

Nátaly Luzia Jorge

**USO DE MACHINE LEARNING PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE
FERTILIDADE DO SOLO**

SÃO CRISTÓVÃO - SE
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - DEAGRI

USO DE MACHINE LEARNING PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE FERTILIDADE DO SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Rychardson Rocha de Araújo

APROVADO em: ____/____/____
ORIENTADO(A): NÁTALY LUZIA JORGE

Prof. Dr. RYCHARDSON ROCHA DE ARAÚJO

Msc. ANNA BEATRIZ
NOGUEIRA DE ARAÚJO
(Banca examinadora)

Msc. WENDEL DE MELO
MASSARANDUBA
(Banca examinadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho e me conceder forças e sabedoria ao longo dessa trajetória.

Ao meu orientador, Rychardson Rocha de Araújo, sou imensamente grata pela orientação, paciência e por compartilhar seu conhecimento com tanto comprometimento. Sua confiança no meu potencial foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Aplicação e Agricultura Digital (LABTECAD), meu sincero agradecimento pelo apoio diário, pelas trocas de conhecimento, risadas e pela parceria nos momentos bons e difíceis. O ambiente colaborativo e acolhedor fez toda a diferença na minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus familiares, pelo amor incondicional, incentivos constantes e por acreditarem em mim mesmo nos momentos de incerteza.

Ao meu namorado, e a todos os meus amigos e professores que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, deixo aqui minha mais profunda gratidão.

RESUMO: O avanço da agricultura brasileiras nos últimos anos tem sido impulsionado por avanços em pesquisas sobre fertilidade do solo e tecnologias aplicadas, que permitiram o uso eficiente de corretivos e fertilizantes, melhorando a qualidade do solo e a produtividade agrícola. A análise química do solo é essencial, mas não exclusiva, nesse cenário, a Agricultura Digital e de Precisão têm revolucionado as práticas agrícolas, com o uso de sensores, mapas de fertilidade, geolocalização e zonas homogêneas de manejo, têm se mostrado eficazes para aumentar a eficiência na utilização de recursos, otimizando a recomendação de insumos e minimizando os impactos ambientais. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo elaborar mapas de fertilidade do solo para determinação e análise de zonas de manejo em uma propriedade localizada no município de Frei Paulo, Sergipe. A caracterização dos atributos químicos do solo foi realizada em uma área experimental de 180 ha, sendo adotado uma área com pontos georreferenciados e gerado grades amostrais em software livre QGIS (3.28.2), sendo 7 pontos amostrais, com 3 amostras por hectare e duas profundidades, 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, e para cada amostra principal foram coletadas 4 subamostras distanciadas de 1 metro. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e os mapas interpolados através do plugin Smart-Map (versão 1.4). De acordo com os mapas gerados foram revelados padrões distintos entre as duas camadas analisadas, o pH, o cálcio, o fósforo e o potássio apresentaram valores mais elevados na camada superficial (0-20 cm), refletindo a influência do manejo agrícola e da lixiviação. A saturação por cátions essenciais indicou boa fertilidade superficial, entretanto a baixa CTC efetiva em profundidade requer atenção à adubação.

PALAVRAS-CHAVES: Agricultura de Precisão; Machine Learning; Fertilidade do Solo, Mapeamento Digital do Solo.

ABSTRACT: The advance of Brazilian agriculture in recent years has been driven by advances in soil fertility research and applied technologies, which have enabled the efficient use of correctives and fertilizers, improving soil quality and agricultural productivity. In this scenario, Digital and Precision Agriculture have revolutionized agricultural practices, with the use of sensors, fertility maps, geolocation and homogeneous management zones, proving to be effective in increasing efficiency in the use of resources, optimizing the recommendation of inputs and minimizing environmental impacts. In this context, the aim of this work was to draw up soil fertility maps to determine and analyze management zones on a property located in the municipality of Frei Paulo, Sergipe. The characterization of the soil's chemical attributes was carried out in an experimental area of 180 ha. An area with georeferenced points and sample grids were generated using the free software QGIS (3.28.2). There were 7 sample points, with 3 samples per hectare and two depths, 0 to 20 cm and 20 to 40 cm, and 4 sub-samples were collected 1 meter apart for each main sample. The data was submitted to descriptive statistics and the maps were interpolated using the Smart-Map plugin (version 1.4). According to the maps generated, distinct patterns were revealed between the two layers analyzed: pH, calcium, phosphorus and potassium showed higher values in the surface layer (0-20 cm), reflecting the influence of agricultural management and leaching. The saturation by essential cations indicated good surface fertility, but the low effective CEC at depth requires attention to fertilization.

KEYWORDS: Precision Agriculture; Machine Learning; Soil Fertility; Digital Soil Mapping.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Revisão de literatura.....	2
2.1. Conceitos de fertilidade do solo: principais atributos químicos, físicos e biológicos.....	2
2.2. Métodos tradicionais e modernos de análise da fertilidade do solo.....	3
2.3. Agricultura digital e geotecnologias aplicadas à análise de fertilidade do solo....	4
2.4. Softwares e ferramentas para mapeamento da fertilidade.....	5
3. Material e métodos.....	6
4. Resultados e discussão.....	8
5. Conclusão.....	15
6. Referências bibliográficas.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Importação dos dados da tabela através do plugin Smart-Map.....	7
Figura 2. Delimitação da área e definição do tamanho do pixel.....	7
Figura 3. Interpolação e geração dos mapas de cada nutriente.....	8
Figura 4. Mapas do teor de pH CaCl_2 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	9
Figura 5. Mapas do teor de Matéria Orgânica em g/kg nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	10
Figura 6. Mapas do teor de Fósforo (P) em mg/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	11
Figura 7. Mapas do teor de Potássio (K) em mg/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	11
Figura 8. Mapas do teor de Cálcio (Ca) em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	12
Figura 9. Mapas do teor de Magnésio (Mg) em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	13
Figura 10. Mapas do teor da relação Ca/Mg nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	13
Figura 11. Mapas do teor de CTC efetiva em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	14
Figura 12. Mapas do teor de CTC a pH 7,0 em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).....	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade de troca de cátions (CTC) e suas implicações práticas. Adaptado de Potash & Phosphate Institute (1995) (Ronquim, 2020).....	3
Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (camada 0-20 cm).....	8
Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (camada 20-40 cm).....	9

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a agricultura brasileira tem demonstrado expressivo progresso no desempenho produtivo das culturas de maior relevância econômica, como o milho, que de acordo com a Embrapa (2021) na safra 2007/2008 apresentou, respectivamente, uma produção e produtividade de 58,6 milhões de toneladas e 3.950 kg/ha. Dentre os fatores determinantes para este progresso, destacam-se as pesquisas em relação ao potencial produtivo do solo e as tecnologias aplicadas à agricultura, com destaque para o manejo da fertilidade química, física e biológica do solo, para aumento da disponibilidade de nutrientes e redução de fatores limitantes ao desenvolvimento radicular em profundidade. Assim, faz-se necessário melhorar as avaliações técnicas para possibilitar o manejo adequado da adubação, com racionalização do uso de fertilizantes (Oliveira et al., 2023).

A inter-relação entre fertilidade do solo e produtividade agrícola é fundamental, pois um solo produtivo não garante alta produtividade, existem outros fatores que limitam a produtividade. A avaliação do estado nutricional do solo é essencial para o planejamento agrícola e pode ser realizada por meio de análises químicas e do monitoramento visual de deficiência nutricional nas plantas. Parâmetros como pH (potencial hidrogeniônico), alumínio trocável, saturação por alumínio, sódio trocável e índice de saturação por sódio, são características do solo que indicam as condições de estresse ou de impedimento químico, assim como os resultados de cálcio e magnésio trocáveis, que indicam impedimentos químicos, resultados utilizados principalmente para determinar doses de corretivos (Mendes, 2007, Silva, 2009).

A Agricultura Digital e a Agricultura de Precisão vêm revolucionando as práticas de manejo do solo, proporcionando maior eficiência no uso de fertilizantes e corretivos. Tecnologias como sensores remotos, mapas de fertilidade e sistemas de geolocalização possibilitam a aplicação localizada de insumos, otimizando a produtividade e reduzindo impactos ambientais. Desde a chegada da Agricultura de Precisão ao mercado, notou-se mudanças em diversos métodos de manejo, um exemplo é o método de coleta para análises de solo, o grid amostral já foi muito utilizado, porém perdeu forças após ter sido incrementado as análises de solo geolocalizadas com base em dados, que objetivam analisar os locais que realmente estão sendo impactados com baixas produtividades, índice de biomassa, entre outros. Assim, é possível avaliar onde pode estar ocorrendo deficiência nutricional do solo (Ramos e Oliveira, 2021).

