



**MIKAELLA MEIRA MONTEIRO**

**PREDIÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO E MATÉRIA  
ORGÂNICA EM SOLOS CULTIVADOS DE MINAS GERAIS  
UTILIZANDO SENSORES PROXIMAIS E ATRIBUTOS DE  
FERTILIDADE DO SOLO**

**LAVRAS – MG  
2024**

**MIKAELLA MEIRA MONTEIRO**

**PREDIÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO E MATÉRIA ORGÂNICA EM  
SOLOS CULTIVADOS DE MINAS GERAIS UTILIZANDO SENSORES PROXIMAIS  
E ATRIBUTOS DE FERTILIDADE DO SOLO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Ciência Do Solo,  
área de concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para a  
obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Monteiro, Mikaella Meira.

Predição da adsorção de fósforo e matéria orgânica em solos cultivados de Minas Gerais utilizando sensores proximais e atributos de fertilidade do solo / Mikaella Meira Monteiro. - 2024.  
92 p. : il.

Orientador(a): Bruno Teixeira Ribeiro.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Adsorção de fósforo. 2. Sensores proximais. 3. Imagens digitais. I. Ribeiro, Bruno Teixeira. II. Título.

**MIKAELLA MEIRA MONTEIRO**

**PREDIÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO E MATÉRIA ORGÂNICA EM  
SOLOS CULTIVADOS DE MINAS GERAIS UTILIZANDO SENSORES PROXIMAIS  
E ATRIBUTOS DE FERTILIDADE DO SOLO**

**PHOSPHORUS SORPTION AND ORGANIC MATTER PREDICTION IN  
CULTIVATED SOILS OF MINAS GERAIS STATE USING PROXIMAL  
SENSORS AND SOIL FERTILITY ATTRIBUTES**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-graduação em Ciência Do Solo,  
área de concentração em Recursos  
Ambientais e Uso da Terra, para a  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em: 31 de janeiro de 2024  
Prof. Dr. Cleiton Antônio Nunes – UFLA  
Prof (a). Dr (a). Renata Andrade – UFLA

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*A minha mãe Samara Meira Barros,  
pois sempre se dedicou e torceu cada segundo  
por minhas conquistas acadêmicas,  
Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu Deus por me fazer entender que tudo é no seu tempo e por ter me dado forças e esperança em meio as atribuições ocorridas durante o mestrado.

Agradeço a minha mãe que há quilômetros de distância conseguiu me levantar, mesmo quando eu pensei que tudo ia desmoronar. Obrigada pela dedicação e pelo apoio. Obrigada por tudo!

Agradeço ao meu orientador, Bruno Teixeira Ribeiro, por toda a dedicação que teve comigo. Obrigada pela sua paciência em me ensinar tudo do zero e pelos puxões de orelha quando precisei, pois tudo isso contribuiu para a evolução que tive durante esses dois anos de mestrado. Você é alguém que eu admiro muito, pela paciência, inteligência, humor e dedicação ao trabalho.

Agradeço a Marcela Vieira por ter sido a primeira pessoa que esteve comigo. Obrigada por todo o suporte desde o início aqui. Você se tornou uma irmã, que cuidou de mim, me aconselhou e me ajudou em todos os sentidos. Obrigada, pois mesmo quando você não podia, você esteve presente e me ajudou. Obrigada por ter sido essa pessoa. Saiba que eu vou te levar sempre no meu coração.

Agradeço a todos os meus amigos que se fizeram presente nessa jornada, em especial as minhas primeiras amigas de Lavras, Marcela Souza e Layane Mendes e as minhas amigas Adrienne Braga, Aline Santos e Kyegla Beatriz pelo apoio e companheirismo no final do curso. Obrigada a minha turma do Norte e do Nordeste. Vocês estiveram comigo nas melhores e piores situações. Obrigada por todos os momentos vividos durante esses dois anos, pelos conselhos, risadas e por todo o apoio.

Agradeço especialmente a minha IC Favorita Kellen Nara (Maria) por ter me ajudado em todas as etapas do laboratório. Obrigada por ter se dedicado tanto a este trabalho. Você deixou tudo mais leve. Obrigada por ter segurado minha mão quando tudo deu errado e por me ajudar a fazer tudo dar certo. Obrigada pelas risadas e conselhos e por me acalmar quando precisei.

Agradeço a todos que fazem parte do Laboratório de Química Ambiental do DCS por toda a ajuda, assim como todos os momentos, aprendizados e pela contribuição nessa jornada da minha vida, especialmente a Rafaella de Sá.

Agradeço a Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, que por meio de todos os funcionários, docentes e discentes, me proporcionaram um ambiente de trabalho divertido e respeitoso, assim como uma oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão das bolsas de estudo e ao Projeto Rural Sustentável Cerrado (PP-001-MG-155) pelo financiamento do nosso trabalho.

Agradeço aqueles que contribuíram e me apoiaram em todos os sentidos da minha vida durante esses dois anos e que deixaram comigo aprendizados jamais esquecidos.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos, saibam que sem vocês nada teria sido especial como foi.

*Tudo tem o seu tempo determinado,  
e há tempo para todo propósito debaixo dos céus.*

*Eclesiastes 3:1*

## RESUMO

Em solos tropicais, a adsorção e o baixo teor disponível de P e a matéria orgânica (MOS) são fatores importantes para o manejo da fertilidade. Os atributos utilizados para avaliação de P e MOS requerem métodos dispendiosos, caros e poluidores. Atualmente, muitos atributos podem ser avaliados com uso de sensores proximais, tendo como vantagens a rapidez e a não necessidade de reagentes químicos. O objetivo deste trabalho foi combinar dados de fluorescência de raios X portátil (pXRF) com a cor do solo, obtida por smartphones e sensor digital portátil, para desenvolver modelos de predição de parâmetros indicadores da adsorção e disponibilidade de P e da MOS. Foram utilizadas 108 amostras superficiais (0-20 cm) provenientes de áreas agrícolas de Minas Gerais. Determinou-se a composição elementar via pXRF, realizaram-se ensaios de adsorção de P, determinação do P remanescente (P-rem), P disponível e MOS. A partir dos ensaios de adsorção de P, determinaram-se a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a constante de Langmuir ( $K_L$ ). Para a obtenção da cor (RGB), foram utilizados dois smartphones (iOS e Android) em diferentes condições de iluminação, além do sensor proximal Nix Pro. Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva, análise de componentes principais (PCA) e correlações de Pearson para avaliar a influência da composição química, física, mineralógica e matéria orgânica nos parâmetros relacionados à adsorção de P. Além disso, a correlação de Pearson foi utilizada para avaliar o desempenho dos diferentes dispositivos na obtenção dos parâmetros RGB. O algoritmo Random Forest foi utilizado para criar os modelos de predição. Os melhores modelos escolhidos apresentaram o menor valor da raiz do erro quadrado médio (RMSE) e maiores valores do desvio da predição residual (RPD) e do coeficiente de determinação  $R^2$ . Os resultados demonstraram que a combinação dos dados obtidos via pXRF + dados de cores permitiram o desenvolvimento de modelos de predição moderadamente acurados para CMAP (RPD entre 1,60 e 1,74) e acurados para P-disponível (RPD entre 2,36 e 2,52) e MOS (RPD entre 2,54 e 2,78). Os dados de fertilidade acrescidos da cor obtiveram modelos de predição acurados para MOS (RPD entre 2,61 e 2,87), moderadamente acurados para P-rem (RPD entre 1,67 e 1,92) e P disponível (RPD entre 1,41 e 1,49). O modelo pXRF + fertilidade do solo possibilitou as melhores predições da MOS (RMSE = 0,36;  $R^2$  = 0,90 e RPD = 3,26) e do P-rem (RMSE = 5,14;  $R^2$  = 0,82 e RPD = 2,19). Para a CMAP, o modelo de pXRF + as cores obtidas por iphone em sombra natural obteve os melhores coeficientes (RMSE = 284,54;  $R^2$  = 0,71 e RPD = 1,74). Já para o P disponível o modelo utilizando apenas dados de pXRF foi o mais acurado (RMSE = 13,83;  $R^2$  = 0,85 e RPD = 2,53). Não foram obtidos modelos confiáveis para a predição do índice  $K_L$ . Portanto, o uso de sensores proximais e imagens digitais demonstraram um potencial promissor para a predição dos parâmetros indicadores da adsorção e disponibilidade de P e da MOS.

**Palavras-chave:** Sensores proximais. Machine learning. Cor do solo Imagens digitais. Solos tropicais.

## ABSTRACT

In tropical soils, the adsorption and low availability of phosphorus (P) and organic matter (OM) are important factors for fertility management. Attributes used to assess P and OM typically require expensive and non environmental-friendly methods. Nowadays, many attributes can be evaluated using proximal sensors, offering advantages such as speed and the elimination of chemical reagents. This study aimed to combine portable X-ray fluorescence (pXRF) data with soil color, captured via smartphones and portable digital sensor, to develop predictive models for parameters indicative of P adsorption, P availability, and OM content. We utilized 108 surface soil samples (0-20 cm) from agricultural areas in Minas Gerais. Elemental composition was determined via pXRF, conducted P adsorption tests, and determination of remaining P (P-rem), available P, and OM. From the P adsorption tests, maximum phosphorus adsorption capacity (CMAP) and Langmuir constant ( $K_L$ ) were determined. Soil color (RGB) was obtained using two smartphones (iOS and Android) under different lighting conditions, as well as the Nix Pro proximal sensor. Results underwent descriptive statistical analysis, principal component analysis (PCA), and Pearson correlations to evaluate the influence of chemical, physical, mineralogical, and organic matter composition on parameters related to P adsorption. Additionally, Pearson correlation was used to assess the performance of different devices in obtaining RGB parameters. Random Forest algorithm was employed to create prediction models. The best models were considered based on the lowest root mean square error (RMSE) values and higher residual prediction deviation (RPD) and coefficient of determination  $R^2$  values. Results demonstrated that the combination of pXRF data with color data enabled the development of moderately accurate prediction models for CMAP (RPD between 1.60 and 1.74) and accurate models for available P (RPD between 2.36 and 2.52) and OM (RPD between 2.54 and 2.78). Soil fertility data combined with color yielded accurate prediction models for OM (RPD between 2.61 and 2.87), moderately accurate models for P-rem (RPD between 1.67 and 1.92), and available P (RPD between 1.41 and 1.49). The pXRF + soil fertility model enabled the best predictions for OM (RMSE = 0.36;  $R^2 = 0.90$  and RPD = 3.26) and P-rem (RMSE = 5.14;  $R^2 = 0.82$  and RPD = 2.19). For CMAP, the model combining pXRF with iPhone-captured natural shade produced the best coefficients (RMSE = 284.54;  $R^2 = 0.71$  and RPD = 1.74). Meanwhile, for available P, the model using only pXRF data was the most accurate (RMSE = 13.83;  $R^2 = 0.85$  and RPD = 2.53). Reliable models for predicting  $K_L$  index were not obtained. Hence, the use of proximal sensors and digital images demonstrated promising potential for predicting parameters related to P adsorption, availability, and OM.

**Keywords:** Proximal sensors. Machine learning. Soil color. Digital images. Tropical soils.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1 <i>Matéria orgânica do Solo</i> .....	15
2.2 <i>Fósforo em solos</i> .....	16
2.3 <i>Isotermas de adsorção de P</i> .....	19
2.4 <i>A cor do solo</i> .....	20
2.5 <i>Espectrometria de fluorescência de raios X portátil</i> .....	22
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 <i>Experimento preliminar em amostras de solos não cultivados</i> .....	24
3.1.1 <i>Amostragem de solos não cultivados</i> .....	25
3.1.2 <i>Preparo de caracterização das amostras de solos não cultivados</i> .....	26
3.1.3 <i>Caracterização dos atributos químicos dos solos não cultivados</i> .....	26
3.1.4 <i>Caracterização dos atributos físicos e mineralógicos</i> .....	27
3.1.5 <i>Determinação da composição elementar total via pXRF</i> .....	28
3.2 <i>Banco de amostras de solos cultivados no estado de Minas Gerais</i> .....	29
3.2.1 <i>Caracterização das amostras de solos cultivados</i> .....	29
3.3 <i>Determinação da cor usando o sensor Nix Pro</i> .....	29
3.4 <i>Determinação da cor do solo com o uso de smartphones</i> .....	30
3.5 <i>Determinação do P remanescente</i> .....	32
3.6 <i>Ensaio de adsorção de P</i> .....	32
3.7 <i>Análises estatísticas e modelagem</i> .....	33
3.7.1 <i>Análises estatísticas</i> .....	33
3.7.2 <i>Modelagem e validação dos modelos de predição</i> .....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
4.1 <i>Descrição geral dos solos não cultivados</i> .....	37

4.1.1 Caracterização física e mineralógica dos solos não cultivados .....	41
4.1.2 Correlação dos atributos com a adsorção e disponibilidade de P dos solos não cultivados. ....	44
4.1.2.1 Correlação dos solos não cultivados .....	44
4.1.2.2 Correlação dos solos cultivados.....	48
4.2 Descrição geral dos solos cultivados.....	49
4.3 Isotermas de adsorção de P dos solos cultivados e não cultivados .....	52
4.4 Determinação da cor das amostras de solos cultivados.....	54
4.5 Análise de agrupamentos e de componentes principais das amostras de solo cultivados .....	60
4.6 Predição dos atributos indicadores da adsorção de P, sua disponibilidade e matéria orgânica.....	62
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos 6 seis macronutrientes exigidos pelas plantas, ou seja, sem este elemento em quantidades adequadas as plantas não conseguem completar o seu ciclo de vida. Na natureza, não existe nenhum elemento que possa substituir as funções que o P exerce nos organismos vivos, muito menos sua contribuição no cenário da segurança alimentar (Pantano et al. 2016). O fornecimento de P às plantas ocorre por difusão. Assim, sua absorção se torna dependente da capacidade de fornecimento pela fase sólida do solo. Contudo, mesmo que os teores totais de P sejam relevantes, apenas uma pequena porcentagem está prontamente disponível às plantas (Gatiboni, 2003).

Dentre os fatores que afetam a disponibilidade de P para as plantas, o fenômeno da adsorção específica de P é muito importante, principalmente em solos tropicais altamente intemperizados (Simonete et al. 2018). Quando fertilizantes fosfatados são aplicados no solo, somente uma parte é aproveitada pelas plantas, dado que após a sua dissolução, a maioria do P fica retido na fase sólida do solo, gerando compostos menos solúveis. Esse processo é afetado pela textura, tipos de minerais de argila, acidez do solo e matéria orgânica (Korndörfer; Melo, 2009; Poggere et al. 2020).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente importante, principalmente por ser determinante da capacidade de troca de cátions, além de ser a principal fonte de nutrientes minerais às plantas (Fontana et al. 2011). A sua interação com outros constituintes afetam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tornando-a um indicativo da qualidade do solo. Em solos tropicais, onde há uma menor disponibilidade de P, a MOS desempenha um papel importante, influenciando a disponibilidade em função do seu caráter ambivalente no solo, podendo contribuir para o aumento da adsorção ou minimizar os efeitos desse processo, por meio da competição pelos sítios de sorção de P nos solos (Sanyal; Datta, 1991; Ibia; Udo, 1993).

Assim, estudos que envolvem os mecanismos de adsorção de P em solos contribuem para um melhor manejo e, conseqüentemente, para um melhor direcionamento nas recomendações de adubação, visando aprimorar a eficiência do fósforo aplicado (Afsar; Hossain, 2012).

O estudo da adsorção de P em solos normalmente é realizada por meio de ensaios do tipo *batch*, onde uma amostra de solo conhecida é reagida com concentrações crescentes e conhecidas de P (Guimarães et al. 2019). A concentração de P no sobrenadante após reação é conhecida como de equilíbrio. Pela diferença entre a concentração conhecida ou inicial de P e a concentração de equilíbrio, calcula-se a quantidade P adsorvida pela fase sólida (Vinha et al. 2021). Esses dados normalmente são ajustados ao modelo de Langmuir, obtendo-se os parâmetros capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e o coeficiente de distribuição (K) ou constante de Langmuir ( $K_L$ ) (Soares et al. 2006).

No Brasil, rotineiramente, tem sido determinado o P remanescente (P-rem). O P-rem nada mais é a concentração de equilíbrio após reação de um volume conhecido de solo com uma solução contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P (Donagema et al. 2008). Os valores de P-rem têm sido utilizados como indicador da reatividade do solo em termos de adsorção de P, apresentando correlações com a textura (Donagemma et al. 2015), mineralogia da fração argila (Eberhardt et al. 2008) quantidade de P previamente adicionada (Souza et al. 2006) e matéria orgânica (Novais; Smyth, 1999). Assim, a interpretação da disponibilidade de P tem sido alcançada com mais sucesso utilizando-se os valores de P-rem como referência, comparada ao uso apenas da textura (Lisboa et al. 2012; Wandt; Silva 2011).

Todos os métodos analíticos desenvolvidos para o estudo de P em solos são demorados, requerem uma grande quantidade de reagentes químicos e geram resíduos poluentes. Atualmente, observa-se o crescimento do uso de métodos espectrométricos, não destrutivos, ambientalmente amigáveis e rápidos para análise de solo, como o uso da espectrometria de fluorescência de raios X portátil (pXRF) (Weindorf et al. 2014). Além disso, dados espectrais têm sido utilizados para predição de atributos de interesse com uso de linguagem de máquina.

