

**AGROTEC**Revista Agropecuária Técnica
Since 1981

ISSN impresso 0100-7467 - ISSN online 2525-8990

AGRARIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Inovação Tecnológica na Agricultura: Análise de Solos da Região das Missões por Espectroscopia NIR como Alternativa Sustentável aos Métodos Convencionais

Antonio Vanderlei dos Santos^{1*}, Vitor Cauduro Girardello¹, João Fernando Zamberlan¹, Paulo Ricardo Betencourt¹, Chrys Katielli Hoinacki Da Silva¹, Carlos Ariel Samudio Perez¹

Resumo

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se destacado como alternativa rápida e de menor custo para avaliar a fertilidade do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da NIR associada à calibração multivariada para estimar teores de argila, matéria orgânica, cálcio, potássio e fósforo em solos da Região das Missões (RS). Foram coletadas 700 amostras em 25 propriedades rurais, preparadas em laboratório e analisadas por métodos convencionais e por espectroscopia NIR em modo de reflectância difusa. Os dados espectrais foram pré-processados e relacionados aos valores de referência por regressões PLS e PCR, com divisão em conjuntos de calibração e validação. Os modelos apresentaram desempenho de moderado a elevado, com melhores ajustes para argila e matéria orgânica e desempenho intermediário para Ca, K e P. Conclui-se que a NIR é ferramenta promissora para estimativas rápidas de atributos de fertilidade do solo, em agricultura de precisão e em laboratórios de análise.

Palavras-chave: Análise de solos, agricultura de precisão, inovação tecnológica, NIR

Abstract

Technological Innovation in Agriculture: Soil Analysis in the Missões Region using NIR Spectroscopy as a Sustainable Alternative to Conventional Methods. Near infrared (NIR) spectroscopy has emerged as a fast and cost-effective alternative for assessing soil fertility. This study aimed to evaluate the potential of NIR spectroscopy combined with multivariate calibration to estimate clay content, organic matter, calcium, potassium and phosphorus in soils from the Missões region, southern Brazil. A total of 700 soil samples were collected from 25 rural properties, prepared under standard laboratory procedures and analyzed both by conventional reference methods and by NIR spectroscopy in diffuse reflectance mode. Spectral data were preprocessed and related to the reference values using PLS (Partial Least Squares) and PCR (Principal Component Regression), with partitioning into calibration and validation sets. The models showed moderate to high performance, with better fits for clay and organic matter and intermediate performance for Ca, K and P. The results indicate that NIR is a promising tool for rapid estimation of key soil fertility attributes in precision agriculture and routine soil testing laboratories.

Keywords: Soil analysis, precision agriculture, technological innovation, NIR

Submetido em 22/01/2025;

¹Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Campus Santo Ângelo, Rio Grande do Sul Brasil
Email: vandao@san.uri.br * (Autor correspondente)

Introdução

A região das Missões, no noroeste do Rio Grande do Sul, caracteriza-se por forte presença de agricultura familiar, uso intensivo do solo e diversificação produtiva, com destaque para culturas como soja, milho, feijão e pecuária. A produtividade desses sistemas está diretamente relacionada à fertilidade do solo, que apresenta marcada variabilidade espacial e temporal, influenciada por fatores como clima, manejo e uso da terra. Assim, o monitoramento contínuo de atributos físicos e químicos do solo é essencial tanto para a manutenção da capacidade produtiva quanto para a conservação ambiental, especialmente em cenários de intensificação sustentável da agricultura.

Os métodos laboratoriais convencionais de análise de solo, embora consolidados e precisos, são relativamente lentos, custosos e demandam elevado consumo de reagentes químicos, o que limita sua aplicação em larga escala e em contextos de agricultura de precisão. Nesse cenário, a espectroscopia de reflectância no visível e infravermelho próximo (Vis-NIR) tem se destacado como método rápido, de menor custo e potencialmente não destrutivo para a predição de diversas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Stenberg et al., 2010; Soriano-Disla et al., 2014). A técnica baseia-se na interação da radiação eletromagnética com grupos funcionais como O-H, C-H e N-H em minerais e compostos orgânicos, cujos sobretons e bandas de combinação no NIR produzem assinaturas espectrais correlacionadas com atributos como textura, matéria orgânica, nutrientes e umidade (Viscarra Rossel et al., 2006).

Avanços recentes em quimiometria e em bancos de dados espectrais ampliaram o escopo da espectroscopia Vis-NIR em ciência do solo. Revisões e estudos de larga escala mostram que bibliotecas espectrais regionais e globais permitem predizer, a partir de espectros Vis-NIR, atributos como carbono orgânico, argila, pH, CTC e teores de óxidos de ferro, com desempenho frequentemente adequado para aplicações agronômicas (Soriano-Disla et al., 2014; Viscarra Rossel et al., 2016). Esses resultados têm impulsionado a integração da espectroscopia NIR a plataformas digitais e à agricultura de precisão, favorecendo o mapeamento em alta resolução da variabilidade do solo e a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis e eficientes. De forma complementar, estudos recentes também destacam o papel de técnicas espectrais e de aprendizado de máquina em aplicações de alto rendimento em agrociência, reforçando o caráter não destrutivo e a rapidez dessas abordagens (Zhai et al., 2023).

Nesse contexto, o presente trabalho busca preencher uma lacuna de conhecimento ao avaliar, de forma sistemática, o uso da espectroscopia no infravermelho próximo associada à calibração multivariada para estimar atributos de fertilidade em solos da Região das Missões, no sul do Brasil. Especificamente, investigam-se modelos baseados em PLS e PCR para a predição dos teores de argila, matéria orgânica, cálcio, potássio e fósforo a partir de uma base de 700 amostras de solo coletadas em 25 propriedades rurais. Ao combinar um grande conjunto de dados locais com métodos de análise espectral e estatística avançados, o estudo pretende demonstrar o potencial da NIR como alternativa inovadora aos métodos convencionais de análise de solo, com aplicações diretas em laboratórios de rotina e em estratégias de agricultura de precisão voltadas a pequenos e médios produtores.