A geração dos mapas dos atributos químicos do solo fornece um diagnóstico da variabilidade espacial das classes de fertilidade e das regiões de menores e maiores teores dos nutrientes (Morato et al., 2021). Nesse contexto, o uso das geotecnologias colabora para otimização dos recursos, possibilitando a partir de análises de solo, interpretar os grids amostrais e fazer recomendações específicas de insumos, garantindo uma otimização e utilização mais racional dos insumos no momento, local e doses corretas, proporcionando benefícios econômicos e ambientais (Basso et al., 2019).

No Brasil, o mapeamento de solos é uma demanda permanente de diversas instituições, na busca de informações do meio físico para o planejamento da ocupação racional das terras e para a gestão ambiental, conciliando desenvolvimento econômico e social, com a conservação e proteção dos recursos naturais (Mendonça-Santos e Santos, 2003). Embora esta demanda seja

alta, há algumas limitações, como os altos custos de aquisição e implementação de tecnologias, especialmente para pequenos e médios produtores. Apesar de haver softwares gratuitos como o QGIS, é necessário domínio e treinamento especializado, o que pode impactar em custos aos produtores (Inamasu, 2024).

Varvel et al. (1999) mostraram que a imagem aérea de um solo apresentava um mesmo padrão de distribuição de matéria orgânica e de nutrientes do que os mapas resultantes de um esquema intensivo de amostragem em malha fina. Novas abordagens, como zonas homogêneas de manejo mostraram-se promissoras para indicar os locais nos quais as amostragens deveriam ser feitas. Luchiari Junior et al. (2000), conceituam zonas de manejo como sendo áreas do terreno de iguais produção potencial, eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental. O uso da zona de manejo é uma estratégia válida para aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais e reduzir o impacto da agricultura no ambiente (Luchiari Junior et al., 2011).

A cidade de Frei Paulo se destaca pela produção de milho, tendo 9.100 ha de área colhida, ocupando a 5ª posição no estado Sergipe. De acordo com o IBGE (2017), o milho é o grão mais cultivado na região SEALBA (Sergipe, Alagoas e Bahia), tendo como maior polo produtor o Agreste sergipano, pois além de ser base para alimentação animal, o milho é amplamente utilizado na alimentação humana na região, principalmente na forma de farinha flocada. Essa cultura vem movimentando significativamente a economia dessa região; todavia, o fato de ser cultivada em monocultura vem causando preocupações quanto a sua sustentabilidade (Procópio et al., 2019).

O objetivo deste estudo foi elaborar mapas de fertilidade do solo para determinação e análise de zonas de manejo em uma propriedade localizada na região do SEALBA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos de fertilidade do solo: principais atributos químicos, físicos e biológicos.

Ao analisar quimicamente um solo, inúmeros elementos podem ser encontrados na amostra, de maneira geral, qualquer elemento que se encontra disponível pode ser absorvido, no entanto, a presença de um elemento químico não implica que este seja fundamental para a nutrição da planta. Um elemento é essencial quando, sua ausência impede que a planta complete o ciclo, o elemento está diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo que sua ação não pode decorrer de correção eventual de condições químicas ou microbiológicas desfavoráveis do solo ou do meio de cultura (Mendes, 2007).

Pesquisas na área de nutrição mineral de plantas, identificaram alguns elementos que podem ser considerados essenciais para algumas culturas ou mesmo substituir parcialmente a função de elementos essenciais. Outros, quando em concentração muito baixas, estimulam o crescimento de plantas, porém sua essencialidade não é demonstrada, e são classificados como benéficos (Mendes, 2007).

Os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), também chamados de nutrientes principais, são absorvidos pela planta em maior proporção que os micronutrientes, boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e manganês (Mn), os chamados elementos-traço. Macro e

micronutrientes, são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato onde a planta cresce e são encontrados dissolvidos no solo. Há outros nutrientes que são considerados benéficos, pois estimulam o crescimento das plantas, mas não essenciais, como o selênio (Se), silício (Si), cobalto (Co), sódio (Na), alumínio (Al), vanádio (V) e níquel (Ni) (Ronquim, 2020).

A capacidade de troca iônica dos solos representa a capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um período prolongado e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes. Um solo é considerado bom para a nutrição das plantas, quando a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais, como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), porém se um solo está ocupado por cátions tóxicos, como o hidrogênio (H) e alumínio (Al), o solo é considerado pobre de nutrientes. A CTC pode ser expressa como “CTC total” quando considerar todos os cátions permutáveis do solo (cálcio, magnésio, potássio, hidrogênio e alumínio). Quando a CTC é expressa sem considerar o íon H^+ , a denominação é “CTC efetiva” (Ronquim, 2020).

Tabela 1. Capacidade de troca de cátions (CTC) e suas implicações práticas. Adaptado de Potash & Phosphate Institute (1995) (Ronquim, 2020).

CTC elevada	CTC baixa
Alta porcentagem de argila, e, ou, alto teor de M.O.	Baixa porcentagem de argila ou baixo teor de M.O.
Maior quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH	Menor quantidade de calcário é necessária para aumentar o pH
Maior capacidade de retenção de nutrientes a uma certa profundidade	Nitrogênio e potássio lixiviam mais
Maior capacidade de retenção de umidade	Menor capacidade de retenção de umidade

A avaliação da fertilidade de um solo permite caracterizar sua capacidade em fornecer nutrientes para as plantas, identificar a presença de acidez e elementos tóxicos, orientar programas de correção e adubação e escolher espécies ou variedades mais adaptadas ao cultivo (Melém Júnior et al, 2008).

2.2. Métodos tradicionais e modernos de análise da fertilidade do solo.

A análise do solo tem sido utilizada há muitos anos para avaliar a fertilidade do solo e a gestão dos nutrientes das plantas, determinar estes fatores é primordial para que as terras agrícolas sejam capazes de manter a produção e a fertilidade. A amostragem e análise do solo é o primeiro de três passos importantes na gestão dos nutrientes exigidos pela planta. A segunda é a interpretação dos dados analíticos, e a terceira é a recomendação para adição de nutrientes, para otimizar o rendimento das culturas, minimizando o impacto ambiental adverso da sua aplicação. As recomendações para adição de nutrientes ao solo baseiam-se em métodos de análise do solo, mas, atualmente existem análises adicionais e recomendações, baseadas em diferentes abordagens de interpretação dos dados (Johnston, 2005).

A análise do solo é a medida mais prática e rápida de se fazer uma análise da fertilidade do solo. A maior utilização da análise é no sentido de orientar na aplicação de fertilizantes e calagem, porém suas informações podem ser usadas para acompanhar as modificações nos

teores dos nutrientes com as diferentes práticas de manejo do solo, da água e da planta, possibilitando um uso eficiente dos adubos e evitando possíveis contaminações do ambiente. As determinações analíticas atendem bem às expectativas, entretanto, a coleta e o acondicionamento da amostra do solo devem obedecer a critérios, as amostragens precisam ser feitas em áreas homogêneas, o número de amostras simples por amostra composta, deve ser suficiente para torná-la representativa da área a amostragem deve ser feita regularmente na área, de acordo com a cultura e o manejo do solo adotado, assim, os resultados das análises são aceitáveis (Luz, 2002).

A análise química do solo é um dos métodos quantitativos mais eficazes para diagnosticar a fertilidade, sendo amplamente utilizado devido ao baixo custo e rapidez nos resultados. Entre os métodos laboratoriais há a utilização de soluções como cloreto de cálcio e tampão SMP, para medir a acidez do solo, extração com resinas trocadoras de cátions e ânions em meio aquoso, para determinação de P (fósforo), Ca (cálcio), Mg (magnésio) e K (potássio), entre outros métodos químicos. Avanços significativos nos métodos de análise de solos no Brasil, iniciaram em 1965, com a implantação de programas de padronização, como o *Soil Testing*, automatizando e uniformizando os procedimentos laboratoriais (Silva, 2009).

Métodos analíticos baseados em sensores têm-se revelado capazes de caracterizar os principais atributos da fertilidade do solo. Os métodos de detecção proximal do solo (PSS) permitem reduzir o número de operações em procedimentos analíticos tradicionais, tornando a análise mais rápida, econômica e sem produzir resíduo químico. Entretanto, ainda não há estudos com resultados satisfatórios e poucos trabalhos relatam o seu desempenho (Tavares, 2022).

As propriedades do solo e os nutrientes variam em um campo, de modo que a aplicação uniforme de fertilizantes pode resultar em áreas com excesso ou falta de fertilização. O escoamento e a lixiviação de áreas com excesso de fertilização podem contaminar o abastecimento de água, enquanto o rendimento pode ser restringido em áreas com pouca fertilização. Para reduzir esse erro de aplicação, mapas de produtividade do solo e aplicadores de taxa variável, são usados para combinar insumos agrícolas com as necessidades específicas do local de cultivo (Cahn, 1994).