Com os avanços na tecnologia as imagens digitais por meio de smartphone também se mostram ferramentas promissoras para estudar as propriedades do solo. Uma vez que a adsorção é afetada pelos óxidos de ferro, minerais de argila e a matéria orgânica e esses atributos influenciam diretamente a cor do solo, o sistema RGB das imagens digitais se tornam ferramentas que podem contribuir para predizer de forma acurada esses atributos. Corroborando com esta afirmativa, Levin et al. (2005), que conseguiram predizer com sucesso os óxidos de ferro em solos por meio das imagens digitais e no estudo de Yang et al. (2021), onde as imagens de smartphones foram

usadas para prever o conteúdo de matéria orgânica do solo. Isto mostra que é possível relacionar a cor do solo obtida pelas imagens digitais com a predição da adsorção do fósforo em solos.

Sendo o fenômeno de adsorção de P em solos muito dependente da constituição da fase sólida, neste trabalho teve-se como hipótese que a composição elementar total obtida com fluorescência de raios X portátil pode fornecer dados suficientes para a predição da adsorção de P em solos. Além disso, em virtude da composição da fase sólida influenciar a cor do solo, teve-se também como hipótese que a cor do solo obtida de forma digital por sensor ou imagens de smartphone, pode ser um atributo adicional para melhorar a predição de adsorção de P e o conteúdo de MOS.

Diante disto, este trabalho objetivou combinar dados obtidos via pXRF com a cor do solo, obtidos por meio de smartphones, para desenvolver um modelo de predição para a adsorção de P, índice  $K_L$ , P remanescente, P disponível e MOS em solos cultivados do estado de Minas Gerais.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 *Matéria orgânica do Solo*

A MOS é definida como qualquer material orgânico de origem vegetal ou animal inserido no solo (Stevenson, 1994). Sua composição pode variar de acordo com as diferentes espécies vegetais e animais existentes no solo. Sendo que a quantidade de MOS depende da entrada do material orgânico e da sua taxa de mineralização, além de outros fatores, como a textura do solo e o clima (Costa et al. 2013).

A interação desses fatores em áreas de vegetação nativa ocorre de maneira que a MOS tende a alcançar um teor de equilíbrio (Khorramdel et al. 2013). Já em áreas de sistemas agrícolas, o manejo adotado exerce grande influência nos teores de MOS, por meio do preparo do solo, tipo de cultura, adição de fertilizantes químicos e materiais orgânicos que influenciam os processos de decomposição e mineralização (Leite et al. 2003) podendo aumentar diminuir ou até mesmo manter o estoque em relação a vegetação nativa (Liu et al. 2003).

A MOS é considerada o principal indicador para avaliar a qualidade do solo, uma vez que interagem com diversos componentes ali presentes e por meio dos seus efeitos diretos modula as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Cunha et al. 2015; Costa et al. 2013).

No que se refere a influência nas condições físicas, destaca-se o equilíbrio da temperatura do solo, aumento da capacidade de retenção de água, melhora da estabilidade dos agregados e proteção do solo contra escoamento superficial de água, o que favorece melhores condições para as planta, o desenvolvimento de raízes e diminuição dos riscos de erosão (Conceição et al 2005).

Já as influencias mais evidentes da MOS para os atributos químicos, destaca-se principalmente com a capacidade de troca catiônica (CTC), pH, condutividade elétrica, ciclagem de nutrientes e complexação de elementos tóxicos do solo (Costa et al. 2013). Além disto, a MOS é considerada uma das principais fontes de nutriente do solo, já que a sua decomposição resulta em mineralização dos nutrientes (Pavinato; Rosolem. 2008). Nos solos tropicais, com alto grau de intemperismo, o papel da MOS constitui uma determinante chave da fertilidade, pois estes solos apresentam minerais de argila com uma capacidade de troca catiônica limitada. Assim sendo, a MOS exerce uma importância fundamental nas características químicas,

visto que, todas as estratégias que visam aumentar o teor de nutriente do solo são baseadas no aumento da MOS (Conceição et al. 2005).

A liberação dos compostos orgânicos de baixo e alto peso molecular por meio da decomposição da MOS, também desempenha influencia na disponibilidade de nutrientes, principalmente na complexação ou adsorção de íons competidores (Pavinato; Rosolem 2008). Em solos tropicais, onde ocorre uma menor disponibilidade de P, a MOS estabelece um importante papel na sua disponibilidade, em razão do seu caráter ambivalente. Sendo capaz de adsorver ou bloquear os sítios de adsorção de P (Sanyal; Datta, 1991).

O principal mecanismo da MOS no aumento da disponibilidade de P refere-se ao recobrimento dos óxidos de Fe e Al, por meio da formação de camadas de húmus, que minimiza a adsorção de P, contribuindo assim para um aumento da sua disponibilidade (Matias, 2010). Outro mecanismo importante está relacionado a competição entre os ânions orgânicos e os íons de fosfato pelos mesmos sítios de adsorção, pois a maior parte dos ácidos orgânicos apresentam caráter aniônico, devido os grupos funcionais apresentarem valores de PCZ maiores que 3,5, proporcionando o predomínio das cargas negativas nesses grupos e favorecendo a competição pelos sítios de adsorção (Marques, 2016). No entanto, o efeito dessa competição é temporário, pois a longo prazo ocorre uma substituição lenta dos ânions orgânicos pelo fosfato (Afif et al. 1995). Assim, a aplicação constante de fontes naturais de ácidos orgânicos no solo pode manter de forma mais contínua o processo de bloqueio dos sítios de adsorção de P (Pavinato; Rosolem, 2008).

## 2.2 Fósforo em solos

O P desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das plantas, participando de diversos processos vitais. Entre as funções, destacam-se sua contribuição essencial na fotossíntese, no metabolismo dos açúcares e na divisão celular (Malavolta, 1996). Além disso, é crucial para a formação e crescimento das raízes, bem como no fornecimento de energia para os processos de absorção e transporte de íons (Tarouco et al., 2021).

O P apresenta-se como um dos principais fatores limitantes para a produção agrícola, devido à sua dinâmica no solo. No que diz respeito a fertilidade do solo, o P apresenta três pontos importantes que merecem destaque: o primeiro está relacionado com seu baixo teor disponível no solo. Segundo Novais e Smyth (1999),

os níveis totais de P podem variar de 200 a 3000 mg kg<sup>-1</sup> no solo, entretanto, apenas cerca de 1% desse teor está presente na solução do solo, disponível de forma imediata para as plantas.

O segundo ponto diz respeito aos compostos de P de baixa solubilidade frequentemente encontrados no solo, o que os torna pouco disponíveis para a absorção pelas plantas. Durante o processo de intemperismo, os minerais fosfatados sofrem degradação ao longo do tempo, resultando em uma diminuição no fornecimento desses compostos para o sistema. Além disso, à medida que os minerais do solo são intemperizados, sua cristalinidade diminui e os sítios de adsorção aniônica aumentam (Cecagno, 2019), o que leva ao terceiro ponto, que é a adsorção do fósforo no solo.

A maior parte do P está presente na fase sólida do solo complexado ou adsorvido aos oxihidróxidos de ferro e alumínio, com o cálcio e/ou com a MOS (Pavinato; Rosolem, 2008). Segundo Santos et al. (2008), a adsorção de P por meio dos óxidos de Fe e Al ocorre principalmente nas formas menos cristalinas, que apresentam alto desbalanço de cargas. Este processo se dá por meio dos sítios de Lewis, onde ocorre a troca de ligantes, no qual os grupos OH e OH<sup>2+</sup> do metal são substituídos pelos íons de fosfato. A intensidade destas reações é maior em solos mais intemperizados, ácidos, argilosos e oxídicos (Rezende, Neto, 2011).

Na fração argila dos solos tropicais predominam argilominerais do tipo 1:1 como a caulinita, juntamente com os óxidos de Fe (goethita, hematita, maghemita e ferrihidrita) e de Al (gibbsita) (Curi; Kampf, 2012). Esses componentes apresentam uma grande área superfície específica, composta por grupos Fe-OH e Al-OH (Fontes; Weed, 1996), capazes de formar complexos de esfera interna com os íons de fosfato (Oliveira, 2015), promovendo a adsorção específica de P (Poggere et al., 2018), que por sua vez, pode ser irreversível (Gatiboni, 2003). Segundo Fox e Searle (1978), a ordem de preferência de adsorção é: óxidos de Fe e Al de baixa cristalinidade > óxidos de Fe e Al cristalinos > argilominerais 1:1 > argilominerais 2:1.

A caulinita é um argilomineral do tipo 1:1, considerada um produto importante do intemperismo em solos tropicais e o argilomineral mais abundante nesses solos (Dixon, 1989). É originada a partir de reações de dissolução/neoformação de vários minerais primários e secundários (Schaefer et al. 2008). Os fatores que mais favorecem a formação da caulinita estão relacionados as condições de clima quente e úmido, juntamente com a drenagem livre e pH ácido (Resende et al. 2014). Devido

as suas cargas dependentes de pH, a caulinita tem a capacidade de reter ânions, como o fosfato em solos com pH ácido. No entanto, a contribuição da caulinita na adsorção de P pode ser menos significativa quando ocorre a predominância de óxidos de Fe e Al na fração argila dos solos (Rolim Neto et al. 2004).

Os óxidos de Fe se originam da liberação de Fe durante o intemperismo dos minerais primários e secundários. Em ambientes aeróbicos, predominam as formas mais cristalinas, como a hematita, goethita e maghemita, enquanto em ambientes menos oxidantes geralmente resultam em formas menos cristalinas, como a ferridrita e lepidocrocita (Oliveira, 2015). Nos solos tropicais e subtropicais, os óxidos de Fe mais frequentes são a goethita e hematita (Pereira et al. 2020), em razão da sua alta estabilidade e baixa solubilidade (Inda Junior, 2002). Por serem mais frequentes e apresentarem maior área superficial específica e conseqüentemente, mais faces expostas para adsorção (Alves; Lavorenti, 2004), esses óxidos, especialmente a goethita, desempenham papel central na adsorção de P na maioria dos solos (Valladares et al. 2003). A goethita, com sua maior área superficial específica, contribui de maneira significativa para adsorção de P, uma vez que possui um maior número de grupamentos OH, o que intensifica as reações da superfície com o P (Torrent et al. 1992).

O óxido de Al mais comum encontrado nos solos tropicais é a gibbsita, formada principalmente em solos ácidos e altamente intemperizados (Oliveira, 2015). A gibbsita ocorre em diferentes tipos de solos e em diversas condições ambientais, mas tende a ser mais predominante em Latossolos (Hsu, 1989), uma vez que neste tipo de solo o intemperismo e a lixiviação de bases ocorre de maneira intensiva, o que resulta em maiores quantidades de gibbsita em relação a caulinita (Schaefer et al. 2008). Tem sido constatado que a gibbsita desempenha um papel intrínseco na adsorção de P em solos. Segundo Rolim Neto et al. (2004), quando este mineral está presente em quantidades elevadas, torna-se um fator determinante na adsorção de P em Latossolos brasileiros, podendo assumir maior relevância do que os óxidos de Fe. No entanto, apesar da sua importância, a gibbsita geralmente é menos eficaz do que a goethita ao adsorver P (Frossard et al. 1994)

Em razão deste processo de adsorção de fosfato, a adubação fosfatada em solos altamente intemperizados se torna pouco eficiente, pois a maior parte do P adicionado é imobilizado (Peluco et al., 2015) e o P residual conserva-se próximo as raízes, tornando-se pouco disponível para as próximas culturas (Guarneri, 2019).

Neste sentido, solos com baixos teores de P e com altas proporções de argilominerais e óxidos, necessitam de doses mais altas de adubação fosfatada para atender as exigências nutricionais das culturas (Motta et al., 2002).

Desta forma, torna-se relevante o estudo dos parâmetros que influenciam a adsorção de fósforo, pois além de contribuir para o entendimento desse processo e para a disponibilidade de P para as plantas, auxilia na predição da adsorção de P no solo, assegurando um melhor manejo dos fertilizantes fosfatados aplicados nas áreas agrícolas (Simonete et al., 2018; Afsar; Hossain, 2012).

### 2.3 Isotermas de adsorção de P

As isotermas de adsorção são determinadas pela relação entre a capacidade de adsorção do adsorvente (sólido) e a concentração de equilíbrio do adsorvato (soluto adsorvido) em uma dada temperatura constante (Oliveira et al. 2018). A obtenção da isoterma de adsorção envolve uma massa conhecida do adsorvente, adicionada em determinado volume (V) juntamente com soluções variadas com concentrações iniciais ( $C_0$ ) conhecidas e distintas. Quando o processo alcança o equilíbrio obtém-se a concentração final do soluto na solução ( $C_e$ ) e a capacidade de adsorção do adsorvente ( $q$ ).

Assim, ao se determinar  $C_e$  e  $q$ , o adsorvente é separado da solução e posteriormente é analisado o sobrenadante para a determinação da concentração residual de adsorvato ( $C_e$ ), por meio de técnicas analíticas, dentre elas: espectrometria de ultravioleta ou visível, espectrometria de adsorção ou emissão e cromatografia gasosa ou líquida. Já para a obtenção dos valores de  $q$  são utilizadas fórmulas aplicando valores da massa do adsorvente (g), junto com as  $C_0$  e  $C_e$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e o volume da solução (L). Posteriormente, é feito um gráfico com os valores de  $q$  e  $C_e$ , resultando em um gráfico das isotermas de adsorção (Nascimento et al. 2020).

Existem diversas equações para esclarecer a relação entre o adsorvato e adsorvente, baseando-se no ajuste dos dados sobre os valores de  $q$  e  $C_e$ , dentre elas as mais usadas atualmente são as isotermas de Freundlich e Langmuir. Isso porque, elas são capazes de prever a capacidade máxima de adsorção do material e caracterizar o comportamento dos dados experimentais (Melo et al. 2020).

O modelo de Freundlich é baseado na teoria de que a adsorção ocorre em multicamadas, nas superfícies heterogêneas do adsorvente, onde os sítios de adsorção apresentam energias variadas e as moléculas adsorvidas interagem entre

si (Ferreira et al. 2015). Já o modelo de Langmuir é baseado na teoria de que existem um número definido de sítios, que apresentam energias equivalentes e cada um contém apenas uma molécula adsorvida, nas quais não interagem umas com as outras, formando uma monocamada com a superfície (Possebon; Vieira, 2021). É expresso pela seguinte equação 1:

$$q_e = \frac{q_{max} * k_L * C_e}{1 + k_L * C_e} \quad (1)$$

Onde:

**$q_e$** : quantidade do soluto adsorvido por unidade de massa do adsorvente;  **$C_e$** : concentração de soluto no equilíbrio;  **$q_{max}$** : capacidade máxima de adsorção do adsorvente;  **$k_L$** : constante de Langmuir que representa a afinidade entre o adsorvente e o adsorvato.

As isotermas de Langmuir tem sido comumente usadas para determinar as proporções de P adsorvidos à fase sólida em função da adição de quantidades crescentes de P na solução, visto que este modelo apresenta um parâmetro quantitativo associado a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e um parâmetro qualitativo que representa a energia de ligação entre os ânions e os sítios de adsorção, sendo essa a constante “k” (Matos et al. 2017).

Em conformidade com o que foi dito acima, Vinha et al. (2021) estudando a adsorção de fósforo em solos presentes na região de transição Cerrado-Amazônia, no Mato Grosso do Sul e Fernandes et al. (2022) estudando a adsorção de P em solo argiloso com diferentes doses de biocarvão, concluíram que as isotermas de Langmuir foi o modelo que melhor descreveu os dados e se mostrou eficiente nos cálculos dos parâmetros de sorção de P no solo.

#### 2.4 A cor do solo

É notável que o solo apresenta diversas variações de cores e essa variedade tem correlação com as propriedades do solo, com a vegetação e o clima (Schaeztl; Anderson, 2005). Os principais componentes que mais influenciam a cor do solo são a matéria orgânica, os óxidos de ferro e os demais minerais (Lepsch, 2002).

A MOS promove cores escuras em horizontes superficiais e em alguns horizontes subsuperficiais sob condições de iluviação. Por outro lado, solos brunados e avermelhados indicam a presença de óxidos de Fe (Botelho et al. 2006), como por exemplo, em regiões tropicais e subtropicais, a presença da goethita é indicada por

colorações amareladas e brunadas no solo, enquanto a hematita é expressa por colorações mais avermelhadas, mesmo quando presente em menores teores (Pereira et al. 2020). Já os solos com predominância de quartzo e pobres em óxidos de Fe e MOS imprimem cores mais claras e esbranquiçadas (Azevedo; Dalmolin, 2004).

A observação da cor tem sido usada para descrever vários processos pedogenéticos do solo, como os seus fatores de formação (Swetha, Chakraborty, 2021). Em estudos pedológicos a cor é o critério diagnóstico mais simples de identificação, usada na classificação e interpretação dos solos. É útil para identificar e delimitar os horizontes (Silva et al. 2018) devido a sua relação com o material de origem, mineralogia e as condições de drenagem (Mancini et al. 2020), assim como para indicar a presença de óxidos de ferro, matéria orgânica e outros constituintes do solo (Resende et al. 2014).

Se tratando da mineralogia, a presença dos óxidos de Fe contribui para evidenciar as condições pedoambientais nas quais alguns solos são formados (Resende et al. 2014). Segundo a Embrapa (1999), o critério mais importante do ponto de vista taxonômico para diferenciar os Latossolos é a cor dominante do horizonte B, uma vez que há uma menor influência da MOS e maior predominância dos óxidos. Além disso, a cor do solo pode apresentar relações diretas com as características químicas do solo. Curi e Franzmeier (1984) descrevem o poder adsortivo alto e baixo para solos com predominância goethita e hematita, respectivamente.