2 Materiais e Métodos

O presente estudo caracteriza-se, quanto aos objetivos, como exploratório, descritivo e explicativo, uma vez que busca compreender as potencialidades da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como alternativa aos métodos tradicionais de análise do solo, ao mesmo tempo em que descreve as condições edafoclimáticas da região das Missões e analisa os fatores que justificam a viabilidade dessa tecnologia. Do ponto de vista metodológico, trata-se de uma pesquisa experimental, conduzida por meio de testes práticos em 25 propriedades rurais, configurando também um estudo de caso por se concentrar em um contexto regional específico. A abordagem

adotada é quantitativa, baseada em medições objetivas das propriedades físicas e químicas do solo, e comparativa, ao confrontar os resultados obtidos por NIR com aqueles provenientes de métodos convencionais, considerando aspectos como custo, tempo e impacto ambiental. Quanto à natureza, a pesquisa é classificada como aplicada, por buscar soluções práticas para o manejo do solo na agricultura, contribuindo para o avanço tecnológico e a sustentabilidade do setor. O trabalho aqui relatado seguiu algumas etapas para garantir a sua organização, execução e avaliação dos resultados. Estas etapas incluem a coleta das amostras de solo, a aquisição e caracterização dos espectros NIR.

2.1 Coleta de Amostras

A coleta das amostras de solo foi realizada em 25 propriedades rurais distribuídas nos municípios de Santo Ângelo, Vitória das Missões, Giruá e Guarani das Missões, localizados na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, na chamada Região das Missões, inserida no Planalto Meridional de origem basáltica. Nessa área predominam solos profundos e argilosos, especialmente Latossolos Vermelhos e Nitossolos, com ocorrência de Gleissolos em posições mais baixas e mal drenadas da paisagem, amplamente utilizados para agricultura mecanizada. O clima regional é classificado como subtropical úmido (Cfa, segundo Köppen), caracterizado por verões quentes, invernos amenos e precipitação bem distribuída ao longo do ano. A amostragem seguiu protocolos padronizados para fins de fertilidade do solo, com coleta no horizonte superficial, a 10 cm de profundidade, conforme as recomendações de CQFS-RS/SC (2016), Teixeira et al. (2017) e Silva (2009). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e armazenadas para posterior análise. No total, foram coletadas 700 amostras de solo para este estudo, as quais foram encaminhadas ao laboratório para análise. Essa etapa enfrentou desafios, como adiamentos devido às chuvas intensas e dificuldades logísticas relacionadas à troca de secretários municipais de agricultura.

2.2 Análises Espectroscópicas e a Calibração

A espectroscopia NIR foi utilizada para coletar os espectros das amostras de solo. Após a coleta em campo, as amostras foram levadas ao laboratório, onde foram secas ao ar em temperatura ambiente, destorroadas manualmente e peneiradas em malha de 2 mm, seguindo os procedimentos usuais de preparo para análises de fertilidade do solo. Em seguida, o solo peneirado foi homogeneizado e acondicionado em copos de amostragem, formando uma camada superficial uniforme para a leitura espectral.

Os espectros de radiação no infravermelho próximo foram obtidos com o espectrofotômetro portátil ITPHOTONICS Polisphec NIR (ITPhotonics S.r.l., Itália), equipado com fonte de luz halógena e detector InGaAs de 256 pixels, operando na faixa espectral de aproximadamente 900–1700 nm, com resolução média em torno de 3,2 nm. As medidas foram realizadas no modo de reflectância difusa, em geometria 0°/difusa, utilizando a referência interna automática do equipamento antes de cada conjunto de leituras. Para cada amostra, foram adquiridos múltiplos espectros consecutivos, posteriormente médios, a fim de reduzir o ruído instrumental.

Com o objetivo de desenvolver um modelo de calibração capaz de quantificar as informações contidas nos espectros NIR, 700 amostras de solo foram previamente analisadas por métodos químicos convencionais (via úmida), determinando-se os teores de argila, matéria orgânica, cálcio (Ca), potássio (K) e fósforo (P) em cada amostra. Esses valores de referência foram então correlacionados ao comportamento espectral no NIR. Os espectros brutos foram submetidos a pré-processamentos quimiométricos usuais, como correção de espalhamento e derivação espectral, com o intuito de minimizar efeitos físicos (granulometria, compactação da amostra, pequenas variações de umidade) e realçar bandas relacionadas aos constituintes químicos de interesse.

Para cada atributo do solo (argila, matéria orgânica, Ca, K e P) foram ajustados modelos de calibração por regressão multivariada entre os espectros NIR e os valores obtidos pelos métodos de referência, gerando modelos preditivos específicos. O conjunto de 700 amostras foi particionado em subconjuntos de calibração e validação, e a qualidade dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), análise dos resíduos e gráficos de regressão entre valores observados (laboratório) e valores preditos pelo modelo. Esses procedimentos permitiram verificar a capacidade da espectroscopia NIR em estimar, de forma rápida e não destrutiva, os atributos químicos e físicos selecionados do solo.

3 Resultados

O estudo adotou abordagem aplicada, com caráter exploratório, descritivo, explicativo e experimental, conduzido como estudo de caso na região das Missões (RS). Foram coletadas 700 amostras de solo em 25 propriedades, seguindo protocolos padronizados de fertilidade. Após secagem, destorroamento e peneiramento, as amostras foram analisadas por espectroscopia NIR (900–1700 nm) em reflectância difusa. Paralelamente, determinaram-se, por métodos convencionais, os teores de argila, matéria orgânica, Ca, K e P. Os dados espectrais foram pré-processados e correlacionados aos valores de referência por regressão multivariada, com divisão em conjuntos de calibração e validação e avaliação do desempenho por coeficiente de determinação (R^2).