A geoestatística tem-se mostrado de grande utilidade na ciência do solo, para caracterizar e mapear a variabilidade espacial de suas propriedades. No estudo da fertilidade do solo, a combinação de uma amostragem detalhada com análises de solo georreferenciadas, possibilita fazer um levantamento completo do estado físico e químico da área. Enquanto a análise laboratorial de uma única amostra de solo, fornece informações sobre o estado nutricional de um ponto específico, a avaliação de um conjunto de amostras permite a extração de dados mais abrangentes, revelando padrões e interações entre variáveis que influenciam processos específicos no solo. A análise integrada dessas variáveis facilita a identificação da variabilidade espacial dos atributos do solo, permitindo um planejamento mais eficiente da adubação, com agilidade na tomada de decisões (Manziona, 2011).

2.3. Agricultura digital e geotecnologias aplicadas à análise de fertilidade do solo.

A agricultura digital pode ser compreendida e engloba tecnologias de comunicação, informação e análise espacial que permitem ao produtor rural, planejar, monitorar e gerenciar

as atividades operacionais e estratégicas do sistema produtivo, desde a pré-produção, na produção e na pós-produção. Essa inovação na agricultura, representa uma oportunidade para erradicar a pobreza e a fome e mitigar os efeitos das alterações climáticas. A conectividade e o processamento de grandes quantidades de informação num instante permitem um trabalho mais eficiente, maior retorno econômico, maiores benefícios ambientais e melhores condições de trabalho no campo (Bolfé et al., 2020).

As geotecnologias aplicadas à agricultura são cada vez mais utilizadas no Brasil, alguns exemplo são: monitoramento de safras, levantamento e caracterização de recursos naturais, mapeamento do uso e da cobertura da terra, zoneamento e a avaliação de cenários. O uso das geotecnologias na agricultura é importante no monitoramento, planejamento e gestão eficiente, pois permitem identificar a variabilidade espacial e temporal das culturas, melhorar a tomada de decisão e minimizar impactos ambientais (Macário et al., 2023).

A análise espacial multivariada mostrou-se uma ferramenta adequada para explorar a estrutura espacial dos atributos do solo em diferentes escalas, de um conjunto de dados relacionados com um problema específico, ao unir técnicas geoestatísticas e análise de componentes principais. Com base nas escalas modeladas, é possível estabelecer zonas de manejo para aplicação de fertilizantes, formulados a partir de P (fósforo) e K (potássio), respeitando a variabilidade espacial dos elementos no solo (Manziane, 2011).

A variografia pode ser uma ferramenta útil para projetar estratégias eficazes de amostragem do solo, para estabelecer as dimensões das zonas de aplicação e para a triagem de variáveis de fertilidade do solo para uso em aplicações específicas do local. As técnicas de detrendência de polimento mediano e de corte de dados, usadas em conjunto com a variografia e a krigagem, podem melhorar as caracterizações da variação espacial e a precisão dos mapas de produtividade do solo (Cahn, 1994).

Rosas et al. (2024) destaca que entender a distribuição espacial do P (fósforo) no solo é fundamental para avançar no manejo eficaz do fósforo e promover práticas agrícolas sustentáveis. O estudo mapeou digitalmente os estoques de P disponível e P total no Brasil em uma resolução fina (30 cm) com o objetivo de contribuir para o uso sustentável de P na agricultura e nos sistemas ambientais.

2.4. Softwares e ferramentas para mapeamento da fertilidade.

Entre as principais geotecnologias estão o Sensoriamento remoto, que usa imagens de satélite para monitoramento da vegetação e mudanças no uso do solo, o SIG (Sistemas de Informação Geográfica), que permite a organização e análise de dados geoespaciais, o Banco de Dados Geoespaciais, armazenando e processando grandes volumes de dados geográficos, e o WebGIS, que facilita o acesso e análise de dados geoespaciais. Projetos como SATVeg, TerraClass e GeoMS, desenvolvidos pela Embrapa, demonstram a aplicação prática dessas ferramentas, possibilitando acompanhamento da vegetação, a detecção de mudanças no solo e a melhoria na gestão ambiental (Macário et al., 2023).

Bolfé et al. (2020) cita em seu trabalho que 84% dos agricultores brasileiros utilizam pelo menos uma tecnologia digital em seu sistema de produção, conectividade, aplicativos móveis, plataformas digitais, softwares, sistemas globais de posicionamento por satélite,

sensoriamento remoto e sensores de campo, são as principais tecnologias utilizadas, e esse percentual diminui à medida que aumenta o nível de complexidade tecnológica da aplicação.

A utilização de SIG e GPS para a cartografia da fertilidade do solo é popular e está ganhando aceitação em todo o mundo. Coletar amostras de solo utilizando GPS para a preparação de mapas de fertilidade do solo é importante, pois ajuda a formular uma gestão de nutrientes específica para o local em causa e ajuda a determinar a disponibilidade e distribuição de nutrientes para as plantas. Entre os métodos geoestatísticos, a krigagem ordinária é amplamente utilizada para cartografar a variação espacial da fertilidade do solo, porque proporciona um nível elevado de exatidão nas previsões (Malla et al., 2020).

Pasquatto (2022) mostrou técnicas de geoprocessamento por meio de um plugin chamado Smart-Map do software QGIS, realizando um comparativo entre métodos de interpolação, visando produtores que desejam adquirir técnicas de agricultura de precisão para obter melhores rendimentos nas suas propriedades. O plug-in Smart-Map, não consegue analisar algumas métricas de dados no modo Machine Learning, enquanto o método da Krigagem Ordinária consegue realizar validação cruzada e a interpolação sem ter erros durante o uso. Desta forma, o plugin Smart-Map foi adequado para comparar os dois métodos, tendo em vista que o método de Krigagem Ordinária mostrou ser mais eficiente para a aplicação de nutrientes na propriedade, pois apresenta detalhadamente os pontos onde é necessário fazer as correções.

Silva et al. (2022) analisou a distribuição espacial dos atributos químicos do solo em uma lavoura de café, utilizando geotecnologias para gerar mapas de aplicação de fertilizantes e corretivos. Os resultados mostraram uma grande variabilidade espacial nos teores de nutrientes, evidenciando a necessidade de um manejo mais eficiente. A técnica de Krigagem foi fundamental para interpolar os dados e criar mapas detalhados, permitindo ajustes localizados na adubação e calagem. A comparação entre a agricultura de precisão e o manejo convencional indicou que o uso de mapas de fertilidade pode reduzir desperdícios de insumos, aumentar a eficiência da adubação e melhorar a produtividade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma área localizada no município de Frei Paulo, região oeste do estado de Sergipe. A área possui 180 (hectares) situado a 220 metros de altitude em relação ao nível do mar, com as coordenadas 10° 33' 04'' latitude sul e 37° 32' 01'' longitude oeste. O clima da região segundo a classificação de Köppen (1961) é clima tropical com chuvas de inverno, temperaturas anuais de 24,8°C e precipitação média anual de 809,8 mm.

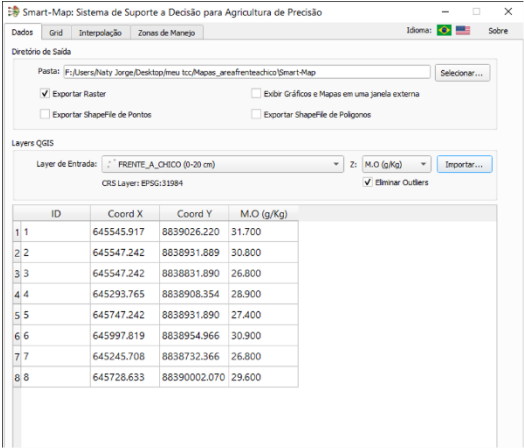
A área experimental foi delimitada por 1 talhão de 18 ha constituído por 6 pontos, e cada ponto de coleta teve suas informações georreferenciadas usando o GNSS (Global Navigation Satellite System) EMLID RS2 com rastreamento de 10 minutos em cada ponto utilizando o sistema de posicionamento NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que fornece o fluxo de dados e correções GNSS das estações RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) em tempo real (IBGE, 2017).

Foram coletadas 6 amostras, sendo 3 por hectare, com profundidade de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm e para cada amostra principal foram coletadas 4 subamostras distanciadas de 1

metro. As amostras foram submetidas a análise química no laboratório de análise de solo, Laboratório Solos & Plantas (ABNT NBR ISO/IEC 17025), localizado no município de Luís Eduardo Magalhães, Bahia. Os atributos analisados foram: pH em cloreto de cálcio, fósforo (P), potássio (K), matéria orgânica, cálcio (Ca), magnésio (Mg), relação cálcio e magnésio, CTC a pH 7,0, CTC efetiva.