Neste sentido, a coloração dos horizontes superficiais pode ser imprescindível para explicar diferenças na capacidade adsortiva, uma vez que esses horizontes apresentam maiores teores de MOS e podem apresentar diferentes teores de goethita e hematita (Almeida et al. 2003). Assim, diversos estudos demonstram a maior capacidade de adsorção em solos essencialmente goethíticos (brunos ou amarelos) em relação a solos mais hematíticos (vermelhos) (Bahia Filho et al. 1983; Almeida et al. 2003; Fink et al. 2015). Fundamentando a hipótese de alguns autores de que ocorre uma relação entre a cor do solo e a adsorção de fosfato (Fontes; Weed, 1996).

Neste sentido, a cor desempenha papel fundamental em diversos sistemas de classificação do solo, especialmente o US Soil Taxonomy, o Word Reference Base e o Sistema Brasileiro de Classificação do solo. Uma das metodologias mais usadas para a caracterização da cor é baseado no sistema de Munsell Soil Color Chart (MSCC), pois é um método fácil, rápido e que usa a percepção óptica para definição da cor (Alves et al. 2020). Entretanto, a definição da cor é muito subjetiva, pois além

da percepção variar para cada indivíduo ela também é afetada por fatores ambientais, como a umidade do solo a posição do sol e a projeção de sombras sobre o solo (Mancini et al. 2020; Mouazen et al. 2007) afetando a precisão dos resultados.

Para melhorar a precisão dos atributos do solo com a avaliação da cor, diversos trabalhos estão fazendo uso de dispositivos e sensores proximais. Com o avanço tecnológico os pesquisadores começaram a estudar o uso do sensor de cores Nix Pro e sua aplicabilidade em prever de forma quantitativa as propriedades do solo de maneira mais rápida e econômica (Swetha et al. 2022). Os estudos de Mancini et al. (2020) observaram que o sensor Nix Pro é capaz de prever a cor de Munsell com precisão e reduz a subjetividade, apresentando dados precisos para análises estatísticas. Já Swetha et al. (2022) destacaram que este sensor se mostrou uma ferramenta qualificada para caracterização quantitativa da cor associada a predição do carbono orgânico do solo.

Atualmente, as câmeras digitais vêm sendo estudadas como uma outra alternativa para a determinação da cor. Uma vez que esse dispositivo está disponível para todos se torna uma ferramenta útil para análise das cores do solo (Levin et al. 2005). Isto pôde ser demonstrado por Gómez-Robledo et al. (2013) que destacaram que o sistema RGB usado nas câmeras digitais podem fornecer medições mais precisas das cores do que a medição visual observada pelas cartas de Munsell.

As imagens digitais apresentam um sistema de combinação entres as cores vermelho (R), verde (G) e azul (B). Nesse sistema usa-se coordenadas cartesianas para definir um vetor específico para cada cor, com valores que variam de 0 a 255, possibilitando a formação de mais de 16.77 milhões de combinações de cores distintas (Santiago, 2018). As cores R, G e B dos pixels quando correlacionadas com os parâmetros da superfície do solo podem fornecer informações precisas (Al-Naji et al. 2021), como observado no estudo de Levin et al., (2005) que conseguiram relacionar a cor do solo a partir de imagens digitais para prever óxidos de ferro e partículas finas do solo com sucesso.

### *2.5 Espectrometria de fluorescência de raios X portátil*

A fluorescência de Raios X (XRF) é um método analítico que possibilita identificar e quantificar a composição elementar de diferentes tipos de materiais e amostras com o uso de raios X (Silva, 2020). Esta técnica é baseada no uso de espectrômetros de raios X que apresentam uma fonte, um sistema de detecção e uma

amostra. A fonte de raios X estende-se sobre uma amostra e o detector mede a radiação provinda desta amostra (Brouwer, 2010).

Os principais sistemas de espectrometria são os de Dispersão de Comprimento de Onda (WDXRF) e os de Energia Dispersiva (EDXRF). O WDXRF é baseado na lei de Bragg, a qual utiliza-se um cristal que tem como função difratar a radiação fluorescente emitida da amostra, com diferentes comprimentos de ondas, em diferentes ângulos. Nesse sistema a radiação da amostra passa por um detector de forma monocromática que converte a energia dos fótons emitidos pela amostra em forma de pulsos elétricos (Santos et al. 2013). Nesse sistema, a difração dos raios X característicos possibilita a separação de uma radiação secundária da amostra por meio do espalhamento dos diferentes ângulos, permitindo assim, analisar a composição química dos materiais (Santos et al. 2013).

No EDXRF um detector registra a radiação característica de todos os elementos que constituem uma amostra, produzindo um pulso eletrônico, no qual a amplitude é proporcional à energia da radiação emitida pelas amostras (Asfora, 2010). O termo “dispersão” está relacionado ao detector que por sua vez possibilita a separação da radiação da amostra com a radiação característica dos elementos constituintes da amostra (Silva, 2020). A maioria dos aparelhos de fluorescência de raios X portátil operam com o sistema EDXRF.

O pXRF consegue identificar e quantificar o conteúdo elementar de uma amostra por meio da indução de fluorescência dos raios (Benedet et al. 2021). Esse princípio ocorre quando um feixe de raios X ao atingir um átomo estimula um rearranjo em suas camadas, sendo que os elétrons das camadas mais internas se deslocam em direção as camadas mais externas. Posteriormente, os espaços vazios que ficaram devido a esse descolamento são preenchidos pelos elétrons das camadas mais externas, gerando raios X secundário. Em meio a esse processo é liberada uma energia em forma de fluorescência, característica para cada elemento químico (Weindorf et al. 2014; Silva et al. 2021; Vieira, 2022).

Nos últimos anos, os equipamentos portáteis de fluorescência de raios X estão sendo cada vez mais utilizados para diferentes finalidades nas áreas agrônômicas, ambientais e pedológicas (Weindorf et al. 2014), por ser um método que consegue analisar a composição elementar de amostras de solo de maneira rápida, precisa, não destrutiva e ecologicamente correta com custo baixo de operação (Ribeiro et al. 2017).

Além disso, o pXRF por ser um equipamento menor, possibilita o seu uso para aplicações fora de laboratório (Pinto, 2019)

No Brasil, o pXRF vem se destacando na Ciência do Solo em diferentes linhas de pesquisa, dentre elas, na avaliação do conteúdo de metais pesados bem como na contribuição para modelos de predição, auxiliando na determinação de diversos atributos do solo, como pH, CTC, teores nutricionais e textura do solo. Um exemplo disso é o estudo de Benedet et al. (2021).

Férrandez (2017), comparando os níveis de metais pesados com o uso de cobertura do solo, encontraram as maiores concentrações de alguns elementos, dentre eles alumínio (Al), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) em solos cultivados com cana de açúcar, na zona da Mata do estado do Pernambuco. O estudo possibilitou classificar os solos de acordo com os critérios estabelecidos para solos contaminados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). No estudo de Troyack (2020) avaliando a concentração de Prata (Ag) em solos de Rezende – RJ, os dados obtidos com XRF foram considerados satisfatórios para avaliação aproximada do potencial de contaminação dos solos por esse elemento.

Com relação ao pXRF aplicado aos atributos químicos do solo, Schmidt et al., (2018) estudando o teor de ferro em solos da cidade de Borja – RJ, conseguiram identificar o manejo mais adequado para esta região com o uso de dados de pXRF. Sharma et al (2015), obtiveram predições adequadas de propriedades dos solos dos Estados Unidos a partir de pXRF. O estudo de Oliveira (2019) possibilitou analisar as influências dos teores dos elementos químicos expressos nas formas de óxidos de ferro, alumínio e silício, encontrados por meio do pXRF, nos solos das regiões do Planalto e do Oeste Catarinense. Já o estudo de Prado et al., (2018), possibilitou identificar com clareza minerais como quartzo, gibssita, hematita e caulinita, demonstrando a eficiência desta técnica na determinação destes componentes.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### *3.1 Experimento preliminar em amostras de solos não cultivados*

Este experimento foi realizado afim de confirmar as hipóteses em relação à influência da composição da fase sólida na adsorção de P. Foram utilizadas amostras dos horizontes A e B de solos de três classes bastante comuns no estado de Minas Gerais e representativas do grau de desenvolvimento pedogenético: Latossolo

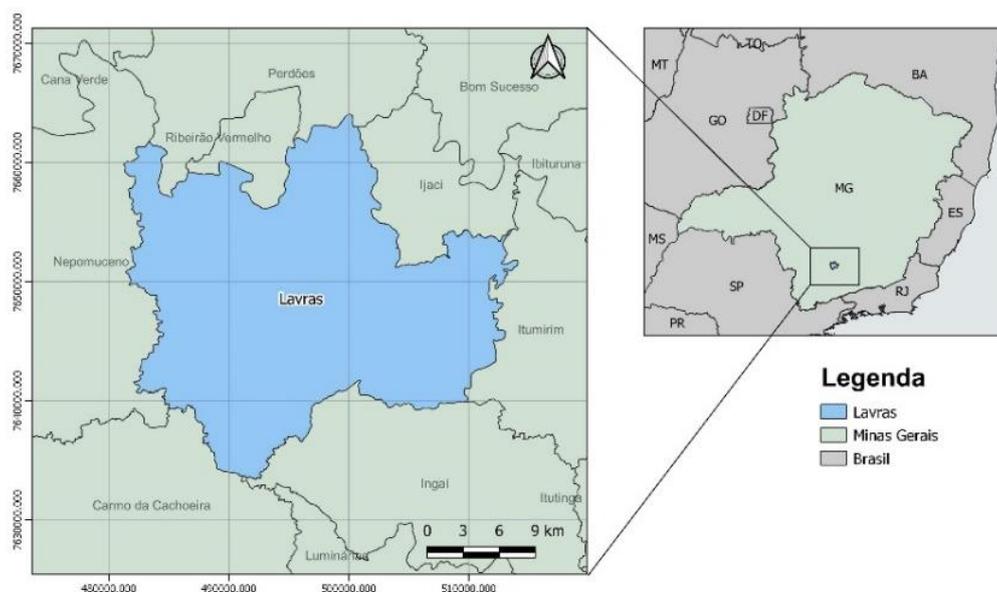
Vermelho Distroférico típico (LVdf), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd) e um Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (CXBd) (CURI et al. 2017).

### 3.1.1 Amostragem de solos não cultivados

As amostras foram coletadas no *campus* da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, localizada entre as longitudes  $44^{\circ} 59' 41,23''$  e  $44^{\circ} 57' 25,76''$  W e latitudes  $21^{\circ} 13' 0,7,61''$  S. Situa-se na superfície do Alto Rio Grande, na unidade geomorfológica do Planalto Atlântico. Esta área está sob influência de gnaisses graníticos leucráticos e mesocráticos, intrusões de gabro e sedimentos aluviais e colúvio-aluviais. O LVdf é originário de gabro; PVAd e CXBd possuem como material de origem o gnaise mesocrático (Curi et al. 2017).

O município de Lavras localiza-se nas coordenadas geográficas  $21^{\circ} 14' 43''$  de latitude sul e  $44^{\circ} 59' 59''$  de longitude oeste (Figura 1), com uma altitude média de 918 metros (Curi et al., 2020). O clima do município é caracterizado como Cwa, subtropical úmido com inverno seco e verão chuvoso e temperatura média anual de  $19,9^{\circ}\text{C}$  e precipitação média anual de 1.460 mm (Dantas et al. 2007).

Figura 1 – Mapa de localização do município de Lavras – MG.



Projeção Universal Transversa de Mercator- UTM | Datum: SIRGAS 2000, 23S | Elaboração: Mikaela Meira Monteiro | 14/11/2023

Fonte: Autora (2024).

O município está inserido na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, na qual, apresenta uma declividade de 6 a 12%, com relevo suave ondulado a ondulado (Pinto

et al. 2005). O relevo do *campus* é predominantemente ondulado, onde nas porções mais declivosas são encontrados os Cambissolos, já os Latossolos e Argissolos encontram-se nas paisagens de relevo mais suavizado. Sendo que os Argissolos são encontrados nas porções mais declivosas em relação aos Latossolos (Curi et al. 2017).

A formação florestal da região é caracterizada como Floresta Tropical Semidecídua Estacional Montana (Carvalho; Scolforo, 2008). Já a formação florestal do Campus é muito diversificada, pode-se encontrar desde floresta tropical, cerrado, floresta ciliar, vegetações hidrófilas e higrófilas de várzea até plantios de eucaliptos, pinos, culturas agrícolas e pastagens (Curi et al. 2017). O LVdf e o PVAd encontram-se em áreas sob vegetação nativa de floresta tropical, já o CXBd situa-se em uma área sob plantio de pinos.

### 3.1.2 Preparo de caracterização das amostras de solos não cultivados

Inicialmente, as amostras foram coletadas com auxílio de uma pá reta, nas profundidades descritas na tabela 1. Após a coleta, as amostras foram secas, destorroadas e peneiradas em peneiras de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, as amostras foram usadas para caracterização física, química e mineralógica descritas a seguir.

Tabela 1 – Profundidade dos solos não cultivados.

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)
CXBd	A	0 - 20
	B	40 - 50
PVAd	A	0 - 20
	Bt	80 - 100
LVdf	A	0 - 20
	Bw	80 - 100

Fonte: Autora (2024).

### 3.1.3 Caracterização dos atributos químicos dos solos não cultivados

As amostras de solos de mata nativa foram caracterizadas quanto aos seguintes atributos químicos: pH em água e em solução KCl 0,01 mol L<sup>-1</sup>, Al trocável; acidez potencial (H +Al); matéria orgânica; Ca e Mg trocáveis; P, K, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B disponíveis. Além disto, foi realizada análise mineralógica na fração argila pelo método do pó

Avaliou-se o pH, usando 6 g de TSFA e 15 mL de solução salina de cloreto de potássio a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , assim como 15 mL de água destilada. Posteriormente as amostras foram agitadas por 15 minutos a 120 rpm e após 30 minutos de repouso, foi realizada a aferição do pH do sobrenadante em suspensão com o auxílio de um peagâmetro (TEIXEIRA et al. 2017).

O teor de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis foram quantificados com uma solução de KCl a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (Mclean et al., 1958). Os teores disponíveis de P, K, S, Cu, Fe, Zn foram extraídos com solução Mehlich 1 (Mehlich, 1953). O B foi extraído por meio da água quente (Abreu et al 1994). O H+Al foi determinado pelo método SMP (Shoemaker; Mclean; Pratt, 1961). A matéria orgânica foi determinada de acordo com a metodologia Dakota do Sul Modificada, descrita por Campos (2011), no qual, foi adicionado  $1 \text{ cm}^3$  de solo e 10 ml da solução de  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  a 4N em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10 N em um recipiente. Após um processo de agitação e repouso, foram adicionados 50 mL de água. As amostras foram submetidas a um repouso “*overnight*”, logo após, foi realizada a leitura em um colorímetro com filtro de transmissão máxima de 645 nm.

#### 3.1.4 Caracterização dos atributos físicos e mineralógicos

Antes das análises físicas, as amostras passaram pelo processo de oxidação da matéria orgânica descrito por Donagema et al. (2011), no qual foram pesadas 50g de TFSA, em seguida foi adicionado 50 mL de água destilada. As amostras foram levadas para uma chapa aquecedora à  $80^\circ\text{C}$ . Durante o aquecimento, foram adicionados 5 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%) e o conteúdo foi agitado com bastão de vidro até a finalização da fervura. Posteriormente, foram adicionados 250 mL de água destilada e 10 mL de hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Quando toda a matéria orgânica foi oxidada, o conteúdo foi passado para garrafas PET e levadas para agitação mecânica por 16 horas em agitador tipo Wagner.

A análise mineralógica seguiu a metodologia de Inda Junior; Kämpf (2005) e Teixeira et al (2017). Primeiramente foi feito o fracionamento granulométrico, onde a fração areia foi separada por peneiramento seguindo o método de Teixeira et al. (2017) e a fração argila e silte foram separadas por sedimentação, baseando-se na lei de Stokes (Jackson, 1965). Logo após, foram quantificados o Fe e Al ditonito (Mehra; Jackson, 1958) e o Fe e Al oxalato (Schwertmann, 1964), via espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) (Teixeira et al., 2017).

Para a caracterização cristalográfica usando o Difratorômetro de raios X (DRX), as amostras da fração argila foram maceradas com auxílio de um almofariz de Ágata, em seguida foram passadas em peneiras de 50 micrometro e levadas para a montagem de lâminas não orientadas e posterior análise em um equipamento Philips, com radiação CoK e filtro de Fe.

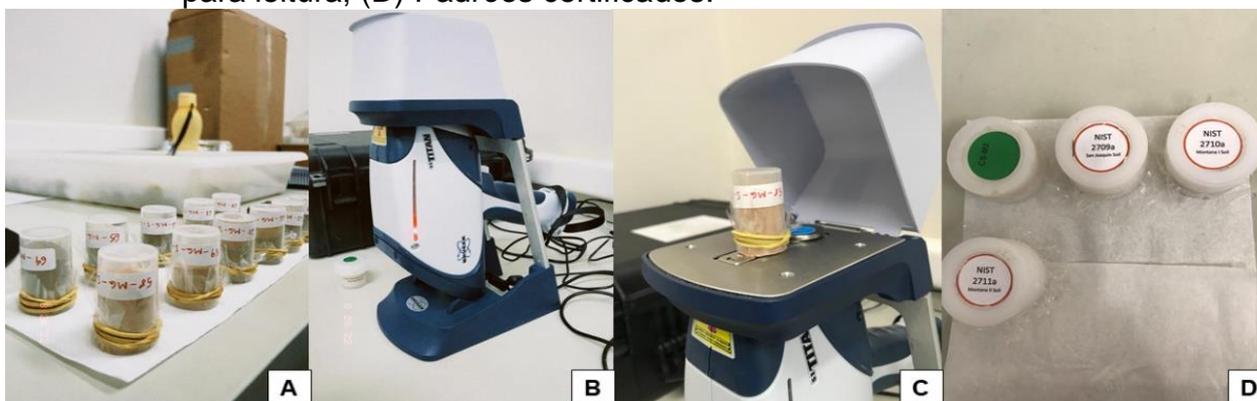
Para estimar a composição total dos elementos químicos mais comuns ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) na fração argila do solo, foi utilizada a metodologia de ataque sulfúrico descrita por Teixeira (2017). Foram pesados 2 g de solo e adicionados 50 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (50%) em um Erlenmeyer. Em seguida, essa solução foi levada para uma chapa aquecedora elétrica para ferver por 30 minutos. Após o resfriamento da solução, foram adicionados 50 mL de água destilada. Logo após, a solução foi transferida para um balão de 250 mL via filtragem. O remanescente do filtro foi aquecido em mufla para a determinação do  $\text{SiO}_2$  e o extrato obtido foi usado para determinar os demais elementos.