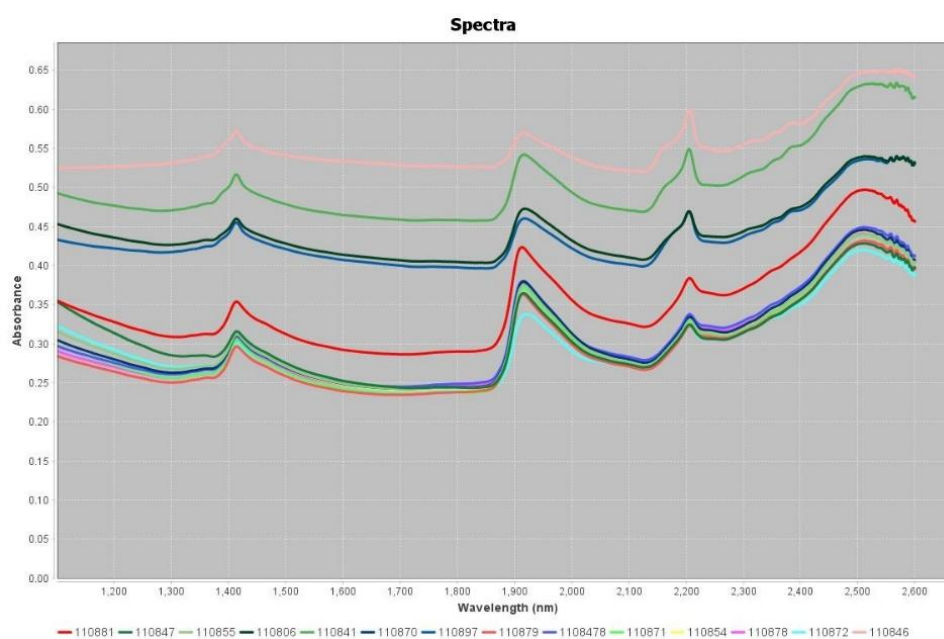


Figura 1: Espectros de absorção no infravermelho próximo (NIR) das amostras de solo, representando os valores de absorvância (eixo y) em função do comprimento de onda (eixo x). Cada curva colorida corresponde a uma amostra de solo, identificada pelo código numérico apresentado na legenda (110881, 110847, 110855, 110806, 110841, 110870, 110897, 110879, 110878, 110871, 110854, 110878, 110872, 110846).

Os espectros usando espectroscopia NIR foi obtido para um grupo de amostras de solo (Figura 1). Cada espectro é um padrão de absorvância da radiação infravermelha pela amostra em função do comprimento de onda da radiação NIR (Figura 1). Cada padrão é formado por picos e vales, sendo os picos formados pela absorção da radiação em faixas de comprimento de onda da radiação NIR específicas (Figura 1). A caracterização de um espectro ajuda a inferir sobre a composição química do solo uma vez que os picos estão relacionados à presença de componentes químicos específicos, como moléculas de água, carbono orgânico, minerais e/ou grupos funcionais presentes no solo

(Figura 1). Por outro lado, a análise da inclinação da curva-permite identificar características físicas do solo, como a textura e a estrutura (Figura 1). Os espectros apresentados não são idênticos, o que sugere que as amostras analisadas possuem composições químicas e/ou propriedades físicas distintas (Figura 1). A caracterização detalhada dos padrões de absorvância em determinadas regiões do espectro permite identificar assinaturas espectrais relacionadas a propriedades específicas do solo (Angelopoulou et al., 2020; Rossel et al., 2016). A presença de picos de absorção entre 1400–1500 nm e 1900–2000 nm, por exemplo, está associada à presença de água, ligada ou livre, nas amostras de solo. Já picos na região acima de 2000 nm podem estar associados a materiais orgânicos e a determinados minerais.

Como esperado, a espectroscopia NIR pode ser empregada tanto na caracterização qualitativa quanto na quantitativa do solo. Para que a caracterização quantitativa seja bem-sucedida, é necessário desenvolver modelos de calibração multivariada robustos (Figura 1). Em geral, esses modelos de calibração são elaborados a partir da correlação entre as informações contidas nos espectros NIR e os dados de referência, obtidos por métodos analíticos convencionais, bem conhecidos para as mesmas amostras, frequentemente utilizando técnicas como regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). Neste estudo, o modelo de calibração foi elaborado a partir da correlação entre os dados espectrais de absorvância no NIR e os valores de referência obtidos em laboratório (Figura 1). Esses valores de referência foram determinados por métodos convencionais de análise do solo, englobando análise granulométrica para obtenção do teor de argila e análises químicas para determinação dos teores de matéria orgânica, cálcio, potássio e fósforo nas amostras, expressos em unidades usuais para estudos de fertilidade do solo (por exemplo, %, g kg^{-1} ou mg dm^{-3} , conforme o parâmetro avaliado).

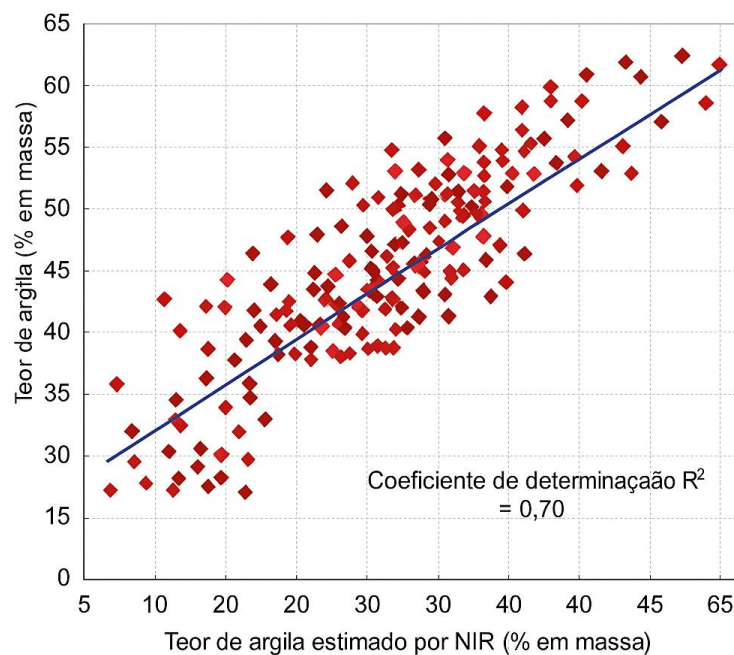


Figura 2. Relação entre o teor de argila (% em massa) determinado por método laboratorial e os valores estimados por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,70$) indica uma correlação positiva moderadamente forte entre os dois conjuntos de dados.