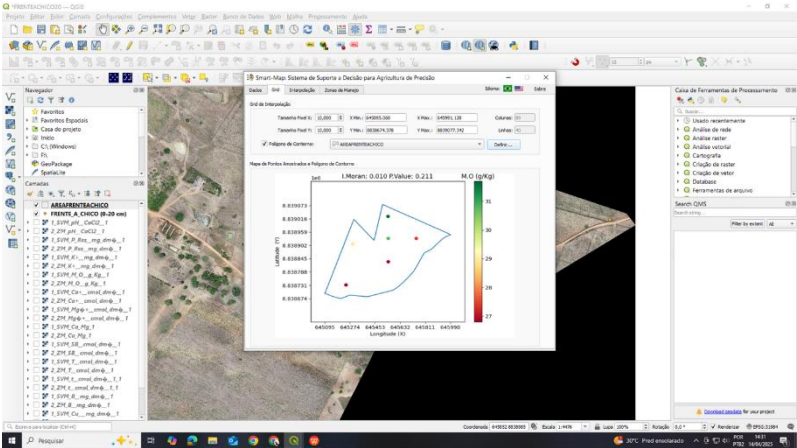
Após as análises laboratoriais, foi elaborada uma tabela contendo as informações de profundidade e quantidade de nutrientes em cada ponto de coleta e os dados de latitude e longitude em UTM, padronização necessária para realizar as interpolações utilizando o plugin Smart-Map (versão 1.4) no QGIS (3.28.2). Os dados tabelados foram importados no modo “.csv” no software QGIS e lido com o plugin Smart-Map (Figura 1). O plugin realizou a leitura dos dados e gerou o grid de interpolação com o tamanho de pixel X E Y estabelecido como 10 e –10 (Figura 2), respectivamente. Assim, foi possível gerar a interpolação e os mapas de cada nutriente (Figura 3).

Figura 1. Importação dos dados da tabela através do plugin Smart-Map.



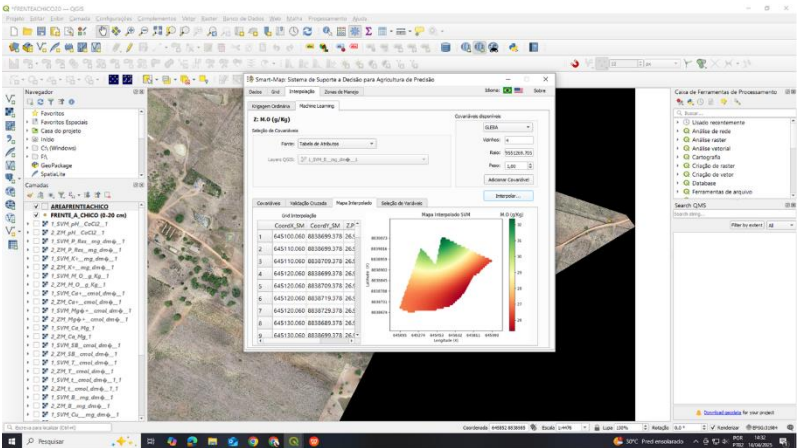
Fonte: Jorge, 2025.

Figura 2. Delimitação da área e definição do tamanho do pixel.



Fonte: Jorge, 2025.

Figura 3. Interpolação e geração dos mapas de cada nutriente.



Fonte: Jorge, 2025.

A interpolação foi realizada por meio de técnicas de Machine Learning, que possibilitam a utilização de dados provenientes de camadas raster e vetoriais do QGIS como covariáveis no processo de predição espacial. Essa abordagem se mostra especialmente vantajosa em áreas onde há disponibilidade de covariáveis com alta densidade amostral e correlação significativa com as variáveis de interesse (Pereira et al., 2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através da análise de solo foram analisados e discutidos através da geração dos mapas de fertilidade e da estatística descritiva dos atributos químicos do solo (Tabelas 1 e 2). A análise estatística inclui parâmetros como média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, assimetria e curtose, ferramentas fundamentais para descrever a variabilidade dos dados e avaliar a uniformidade dos atributos entre as amostras (Gomes e Garcia, 2002).

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (camada 0-20 cm).

Atributos	Unidade	Média	DP	V	CV	Mn	Md	Mx	AMP	ASS	K
pH		6,34	0,29	0,08	4,62	5,9	6,3	6,8	0,9	0,15	-0,60
P Res	mg/dm ³	121,25	51,8	2687,64	42,76	73	101,5	200	127	0,70	-1,33
K+	mg/dm ³	153,7	53,0	2803,51	34,45	97,1	138,8	249,7	152,6	0,78	-0,17
Ca+	cmol/dm ³	14,58	2,14	4,56	14,65	12,8	13,75	19,4	6,6	1,99	4,34
Mg ²⁺	cmol/dm ³	2,84	0,65	0,42	22,76	2	2,6	4	2	0,75	0,01
M.O	g/Kg	29,11	1,95	3,81	6,70	26,8	29,25	31,7	4,9	-0,05	-1,85
T	cmol/dm ³	22,02	3,07	9,45	13,96	17,23	21,15	26,52	9,29	0,12	-0,62
t	cmol/dm ³	17,80	2,31	5,35	12,99	15,97	17,005	22,83	6,86	1,74	3,16
Ca/Mg		5,31	1,06	1,12	19,91	3,5	5,25	6,7	3,2	-0,38	-0,46

DP: desvio padrão; V: variância; CV (%): coeficiente de variação; Mn: mínimo; Md: mediana; Mx: máximo; AMP: amplitude; ASS: assimetria; K: curtose. Potencial hidrogeniônico (pH); fósforo (P Res); potássio (K+); cálcio (Ca+); magnésio (Mg²⁺); matéria orgânica (M.O); CTC a pH 7,0 (T); CTC efetiva (t); relação cálcio e magnésio (Ca/Mg).

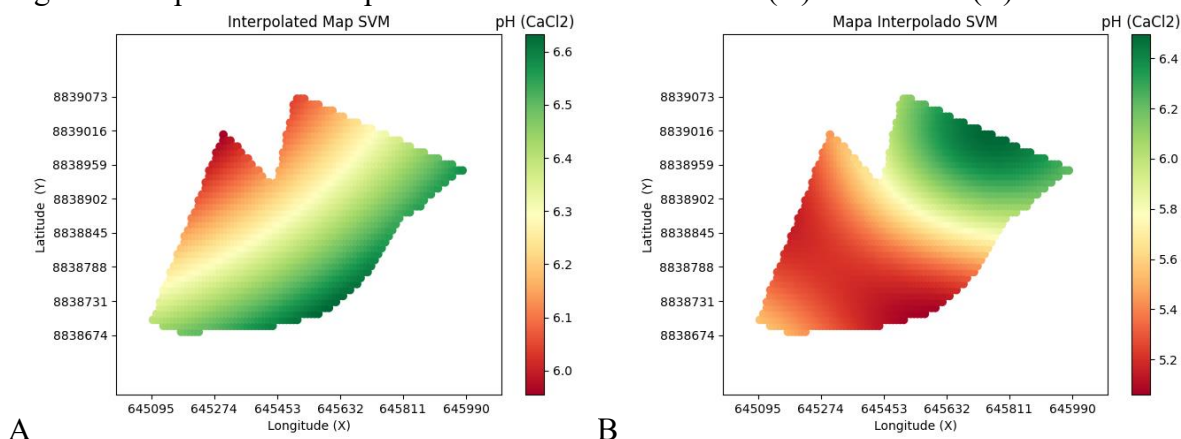
Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo (camada 20-40 cm).

Atributos	Unidade	Média	DP	V	CV	Mn	Md	Mx	AMP	ASS	K
pH		5,75	0,44	0,19	7,61	5,2	5,75	6,3	1,1	0	-2,34
P Res	mg/dm ³	76,12	32,6	1063,27	42,83	33	69,5	128	95	0,47	-0,77
K+	mg/dm ³	91,5	37,8	1431,30	41,35	54,9	83,15	161	106,1	0,86	-0,06
Ca+	cmol/dm ³	11,25	1,08	1,16	9,57	10,2	11,05	13,5	3,3	1,40	2,23
Mg ²⁺	cmol/dm ³	2,52	0,58	0,34	23,17	1,9	2,45	3,8	1,9	1,59	3,52
M.O	g/Kg	18,44	4,49	20,13	24,33	11,2	19,3	25,6	14,4	-0,13	-0,02
T	cmol/dm ³	15,85	1,04	1,07	6,53	14,05	15,7	17,58	3,53	-0,06	1,05
t	cmol/dm ³	14,02	1,02	1,04	7,28	12,95	13,82	16,28	3,33	1,75	3,92
Ca/Mg		4,62	1,06	1,13	23,02	2,7	4,5	6	3,3	-0,49	0,33

DP: desvio padrão; V: variância; CV (%): coeficiente de variação; Mn: mínimo; Md: mediana; Mx: máximo; AMP: amplitude; ASS: assimetria; K: curtose. Potencial hidrogeniônico (pH); fósforo (P Res); potássio (K+); cálcio (Ca+); magnésio (Mg²⁺); matéria orgânica (M.O); CTC a pH 7,0 (T); CTC efetiva (t); relação cálcio e magnésio (Ca/Mg).

