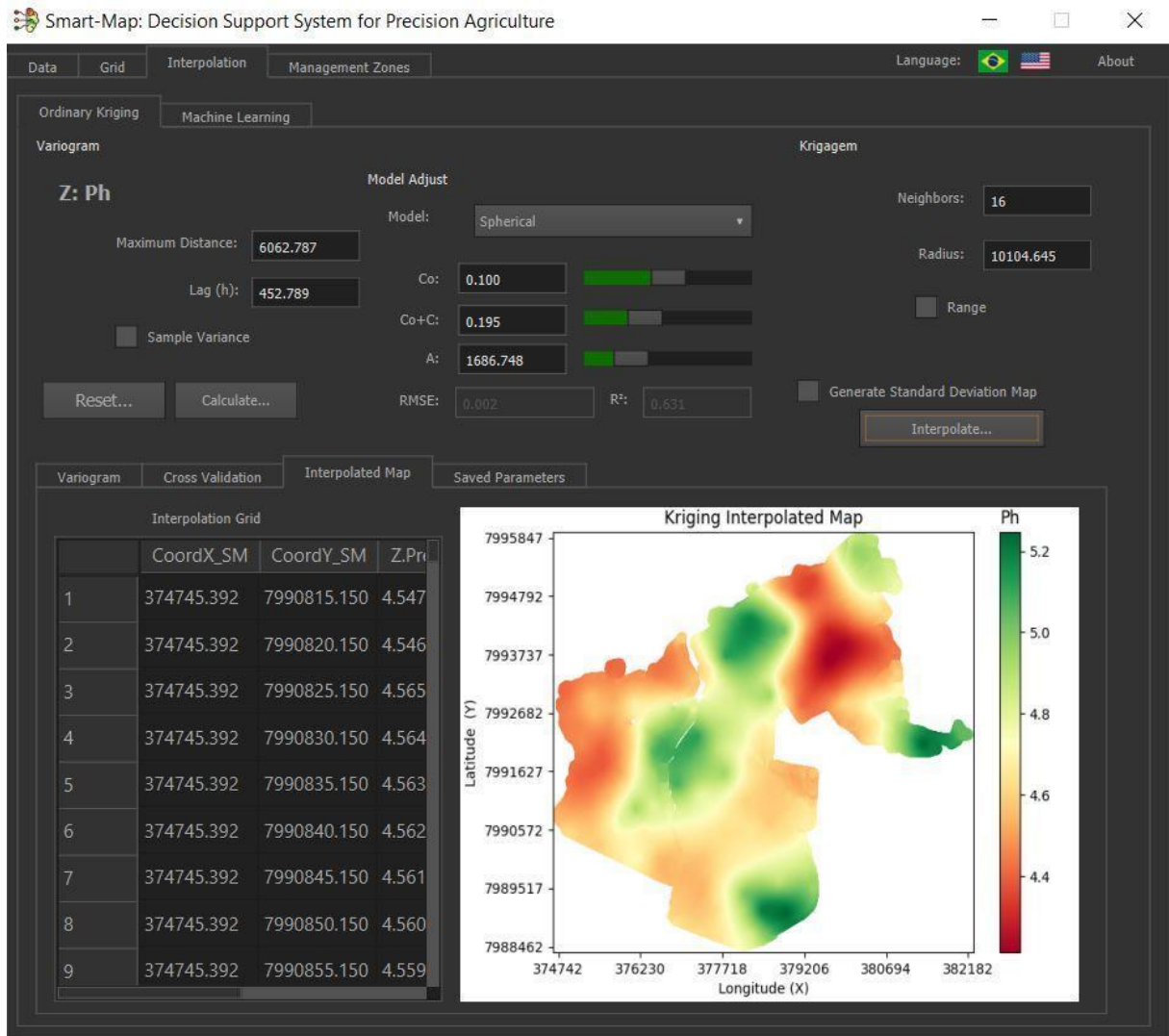
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE O – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de pH na Validação Cruzada



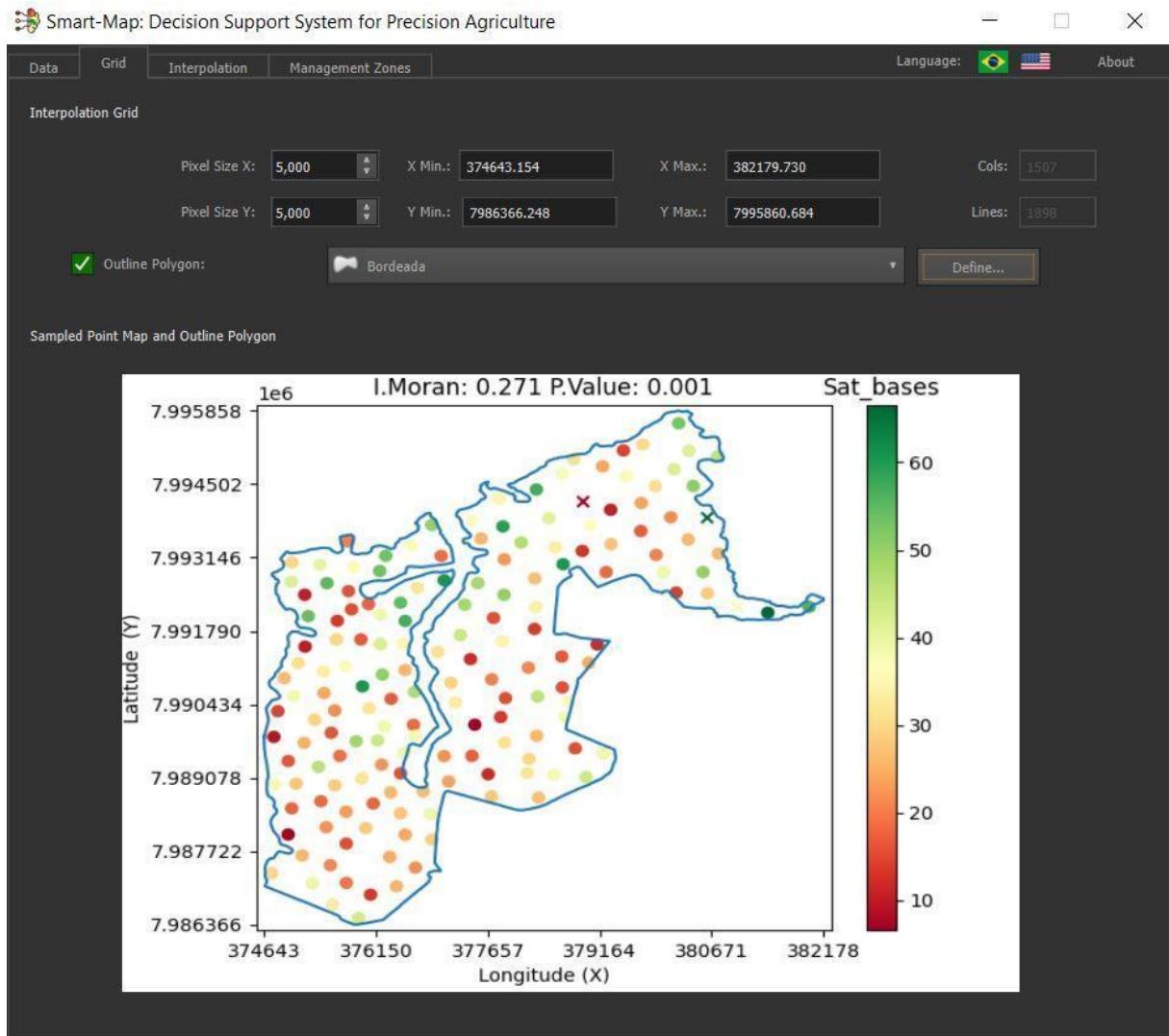