### 3.1.5 Determinação da composição elementar total via pXRF

As análises com utilização de pXRF seguiram as metodologias propostas por Weindorf; Chakraborty (2016) e USEPA 6200 (USEPA, 2007), com pequenas modificações. Amostras de terra fina seca ao ar (< 2 mm) foram acondicionadas em potes plásticos de 2,67 cm de diâmetro e 4,89 cm de altura, garantindo no mínimo 1 cm de espessura. Os potes foram fechados com filme Prolene® (6 $\mu\text{m}$ ) com auxílio de elástico e invertidos para colocação sobre a janela de raios X/detector do pXRF. Foi utilizado um equipamento da marca Bruker® S1 Titan 800 operando nas seguintes condições operacionais. As análises foram realizadas utilizando o modo de calibração do fabricante *Geoexploration* durante 90 s. Para controle de qualidade das análises foram utilizados três padrões certificados pelo National Institute of Standards and Technology (<https://www.nist.gov/>): NIST 2709a (San Joaquin Soil), NIST 2710a (Montana I Soil) e NIST 2711a (Montana II Soil). Além desses três padrões, foi utilizado uma amostra padrão do fabricante Bruker® denominada *check-sample* para verificação da performance do equipamento (Figura 2). Para cada elemento considerado, calculou-se a porcentagem de recuperação [ $R = (\text{concentração obtida}/\text{concentração certificada}) * 100$ ] para cada padrão NIST. Foram obtidas as seguintes recuperações (2709a/2710a/2711a): Al (111/110/111); Si (112/110/113); K (101/101/101); Ca (102/98/100); Ti (101/99/101); Fe (101/99/99); P (87/89/85); Cr

(104/0/0); Ni (88/0/91); Cu (88/88/88); Zn (88/88/88); Rb (88/88/89); Sr (88/88/89); Zr (89/89/0); Y(0;0;0). Recuperações iguais a 0, indicam que as leituras do equipamento não obtiveram limites de detecção para determinado elemento ou nenhum valor de referência nos materiais certificados.

Figura 2 – (A) amostras; (B) Modelo do pXRF; (C): amostra no equipamento pronta para leitura; (D) Padrões certificados.



Fonte: Autora (2024).

### 3.2 Banco de amostras de solos cultivados no estado de Minas Gerais

Com a finalidade de explorar a casualidade e o serviço que é realizado pelos laboratórios de rotina, amostras desconhecidas ( $n=111$ ), coletadas na camada superficial (0 – 20 cm) provenientes de áreas agrícolas representativas do estado de Minas Gerais, foram recebidas por um laboratório de análise de solo com ISO/IEC 17025.

#### 3.2.1 Caracterização das amostras de solos cultivados

Nas amostras dos solos cultivados, foram realizadas análises químicas e de fluorescência de raios X. Quanto as análises químicas, foram determinados os seguintes atributos: pH em água e em solução  $\text{CaCl}_2$  a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , Al, Ca e Mg trocáveis; H +Al; matéria orgânica; P e K disponíveis e foram calculados os seguintes indicadores de fertilidade: CTC potencial, CTC efetiva, soma de bases e saturação por base. Todas as análises foram descritas nos itens 3.1.3 e 3.1.5.

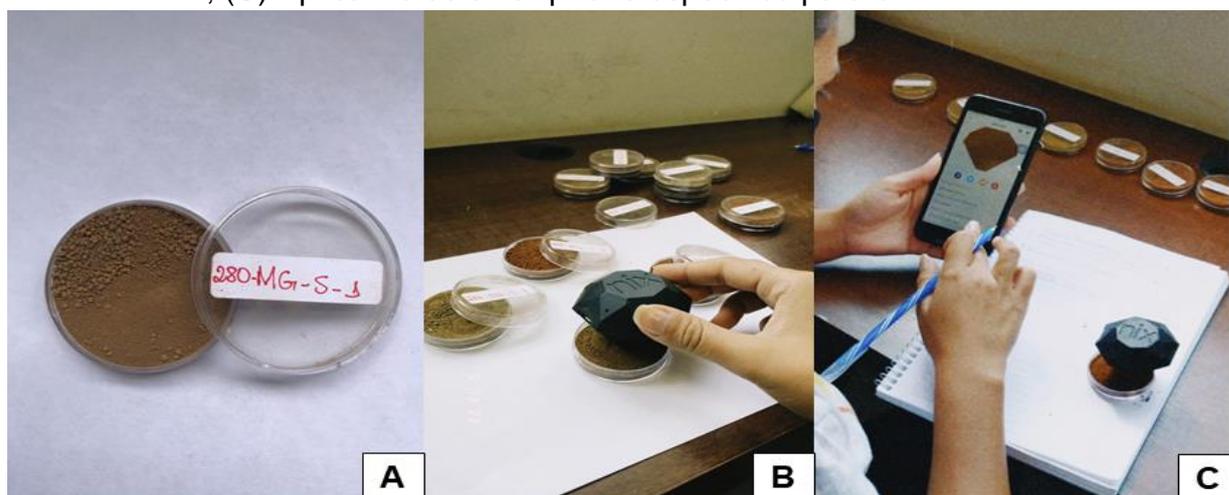
### 3.3 Determinação da cor usando o sensor Nix Pro

O sensor Nix Pro é equipado com uma fonte de luz própria de diodo emissor de luz LED, localizado no centro da base côncava do sensor com cerca de 1 cm acima do campo de visão e pode ser controlado via Bluetooth com uso de smartphone fazendo-se uso de aplicativo gratuito e específico disponível para sistemas Android e

iOS (Stiglitz et al., 2016). O sensor escaneia de forma quase instantânea (2s) enviando parâmetros de cor de vários sistemas, como RGB, HEX, CMYK e CIELab.

Amostras de terra fina seca ao ar ( $n = 111$ ) foram acondicionadas em pequenas placas de acrílico de 5 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura, assegurando-se no mínimo 1 cm de espessura. A superfície da amostra de solo foi delicadamente nivelada e posicionado o sensor Nix Pro para leitura (Figura 3). Em cada amostra foram realizadas três leituras mudando-se aleatoriamente a posição do sensor. Os parâmetros de cor R (red), G (green) e B (blue), os quais variam de 0 a 255 em uma escala adimensional, foram selecionados para este estudo.

Figura 3 – (A) TFSA em placa de acrílico; (B) escaneamento da amostra pelo sensor Nix; (C) Aplicativo de smartphone específico para o Nix.



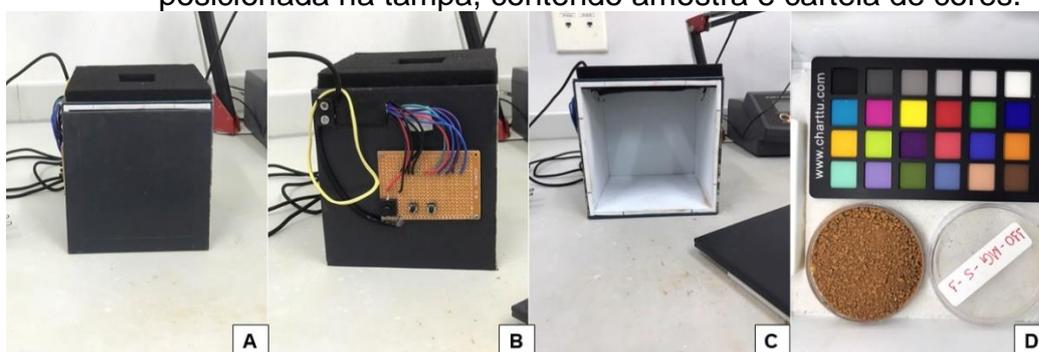
Fonte: Autora (2024).

### 3.4 Determinação da cor do solo com o uso de smartphones

As mesmas amostras acondicionadas nas placas de acrílico, conforme descrição prévia, foram utilizadas para obtenção das imagens utilizando-se dois smartphones. O primeiro com sistema operacional iOS, modelo iPhone 7 Plus com câmera de 12 megapixels equipada com lentes grande-angular (abertura  $f/1.8$ ) e teleobjetiva (abertura  $f/2.8$ ), com estabilização óptica de imagens, lente coberta com cristal de safira e sensor de retroiluminação, com filtro IV híbrido, foco automático, captura de ampla tonalidade de cores para fotos e mapeamento de tom local aprimorado e controle de exposição. O segundo com sistema operacional Android 12, modelo Moto G30 com câmera de 64 megapixels, equipada com lente de vidro com ângulo máximo de  $118^\circ$  (abertura  $f/1.8$ ) e com autofocus.

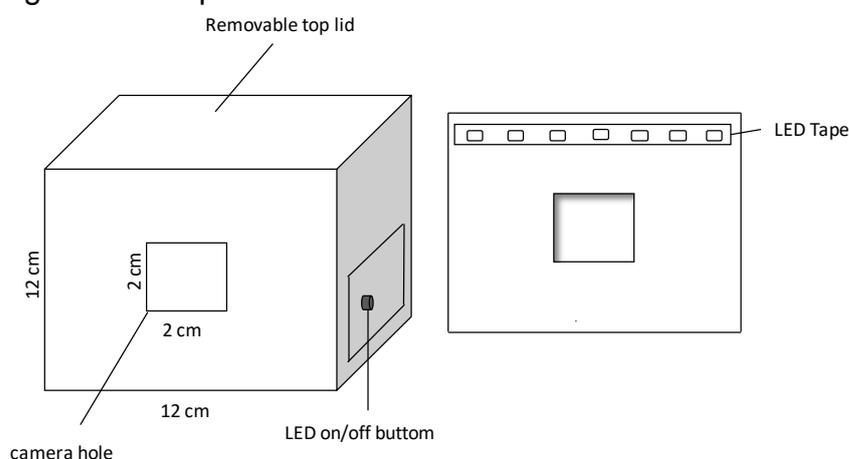
As imagens foram capturadas em três condições: i) externamente à sombra em condição de luz natural; ii) em condições laboratoriais sob efeito de luz branca fluorescente; iii) em condição controlada por um miniestúdio (Figura 4). O miniestúdio apresenta dimensões de 12 cm de largura, 12 cm de comprimento e 12 cm de altura, construído em papelão com revestimento de etileno-acetato de vinila (EVA) branco, contendo uma tampa superior removível e iluminado internamente com 7 LEDs (5V, 0,56 W, 6500 K). A câmera do smartphone foi posicionada em um orifício de 2 x 2 cm, localizado na tampa do miniestúdio (Figura 5).

Figura 4 – (A) Lateral do miniestúdio fechado com tampa superior; (B) Parte traseira do miniestúdio; (C) interior do miniestúdio; (D) Visão da câmera posicionada na tampa, contendo amostra e cartela de cores.



Fonte: Autora (2024).

Figura 5 – Esquema do miniestúdio.



Fonte: Nunes (2023).

Para o processamento das imagens foi utilizando o software IMAGEJ (<https://imagej.net/ij/>). No programa foi definindo a área de interesse da amostra de solo, na qual foram extraídos os valores médios de RGB. Durante análise de cada amostra, foi utilizada uma cartela-padrão de cores da marca charttu (<https://imagej.nih.gov/ij/>) com valores de RGB conhecidos (Figura 4). Foram obtidos

os valores RGB de dez cores da cartela: ciano, azul, verde, amarelo, vermelho, laranja, lilás, preto, branco e cinza. Desta forma, foram obtidas curvas de regressão linear entre os valores conhecidos de RGB das cores padrão e os valores de RGB extraídos após o processamento da imagem no software IMAGEJ. Com base nas equações, os valores de RGB obtidos para as amostras de solo foram corrigidos por meio de equações lineares no software R Studio.

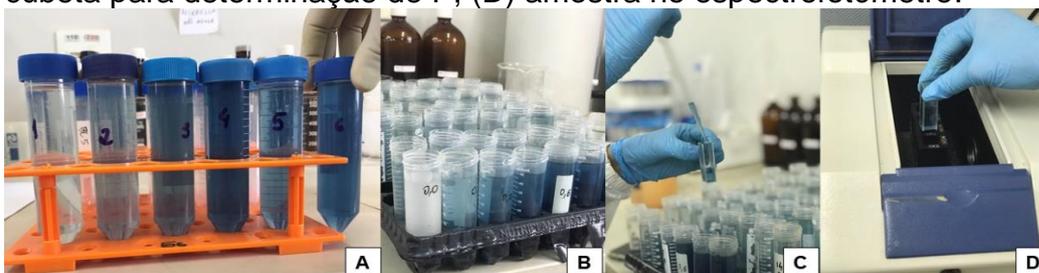
### 3.5 Determinação do P remanescente

Foi adicionado em amostras de TSFA uma solução de equilíbrio de  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{CaCl}_2$ , contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P (Alvarez et al., 2000) em uma relação 1:1. Em seguida, as amostras foram agitadas a 2000 rpm por 24 horas e centrifugadas por 20 minutos a 150 rpm. Após centrifugação, as amostras foram filtradas com papel filtro qualitativo com diâmetro de 125 mm, espessura de 0,16 mm e gramatura de  $80 \text{ g/m}^2$ . A concentração de P nas soluções foi determinada via ICP-OES.

### 3.6 Ensaios de adsorção de P

Foi adicionado 0,3 g de terra seca fina ao ar (TSFA) em tubos Falcon com capacidade para 50 mL contendo 30 mL de soluções nas seguintes concentrações: 0; 2,5; 5; 10; 20; 40 e  $80 \text{ mg L}^{-1}$  de P tendo como solução background  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{CaCl}_2$ . As suspensões foram agitadas por 24 horas a 120 rpm, seguindo a metodologia de Vinha et al. (2021). Após a agitação, os tubos foram centrifugados por 15 minutos a 2000 rpm. As concentrações de fósforo no sobrenadante foram determinadas pelo método de redução azul-ascórbico de molibdênio de Murphy; Riley (1962) (Figura 6).

Figura 6 – (A) padrões para determinação da curva de fósforo; (B) sobrenadantes reduzidos com azul-ascórbico de molibdênio (C) amostra sendo depositadas em cubeta para determinação de P; (D) amostra no espectrofotômetro.



Fonte: Autora (2024).

O P adsorvido foi expresso em  $\text{mg kg}^{-1}$ , sendo calculado pela diferença entre as concentrações de P iniciais e as concentrações de equilíbrio (Equação 2).

$$P_{ads} = \frac{(C_i - C_e) * V}{m}$$

Onde: **C<sub>i</sub>** é a concentração inicial de P (mg L<sup>-1</sup>); **C<sub>e</sub>** é a concentração de equilíbrio de P no sobrenadante (mg L<sup>-1</sup>); **V** é o volume da solução utilizada em L e **m** é a massa de solo em kg. Para obtenção de isotermas de adsorção, as concentrações de equilíbrio foram plotadas no eixo das abscissas e, no eixo das ordenadas, as respectivas concentrações de P adsorvido calculadas pela equação 3. Os dados foram ajustados ao modelo de Langmuir. Para obtenção dos parâmetros do modelo (**K<sub>L</sub>** e **B**), procedeu-se a linearização plotando-se no eixo das abscissas as concentrações de equilíbrio e, no eixo das ordenadas, a **C<sub>e</sub>/P<sub>ads</sub>** (Equação 3).

$$\frac{C_e}{P_{ads}} = \frac{1}{K_L B} + \frac{1}{B} * C_e \quad 3$$

Onde: **C<sub>e</sub>** é a concentração de equilíbrio; **K<sub>L</sub>**: é a constante de Langmuir e **B**: a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP).

A partir da equação linear ( $y = a + bx$ ) ajustada, o parâmetro capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) foi calculado de acordo com a equação 4.

$$b = 1/B \quad 4$$

Onde: **b**: a inclinação da reta ajustada e **B**: a CMAP.

Conhecendo o valor de B, pode-se calcular o parâmetro **K<sub>L</sub>** por meio da equação 5.

$$a = 1/KB \quad 5$$

Onde:

**a**: o intercepto da reta ajustada; **B**: CMAP e **K<sub>L</sub>**: constante de Langmuir.

### 3.7 Análises estatísticas e modelagem

#### 3.7.1 Análises estatísticas

Com o auxílio do Microsoft Excel, foram conduzidas análises descritivas com o objetivo de caracterizar as amostras de solos, tanto cultivados quanto não cultivados.

Utilizando esta mesma ferramenta, foram feitas isotermas de adsorção de P, bem como, os cálculos da CMAP e do índice  $K_L$ .

Já com o software R versão 4.2.0 (R core team, 2022), foram realizadas análises de cluster e análises de componentes principais (PCA). Essas análises visaram agrupar as amostras de solos cultivados que compartilham características similares, além de identificar as variáveis que mais contribuíram para a distinção dos agrupamentos obtidos.