O pH CaCl₂ é considerado uma determinação mais precisa do que o pH em água, representado pela atividade do íon na solução do solo e bastante afetado por pequenas quantidades de sais presentes no solo (Shofield e Taylor, 1955; Davey e Conyers, 1988). A camada 0-20 cm (Figura 4A) apresentou valores de pH entre 5,9 e 6,8 (Tabela 1), indicando uma possível influência de fatores externos, como aplicação localizada de corretivos agrícolas, como a calagem, responsável por neutralizar o alumínio e fornecer cálcio e magnésio como nutrientes (Sousa e Lobato, 2004). Esses padrões são confirmados pelos resultados estatísticos da tabela 1, que apontam uma média de 6,34 e um baixo coeficiente de variação (4,61%), indicando uniformidade, mas com pequenas flutuações locais, compatíveis com as manchas de variação observadas no mapa. A camada de 20-40 cm (Figura 4B) apresentou valores entre 5,2 e 6,3, com uma distribuição mais contínua e um gradiente bem definido de acidez, possivelmente relacionado a processos de lixiviação que aumentam em regiões com baixa CTC e diminui os efeitos residuais dos corretivos de acidez do solo (Sousa e Lobato, 2004).

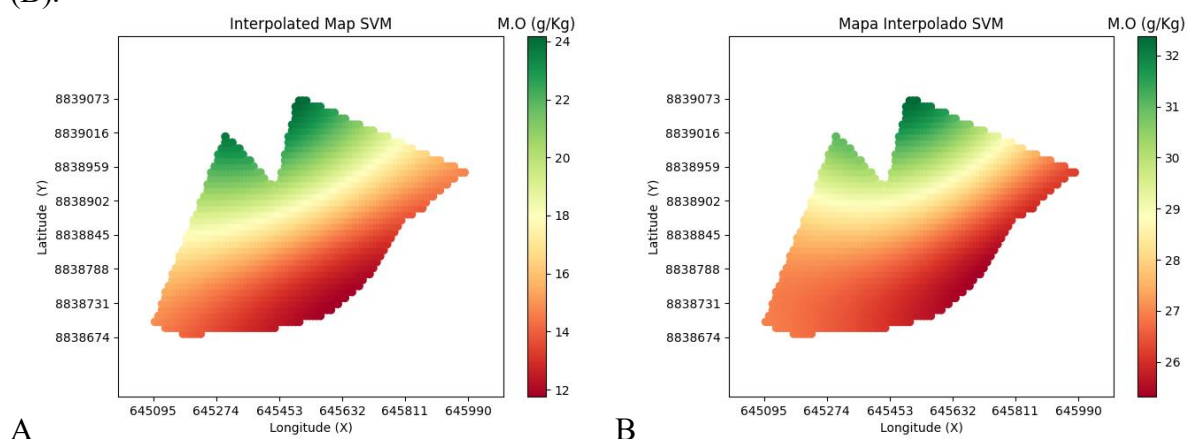
Figura 4. Mapas do teor de pH CaCl nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

A área experimental apresentou valores de matéria orgânica entre 26,8 e 31,7 g/kg na camada 0-20 cm (Figura 5A), e entre 11,2 e 25,6 g/kg na camada 20-40 cm (Figura 5B), sugerindo que houve revolvimento do solo em sua preparação. Esses resultados corroboram os estudos da Embrapa (2023), que demonstrou que o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial do solo é característico de sistemas sem revolvimento, nos quais há predominância da deposição superficial dos resíduos da cultura.

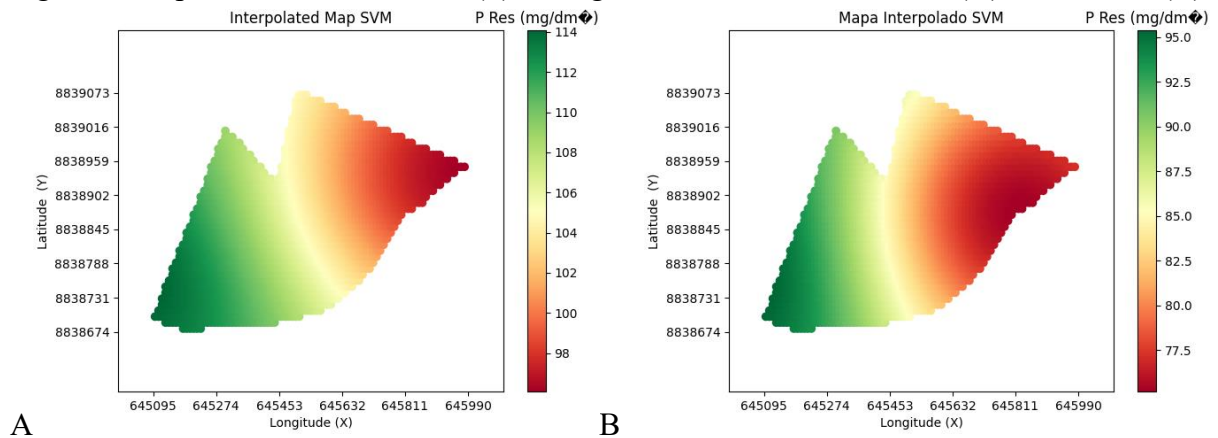
Figura 5. Mapas do teor de Matéria Orgânica em g/kg nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

O fósforo (P) é o elemento de maior complexidade no solo, sendo influenciado por diversos fatores, como o pH e os teores de outros nutrientes. Analisando o mapa de distribuição do fósforo (P), percebe-se que na camada 0-20 cm (Figura 6A) os valores variam entre 73 mg/dm³ e 200 mg/dm³. Essa variação é refletida nos dados estatísticos (Tabela 1), que indicam uma média de 121,25 mg/dm³, alto coeficiente de variação (42,76%) e assimetria positiva (0,69), sugerindo a aplicação localizada de fertilizantes. A camada 20-40 cm (Figura 6B) varia entre 33 e 128 mg/dm³, com alto coeficiente de variação (42,83%) de acordo com a tabela 2. Os valores de fósforo inferiores na camada 20-40 cm, comparado a camada 0-20 cm, corroboram com os estudos de Hauschild (2013), onde os teores de fósforo diminuem com a profundidade, estando diretamente relacionado com o pH do solo e sua baixa mobilidade, ou seja, a acidez do solo diminui a disponibilidade de fósforo no solo. Apesar da variação significativa entre as camadas analisadas, todos os valores observados encontram-se dentro dos parâmetros adequados para solos de textura argilosa, conforme os critérios estabelecidos por Sobral et al. (2015), os quais indicam valores superiores a 8 mg/dm³ como suficiente para este tipo de solo.

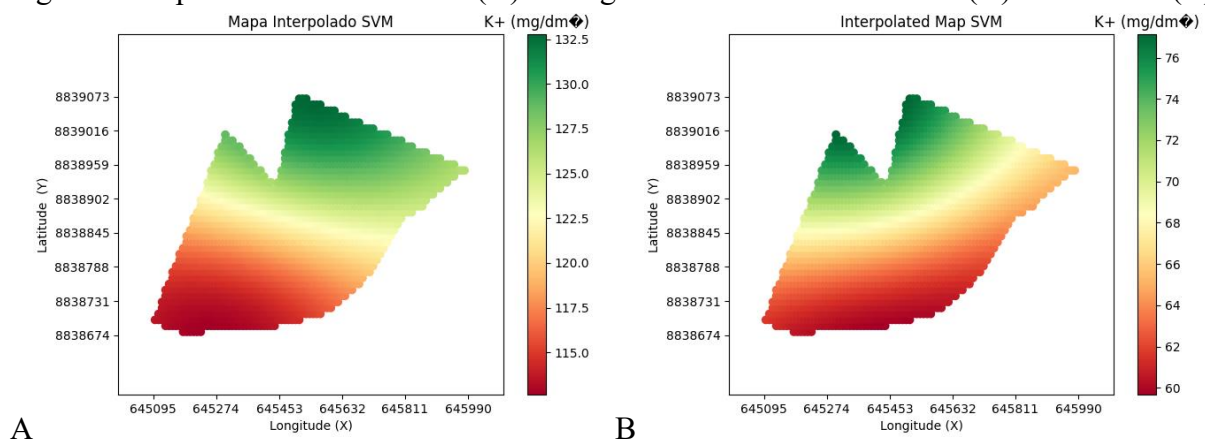
Figura 6. Mapas do teor de Fósforo (P) em mg/dm³ nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

A análise dos mapas de fertilidade indicara um marcante gradiente vertical nos teores de potássio (K⁺), com concentrações significativamente superiores na camada 0–20 cm, variando entre 97,1 e 249,7 mg/dm³ (Figura 7A e Tabela 1) em comparação à camada 20-40 cm, variando entre 54,9 e 161 mg/dm³ (Figura 7B e Tabela 2). Esse padrão é consistente com estudos que indicam que os níveis de potássio tendem a ser mais elevados nas camadas superficiais devido à aplicação de fertilizantes, à decomposição de resíduos vegetais, que promovem maior disponibilidade do nutriente para as plantas e a baixa lixiviação (Schmidt e Hughes-Games, 2010). A redução média de 45% dos teores na camada de 20-40 cm sugere limitação na mobilidade vertical do K⁺, característica observada em solos manejados sob sistemas conservacionistas, como o plantio direto, onde o potássio se acumula nas camadas superiores devido à baixa lixiviação (Artuso et al., 2023). Essa retenção está diretamente ligada à CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo, sendo responsável por regular a relação entre K⁺ trocável e K⁺ na solução, otimizando o armazenamento e reduzindo perdas por lixiviação (Werle et al., 2008).