A relação entre o teor de argila (% em massa) determinado por métodos laboratoriais convencionais e os valores estimados por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)(Figura 2). Observa-se uma tendência linear positiva entre os dois conjuntos de dados, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$, indicando que 70% da variabilidade dos dados laboratoriais pode ser explicada pelas

estimativas do modelo NIR (Figura 2). Apesar da boa correlação, nota-se certa dispersão dos pontos, especialmente nas faixas médias e superiores de teor de argila, o que sugere a possibilidade de melhorias no modelo preditivo. O modelo de calibração para os teores de argila, onde o eixo x do gráfico estão representados os valores percentuais da quantidade de argila determinados pela absorvância da radiação infravermelha via espectroscopia NIR (NIR values), enquanto que no eixo y encontram-se os valores de referência (Ref values) que correspondem aos percentagens de argila determinados pelos métodos químicos tradicionais (Figura 2). Cada ponto vermelho no gráfico representa uma das 700 amostras estudadas, comparando os seus valores previsto pela espectroscopia NIR e de referência (Figura 2). Os pontos apresentam uma tendência linear de crescimento, portanto, os valores de referência crescem conforme os valores NIR aumentam (Figura 2). Este tipo de comportamento sugere utilizar como modelo de calibração uma linha reta (Figura 2). Assim, como primeira aproximação para calibrar os dados NIR, o conjunto de pontos foi ajustado utilizando o método de regressão linear (linha azul)(Figura 2). Para avaliar o grau de precisão do ajuste foi determinado o coeficiente de determinação (R^2), que reflete o grau de ajuste da regressão linear aos dados experimentais (Figura 2).

A definição do coeficiente de determinação (R^2), sabe-se que seus valores variam entre 0 e 1. Valores de R^2 próximos de 1 indicam que o modelo apresenta bom ajuste aos dados, explicando grande parte da variabilidade observada (Figura 2). Neste estudo, considerou-se que $R^2 < 0,50$ representa desempenho insatisfatório do modelo, $0,50 \leq R^2 < 0,70$ indica ajuste moderado e $R^2 \geq 0,70$ caracteriza um ajuste considerado adequado para fins de predição (Figura 2). Por outro lado, valores de R^2 muito próximos de 0 indicam que o modelo explica pouca ou nenhuma variância dos dados. O modelo de calibração para o parâmetro argila demonstra uma correlação linear positiva, como evidenciado pelo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,7$), que reflete o bom grau de ajuste da regressão linear aos dados experimentais (Figura 2). Estes resultados indicam que o modelo pode muito bem ser utilizado para indicar qual a provável porcentagem de argila nos solos da região das Missões via espectroscopia NIR.

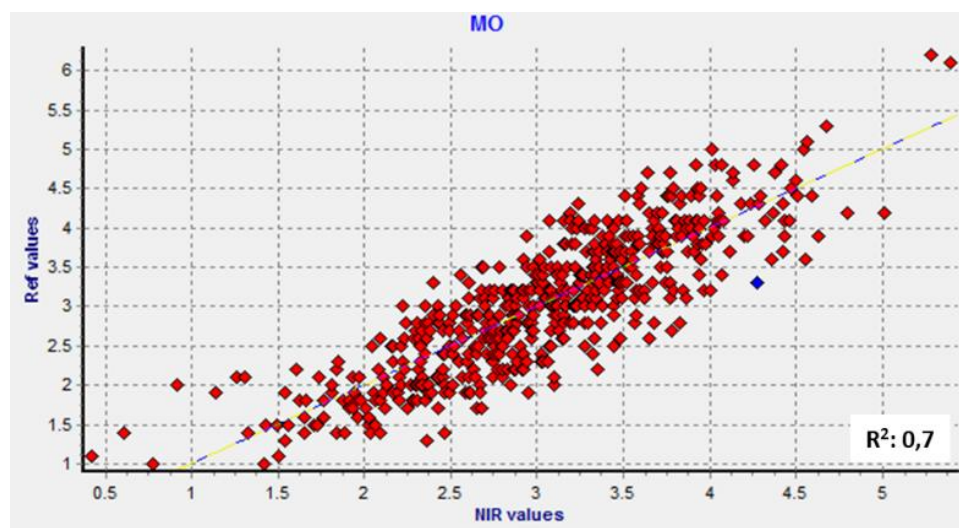


Figura 3: Curva de calibração para matéria orgânica.

O modelo de calibração para matéria orgânica (MO), onde o eixo x representa os valores da concentração da MO estimados a partir do espectro NIR e o eixo y refere-se aos valores observados da MO provenientes de análises laboratoriais tradicionais (Figura 3). A concentração de MO é muito baixa nas 700 amostras estudadas (Figura 3). Observa-se também uma relação linear entre os valores de referência e os obtidos pela espectroscopia NIR (Figura 3). A qualidade do ajuste é indicada pelo valor do coeficiente de determinação $R^2=0,7$ que aponta uma boa correlação entre os valores (Figura 3). O coeficiente de determinação sugere que 70% da variância dos valores de MO

observados pode ser explicada pelo modelo NIR. Esse valor indica um bom ajuste entre os valores previstos e observados principalmente considerando que a porcentagem de MO é baixa nas amostras. Embora o ajuste seja significativo, há espaço para melhorias no modelo de calibração. Tanto o teor de argila quanto o teor de MO são parâmetros que normalmente apresentam alta variabilidade nos solos. A argila está relacionada com a textura do solo e influencia no processo de irrigação do solo: solos arenosos drenam rapidamente enquanto que solos ricos em argila, retém mais água. Já a MO desempenha um papel importante do ponto de vista químico, físico e biológico do solo e é a principal responsável pela retenção de nutrientes no solo, especialmente em solos arenosos.