Além disto, foram feitas análises de correlação de Pearson nas amostras de solos cultivados e não cultivados com a finalidade de verificar a correlação entre a CMAP, MOS, P-rem, P disponível e o índice  $K_L$  com os atributos químicos, físicos e mineralógicos. Esta análise também foi usada para correlacionar os parâmetros R, G e B das imagens digitais com o sensor Nix Pro.

Para determinar a melhor combinação entre smartphone e a condição de iluminação, foram feitas curvas de regressão linear entre os parâmetros R, G e B obtidos pelas imagens digitais com os valores padrão da cartela de cores. Sendo que a melhor condição foi considerada a que apresentasse o menor valor de RMSE e o maior valor de  $R^2$ .

### *3.7.2 Modelagem e validação dos modelos de predição*

Todos os modelos de predição apresentados no Quadro 1 foram criados com o software R versão 4.2.2 (R core team, 2022), por meio do pacote “caret” (Kuhn, 2008). Todas as variáveis usadas para a modelagem estão apresentadas na Tabela 2.

O algoritmo Random Forest foi escolhido e a análise foi feita por meio de validação cruzada. O conjunto de dados foi separado aleatoriamente em subconjunto de modelagem para a calibração e validação. Assim, a validação cruzada ajuda a observar os possíveis sobre ajustes que possam estar ocorrendo no conjunto de treinamento dos dados avaliados. Foram utilizados apenas o conjunto de dados referentes as amostras de solos cultivados, os quais foram subdivididos em um conjunto de treino (70%) e de teste (30%).

Foram feitas análises exploratórias para observar possíveis outliers e foi visto que apenas na predição do índice  $K_L$  foi observado um outlier. De acordo com o conjunto de dados, notou-se que esta amostra em específico apresentou um  $K_L$  igual a 3, sendo assim, a mesma foi desconsiderada na predição deste parâmetro.

Quadro 1 – Modelos de predição dos parâmetros MOS, CMAP, P-rem, P disponível e índice  $K_L$ .

<b>Modelos de predição</b>
<i>pXRF</i>
<i>Fertilidade</i>
<i>pXRF + Fertilidade</i>
<i>pXRF + Nix</i>
<i>pXRF + IOS_ME</i>
<i>pXRF + IOS_SN</i>
<i>pXRF + A_ME</i>
<i>pXRF + A_SN</i>
<i>Fertilidade + Nix</i>
<i>Fertilidade + IOS_ME</i>
<i>Fertilidade + IOS_SN</i>
<i>Fertilidade + A_ME</i>
<i>Fertilidade + A_SN</i>

Nix: sensor Nix Pro; A\_LA: Dispositivo Android sob luz artificial; A\_C: Dispositivo Android sob miniestúdio; A\_SN: Dispositivo Android sob sombra natural; I\_LA: Dispositivo iOS sob luz artificial; I\_C: Dispositivo iOS sob miniestúdio; I\_SN: Dispositivo iOS sob sombra natural.

Fonte: Autora (2024).

Tabela 2 – Variáveis usadas para a predição da MOS, CMAP, P-rem P disponível e índice  $K_L$ .

Variáveis preditoras	Parâmetros				
	MOS	CMAP	P-rem	P disponível	$K_L$
			<b>Convencionais</b>		
pH (H <sub>2</sub> O)	x	x	x	x	x
pH (CaCl <sub>2</sub> )	x	x	x	x	x
K	x	x	x	x	x
S	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x
Mg	x	x	x	x	x
P	x				x
Al	x	x	x	x	x
H+Al	x	x	x	x	x
t	x	x	x	x	x
T	x	x	x	x	x
SB	x	x	x	x	x
MOS		x	x	x	x
m	x	x	x	x	x
V	x	x	x	x	x
			<b>pXRF</b>		
P	x	x	x	x	x
K <sub>2</sub> O	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x
Al	x	x	x	x	x
Zn	x	x	x	x	x
Ni	x	x	x	x	x

(Continua)

Tabela 2 – Variáveis usadas para a predição da MOS, CMAP, P-rem P disponível e índice  $K_L$ .

(Conclusão)

Variáveis preditoras	Parâmetros				
	MOS	CMAP	P-rem pXRF	P disponível	$K_L$
Fe	x	x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x
SiO <sub>2</sub>	x	x	x	x	x
Ti	x	x	x	x	x
Cr	x	x	x	x	x
Rb	x	x	x	x	x
Sr	x	x	x	x	x
Zr	x	x	x	x	x
Y	x	x	x	x	x

Fonte: Autora (2024).

A precisão dos modelos foi avaliada por meio da comparação entre os valores previstos e observados, usando coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio residual de predição (RPD) (equação 6) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) (equação 7). O modelo com maiores valores de  $R^2$  e RPD e menores valores de RMSE foram considerados os melhores.

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad 6$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_I - m_i)^2} \quad 7$$

Onde:  $n$ : número de observações;  $Y_I$ : valor estimado pelo modelo;  $m_i$ : valor obtido pela análise química convencional e **SD**: desvio padrão dos valores observados.

Os valores de RPD foram classificados em:  $RPD > 2$ , modelos de predição que fornecem resultados acurados;  $1,4 \leq RPD \leq 2$ , modelos de predição que fornecem resultados moderadamente acurados; e  $RPD < 1,4$ , modelos de predição não confiáveis (CHANG et al. 2001).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Descrição geral dos solos não cultivados

Os atributos químicos dos solos não cultivados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Atributos químicos dos horizontes A e B do CXBd, PVAd e LVdf não cultivados selecionados para o estudo.

(Continua)

SOLO		Análises convencionais					
		CXBd		PVAd		LVdf	
Horizonte		A	B	A	B	A	B
	pH <sub>H2O</sub>	5,6	5,2	5,2	5,1	5,7	5,7
	pH <sub>KCl</sub>	4,6	3,96	4,76	6,09	4,25	4,94
	ΔpH	-0,81	-1,28	-0,45	0,77	-1,16	-0,11
MOS	g kg <sup>-1</sup>	43	23	30	5	55	12
CMAP	mg kg <sup>-1</sup>	476	769	1667	1667	435	3333
P-rem		19,8	0,1	21,3	9,0	1,3	0,0
P	mg dm <sup>-3</sup>	1,9	0,7	1,0	0,0	0,6	0,0
K		139,8	105,0	50,6	9,7	72,2	8,6
S		2,2	2,8	2,2	9,2	1,4	2,9
Ca	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	4,8	0,8	1,9	0,5	3,3	0,5
Mg		1,1	0,3	1,1	0,5	1,9	0,5
Al		0,1	0,6	0,2	0,0	0,1	0,0
B		0,15	0,07	0,11	0,06	0,14	0,08
Zn		1,3	0,3	1,0	0,1	1,2	0,3
Fe	mg dm <sup>-3</sup>	148,3	220,4	130,6	41,7	33,3	67,2
Mn		19,7	3,2	100,8	7,0	73,1	9,0
Cu		0,8	0,7	1,9	1,2	3,4	6,3
H + Al		3,9	3,7	3,4	1,9	3,6	1,5
t	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	6,4	1,9	3,3	1,0	5,5	0,9
T		10,1	5,1	6,5	2,9	9,0	2,3
SB		6	1	3	1	5	1
V	%	62	26	48	34	60	36

Tabela 3 – Atributos químicos dos horizontes A e B do CXBd, PVAd e LVdf não cultivados selecionados para o estudo.

(Conclusão)

Análises via Pxf						
SOLO	CXBd		PVAd		LVdf	
Horizonte	A	B	A	B	A	B
P	0,25	0,12	0,25	0,17	0,17	0,17
K	3,09	0,88	0,62	0,61	2,26	2,51
Ca	1,06	0,06	0,08	0,59	2,22	0,59
Al	238	265	246	248	263	278
Ni	0,11	0,12	0,46	0,47	0,05	0,03
Fe	64	83	150	169	32	26
Si	364	216	151	139	357	400
Ti	8	4	6	8	3	3
Cu	0,04	0,03	0,08	0,10	0,01	0,01
Cr	0,49	0,48	2,57	3,17	0,18	0,13
As	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Rb	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sr	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Zr	0,65	0,38	0,24	0,18	0,46	0,40
Nb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zn	0,04	0,02	0,05	0,04	0,03	0,02

Fonte: Autora (2024).

Percebe-se em todos os solos e horizontes amostrados valores de pH variando entre 5,1 a 5,7, sendo considerados quimicamente como acidez média e agronomicamente como pH baixo/bom (Ribeiro et al. 1999). Por meio do delta pH nota-se que são solos onde há predominância de cargas negativas, conferindo ao solo a capacidade de reter cátions, exceto no horizonte B do PVAd. O balanço de cargas negativas é esperado nesse tipo de solo visto que os principais constituintes da fase sólida são MOS, óxidos de Fe e Al e caulinita, cuja carga superficial varia de acordo com o pH do meio (Alleoni et al. 2005; Baldotto et al. 2010). Sendo a MOS o principal gerador de cargas negativas em solos tropicais e na sua ausência os óxidos de Fe e Al são os responsáveis por manter cerca de 50% das cargas variáveis (Alleoni et al. 2005).

Da superfície (horizonte A) para subsuperfície (horizonte B) foi verificada uma diminuição dos teores de P, K, Ca e Mg, conseqüentemente, uma diminuição da CTC efetiva e potencial, assim como a SB em todos os solos. A melhor fertilidade da camada superficial está associada à presença de matéria orgânica, a qual diminui drasticamente em profundidade. A MOS promove um aumento de cargas negativas e

diminuição da atividade dos íons  $H^+$ , o que permite o aumento da CTC do solo (Falleiro et al. 2003). Vários estudos demonstram a relação linear entre a CTC e a MOS, como Skorupa et al. 2012; Matias et al. 2012; Chiodini et al. 2013).

Foi observado um decréscimo do teor de MOS do horizonte A para o Horizonte B. Os maiores teores de MOS no horizonte A podem estar relacionados ao maior aporte dos resíduos vegetais na superfície dos solos. Este mesmo comportamento foi visto no estudo de Inda et al. (2014) onde verificaram maiores incrementos de carbono orgânico em floresta nativa em relação ao campo nativo, devido a associação das plantas rasteiras e arbóreas, que determinam um maior aporte dos resíduos vegetais em ambientes de floresta.

Com relação à saturação por base (V), todos os solos apresentaram caráter distrófico, com exceção do horizonte A do CXbd e LVdf. Os valores de V variaram de 26 a 36% no horizonte B e 48 a 62% no horizonte A. Valores inferiores foram observados por Papa et al. (2011) estudando Latossolos sob vegetação nativa de cerrado na região do Distrito Federal, onde encontraram valores de 2 a 4% no horizonte A e 6 a 27% no horizonte B.

Solos de baixa V apresentam maiores quantidades de íons de  $Al^{3+}$  e  $H^+$  ocupando o complexo de troca, conseqüentemente, menores teores de cátions básicos. Isto ocorre em solos altamente intemperizados que passam por processos pedogenéticos que promovem a diminuição de grande parte do silício e das bases do sistema, favorecendo a formação de argilominerais 1:1, conferindo ao solo uma baixa CTC (Marcolin; Calegari, 2020), conseqüentemente, baixa saturação por bases.

Com relação a composição elementar obtida via pXRF verificou-se que os teores de Fe, Al e Si foram quantificados em níveis mais elevados, podendo ser atribuído as características dos solos que são ricos em oxihidróxidos de ferro e alumínio e outros argilominerais, como observados na Tabela 3. De maneira inferior observa-se que os teores de K, Ca, e Ti também foram quantificados em maiores quantidades quando comparados aos outros elementos. Resultados semelhantes foram vistos por Ribeiro et al. (2024), ao analisar atributos dos solos do Paraná via pXRF, encontraram maiores teores de Si, Al e Fe, assim como K, Ca e Ti e atribuíram estes resultados a presença da MOS, textura, mineralogia da fração argila e fertilizantes.

Os valores de P-rem do horizonte superficial foram superiores ao horizonte subsuperficial, sendo o maior valor observado no PVAd, seguindo pelo CXbd e LVdf.

Este mesmo padrão foi observado por Valladares et al. (2003), estudando diferentes classes de solo de regiões tropicais do Brasil. O PVAd e CXbd constituem uma mineralogia com predominância de caulinita, o que permite uma menor capacidade de adsorção do fosfato, em relação ao LVdf que apresenta uma mineralogia mais oxidica. Segundo Novais; Smyth (1999), quanto mais oxidídico for o solo, maior a capacidade de adsorção de P, portanto, menor a valor de P-rem (Donagemma et al. 2008).

No que se refere a CMAP, foi verificado os menores teores no horizonte A do CXbd e do LVdf, pode-se atribuir a este resultado os menores teores de óxidos de Fe e Al encontrados nessa camada e principalmente à presença da MOS, já que ela pode bloquear os sítios de adsorção dos colóides (Sanyal; De Datta, 1991), por meio dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, bem como, recobrando a superfície dos óxidos (Fontes et al. 1992), diminuindo assim, a capacidade sortiva de P na camada superficial. Resultados semelhantes foram constatados por Fontana et al. (2021) estudando a adsorção de fósforo em solos de fertilidade construída, observaram que a presença da MOS minimizou o potencial de adsorção de P pelos minerais da fração argila. Assim como no estudo de Pereira et al. (2010) o qual, constatou que o aumento nos teores de MOS promoveu a redução da adsorção de P em áreas sob sistema de plantio direto.

Ao verificar o horizonte B, percebe-se que a CMAP acompanha valores com a seguinte ordem decrescente: LVdf>PVAd>CXbd. Este resultado pode ser justificado pela variação da mineralogia da fração argila, assim como, os teores de óxidos de Fe e Al presentes nesse horizonte. O caráter caulínico do PVAD e do CXbd é considerado menos eficaz na adsorção de fosfato quando comparado aos componentes mais oxidicos. Isso foi observado por Ker (1995) no qual, perceberam que a predominância da caulinita nos Latossolos implicava em redução da capacidade de adsorção de P devido ao aumento nos teores de óxidos.

Os resultados encontrados neste estudo se diferenciaram dos observados por Moreira et al. (2006), ao estudar a adsorção de P em solos do Ceará, observaram que Cambissolo foi a classe que mais adsorveu fósforo seguida pelo Latossolo e Argissolo. Os autores atribuíram estes resultados aos teores de óxidos de Fe total, livres e amorfos encontrados nestes solos. Já Soares (2020) ao analisar a adsorção de P em solos do estado de São Paulo e Paraná, encontraram maiores valores de CMAP em um Latossolo (1335 mg kg<sup>-1</sup>) e em um Argissolo (492 mg kg<sup>-1</sup>) quando comparado a

outras classes de solo, em decorrência da presença dos óxidos de Fe e Al bem como, os teores de argila total e a área de superfície específica da argila.

#### 4.1.1 Caracterização física e mineralógica dos solos não cultivados

Na tabela 4 são apresentados os atributos físicos e mineralógicos dos solos não cultivados. Com base nos índices Ki e Kr é possível avaliar o estágio de intemperismo dos solos (IBGE, 2007).

Tabela 4 – Atributos físicos e mineralógicos do dos horizontes A e B do CXBd, PVAd e LVdf não cultivados selecionados para o estudo.

SOLO	Horizonte	Argila	Silte	Areia	Al <sub>ox</sub>	Al <sub>DCB</sub>	Fe <sub>ox</sub>	Fe <sub>DCB</sub>
		%			g/kg			
CXBd	A	46	18	36	2,3	3,5	1,4	10,1
	B	42	22	36	3,0	4,5	3,1	10,2
PVAd	A	38	10	52	2,4	7,6	2,0	27,6
	B	60	13	27	2,3	9,2	1,1	30,5
LVdf	A	64	16	20	2,3	17,8	1,5	68,5
	B	69	15	16	4,3	13,0	3,0	62,0
Tipo de solo	H	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O	Ki	Kr
		%						
CXBd	A	20,45	18,54	2,67	0,41	0,03	1,9	1,7
	B	21,51	19,27	2,2	0,35	0,02	1,9	1,8
PVAd	A	8,37	12,35	4,33	0,86	0,03	1,2	0,9
	B	17,39	24,1	7,6	0,78	0,05	1,2	1,0
LVdf	A	6,82	21,17	14,65	1,2	0,08	0,6	0,4
	B	10,48	26,21	18,21	1,33	0,06	0,7	0,5

Al<sub>ox</sub>: e Fe<sub>ox</sub>: Alumínio e Ferro extraído por oxalato de amônio; Al<sub>DCB</sub> e Fe<sub>DCB</sub>: Alumínio e Ferro extraído por citrato-ditionito-bicarbonato.

Fonte: Autora (2024).

O LVdf apresentou os maiores teores de argila, seguido pelo PVAd e CXbd, evidenciando os diferentes materiais de origem e estágios de desenvolvimento. Levando em conta o Ki e Kr verificou-se que o grau de intemperismo decresceu da seguinte forma: LVdf > PVAd > CXbd. Segundo Vendrame et al. (2015); Rocha et al. (2002), maiores valores de Ki e Kr indicam menor estágio de desenvolvimento pedogenético. Foi verificado valores de Ki menores que 2,2, sugerindo solos com alto grau de intemperismo (Curi; Kampf, 2012). Isso acontece devido à intensa remoção de sílica do sistema ao longo do tempo, favorecendo uma mineralogia mais caulinitica e oxídica (Melfi; Pedro, 1977). Conforme demonstrado na figura 7, a mineralogia da fração argila natural é dominada pelos minerais caulinita e gibbsita.