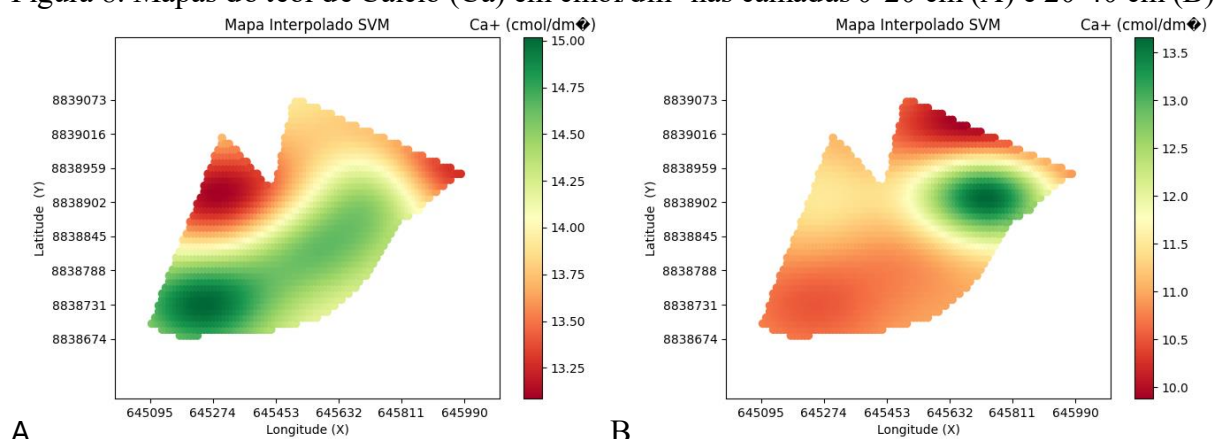
Figura 7. Mapas do teor de Potássio (K) em mg/dm³ nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

O cálcio (Ca) é um elemento essencial primário, melhora a estrutura, a permeabilidade e a infiltração de água no solo, bem como auxilia a planta a suportar o estresse pela salinidade dos solos (Daba, 2024). Analisando os mapas dos teores de cálcio, observa-se teores mais elevados na camada 0-20 cm, entre 12,8 e 19,4 cmol/dm³ (Figura 8A e Tabela 1) comparado com a camada 20-40 cm, onde os valores variam de 10,2 a 13,5 cmol/dm³ (Figura 8B e Tabela 2). Sousa e Lobato (2002) recomendam a aplicação de gesso quando o teor de cálcio nas camadas inferiores forem abaixo de 0,5 cmol/dm³, apesar dos valores de cálcio apresentarem valores mais baixos na camada 20-40 cm comparado a camada 0-20 cm, os valores se encontram acima do recomendado para o uso de gesso.

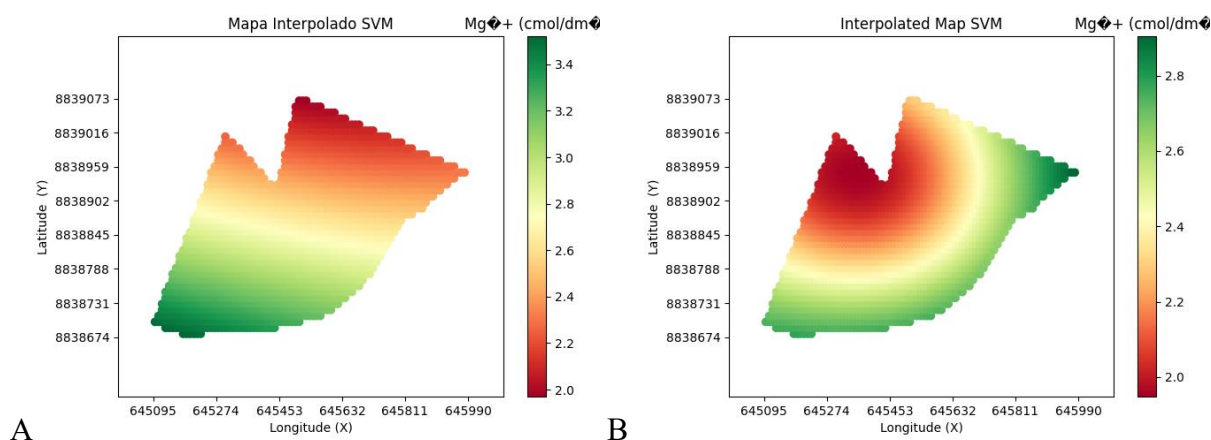
Figura 8. Mapas do teor de Cálcio (Ca) em cmol/dm³ nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

O magnésio apresenta valores mais elevados na camada 20-40 cm, entre 1,9 e 3,8 cmol/dm³ (Figura 9B e Tabela 2) comparado com a camada 0-20 cm (Figura 9A), onde os valores estão entre 2 e 4 cmol/dm³ (Tabela 1), este efeito pode ser explicado pelo raio iônico hidratado, quanto maior o raio, menor é a força de adsorção e, portanto, maior a mobilidade no solo (Benites, et al, 2010). O magnésio é um macronutriente secundário utilizado pelas plantas e sua principal função é ser átomo central da molécula de clorofila, que é responsável pela absorção de luz e transferência de energia na fotossíntese (Oliveira et al., 2024).

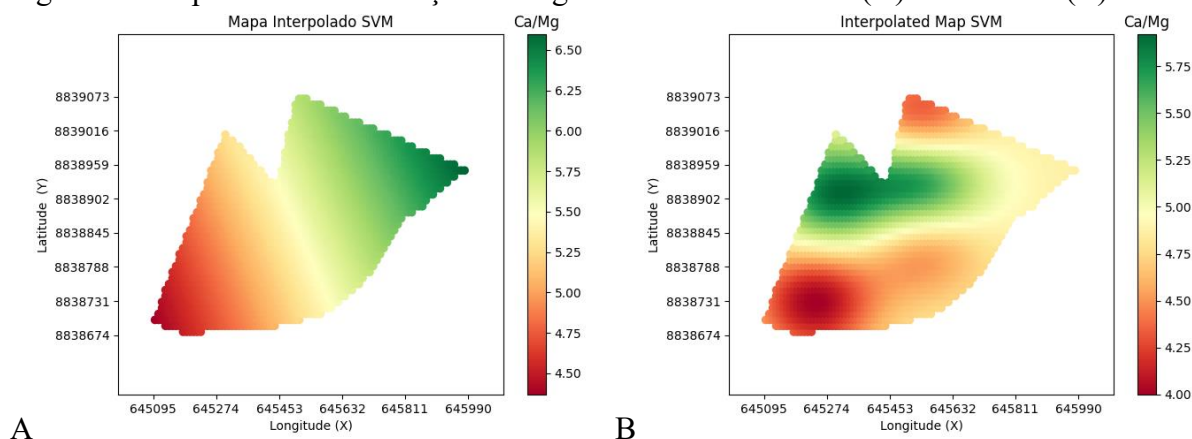
Figura 9. Mapas do teor de Magnésio (Mg) em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

A relação Ca/Mg (Figura 10A e 10B) se mantém entre 3:1 e 5:1, indicando condições favoráveis ao acúmulo de massa seca radicular e da parte aérea da soja e do milho, aumentando a produção de soja (Lange et al, 2021).