Os teores de argila e de matéria orgânica são variáveis fundamentais na caracterização do solo, pois influenciam propriedades como a capacidade de troca de cátions, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes, sendo amplamente consideradas na interpretação da fertilidade e nas recomendações de adubação (Silva et al., 2010). Por se tratarem de parâmetros determinados rotineiramente em grande número de amostras e que demandam tempo e reagentes nos métodos convencionais, acredita-se que a introdução do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) possa trazer maior agilidade, rapidez e redução de custos às determinações de argila e matéria orgânica, sem comprometer a qualidade dos resultados (Silva et al., 2010). A maioria dos métodos analíticos para determinação de argila e MO em solos são relativamente demorados e exigem grande demanda de mão de obra e insumos químicos, assim o uso de métodos rápidos, eficientes e de baixo custo para o monitoramento de solos é importante (Figura 3). O R^2 de 0,7 indica que a técnica é capaz de capturar uma parcela significativa da variabilidade nos teores de argila e de MO com base nos valores de NIR, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta complementar ou alternativa aos métodos laboratoriais tradicionais, que demandam maior tempo e custo (Oliveira & Santos, 2023). Baseado nisso pode-se sugerir que a introdução do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) na região das Missões pode trazer agilidade, rapidez e menor custo às análises dos solos.

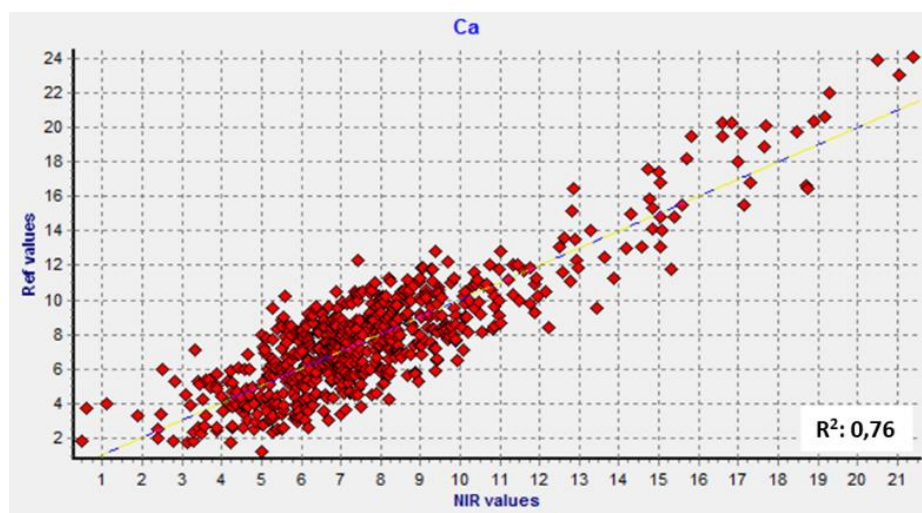


Figura 4: Curva de calibração para cálcio

A relação entre os valores obtidos por espectroscopia NIR e os valores de referência para cálcio nas 700 amostras provenientes da região das Missões (Figura 4). Observa-se que a maioria das amostras apresenta concentrações de referência entre 3% e 11%. A linha de tendência ajustada, representada em amarelo, sugere uma relação linear entre os dois conjuntos de dados, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,76 (Figura 4). Esse valor indica uma correlação positiva de moderada a forte, sugerindo que o método NIR explica 76% da variabilidade dos valores de referência de cálcio nos solos, apesar de 24% da variabilidade permanecer não explicada (Figura 4). De fato observa-se uma

grande dispersão nos valores acima e abaixo da linha de calibração. Por outro lado, a variabilidade pode estar associada a limitações do modelo matemático, ou a variáveis externas não consideradas.

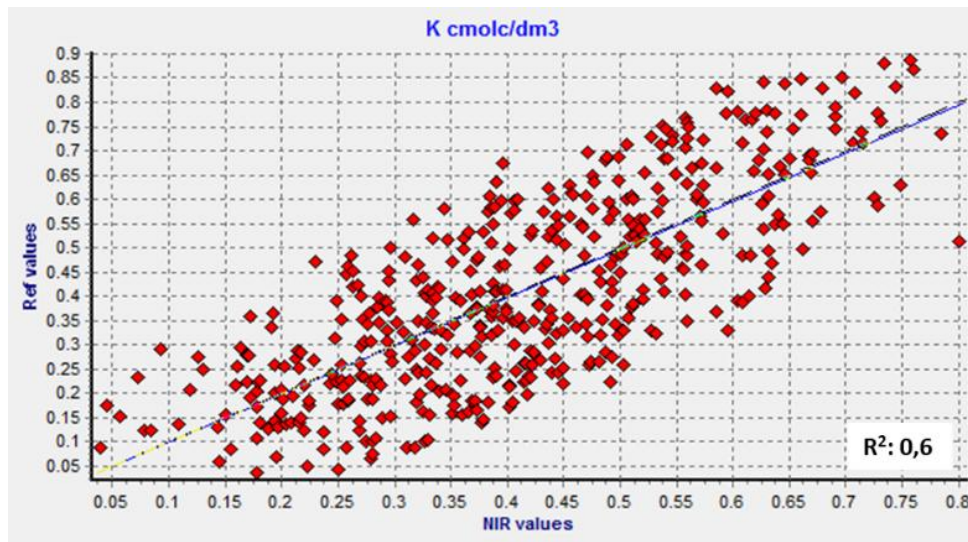


Figura 5: Curva de calibração para potássio.