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE P – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de pH na etapa de Krigagem



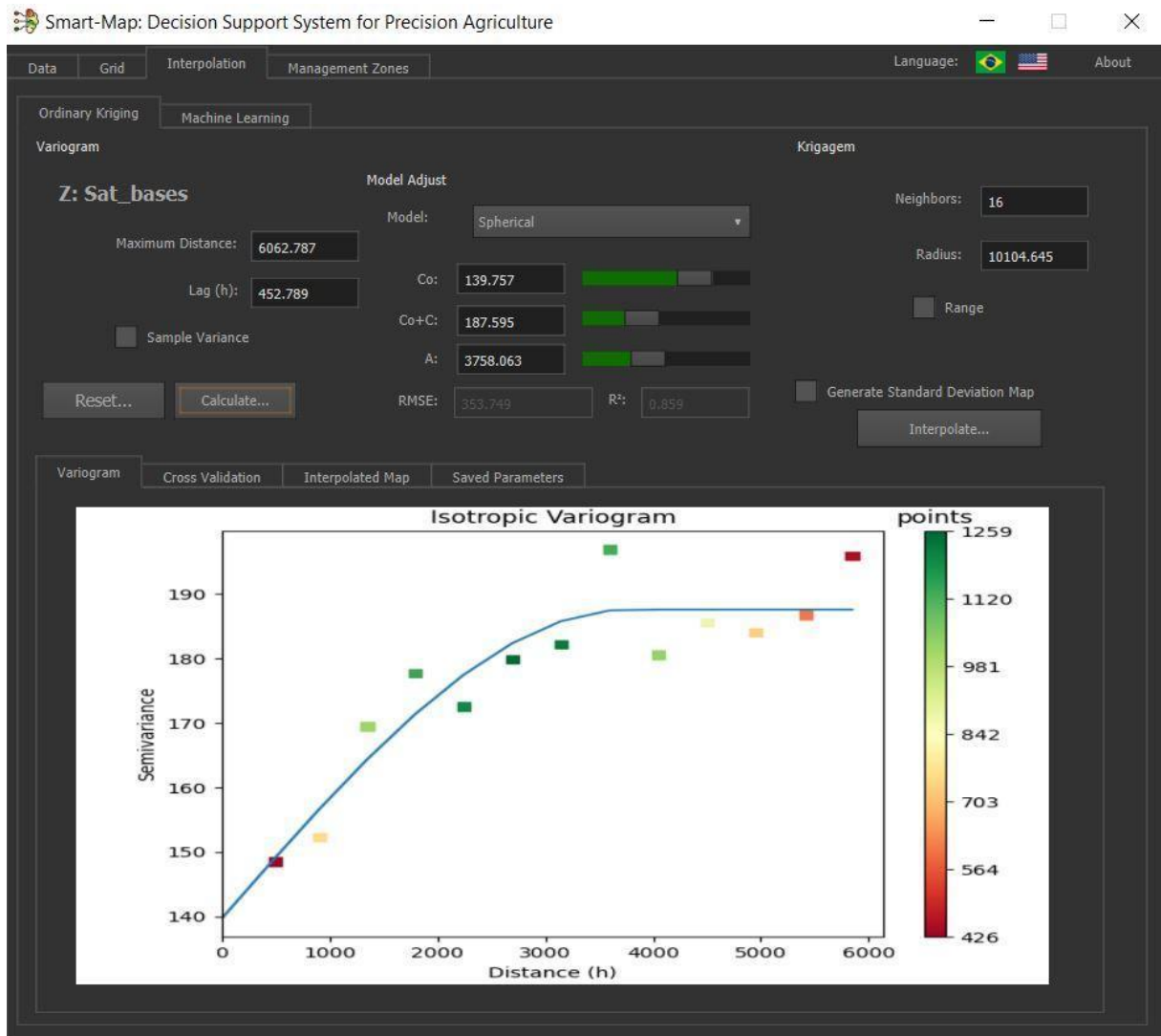
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE Q – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Saturação por Bases (V%) na etapa de Grid Amostral



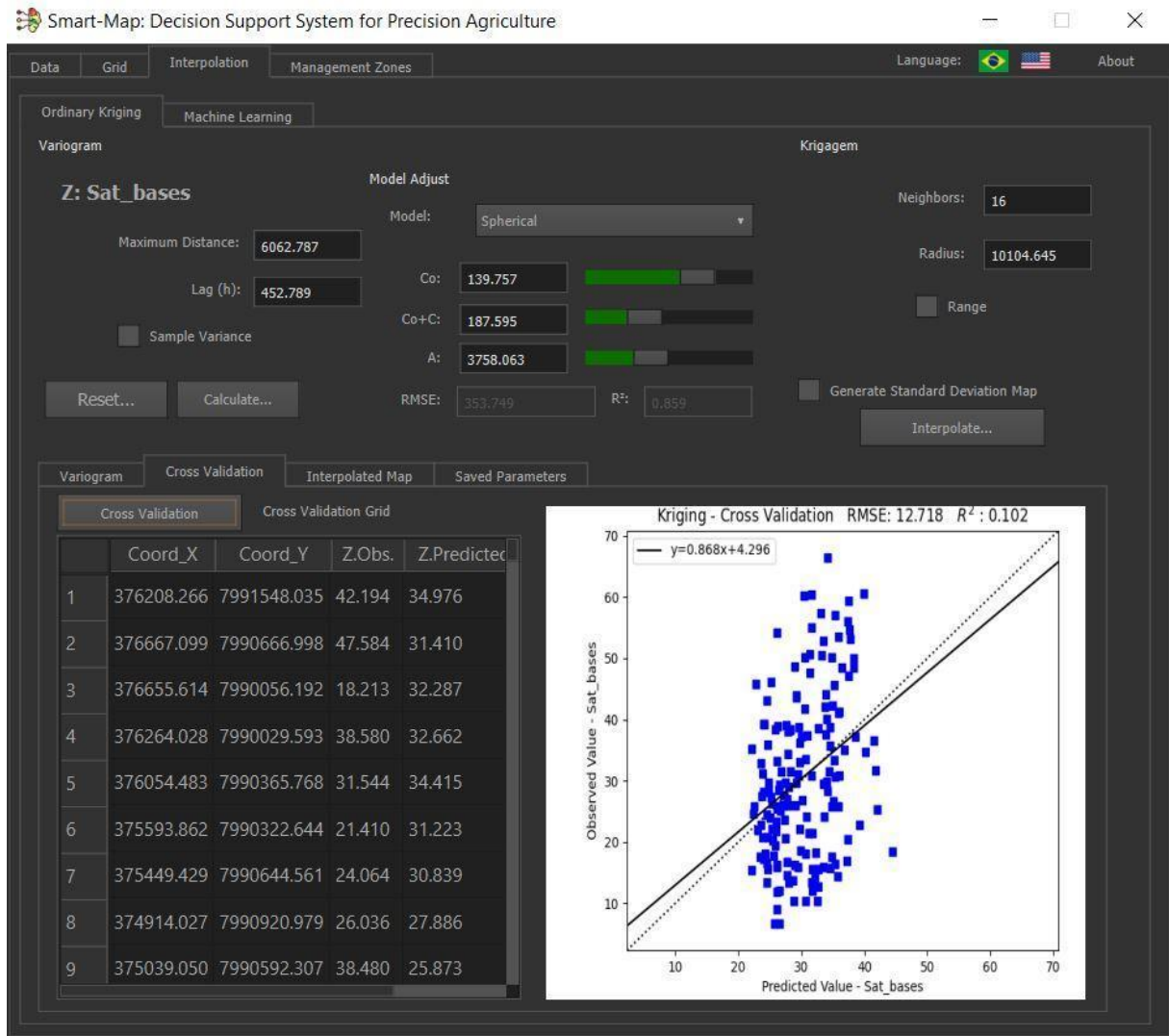
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE R – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Saturação por Bases (V%) no Modelo Esférico



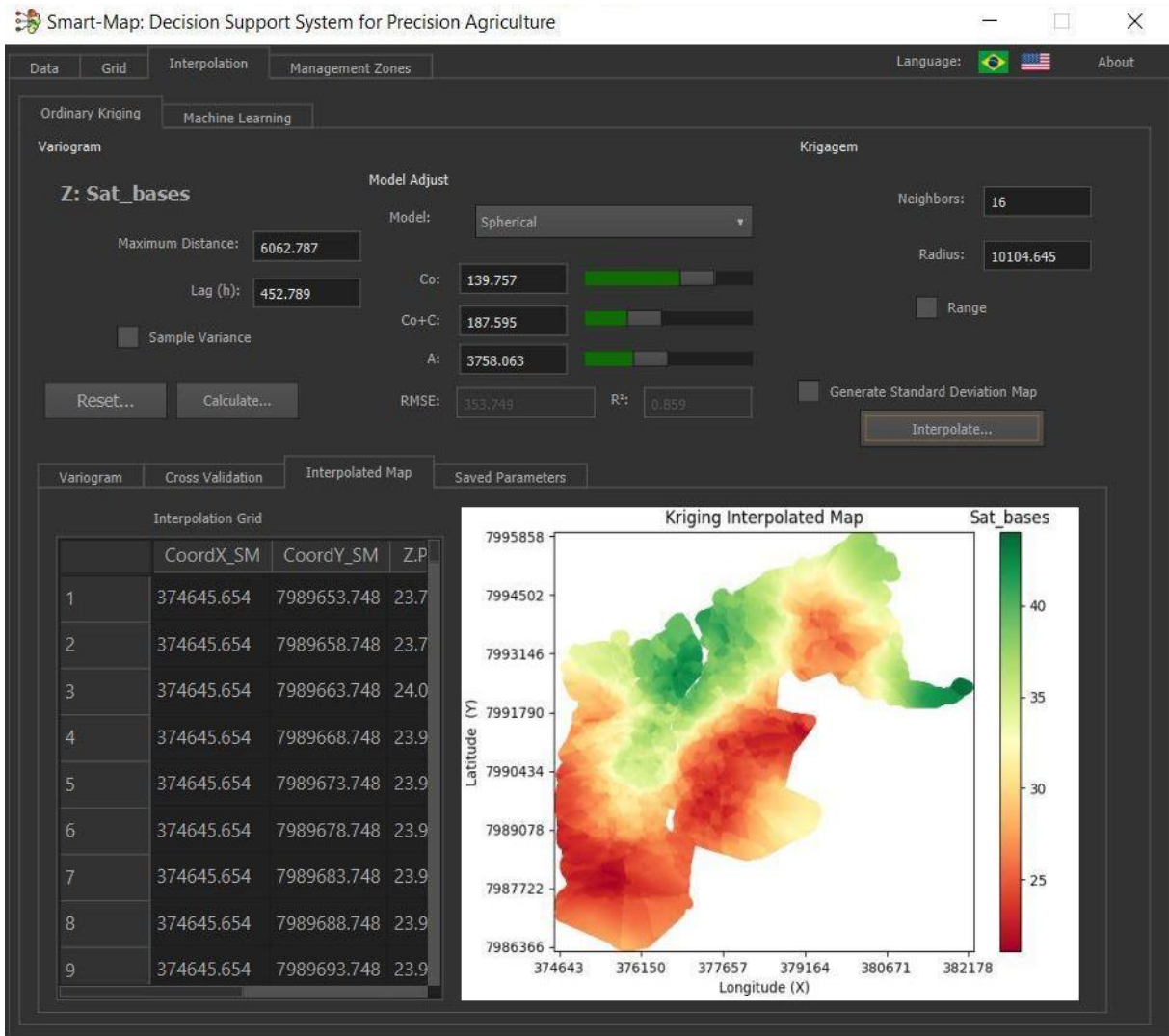
Fonte: Autoria própria

APÊNDICE S – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Saturação por Bases (V%) na Validação Cruzada



Fonte: Autoria própria

APÊNDICE T – Imagem da ferramenta de interpolação no mapa de Saturação por Bases (V%) na etapa de Krigagem



Fonte: Autoria própria