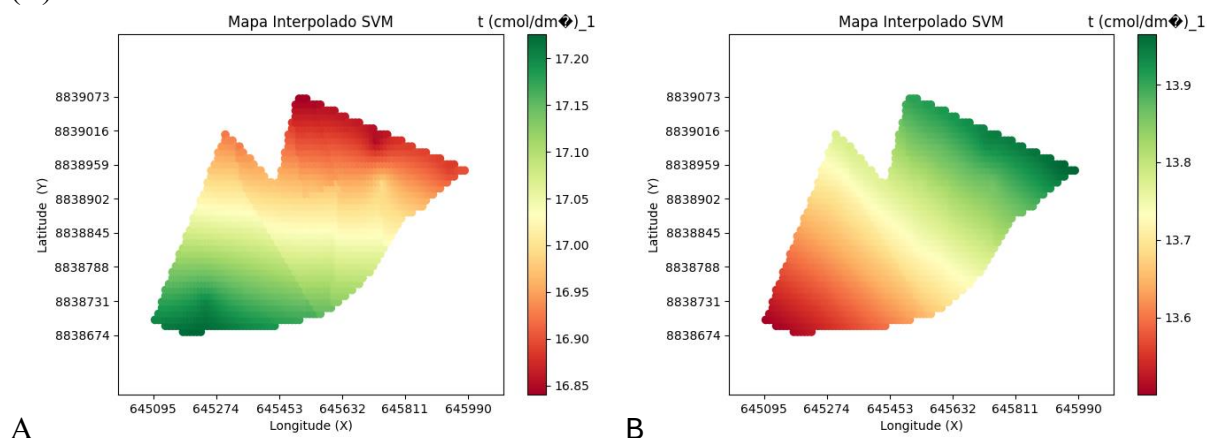
Figura 10. Mapas do teor da relação Ca/Mg nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

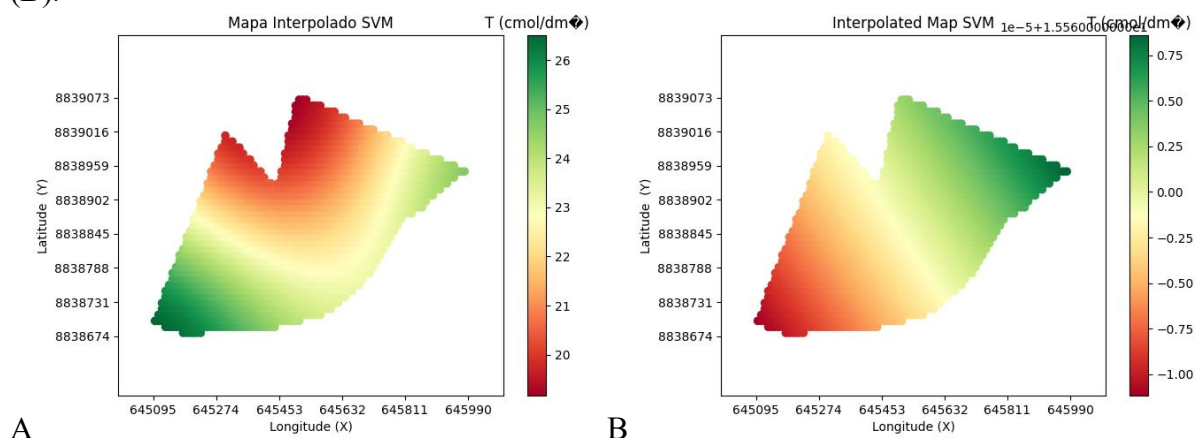
O mapa de CTC efetiva na camada 0-20 cm (Figura 11A) apresenta valores entre 15,97 e 22,83 cmol/dm^3 (Tabela 1), o mapa de CTC pH 7,0 na camada 0-20 cm (Figura 12A) apresenta semelhança com o mapa de CTC efetiva, porém, seus valores variam entre 17,23 e 26,52 cmol/dm^3 . A camada 20 a 40 cm (Figura 11B), apresenta CTC efetiva com valores entre 12,95 e 16,28 cmol/dm^3 (Tabela 2), já a CTC pH 7,0 (Figura 12B) apresenta valores um pouco mais altos, entre 14,05 e 17,58 cmol/dm^3 (Tabela 2). A baixa CTC efetiva nas duas camadas indica possíveis limitações à disponibilidade de nutrientes em profundidade (Souza, 2003).

Figura 11. Mapas do teor de CTC efetiva em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

Figura 12. Mapas do teor de CTC a pH 7,0 em cmol/dm^3 nas camadas 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B).



Fonte: Jorge, 2025.

Segundo Ronquim (2020), um solo é considerado bom para a nutrição das plantas, quando a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais, como Ca (cálcio), Mg (magnésio) e K (potássio), porém se um solo está ocupado por cátion tóxicos, como o H (hidrogênio) e Al (alumínio), o solo é considerado pobre de nutrientes. A saturação por cátions essenciais indica boa fertilidade superficial, mas a baixa CTC efetiva em profundidade exige atenção à adubação em camada subsuperficiais.

Os resultados revelam padrões distintos entre a camada 0-20 cm e a camada 20-40 cm, refletindo influências de manejo agrícola e processos como a lixiviação. O pH, assim como outros nutrientes, como o cálcio, fósforo e o potássio apresentam valores mais elevados na camada 0-20 cm, já o magnésio e matéria orgânica apresentam taxas mais altas na camada 20-40 cm.

5. CONCLUSÃO

A interpolação geoespacial dos dados possibilitou a identificação precisa de áreas com déficits ou excesso de nutrientes, gerando mapas de fertilidade que orientam decisões estratégicas, incluindo a geração de mapas de zonas de manejo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Marlene Cristina. Sistemas de rotação de culturas com plantio direto em Latossolo Roxo: efeitos nas propriedades físicas e químicas; 1992.

ARTUSO, Deonilce Retka; MOTERLE, Diovane Freire; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos; TIECHER, Tales. Potassium distribution in soil profiles under no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.48, e0230125, 2024.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 2005.

BASSOI, Luís Henrique; INAMASU, Ricardo Yassushi; BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; VAZ, Carlos Manoel Pedro; SPERANZA, Eduardo Antonio; CRUVINEL, Paulo Estevão. Agricultura de precisão e agricultura digital. TECCOGS – *Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, n. 20, p. 17-36, jul./dez. 2019.

BENITES, Vinícius de Melo; CARVALHO, Maria da Conceição Santana; RESENDE, Álvaro Vilela de; POLIDORO, José Carlos; BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; OLIVEIRA, Fábio Alvares de. O potássio, o cálcio e o magnésio na agricultura brasileira. In: EMBRAPA. *Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes: produto da rede FertBrasil*. Embrapa: Brasília, DF, pp. 16-45, 2012.

BOLFE, Édson Luis; JORGE, Lúcio André de Castro; SANCHES, Ieda Del'Arco; LUCHIARI JÚNIOR, Ariovaldo; COSTA, Cinthia Cabral da; VICTORIA, Daniel de Castro; INAMASU, Ricardo Yassushi; GREGO, Célia Regina; FERREIRA, Victor Rodrigues; RAMÍREZ, Andréa Restrepo. *Precision and digital agriculture: Adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. Agriculture*, 10.12: 653, 2020.

CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUWER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 4, p. 1240-1248, 1994.

DABA, Ashenafi Worku. Rehabilitation of soil salinity and sodicity using diverse amendments and plants: a critical review, 2024.

DAVEY, B.J.; CONYERS, M.K. Determining the pH of acid soils. *Soil Science*, Baltimore, v.146, n.3, p.141-150, 1988.

DUARTE, Jason de Oliveira; MATTOSO, Marcos Joaquim; GARCIA, João Carlos. Importância Socioeconômica do milho. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de->

[informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica](#). Acesso em: 24 abr. 2025.

EMBRAPA Meio Ambiente. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical, 2023.

GOMES, Frederico Pimentel e GARCIA, Carlos Henrique. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002.

HAUSCHILD, Fábio Evandro Grub. Técnicas de agricultura de precisão para definição de zonas de manejo de solo. Santa Maria, 2013.

IBGE. Especificações e Normas para Levantamento Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/pdf/se.pdf. Acesso em: 6 mar. 2025.

INAMASU, Ricardo Yassushi; BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; VAZ, Carlos Manuel Pedro; PIRES, João Leonardo Fernandes; GEBLER, Luciano; JORGE, Lúcio André de Castro; BASSOI, Luís Henrique. *Agricultura de Precisão: Um novo olhar na Era Digital*, 1ª ed.; Embrapa: São Carlos, SP, 2024; pp. Xi-xvi. DOI: <https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000003>.

JOHNSTON, Johnny; FELLOW, Lawes Trust Senior. *Assessing soil fertility: the importance of soil analysis and its interpretation*. Potash Development Association, York, UK, 2005.

KÖPPEN. Classificação dos climas segundo Köppen. In: Moreno, J. A. *Climatologia do Brasil*; EDUSP: São Paulo, 1961; pp. 119-142.

LANGE, Anderson; CAVALLI, Edilson; PEREIRA, Cassiano Spaziani; CHAPLA, Marcos Vinícius; FREDDI, Onâ da Sila. Relações Cálcio: Magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. *Nativa*. 2023, 9(3), 294-301. DOI: [10.31413/nativa.v9i3.11526](https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.11526).