Os valores obtidos por espectroscopia NIR e os valores de referência para potássio (K)(Figura 5). A linha azul representa o ajuste dos dados e corresponde a uma tendência linear, com um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,6 (Figura 5). Este valor de R^2 indica que há uma correlação de magnitude moderada entre os valores estimados pela espectroscopia NIR e os valores de referência obtidos por métodos convencionais, sugerindo um desempenho intermediário do modelo, com capacidade razoável de predição, mas ainda com margem para aperfeiçoamento (Figura 5). Isto sugere que em casos que se necessite uma maior precisão nos resultados a análise NIR deve ser complementada com análises laboratoriais mais robustas. Estudos prévios indicam que a espectroscopia NIR apresenta melhor desempenho para parâmetros do solo com forte assinatura espectral, como matéria orgânica e argila (Viscarra Rossel et al., 2006; Reeves et al., 2012). Entretanto, para elementos como potássio, que podem ter influência de fatores como textura do solo e umidade, a precisão pode ser reduzida (Terhoeven-Urselmans et al., 2010). Assim, os resultados encontrados no presente estudo estão em conformidade com a literatura, que aponta limitações da técnica para certos elementos químicos.

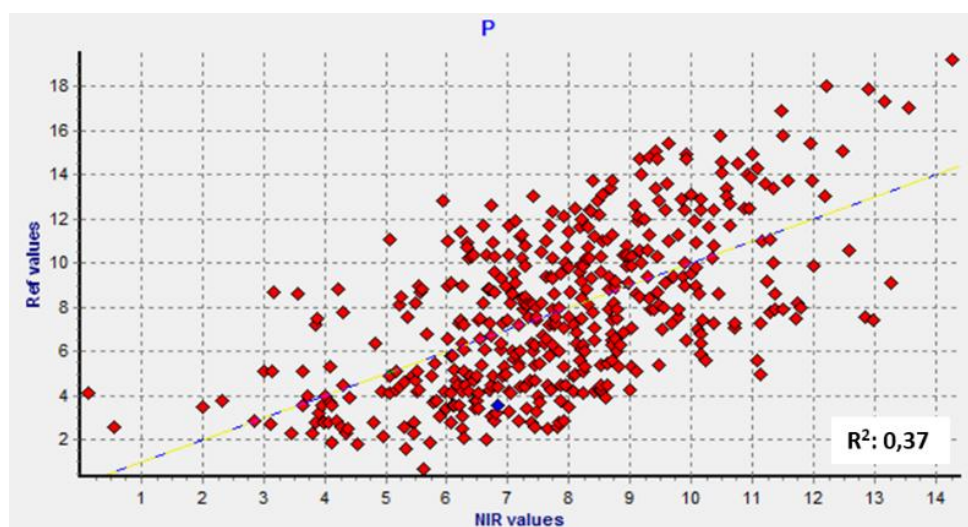


Figura 6: Curva de calibração para fósforo.

A relação entre os valores obtidos por espectroscopia NIR e os valores de referência para fósforo (Figura 6). A linha de tendência ajustada, representada em amarelo e verde, reflete a relação linear entre os dados, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,37 (Figura 6). Este valor indica uma correlação fraca entre os valores obtidos pela espectroscopia NIR e os valores de referência. Isso significa que apenas 37% da variabilidade dos valores de referência é explicada pelo modelo, enquanto 63% permanece sem explicação (Figura 6). Essa baixa correlação pode estar relacionada à variabilidade intrínseca do fósforo no solo, possíveis limitações técnicas do aparelho utilizado efetuar a espectroscopia NIR para detectar fósforo, ou ainda à ausência de ajustes mais refinados no modelo de calibração elaborado. Apesar do baixo desempenho em relação a determinação quantitativa de fósforo, o método NIR pode ser utilizado em aplicações onde não seja necessária uma precisão elevada, como triagens preliminares ou análises de grandes volumes de amostras uma vez que a análise pode ser feita *in loco* e de forma rápida.

4. Discussão

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), associada a métodos de calibração multivariada, para a estimativa de atributos físicos e químicos do solo relevantes à fertilidade em especial os teores de argila, matéria orgânica, cálcio, potássio e fósforo. Os modelos de regressão apresentaram desempenho que variou de moderado a elevado, com melhor capacidade preditiva para argila e matéria orgânica e resultados mais desafiadores para alguns nutrientes, como P e, em menor grau, K. Esse comportamento é coerente com o relatado na literatura, que aponta desempenho consistentemente superior da NIR para propriedades ligadas à fração sólida da matriz do solo (textura e carbono orgânico), enquanto nutrientes em menores concentrações e mais heterogêneos espacialmente tendem a apresentar modelos menos robustos (Soriano-Disla et al., 2014; Reeves et al., 2012; Rossel et al., 2016).

No caso da argila, a boa performance dos modelos pode ser atribuída ao fato de que a fração argilosa influencia diretamente o comportamento espectral do solo, tanto pela presença de minerais específicos (como filossilicatos) quanto por efeitos de espalhamento da radiação, o que gera assinaturas espectrais relativamente estáveis e consistentes. Estudos anteriores também reportaram elevada acurácia da NIR na diferenciação textural e na predição do teor de argila em diferentes classes de solos (Melo & Barreto, 2020; Viscarra Rossel et al., 2006). Assim, a utilização da NIR para estimar a textura em rotinas laboratoriais ou em contextos de agricultura de precisão se mostra uma alternativa promissora para reduzir o tempo e o custo das análises granulométricas tradicionais.