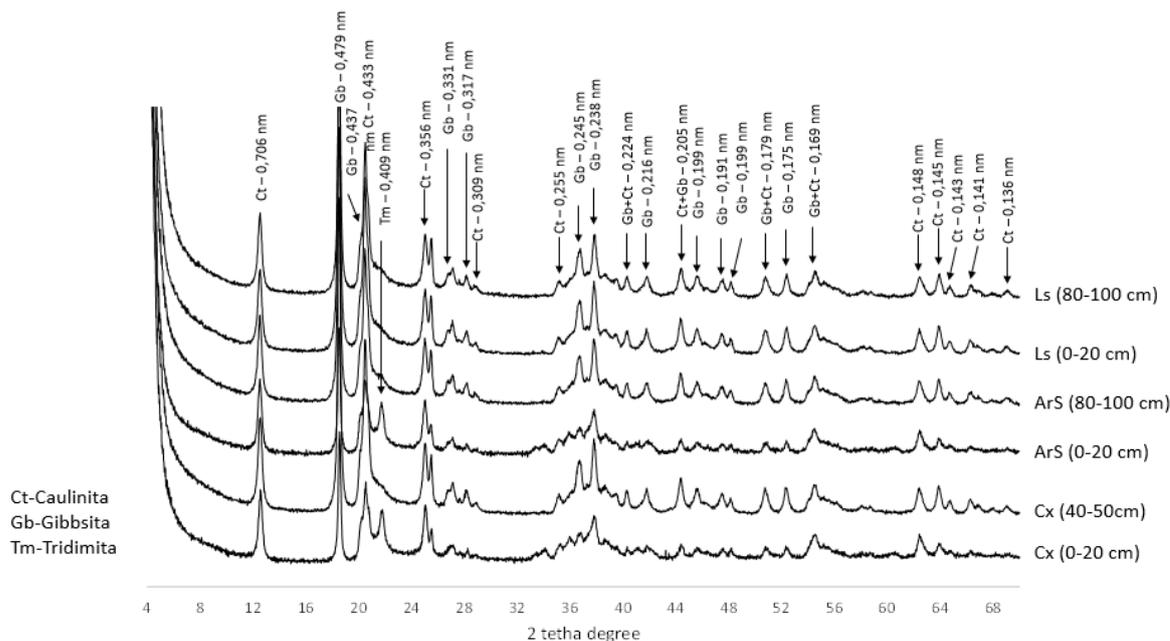
Com relação ao índice Kr, observou-se valores acima de 0,75 no CXbd e PVAd, indicando a predominância de caulinita, enquanto no LVdf foram observados valores menores que 0,75, indicando um sistema mais oxidico (Embrapa, 2006; Mello et al. 2009). Alleoni et al. (2005) estudando algumas classes de solos tropicais, encontraram valores de Kr superiores aos deste trabalho, para PVAd (1,61 e 1,72) e para LVd (1,10 e 1,20) para os horizontes A e B, respectivamente, e comprovaram a mineralogia composta predominantemente por caulinita no PVAd e no LVd foi observada a predominância tanto da caulinita quanto da gibbsita. A variação da caulinita ou gibbsita no solo, depende do seu estágio de intemperismo (Motchi, 1977), sendo que quanto maior o grau de intemperismo, maior o teor de gibbsita (Rodrigues, 1977).

Os teores mais elevados de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram identificados no horizonte B, destacando-se notavelmente os solos do tipo PVAd e LVdf, os quais apresentaram os maiores teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nesse horizonte. É importante salientar que o solo LVdf, no mesmo horizonte, exibiu o teor mais elevado de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o que está em concordância com seu estágio pedogenético mais avançado, conforme discutido por Schaetzl; Anderson (2005).

Com relação às diferentes formas de óxidos de Fe, os teores variam de acordo com as classes de solo e de maneira geral, os teores do horizonte B são superiores aos do horizonte A. Foi verificada a predominância de formas pouco cristalinas ( $\text{Fe}_{\text{DCB}}$ ) em relação as formas cristalinas ( $\text{Fe}_{\text{ox}}$ ) em todas as classes. O mesmo comportamento ocorre com os óxidos de Al. Verifica-se também que os teores de Al e Fe oxalato no CXbd e LVdf são menores no horizonte A. Essa redução possivelmente está relacionada com o efeito da inibição da MOS nas camadas superiores desses solos (Damaceno, 2020).

O predomínio de formas pouco cristalinas sobre as formas mais cristalinas dos óxidos também foi observado nessas mesmas classes de solo localizadas no nordeste brasileiro (Moreira et al. 2006) e em diferentes solos do estado do Paraná (Inda et al. 2010; Vilar et al. 2010). Valladares et al (2003) ao estudar solos de regiões tropicais formados por diferentes materiais de origem, também encontram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho.

Figura 7 – Mineralogia da fração argila dos horizontes A e B do CXBd, PVAd e LVdf não cultivados selecionados para o estudo.



Fonte: Autora (2024).

A mineralogia da fração argila foi marcada pela presença de polimorfos de quartzo (Tridimita) e a predominância de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) (Figura 7). De modo geral, a presença de caulinita reflete condições de lixiviação intensa, em solos de pH levemente ácidos e muito pobres em cátions básicos (Campos, 2010). Já a gibbsita reflete uma condição de intemperismo extremo, na qual a sílica foi removida do sistema, resultando na formação de oxi-hidróxidos de Al (Buol et al. 1989). Essas condições são tipicamente encontradas em regiões tropicais úmidas sob condições pedoambientais de dessilicificação parcial (Gaspari et al. 2020).

A quantidade de Gibbsita nesses solos podem estar associadas a presença do Fe. Segundo Resende (1976) há uma tendência na formação de gibbsita quando os solos são formados por rochas ricas em Fe. Além disto, em solos tropicais, o Fe pode estar presente na estrutura dos minerais, já que este elemento constitui uma das principais impurezas encontradas nos minerais de argila, especialmente na caulinita, uma vez que este elemento pode substituir, em grandes quantidades, o Al que naturalmente ocupam os sítios octaédricos e o Si que ocupam os sítios tetraedrais na estrutura do mineral, especialmente na caulinita (Pérez et al. 2004).

#### *4.1.2 Correlação dos atributos com a adsorção e disponibilidade de P dos solos não cultivados.*

Na figura 8 são apresentadas as correlações encontradas entre todos os atributos analisados dos solos não cultivados e dos solos cultivados e a capacidade máxima de adsorção de P, constante de Langmuir ( $K_L$ ), P-rem e P-disponível.

##### *4.1.2.1 Correlação dos solos não cultivados*

Destaca-se que a CMAP obteve coeficientes de correlação positivos e acima de 0,60, com o delta pH (0,79), mas principalmente com os óxidos de Al menos cristalinos (0,8). Vale destacar também as correlações positivas com a fração argila (0,45) e o pH CaCl<sub>2</sub> (0,52), que apesar de serem correlações mais baixas, esses atributos são muito importantes no processo da adsorção de P em solos.

Embora muitos trabalhos demonstrem a influência dos óxidos de Fe na capacidade de adsorção de P (Ranno et al. 2007; Gonçalves et al. 2011; Fink et al. 2014), neste estudo, houve fortes correlações com os óxidos de alumínio amorfos. Segundo Pozza et al. (2009), a correlação com os óxidos de Al podem ser maiores ou equiparadas a dos óxidos de Fe, dependendo do teor de gibbsita em relação ao de goethita ou dependendo do pH dos solos, os óxidos de Al atuam diretamente na retenção de ânions, tornando-se um dos minerais que mais adsorve fosfato (Eberhardt et. 2008). Além disto, o grau de cristalinidade de Al afeta significativamente a CMAP, sendo os óxidos menos cristalinos os principais responsáveis pela adsorção de fósforo em solos tropicais, uma vez que apresentam uma maior área superficial específica e portanto, uma maior quantidade de sítios de adsorção (Fontes; Weed 1996; Moreira et al. 2006).

Foi observada uma forte correlação positiva entre a CMAP e o delta pH, ou seja, o aumento do delta pH favorece o aumento da CMAP, pois se o delta pH é positivo a densidade de cargas líquidas do solo também é positiva (Carneiro, 2019) e quanto mais cargas positivas, mais favorável a ocorrência da adsorção de P. Os principais responsáveis pelas cargas líquidas positivas em solos tropicais são os óxidos de Fe e Al, pois o seu ponto de carga zero (PCZ) está entre 4 e 7,8 e em valores de pH abaixo do PCZ ocorre o predomínio de cargas positivas (Baldotto; Velloso, 2013). Vale ressaltar, que estes são os principais componentes da adsorção de P.



A CMAP também se correlacionou positivamente com a fração argila. Estes resultados são esperados nesses tipos de solo, uma vez que o teor de argila é considerado um importante atributo na adsorção do P. De acordo com Pereira (2021) a ordem de maior adsorção, considerando as frações granulométricas é: argila>silte>areia fina>areia grossa. Corroborando com esses resultados, Vieira et al (2021) estudando diferentes solos da região do semiárido, concluíram que solos com maiores teores de argila obtiveram a maior capacidade de adsorção de P. E Corrêa et al. (2011) estudando solos do estado de Pernambuco comprovaram que, de maneira geral solos com maiores teores de argila, obtiveram os maiores valores de CMAP, corroborando também com o estudo de Ranno et al. (2007) que observaram correlação positiva entre o teor de argila e a CMAP nos solos estudados.

A correlação entre a CMAP e o pH ( $\text{CaCl}_2$ ) também é esperada, uma vez que o pH é um parâmetro fundamental de adsorção em solução, pois é responsável por determinar as cargas das superfícies do adsorvente (solo), influenciando as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato (Toledo et al. 2005). Geralmente o fosfato tende a interagir com o Fe e o Al em pH menor que 5 e no caso dos solos analisados o pH em  $\text{CaCl}_2$  corresponde a esta variação. A variação do pH possibilita a formação ou dissolução de novos compostos, por meio de troca de ligantes na medida em que ocorre o estabelecimento das ligações covalentes (Fixen; Ludwig, 1982).

Destaca-se uma correlação negativa entre a CMAP e a MOS (-0,69). O papel da MOS é tão importante quanto o das argilas no estabelecimento da capacidade sortiva de P dos solos. Pois, a MOS pode bloquear os sítios de adsorção (Sanyal; De Datta, 1991), por meio dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, e também pode recobrir a superfície dos óxidos (Fontes et al. 1992), minimizando os efeitos da adsorção de fosfato. No entanto, esse efeito é apenas transitório, pois a longo prazo pode ocorrer uma substituição lenta dos ânions orgânicos pelo fosfato (Afif et al. 1995). Assim, a aplicação constante de fontes naturais de ácidos orgânicos no solo pode manter de forma mais contínua o processo de bloqueio dos sítios de adsorção de P (Pavinato; Rosolem, 2008). Fontana et al. (2021) estudando solos de fertilidade construída, observaram que a presença da MOS minimizou o potencial de adsorção de P pelos minerais da fração argila. Assim como no estudo de Pereira et al (2010) que constataram que em áreas sob sistema de plantio direto que o aumento nos teores de MOS, promoveu a redução da adsorção de P.

Com relação ao P-rem, evidencia-se as correlações positivas com a CTC Potencial (0,44) e efetiva (0,43) e V (0,48). Contrastando com esses resultados, Arruda et al. (2017) identificaram correlações negativas com a CTC efetiva em solos da Paraíba e Corrêa et al. (2011) observaram correlações negativas entre P-rem e a CTC em solos de Pernambuco, todavia, esses mesmos autores notaram correlações positivas com o V, corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

Foi evidenciado a correlação negativas e acima de 0,60 entre o P-rem com a fração Argila (-0,62) e correlações positivas com a fração Areia (0,76). Essa associação ocorre devido à presença predominante de óxidos de Fe e Al na fração argila do solo (Eberhardt et al., 2008). Observou-se que o P-rem também apresentou correlação negativa com os óxidos de Fe (-0,52) e Al (-0,53), sustentando os resultados de Eberhard et al. (2008). Essa relação negativa do P-rem com a argila foi observada por outros estudos, tais como os de Arruda et al. (2017), Vilar et al. (2010), Corrêa et al. (2011) e Fontana et al. (2013).

No que diz respeito ao P disponível, destaca-se correlações negativas com a fração argila (-0,65), os teores de Fe e Al extraídos do ataque sulfúrico (-0,59 e -0,66, respectivamente) e a CMAP (-0,64). Como explicado anteriormente, a associação dos óxidos de Fe e Al com a fração argila do P exerce influência direta na capacidade de adsorção de P do solo e conseqüentemente a disponibilidade de P. Assim, à medida que o solo apresenta uma capacidade mais elevada de adsorver P, ocorre uma menor disponibilidade deste nutriente no solo. Corroborando com esses resultados, Neto et al. (2009) estudando diferentes extratores de P em solos, observaram correlações negativas e significativas entre o P extraído por Mehlich-1 e a CMAP, óxidos de Fe e argila

Foi possível observar a correlação positiva entre o P disponível e a MOS (0,66). Essa relação é evidenciada em vários estudos, uma vez que a MOS é a principal fonte de nutrientes, além de ser um componente eficiente em diminuir a adsorção de P em solos (Fontana et al. 2008), o que aumenta a sua disponibilidade. Corroborando com esses dados, Bezerra et al. (2015) estudando diferentes frações de P correlacionadas com alguns atributos do solo, observaram correlações positivas entre a MOS e o P inorgânico, P orgânico e o P total dos solos. E no estudo de Rosset et al. (2016), no qual observaram que o aumento da MOS promove uma maior disponibilidade do P inorgânico dos solos.

No que se refere ao índice  $K_L$ , que determina a energia de ligação do fósforo ao solo no processo de adsorção, destaca-se a correlação positiva com a fração de argila (0,86) e o pH (0,56) e correlação negativa com a MOS (-0,6).

A relação positiva do índice  $K_L$  com a argila faz sentido, uma vez que valores mais elevados de  $K_L$  são esperados em solos mais argilosos, conforme evidenciado por Oliveira et al. (2014). De acordo com Vinha et al. (2021), o índice  $K_L$  varia em função do teor de fósforo no solo. Esses mesmos autores também encontraram correlações positivas entre o índice  $K_L$ , a fração de argila e o pH, assim como correlações negativas com a MOS. Vinha et al. (2021) também destacaram que o pH exerce uma influência direta na constante  $K_L$ , pois influencia a adsorção de ânions no solo, especialmente em condições ácidas, onde ocorre a protonação e solubilização dos óxidos. Quanto à correlação negativa com a MOS, essa relação provavelmente está associada à competição pelos sítios de adsorção entre os ácidos orgânicos e os íons de fosfato.

#### *4.1.2.2 Correlação dos solos cultivados*

Para os solos cultivados foram destacadas apenas as correlações acima de 0,60. Assim, não foram discutidas as correlações entre o índice  $K_L$  com as demais variáveis.

No que se refere a CMAP, destaca-se as correlações positivas com a MOS (0,62) e com os teores de Fe obtido via pXRF (0,7). Isto sugere que a presença desses componentes nas camadas superficiais destes solos favorece o aumento da capacidade máxima de adsorção de P destes solos. Geralmente, são esperadas correlações negativas entre a CMAP e a MOS, como vistas nos solos não cultivados. Todavia, com o aumento da MOS pode ocorrer uma tendência no aumento da CMAP, possivelmente devido aos compostos húmicos que podem formar pontes de cátions com o Al, Fe e Ca, aumentando a capacidade de adsorção de P. Estes resultados corroboram com os resultados encontrados por Valladares et al. (2003) e Sanyal; De Datta, (1991), onde encontraram correlações positivas da CMAP com os teores de MOS. Bem como, com o estudo de Souza et al. (2006) que observaram que com o aumento das doses de esterco bovino, foi verificada uma tendência no aumento da CMAP dos solos estudados.

Vale destacar as correlações negativas entre a CMAP e o teor de  $\text{SiO}_2$  obtido via pXRF (-0,78) e com o P-rem (-0,69). A correlação negativa com o  $\text{SiO}_2$  e com o P-

rem também é esperada, uma vez que solos de textura mais arenosa e com maiores teores de silício apresentam menor capacidade sortiva do P e portanto, maiores valores de P-rem em comparação a solos de textura mais argilosa. Corroborando com o estudo de Teixeira et al. (2008) que observaram correlações negativas entre a CMAP e o teor de areia (-0,71).

No que se refere ao P disponível, evidencia-se apenas a correlação positiva com o P obtido via pXRF, com um coeficiente igual a 0,77, corroborando com o estudo de Teixeira et al. (2019). Já com relação ao P-rem, foram verificadas correlações negativas com o  $Al_2O_3$  (-0,66) e com o Fe (-0,62) obtidos via pXRF. Isto é esperado, uma vez que solos que tem maiores teores de óxidos, aumenta o teor de formas de P ligadas ao Al e ao Fe (Souza et al. 2006). Ressalta-se que estes resultados estão de acordo com os resultados observados nas amostras de solo não cultivados deste estudo.

Com relação a MOS, destaca-se principalmente as correlações positivas com o Estrôncio (Sr) (0,87); CTC potencial (0,86) e efetiva (0,79), bem como a SB (0,76). Estes resultados podem ser justificados pelo comportamento da MOS no solo, já que ela determina a disponibilidade de elementos químicos, como o Sr (LAWSON et al. 2016) e promove o aumento da CTC do solo, uma vez que os colóides orgânicos apresentam a habilidade de fixar cátions presentes na solução do solo e posteriormente disponibilizar para as plantas ou realizar trocas, em ambientes de concentrações de íons diferentes (Ciotta et al. 2003).