LUCHIARI JUNIOR, Ariovaldo; BORGHI, Emerson; AVANZI, Junior César; FREITAS, Alexandre Aires de; BORTOLON, Leandro; BORTOLON, Elisandra Solange Oliveira; UMMUS, Marta Eichemberger; INAMASU, Ricardo Yassushi. Zonas de manejo: teoria e prática. In: REDE AP. *Livro 1: Agricultura de Precisão no Brasil*; Embrapa Pesca e Aquicultura: Palmas, 2011.

LUCHIARI JUNIOR, Ariovaldo.; SHANAHAN, J.; LIEBIG, M.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D.; PAYTON, S. Strategies for Establishing Management Zones for Site Specific Nutrient Management. In: *Proceedings of the 5 th International Conference on Precision Agriculture*, 2000, Minneapolis; University of Minnesota: Minneapolis, 2000.

LUZ, Maria José da Silva; FERREIRA, Gilvan Barbosa; BEZERRA, José Renato Cortez. Adubação e correção do solo: procedimentos a serem adotados em função dos resultados da análise do solo. *Circular Técnica 63*, MAPA, Campina Grande-PB, 2002.

MACÁRIO, Carla Geovana do Nascimento; ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora; COUTINHO, Alexandre Camargo; Speranza, Eduardo Antonio; SILVA, João dos Santos Vila da; ANTUNES, João Francisco Gonçalves; VENDRUSCULO, Laurimar Gonçalves; CRUZ, Sérgio Aparecido Braga da. Geotechnologies in digital agriculture. *Digital agriculture: research, development and innovation in production chains*. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 4, p. 71-89.

MALLA, Razan; SHRESTHA, Shankar; KHADKA, Dinesh; BAM, Chet Raj. Soil fertility mapping and assessment of the spatial distribution of Sarlahi District, Nepal. *American Journal of Agricultural Science*. Vol. 7, No. 1, 2020, pp. 8-16.

MANZIONE, Rodrigo Lilla.; ZIMBACK, Célia Regina Lopes. Análise Espacial Multivariada Aplicada na Avaliação da Fertilidade do Solo. *Revista Engenharia na Agricultura - REVENG*, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 227–235, 2011. DOI: 10.13083/reveng.v19i3.181. Disponível em: <https://beta.periodicos.ufv.br/reveng/article/view/163>. Acesso em: 13 mar. 2025.

MELÉM JÚNIOR, Nagib Jorge; FONSECA, Inês Cristina de Batista; BRITO, Osmar Rodrigues; DECAENS, Thibaud; CARNEIRO, Massiene Meireles; MATOS, Maria de Fátima Alves de; GUEDES, Marcelino Carneiro; QUEIROZ, José Antonio Leite de; BARROSO, Kátia de Oliveira. Análise de componentes principais para avaliação de resultados analíticos da fertilidade de solos do Amapá. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 29, n.3, p. 499-506, jul./set. 2008.

MENDES, Alessandra Monteiro Salviano. *Introdução à fertilidade do solo*. Aula ministrada no Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água promovido pela Superintendência Federal de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Estado da Bahia – SFA-BA/SDC/MAPA, no auditório da UFBA, em Barreiras-BA, 2007.

MENDONÇA-SANTOS, Maria de Lourdes; SANTOS, Humberto Gonçalves dos. *Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos: métodos, paradigmas e novas técnicas*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

MORATO, Leandro Xavier de Oliveira; OLIVEIRA, Gabriela Costa; SILVA, Vladimir Antonio. Variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo da fazenda Varginha. *Brazilian Journal of Development*. 2021, 7(12), 119119-119135. DOI: 10.34117/bjdv7n12-599.

OLIVEIRA, Cintia da Silva; OLIVEIRA, Jaiara Almeida de; ASSIS, Valeska Cristina Souza Silva de; OLIVEIRA, Gustavo Henrique de; SÁ, Amanda Aciely Serafim de; SILVA, Ramom Pereira; CASAMASSA, Maurício Tayar; BERTI, Mariana Pina da Silva. Dinâmica do magnésio no sistema solo-planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, [S. l.], v. 17, n. 4, 2024. DOI: 10.36560/17420241898. Disponível em: <https://scientificelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/1898>. Acesso em: 29 abril. 2025.

OLIVEIRA, Fábio Alvares de; CASTRO, César de; OLIVEIRA JUNIOR, Adilson; KLEPKER, Dirceu; FIRMANO, Ruan Francisco. Tecnologias de manejo da fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: *Documentos Embrapa Soja*, 1ª ed.; Embrapa: Londrina, PR; Vol. 458, 75 pp.

PASQUATTO, Igor Alexandre. Aplicação de técnicas de geoprocessamento no desenvolvimento de mapas de fertilidade do solo. *Tese de Bacharelado*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022.

PEREIRA, Gustavo Willian; VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães; QUEIROZ, Daniel Marçal de; COELHO, André Luiz de Freitas. SMART-MAP: Plugin QGIS para interpolação utilizando Krigagem Ordinária e Machine Learning. In: *Anais do 14º Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO)*, 2023, Natal/RN. Sociedade Brasileira de Computação: Porto Alegre, 2023; pp. 127-134. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbiagro.2023.26550>.

PROCÓPIO, Sérgio de Oliveira; CRUZ, Marcos Aurélio Soares; ALMEIDA, Márcio Rogers Melo de; JESUS JÚNIOR, Luciano Alves de; NOGUEIRA JÚNIOR, Lauro Rodrigues; CARVALHO, Hélio Wilson de Lemos. Sealba: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. (Documentos, 221).

RAMOS, F. P. L.; OLIVEIRA, J. P. M. de. Agricultura digital como ferramenta de auxílio em tomadas de decisões dos produtores rurais do Brasil. *Anais de Agronomia*, 2021, 2(1), 1-13.

ROSAS, Jorge Tadeu Fim; DEMATTÊ, José A.M.; ROSIN, Nicolas Augusto; BARTSCH, Bruno dos Anjos; POPPIEL, Raul Roberto; RODRIGUEZ-ALBARRACIN, Heidy Soledad; NOVAIS, Jean Jesus Macedo; PAVINATO, Paulo Sergio; MA, Yuxin; MELLO, Danilo César de; FRANCELINO, Mrcio Rocha; ALVEZ, Marcelo Rodrigo. Geotechnologies on the phosphorus stocks determination in tropical soils: General impacts on society. *Science of The Total Environment*, 2024.

RONQUIM, Carlos Cesar. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 35, v. 2. Campina: Embrapa Territorial, 2020.

SCALON, Lourenço Quintão. Variabilidade espacial da fertilidade do solo e mapas de recomendação, 2020.

SCHMIDT, O.; HUGHES-GAMES, G. *Potassium considerations for nutrient management. Nutrient Management Factsheet – No. 7 in Series*. Disponível em: https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/631500-5_potassium_considerations_factsheet_no7_sep2010.pdf. Acesso em: 4 abr. 2025.

SCHOFIELD, R.K.; TAYLOR, A.W. The measurement of soil pH. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.25, n.2, p.164-167, 1955.

SILVA, Fábio César da (Ed.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*, 2ª ed., rev. e ampl.; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, DF; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2009; pt. 2, cap. 1, pp. 107-189.

SILVA, Henrique Gabriel da; MARQUES, Maycon Luis; CIACCI, Lucio Flávio; OLIVEIRA, Allison Souza de; MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor; ROCHA, Marcelo Henrique Fernandes de Faria; RODRIGUES, Luciano Santos; FREITAS, Aurivan Soares de. Spatial analysis of soil chemical attributes and generation of fertilizer and correction application maps in Coffee Culture. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 11, n. 12, p. e524111234997, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i12.34997. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/34997>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SOBRAL, Lafayette Franco; BARRETO, Marcos Cabral de Vasconcellos; SILVA, Airon José da; ANJOS, Joézio Luiz dos; CPATC. Guia Prático Para Interpretação De Resultados De Análises De Solos; 2015.

SOUSA, Djalma Martinho Gomes de; LOBATO, Edson. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.

SOUSA, Djalma Martinho Gomes de; LOBATO, Edson. Cerrado: correção do solo e adubação, 2ª ed.; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, DF, 2004.

TAVARES, Tiago R.; MOUAZEN, Abdul M.; NUNES, Lidiane. C; SANTOS, Felipe R. dos; MELQUIADES, Fábio L.; SILVA, Thainara R. da; KRUG, Francisco J.; MOLIN, José P.. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for tropical soil fertility analysis. *Soil and Tillage Research*, 216: 105250, 2022.

VARVEL, Gary. E.; SCHLEMMER, Michael R.; SCHEPERS, James S. *Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels*. Disponível em: https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/631500-5_potassium_considerations_factsheet_no7_sep2010.pdf. Acesso em: 4 abr. 2025.

WERLE, Rodrigo; GARCIA, Rodrigo Arroyo; ROSOLEM, Ciro Antônio; Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, [S.l.], v. 32, n. 6, p. 2297-2305, nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600009>.