De forma semelhante, os modelos para matéria orgânica apresentaram desempenho satisfatório, o que era esperado, uma vez que compostos orgânicos possuem bandas de absorção bem definidas no infravermelho próximo, principalmente associadas a ligações C–H, N–H e O–H. Diversos trabalhos têm demonstrado que a NIR é particularmente eficiente para a predição de carbono orgânico do solo em diferentes biomas, inclusive em condições tropicais, como Cerrado e Amazônia (Marchão et al., 2019; Gomes & Silva, 2022; Soriano-Disla et al., 2014). Nesse contexto, a possibilidade de estimar rapidamente o teor de matéria orgânica a partir de espectros NIR representa um avanço importante, pois esse atributo é fundamental na interpretação da fertilidade, no manejo da adubação e na avaliação de estoques de carbono em solos agrícolas.

Para os nutrientes cálcio e potássio, os modelos apresentaram desempenho intermediário, indicando que, embora seja possível obter estimativas razoáveis a partir dos espectros NIR, ainda há maior sensibilidade a variações na mineralogia, na umidade residual e em diferenças de manejo entre áreas. Esses resultados corroboram a ideia de que, para cátions trocáveis, a NIR tende a captar tanto efeitos diretos (bandas associadas a minerais e à matéria orgânica que os adsorvem) quanto efeitos indiretos (correlação desses nutrientes com outros atributos do solo). A literatura aponta que a predição de Ca e K por NIR é viável, mas normalmente com desempenho inferior àquele observado

para textura e carbono orgânico, o que reforça a necessidade de calibrações regionais e de bases de dados robustas (Reeves et al., 2012; Soriano-Disla et al., 2014).

No caso do fósforo, a maior variabilidade dos resultados e a menor robustez dos modelos são compatíveis com o fato de que esse nutriente apresenta forte interação com a mineralogia da fração argilosa (particularmente óxidos de Fe e Al) e elevada heterogeneidade espacial. Isso dificulta a construção de modelos generalizáveis e explica por que vários estudos relatam desempenho mais modesto da NIR para P disponível, quando comparado a outros atributos (Rossel et al., 2016; Soriano-Disla et al., 2014). Ainda assim, mesmo modelos com desempenho moderado podem ser úteis em triagens iniciais, na priorização de amostras para análise convencional ou como ferramenta auxiliar em sistemas de recomendação de fertilização em larga escala. A redução da dimensionalidade por componentes latentes, aliada a pré-processamentos adequados (correções de espalhamento, centragem na média, derivadas), contribuiu para mitigar efeitos físicos (granulometria, compactação, pequenas variações de umidade) e realçar correlações com as propriedades de interesse. Esse tipo de abordagem está em consonância com o estado da arte em quimiometria aplicada a solos, que enfatiza a combinação de espectroscopia de reflectância e técnicas multivariadas como estratégia central para construção de bibliotecas espectrais e modelos preditivos de uso prático (Rossel et al., 2016; Soriano-Disla et al., 2014; Stenberg et al., 2010).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma abordagem eficiente para a estimativa de atributos-chave do solo, com destaque para argila, matéria orgânica e cálcio. A aplicação prática dessa técnica é particularmente relevante em contextos de monitoramento em larga escala e agricultura de precisão, uma vez que permite análises rápidas, de menor custo e com redução do uso de reagentes químicos (Silva et al., 2010; Oliveira & Santos, 2023). Apesar disso, limitações foram observadas, especialmente para potássio e fósforo, cujos modelos apresentaram menor robustez, refletindo a influência de fatores como heterogeneidade espacial, mineralogia e baixa assinatura espectral direta (Rossel et al., 2016; Soriano-Disla et al., 2014). Tais limitações indicam que, para determinados nutrientes, a NIR deve ser empregada como ferramenta complementar aos métodos convencionais. Como perspectivas futuras, recomenda-se o aprimoramento dos modelos por meio da ampliação da base de dados, inclusão de maior variabilidade de solos, aplicação de técnicas avançadas de quimiometria e integração com outras abordagens espectroscópicas. Dessa forma, será possível aumentar a robustez, a capacidade preditiva e a aplicabilidade dos modelos em diferentes condições edafoclimáticas.

4 Conclusão

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) demonstrou elevado potencial para a estimativa de atributos físicos e químicos do solo, especialmente para teor de argila e matéria orgânica, apresentando desempenho satisfatório. Os resultados evidenciam que a técnica é capaz de explicar uma parcela significativa da variabilidade desses parâmetros, consolidando-se como uma alternativa rápida, econômica e sustentável em relação aos métodos laboratoriais tradicionais. Para cálcio e potássio, os modelos apresentaram desempenho intermediário, enquanto para fósforo a capacidade preditiva foi limitada, indicando a necessidade de cautela na interpretação desses resultados. Ainda assim, a NIR se mostra útil como ferramenta de triagem e suporte à tomada de decisão em análises de fertilidade. Os achados reforçam a importância da integração entre espectroscopia e quimiometria para o desenvolvimento de métodos analíticos modernos, com potencial de aplicação em larga escala no monitoramento e manejo de solos.

Referências

Abdala, G.; Diedhiou, A.; Dupouey, J.-L.; Buée, M.; Dambrine, E.; Laüt, L.; Garbaye, J. The functional structure of ectomycorrhizal communities in an oak forest in central France witnesses