#### 4.2 Descrição geral dos solos cultivados

A análise de estatística descritiva dos atributos químicos das amostras de solo (Tabela 5) possibilitou verificar que a maior parte dos valores médios se mostraram acima do nível crítico para o desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas, segundo as recomendações de Ribeiro et al (1999).

Tabela 5 – Estatística descritiva dos atributos do solo de áreas agrícolas do estado de Minas Gerais

Atributo	Unidade	MIN	MAX	Média	Mediana	S.D	C.V
Análises convencionais							
pH <sub>H2O</sub>		4,03	6,68	5,45	5,52	0,55	10,11
pH <sub>CaCl<sup>2</sup></sub>		3,42	6,26	4,88	5,02	0,58	11,89

Tabela 5 – Estatística descritiva dos atributos do solo de áreas agrícolas do estado de Minas Gerais

(Conclusão)

Atributo	Unidade	MIN	MAX	Média	Mediana	S.D	C.V
<b>Análises convencionais</b>							
SOM	g kg <sup>-1</sup>	7	53	31	30	12	39
CMAP	mg kg <sup>-1</sup>	37	2000	818	801	478	58
P-Rem		0,27	58,39	15,51	11,85	15,62	100,71
P	mg dm <sup>-3</sup>	0,40	139,80	29,15	11,05	37,56	128,84
K		9,81	525,84	134,70	77,27	115,20	85,53
S		0,72	46,43	11,63	10,86	9,26	79,60
Ca		0,10	9,29	3,14	2,96	2,12	67,51
Mg		0,10	5,33	0,94	0,85	0,74	78,78
Al		0,10	3,26	0,24	0,10	0,40	166,84
H+Al	cmoc dm <sup>-3</sup>	0,25	13,37	2,82	2,68	1,61	57,02
t		0,60	11,45	4,66	4,27	2,59	55,49
T		1,08	14,88	7,25	6,85	3,09	42,68
SB		0,25	11,35	4,42	4,09	2,73	61,71
V	%	6	91	57	64	22	38
<b>pXRF</b>							
P		0,09	1,84	0,56	0,18	0,57	101,38
K		0,08	24,65	5,05	3,45	5,84	115,78
Ca		0,06	29,59	2,32	1,96	3,16	136,45
Al		40,46	341,81	219,27	254,34	71,28	32,51
Zn	g kg <sup>-1</sup>	3,00	88,00	27,68	20,50	19,97	72,16
Ni		0,01	0,08	0,03	0,03	0,02	55,57
Fe		0,31	112,17	53,27	52,79	33,51	62,91
Si		101,60	682,99	283,06	251,29	146,50	51,76
Ti		1,77	28,86	10,50	10,72	4,88	46,50
Zn		3,0	88,0	27,7	20,5	20,0	72,2
Cu		3,0	62,0	21,4	18,0	14,0	65,5
Cr		24,0	247,0	123,0	129,5	54,8	44,6
As	mg kg <sup>-1</sup>	3,0	26,0	10,4	10,0	5,3	51,5
Rb		2,0	208,0	36,6	17,5	43,1	118,0
Sr		3,0	81,0	32,5	27,0	19,3	59,4
Zr		234,0	1721,0	830,7	732,0	307,5	37,0

S.D: desvio padrão; C.V: coeficiente de variação.

Fonte: Autora, (2024).

No geral, os solos apresentaram uma saturação por base acima de 50%, com valores variando de 6 a 91%, com uma faixa média de pH em água considerada boa (5,45) e em CaCl<sub>2</sub> considerada ácida (4,88). Os valores médios observados para CTC (7,25 cmolc dm<sup>-3</sup>) e MOS (31 g kg<sup>-1</sup>) se encontram em uma faixa boa e os valores

médios de Al ( $0,24 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) considerados baixos. Essas características são esperadas em áreas de cultivos agrícolas que adotam boas práticas de manejo, como as áreas avaliadas neste estudo. Santos et al. (2021) verificaram que os atributos químicos do solo se encontram adequados em área com cultivo de soja. Assim como, Michelon et al. (2019) no qual, concluíram que o manejo com sucessão de culturas possibilitou um elevado teor de MOS e uma melhor disponibilidade de fósforo, potássio e enxofre. Resultados semelhantes foram vistos no estudo de Monteiro et al. (2019) e Troleis et al. (2020).

O P remanescente apresentou valores médios de  $15,51 \text{ mg dm}^{-3}$ , com uma mediana de  $11,85 \text{ mg dm}^{-3}$ . O P-rem pode variar de 0 a  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  e é considerado uma medida importante para a interpretação dos resultados de P disponível e da capacidade máxima de adsorção de P. Os valores de P-rem encontrados nestes solos foram menores do que os valores encontrados no estudo de Fontana et al. (2021). A possível explicação para estes valores pode estar relacionada principalmente ao teor e tipo de argila, MOS e ao manejo no sistema de produção. Pereira et al. (2010) verificaram que os menores valores de P-rem estavam associados a áreas de soja sob preparo convencional. Já Guareschi et al. (2012) verificaram que o manejo do solo sob plantio direto, possibilitou um maior aumento no teor de P remanescente, devido a presença da MOS. Moura et al. (2023), verificaram valores de P-rem entre 30 e  $46,6 \text{ mg dm}^{-3}$  em solos com acúmulo de matéria orgânica originada de fezes de aves da espécie *Bubulcus ibis*.

Os valores de P disponível variaram de 0,40 a  $139,80 \text{ mg dm}^{-3}$ , sendo o valor médio ( $29,15 \text{ mg dm}^{-3}$ ) considerado muito bom para o desenvolvimento da maioria das culturas cultivadas no estado de Minas Gerais, como a soja e o milho. Provavelmente, as práticas de correção do solo e adubação possibilitaram um maior teor de P disponível nestas áreas com cultivos agrícolas. Este comportamento foi observado no estudo de Janegitz et al. (2015), onde a aplicação de corretivos possibilitou um aumento no P disponível. E no estudo de Souza et al. (2006) no qual, observaram que a adição de MOS e calcário promoveu uma maior disponibilidade de P e conseqüentemente maior produção no feijoeiro.

A CMAP variou entre 37 a  $2000 \text{ mg kg}^{-1}$ . Os menores valores estão associados as áreas com solos mais arenosos e com pouca matéria orgânica, já os valores maiores relacionam-se com solos com alto teor de argila. Segundo Gatiboni et al. (2021) a composição granulométrica mais arenosa nos horizontes superficiais diminui

consideravelmente a CMAP, devido a relação entre a argila e o P. Cadoná et al. (2022) avaliando solos de textura mais arenosa, como Cambissolos e Neossolos, encontraram valores menores de CMAP, quando comparados com Argissolos, no Sul do Brasil.

A variabilidade dos atributos observados tanto na análise convencional quanto na análise via pXRF foi representada pelo coeficiente de variação. Ao analisar o CV, podemos constatar que o pH foi o único atributo que obteve valores considerados baixos (<12) (Carneiro et al. 2017). Contudo, observa-se que a maioria dos atributos obtiveram valores médios, como CTC, Al, H+Al, V (%) e elementos como Ni, Si, Ti, Al, Cr, Sr, Zr do pXRF. Os valores acima de 60 são considerados altos, podemos destacar nesta categoria o teor de P remanescente e P disponível, assim como os teores de K, Ca, Mg, S, SB.

Segundo Carneiro et al. (2016) e Carvalho et al. (2003), essas variações nas características químicas apresentadas podem estar relacionadas com os processos de formação de cada solo, assim como as práticas de manejo adotadas principalmente nas camadas superficiais do solo e da cultura, como a calagem e adubação. Neste estudo, a variação observada pode estar associada principalmente ao efeito das práticas de manejo adotadas no sistema agrícola de cada área. Este mesmo comportamento foi semelhante ao observado nos estudos de Carneiro et al. (2009) e Dalchiavon et al. (2012), onde o sistema de manejo possibilitou uma maior variação nos atributos químicos dos solos estudados.

#### *4.3 Isotermas de adsorção de P dos solos cultivados e não cultivados*

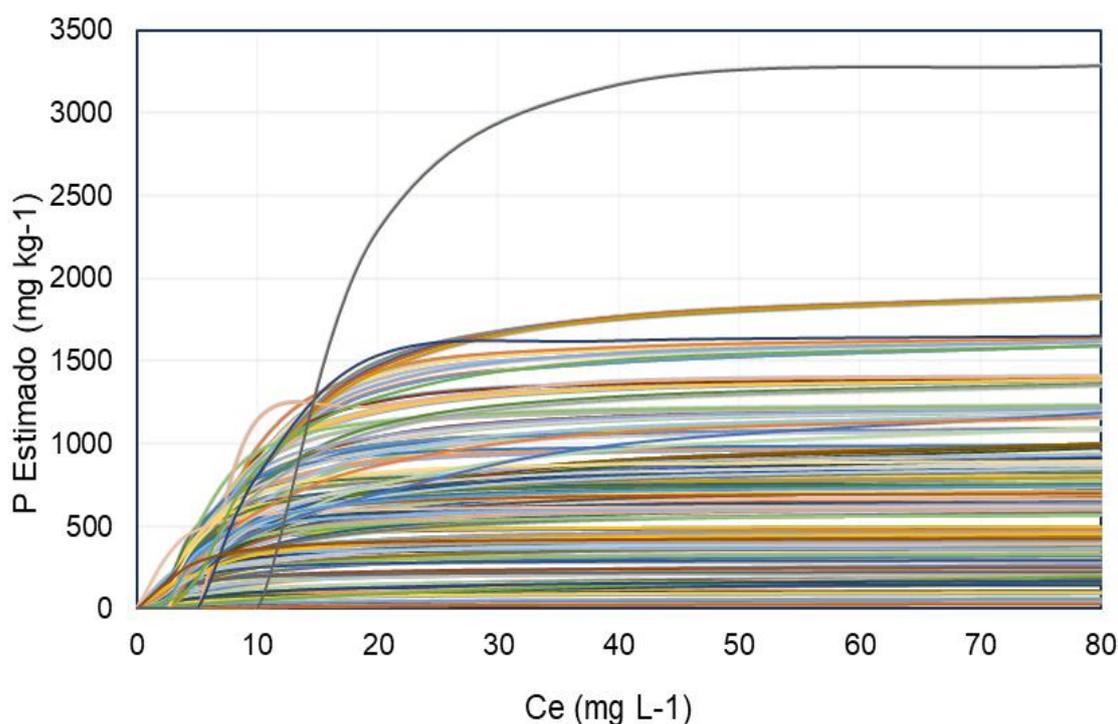
Ao realizar análises de adsorção é comum escolher equações que sejam facilmente linearizáveis. No caso da adsorção de P em solos, o modelo mais empregado é o de Langmuir. Este modelo permite calcular a capacidade máxima de adsorção de P e a constante relacionada com a energia de adsorção (Falcão; Silva 2004).

As isotermas de adsorção de P, evidenciaram que as quantidades de fosfato adsorvidas aumentam de acordo com o aumento da concentração da solução de equilíbrio, onde, no primeiro momento ocorre de uma maneira mais intensa, mas com o aumento da concentração tendem a adquirir um valor estável, momento em que todos os sítios de ligação estariam ocupados (Figura 8). Este mesmo comportamento

foi observado por Falcão; Silva (2004) em solos da Amazônia Central e Vinha et al. (2021) em solos de regiões tropicais do Brasil.

Na figura 8, foi possível observar a evidencia de uma isoterma em relação as outras. Essa isoterma mais discrepante é referente a amostra do LVdf que apresentou a maior CMAP, com valor igual a  $3333 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esse resultado é justificado devido a sua mineralogia mais oxídica que contribui para o aumento da CMAP, como explicado no item 4.1.1.

Figura 8 – Isotermas de adsorção de P estimadas pelo modelo de Langmuir.



Fonte: Autora (2024).

Na primeira fase do processo de adsorção ocorre uma atração eletrostática inicial, logo após ocorre a troca de ligantes, por oxi-hidróxidos (Barrow, 1985), com o  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}^{2+}$  da superfície dos óxidos por fosfato da solução (Novais; Smyth, 1999). Esta adsorção específica é predominantemente covalente, diferente de ânions como  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$  que são adsorvidos por atrações eletrostáticas (Partif et al. 1995).

Ao observar a figura 8, destacamos que o modelo de Langmuir se ajustou bem aos dados. A Tabela 8 do Anexo I demonstra os coeficientes de determinação e as equações linearizadas das isotermas de Langmuir. Foi verificado que 37% das amostras obtiveram coeficientes de correção igual a 1,0, 18% coeficientes igual a 0,99 e 42% das amostras obtiveram coeficiente de correlação abaixo de 0,99, variando de

0,88 a 0,98. Esses resultados indicam que o modelo de Langmuir foi capaz de estimar as constantes de adsorção de P de forma significativa. Corroborando com o Trabalho de Cavalcante (2022) estudando diferentes modelos de Langmuir em solos de Alagoas, constataram que o mesmo modelo usado neste estudo foi o que melhor se ajustou aos dados observados no laboratório.

Vários outros estudos demonstram a eficiência deste modelo no ajuste dos dados obtidos pelas análises laboratoriais, bem como, na estimativa dos parâmetros relacionados a adsorção de P. Destacam-se o trabalho de Falcão; Silva, (2004) estudando solos da Amazônia Central, verificaram coeficientes de correlação entre 0,98 a 0,99. Vinha et al. (2021) obtiveram valores de  $R^2$  iguais a 0,95 e 0,98 para um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho Amarelo no Mato Grosso

Destaca-se que duas amostras não foram bem ajustadas por esse modelo, obtendo valores de  $R^2$  iguais a 0,40 e 0,52 e uma amostra obteve um  $R^2$  igual a 0,76. A CMAP estimada pelo modelo subestimou os valores observado. Comportamento semelhante foi verificado no estudo de Farias et al. (2009), avaliando isotermas de adsorção de P em solos da Paraíba verificaram que as isotermas de Langmuir linearizadas não se ajustaram bem aos dados, subestimando os valores de CMAP em média de 33% em solos mais intemperizados e 31% em solos menos intemperizados. Ronzani (2023) observou que as isotermas de Langmuir não se ajustaram bem em solos com concentrações intermediárias de CMAP, encontrando valores de  $R^2$  igual a 0,52 e 0,54 em solos com CMAP de 85 e 45 mg kg<sup>-1</sup>.

O modelo de Langmuir é, de toda forma, muito útil para a estimativa de índices relacionados a adsorção de P em solos como a CMAP e a constante de ligação ( $K_L$ ), como comprovados em vários trabalhos encontrados na literatura (Guedes et al. 2015; Moura et al. 2015; Matos et al. 2017 e Ronzani, 2023).

#### *4.4 Determinação da cor das amostras de solos cultivados*

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram o desempenho dos diferentes smartphones na obtenção dos parâmetros RGB em relação ao valor padrão da cartela de cores.

Tabela 6 – Valores de RMSE,  $R^2$  e  $R^2$  ajustado das cores dos solos cultivados obtidas via smartphone.

Smartphone	R			
	RMSE	$R^2$	$R^2_{(a)}$	Equação
IOS_ME	31,43	0,88	0,87	$y = 1,0255x - 3,4662$
IOS_LA	30,37	0,89	0,87	$y = 1,0091x + 8,7228$
IOS_SN	29,08	0,90	0,88	$y = 1,1125x + 12,767$
Android_ME	44,92	0,75	0,72	$y = 1,0892x + 8,7894$
Android_LA	42,29	0,78	0,76	$y = 0,9148x + 26,664$
Android_SN	35,47	0,85	0,83	$y = 1,0129x + 27,956$
Smartphone	G			
	RMSE	$R^2$	$R^2_{(a)}$	Equação
IOS_ME	18,32	0,92	0,91	$y = 0,7703x + 30,066$
IOS_LA	13,84	0,95	0,95	$y = 1,0101x + 25,701$
IOS_SN	12,19	0,96	0,96	$y = 1,0101x + 25,701$
Android_ME	19,05	0,91	0,90	$y = 1,118x + 4,3747$
Android_LA	14,01	0,95	0,95	$y = 0,9946x + 8,6397$
Android_SN	17,78	0,92	0,92	$y = 1,003x + 22,817$
Smartphone	B			
	RMSE	$R^2$	$R^2_{(a)}$	Equação
IOS_ME	18,90	0,90	0,89	$y = 0,9583x + 1,7425$
IOS_LA	23,18	0,85	0,83	$y = 0,9452x - 5,7084$
IOS_SN	22,28	0,86	0,85	$y = 1,1047x - 5,0494$
Android_ME	26,09	0,81	0,79	$y = 0,7435x + 38,546$
Android_LA	17,38	0,92	0,91	$y = 0,7375x + 34,767$
Android_SN	19,13	0,90	0,89	$y = 0,8704x + 36,996$

ME: miniestúdio; LA: luz artificial; SN: sombra natural;  $R^2_{(a)}$ : coeficiente de determinação ajustado.

Fonte: Autora (2024).

Com relação ao dispositivo iOS, foi possível observar que as cores obtidas pelas imagens em sombra natural apresentaram os maiores valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado e os menores valores de RMSE tanto para o parâmetro R (RMSE = 29,08;  $R^2 = 0,90$  e  $R^2$  ajustado = 0,88), quanto para o parâmetro G (RMSE = 12,19;  $R^2 = 0,96$  e  $R^2$  ajustado = 0,96). Nota-se que para o parâmetro B, a condição que melhor se destacou foi o miniestúdio, com o menor valor de RMSE (18,90) e os maiores valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado, sendo 0,90 e 0,89, respectivamente. Assim, considerando o desempenho desses dispositivos nas diferentes condições de iluminação, pode-se destacar dispositivo iOS na condição de sombra natural obteve o melhor desempenho em relação as outras condições para obter os valores de RGB aproximados ao valor padrão da cartela de cores.