- ancient Gallo-Roman farming practices. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 5, p. 860-862, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.011>
- Acqua, N. H. D.; et al. Métodos de amostragem de solos em áreas sob plantio direto no Sudoeste Goiano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 117-122, 2013.
- Angelopoulou, T.; Balafoutis, A. T.; Zalidis, G.; Bochtis, D. From Laboratory to Proximal Sensing Spectroscopy for Soil Organic Carbon Estimation—A Review. *Sustainability*, v. 12, n. 2, p. 443, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12020443>
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS-RS/SC). Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016.
- Gomes, F. P.; Silva, R. F. Espectroscopia no infravermelho próximo e análise de componentes principais para investigação de solos submetidos a diferentes usos da terra na Amazônia Oriental brasileira. *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 2, p. 456-472, 2022. <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/3332>
- Liu, B.; Guo, B.; Zhuo, R.; Dai, F. Estimation of soil organic carbon content by Vis-NIR spectroscopy combining feature selection algorithm and local regression method. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0230067, 2023.
- Marchão, R. L.; Sato, J. H.; Figueiredo, C. C. de; Vendrame, P. R. S.; Félix, J. C.; Madari, B. E.; Sano, E. E.; Pulrolnik, K.; Becquer, T. Espectroscopia de infravermelho próximo na quantificação do carbono orgânico em solos do Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2019. 25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 352). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1151621>
- Melo, G. F.; Barreto, L. A. Espectroscopia de infravermelho próximo na avaliação de solos ao longo de uma toposequência. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e20200005, 2020. <https://www.scielo.br/j/rbcs>
- Mendes, A. P.; Costa, L. R. Avaliação do uso da espectroscopia NIR para análise de matéria orgânica em solos tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e20210103, 2021. <https://www.scielo.br>
- Nascimento, F. P. Classificação da pesquisa: natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. In: Nascimento, F. P.; Sousa, F. L. L. Metodologia da pesquisa científica: teoria e prática – como elaborar TCC. Brasília: Thesaurus, 2016. p. 1-11. <https://www.franciscopaulo.com.br/arquivos/Classificando%20a%20Pesquisa.pdf>
- Oliveira, J. P.; Santos, A. V. Classificação da pesquisa: natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. *Revista de Ciências Metodológicas*, v. 25, n. 3, p. 89-102, 2023. Disponível em: <https://www.franciscopaulo.com.br>
- Rabello, L. M.; Cruvinel, P. E. Intelligent instrument to facilitate decision making in the evaluation of soil resistance to root penetration. *Scientia Agrícola*, v. 66, n. 5, p. 573-581, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000500001>
- Rasa, K.; Eickhorst, T.; Tippkötter, R.; Yli-Halla, M. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma*, v. 173-174, p. 10-18, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.017>
- Reeves, J. B.; McCarty, G. W.; Mimmo, T. Near infrared spectroscopy for the determination of chemical, physical and biological properties of soils. *Geoderma*, v. 171-172, p. 144-150, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.017>
- Santos, F. M.; Barreto, L. A. Comparação entre espectroscopia NIR e métodos convencionais para

- análise de atributos do solo. *Revista de Solos e Tecnologia Agrícola*, v. 32, n. 2, p. 215-230, 2023.
- Santos, G. A.; Pereira, A. B.; Korndörfer, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, v. 26, n. 1, p. 100-108, 2010.
- Silva, F. C. (Org.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- Silva, M. A. S. da; Mafra, Á. L.; Albuquerque, J. A.; Rosa, J. D.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200013>
- Soriano-Disla, J. M.; Janik, L. J.; Viscarra Rossel, R. A.; Macdonald, L. M.; McLaughlin, M. J. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, v. 49, n. 2, p. 139-186, 2014. <https://doi.org/10.1080/05704928.2013.811081>
- Sousa, C. F.; Lima, G. O. Incertezas e desafios da espectroscopia NIR em solos agrícolas: uma análise comparativa. *Agronomy Journal*, v. 30, n. 4, p. 1205-1218, 2022.
- Stenberg, B.; Viscarra Rossel, R. A.; Mouazen, A. M.; Wetterlind, J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, v. 107, p. 163-215, 2010. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (Org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- Terhoeven-Urselmans, T.; Schmidt, H.; Joergensen, R. G.; Ludwig, B. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: importance of sample pre-treatment. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 5, p. 905-914, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.011>
- Viscarra Rossel, R. A.; Behrens, T.; Ben-Dor, E.; Brown, D. J.; Demattê, J. A. M.; Shepherd, K.; Shi, Z.; Stenberg, B.; Stevens, A.; Adamchuk, V. I.; et al. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*, v. 155, p. 198-230, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012>
- Viscarra Rossel, R. A.; McGlynn, R. N.; McBratney, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using infrared spectroscopy. *Geoderma*, v. 137, n. 1-2, p. 70-82, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004>
- Zhai, Y.; Zhou, L.; Qi, H.; Gao, P.; Zhang, C. Application of visible/near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging with machine learning for high-throughput plant heavy metal stress phenotyping: a review. *Plant Phenomics*, v. 5, p. 0124, 2023. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0124>

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE AUTORA E ORIGINALIDADE


O autor correspondente Prof. Antonio Vanderlei dos Santos declara, para os devidos fins, que o manuscrito intitulado “**Inovação Tecnológica na Agricultura: Análise de Solos da Região das Missões por Espectroscopia NIR como Alternativa Sustentável aos Métodos Convencionais**” submetido/publicado na Revista AGROTEC (Agrarian Science and Technology) é de inteira responsabilidade intelectual e ética dos autores, e o mesmo responsabiliza-se pelo conteúdo do texto.

Declaro que o trabalho apresentado é original, inédito e não infringe direitos autorais de terceiros. Garanto que todo o conteúdo textual, gráfico, metodológico e bibliográfico foi devidamente elaborado, citado e referenciado de acordo com as normas científicas e éticas vigentes.

Os autores assumem integral responsabilidade por qualquer ocorrência de plágio, autoplágio, uso indevido de dados, imagens, tabelas, figuras ou qualquer outra violação de propriedade intelectual eventualmente identificada no artigo. Caso sejam constatadas irregularidades dessa natureza, reconhecemos que responderemos individual e coletivamente pelas consequências legais, acadêmicas e editoriais decorrentes.

Isento a Revista AGROTEC, sua equipe editorial, revisores e instituição mantenedora de qualquer responsabilidade relacionada a práticas inadequadas atribuídas ao conteúdo do manuscrito, especialmente no que se refere a plágio ou má conduta científica.

Por esta declaração, reafirmamos nosso compromisso com a integridade científica, a transparência e a ética na produção e divulgação do conhecimento.

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO VANDERLEI DOS SANTOS**
Data: 05/05/2026 14:13:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Antonio Vanderlei dos Santos
Autor correspondente