Ao se tratar do dispositivo Android, nota-se que a condição de sombra natural, obteve o melhor desempenho apenas para o parâmetro R, com RMSE igual a 35,47;  $R^2$  igual a 0,85 e  $R^2$  ajustado igual a 0,83. Já para os parâmetros G e B, verifica-se o destaque da condição de luz artificial, com os menores valores de RMSE e maiores valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado. Portanto, a condição de luz Artificial foi a obteve o melhor desempenho para obter os valores RGB, seguida pela Sombra Natural e Miniestúdio.

Essas diferenças encontradas estão relacionadas principalmente com a influência intrínseca da iluminação do ambiente (Gómez Robledo et al. 2013) e das configurações dos dispositivos (Hong et al. 2001). Como visto por Yang et al. (2021), avaliando o efeito de diferentes smartphones na predição da matéria orgânica do solo baseada em cores, observaram que as configurações das câmeras de alguns smartphones resultaram em respostas espectrais diferentes e, conseqüentemente, cores do solo diferentes, afetando a performance do modelo.

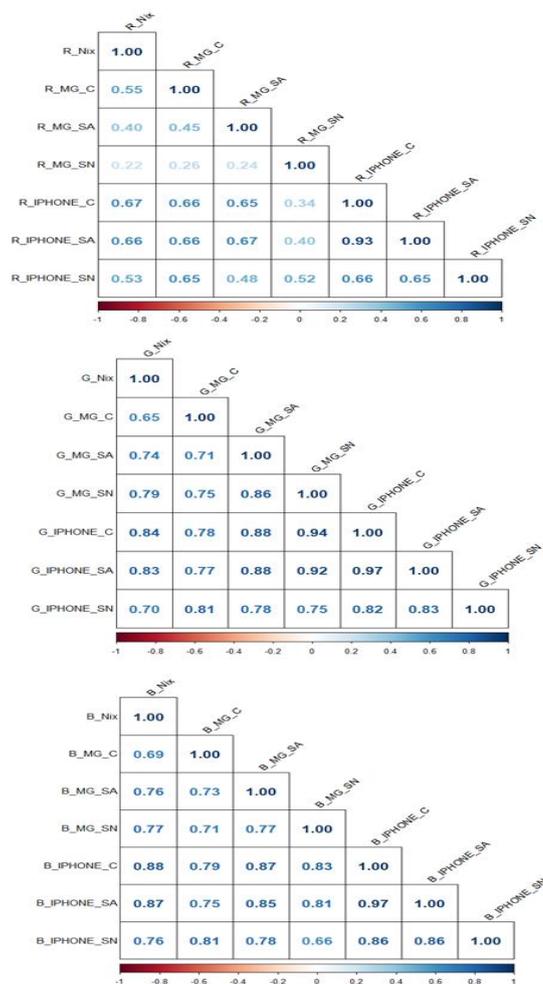
Neste estudo, foi observado que no geral, as imagens obtidas por meio do miniestúdio (condição controlada) não apresentaram um desempenho satisfatório quando comparado as outras condições, apresentando valores de RMSE altos. Se diferenciando de alguns estudos que demonstram a possibilidade de determinar de forma eficaz a cor do solo em condições de iluminação controladas. Dentre eles, destaca-se Moonrungeesee et al. (2015), que avaliando um analisador colorimétrico baseado em câmera de celular para a determinação de P disponível, observaram que o uso de uma caixa com condições de luz controladas promoveu a melhor precisão e exatidão da medição do P disponível.

Uma maneira de minimizar os efeitos tanto da iluminação ambiente quanto da configuração dos dispositivos é a calibração das imagens. Neste estudo, os parâmetros RGB das imagens obtidas em todas as condições foram calibradas por meio de regressão simples, usando padrões de cores com valores conhecidos para minimizar esses efeitos. Seguindo esta mesma linha, as pesquisas de Aitkenhead et al. (2018); Fu et al. (2020) e Baek et al. (2023a) demonstraram a importância da calibração das cores obtidas por imagens digitais para a predição de atributos do solo. No estudo de Yang et al. (2024) avaliando diferentes formas de calibração de imagens digitais para a predição de MOS, observaram que a calibração das cores das imagens foi considerada uma solução eficaz para melhorar o desempenho compartilhado dos modelos de predição e que quanto mais cores usadas para calibração, melhor será o desempenho destes modelos.

Além disto, existem outras formas para minimizar os efeitos da iluminação. Destaca-se o estudo de Baek et al. (2023b) que propuseram realizar o processamento das imagens digitais capturadas em simulações de condições externas antes da coleta dos parâmetros de cores. Estes autores observaram que este método torna a obtenção da cor do solo mais versátil e aplicável ao campo. Já Yang et al. (2021) sugeriram o desenvolvimento de softwares ou aplicativos que elimina as diferenças de cores entre as câmeras dos smartphones, como o aplicativo desenvolvido pelo Instituto James Hutton, que combina o cartão de correção de cores das imagens para iluminar automaticamente e calibrar as imagens dos perfis de solo (Aitkenhead et al. 2013).

A eficiência do sensor Nix Pro na determinação da cor do solo vem sendo comprovada em vários estudos (Mancini et al. 2020; Schmidt et al. 2002; Swetha et al. 2022), principalmente por sua capacidade de controlar a iluminação. Dessa maneira, foi realizada a análise de correlação de Pearson para avaliar a correlação dos parâmetros RGB corrigidos obtidos por meio dos smartphones com este sensor e determinar a variável mais adequada para alimentar os modelos de predição (Figura 10).

Figura 10 – Correlação de Person entre os parâmetros R, G e B das imagens digitais obtidas via sensor Nix e os smartphones em diferentes condições de iluminação dos solos cultivados.



Nix: sensor Nix Pro; A\_LA: Dispositivo Android sob luz artificial; A\_C: Dispositivo Android sob miniestúdio; A\_SN: Dispositivo Android sob sombra natural; I\_LA: Dispositivo iOS sob luz artificial; I\_C: Dispositivo iOS sob miniestúdio; I\_SN: Dispositivo iOS sob sombra natural.

Fonte: Autora (2024).

Foi possível observar que apesar da calibração das imagens digitais, o aparelho iOS em condição de iluminação controlada (miniestúdio) apresentou correlações com o sensor mais altas para todos os parâmetros de cores, com valores de 0,67, 0,84 e 0,88 para o R, G e B, respectivamente. Vale ressaltar, que esse mesmo dispositivo, em condições de luz artificial, obteve o segundo maior valor para as cores R = 0,66, G = 0,83 e B = 0,87.

O aparelho Android, em todas as condições, alcançou valores acima de 0,6 somente para as cores G e B. No entanto, a condição de sombra natural se destacou em relação às outras, com valores de G igual a 0,79 e B igual a 0,77.

Ao observar os dados, verifica-se que a cor R obteve os menores valores de correlação em todas as condições estudadas. De alguma maneira, as diferentes condições de iluminação e os diferentes smartphones podem resultar em melhor concordância para alguns canais de cores, o que justifica esses resultados. Januário (2021), desenvolvendo um método colorimétrico com o uso de imagens digitais, observou que o parâmetro B sofreu grande influência, mesmo em imagens obtidas em condições controladas de iluminação, e justificaram este resultado devido aos LEDs, que, exercem influência na cor dependendo da intensidade luminosa. Portanto, estes são fatores que devem ser controlados ao conduzir experimentos com uso de sistemas de cores.

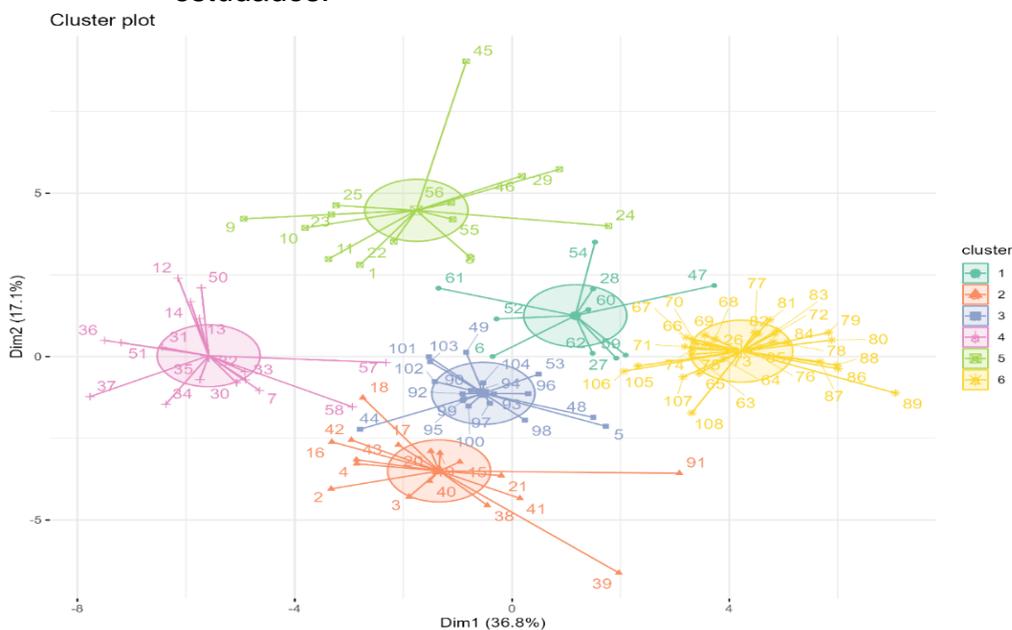
De maneira geral as imagens digitais obtidas pelo aparelho iOS se mostraram mais satisfatórias, possivelmente devido a câmera do iPhone apresentar resoluções e funcionalidades de correção de cores e iluminação superiores em comparação ao Motorola. Não foram encontrados trabalhos correlacionando diferentes smartphones na determinação de atributos em amostras de solo. Todavia, Morais (2023), avaliando imagens digitais obtidas por smartphones da marca Motorola e iPhone para determinação de P por meio de um aplicativo como método alternativo para as análises com espectrofotômetro, verificaram que as imagens obtidas pelo Motorola apresentam resultados mais satisfatório e, diferentemente deste trabalho, os autores justificaram que a alta tecnologia do iPhone na obtenção da imagem pode ter influenciado o processamento destas imagens pelo aplicativo utilizado.

Diante dos resultados obtidos por meio da correlação de Pearson, conclui-se que os dados provenientes do aparelho iPhone foram considerados os melhores para a construção dos modelos de predição. Porém, visando atender às necessidades dos futuros usuários, foram criados modelos de predição usando os dados obtidos pelo dispositivo Android e pelo sensor Nix Pro. No que se refere as condições de iluminação, foram priorizadas as imagens obtidas pelo miniestúdio, uma vez que esta condição padroniza a obtenção das imagens, como visto nos estudos citados anteriormente, bem como a condição de Sombra Natural, por facilitar a obtenção das imagens em campo.

#### 4.5 Análise de agrupamentos e de componentes principais das amostras de solo cultivados

A análise de cluster, conforme mostrado na Figura 11, permitiu a diferenciação dos solos cultivados em seis grupos distintos. Esses grupos indicam que, embora todas as áreas sejam destinadas à atividade agrícola, cada uma possui atributos físico-químicos específicos e adota sistemas de manejo distintos, resultando na formação de grupos singulares. Destaca-se a notável discrepância entre os grupos 4 e 6. Por outro lado, os agrupamentos 1, 2, 3 e 5 apontam características intermediárias em relação a esses grupos principais. No entanto, os agrupamentos 2 e 5 foram os mais divergentes em relação aos demais.

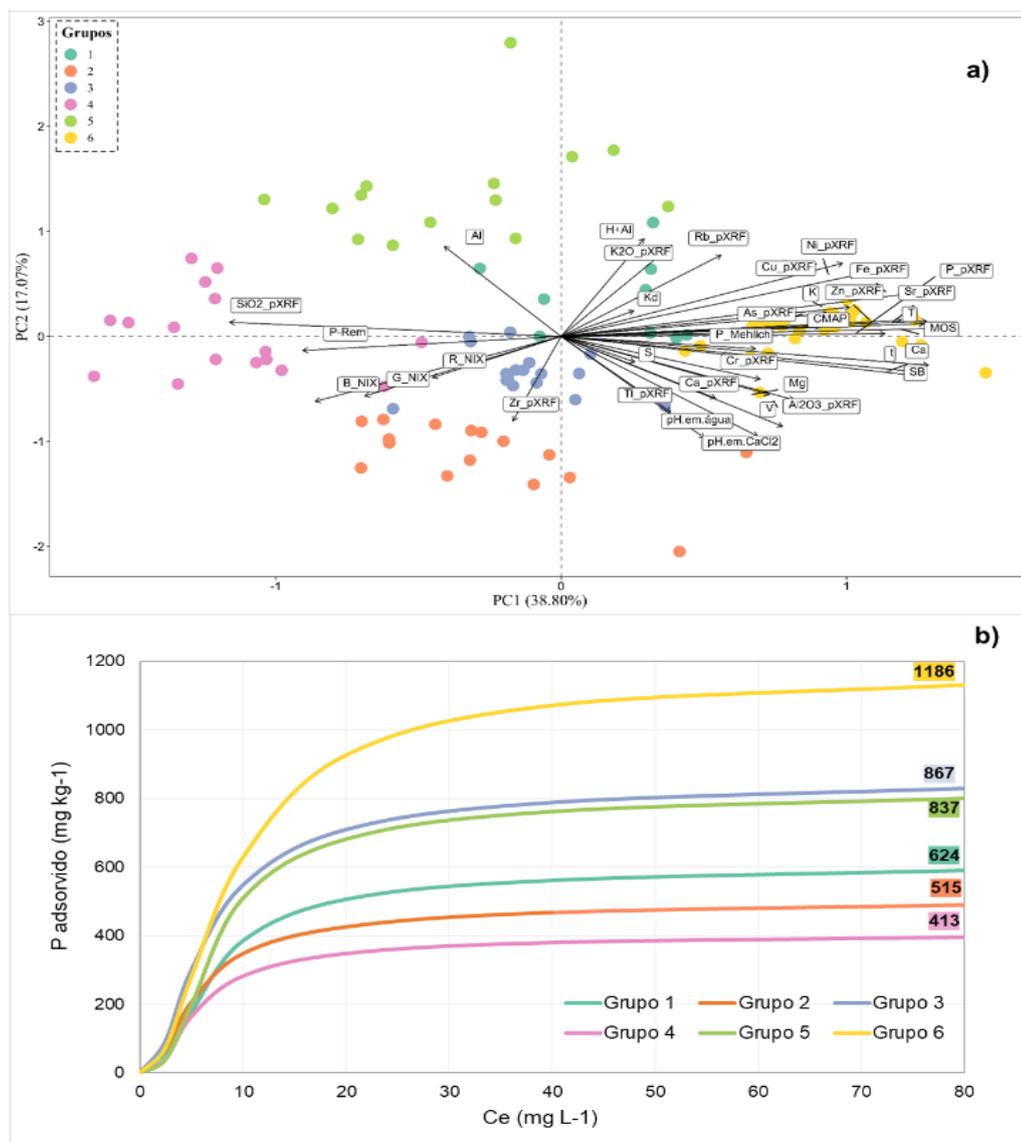
Figura 11 – Agrupamentos formados pela análise de cluster das amostras dos solos estudados.



Fonte: Autora (2024).

A análise de componentes principais (PCA) apresentada na figura 12, utilizando dados de fertilidade do solo, pXRF e cor, foi fundamental para identificar as variáveis mais relevantes na distinção dos agrupamentos. Nesse contexto, a magnitude do vetor indica a influência da respectiva variável, sendo que vetores maiores indicam uma maior influência na análise (Borcard et al., 2011).

Figura 12 – a) análise de componentes principais dos atributos químicos das amostras de solos cultivados; b) isotermas de adsorção de fósforo dos grupos formados pela PCA.



Fonte: Autora (2024).

O grupo 4 é marcadamente influenciado pela maior presença de SiO<sub>2</sub> e maiores valores de P-rem, sugerindo a ocorrência de solos mais arenosos e mais pobres. Consequentemente, o grupo 4 foi o que apresentou a menor CMAP, com valor médio de 413 mg kg<sup>-1</sup>. Já o grupo 6 foi influenciado por diversos atributos do solo, destacando os teores totais de Fe e P e CMAP. Isso sugere se tratar de solos mais argilosos, com um maior grau de intemperismo, com uma fração argila altamente reativa com o P, resultando em uma CMAP igual a 1186 mg kg<sup>-1</sup>, sendo este o maior valor dentre as médias observadas na figura 12b.

Nota-se que os vetores representativos do teor de K, Ca, MOS, SB, T e t também se mostram influentes na formação do grupo 6, possibilitando inferir que, em sua maioria, são áreas de solos eutróficos. A influência marcante destas variáveis

ligadas à fertilidade sugere que essas áreas recebem consideráveis investimentos em práticas de manejo, cuja fertilidade foi construída ao longo do tempo pelo uso de corretivos e fertilizantes que aumentam os teores desses nutrientes no solo, assim como, áreas que adotam sistemas de manejo que promovem o acúmulo da MOS. O sistema plantio direto (SPD), baseado em práticas conservacionistas é um exemplo de sistema de manejo que tende a melhorar a fertilidade do solo (Karlen et al. 2013), e promover o acúmulo de resíduos vegetais na superfície, aumentando os teores de MOS nestas camadas, melhorando significativamente os atributos físicos e químicos do solo (Guareschi et al. 2012).

Em contra partida, os solos do grupo 4, devido à influência do teor de  $\text{SiO}_2$ , possibilita inferir que estas áreas apresentam solos com maiores teores de areia. A ausência de atributos relacionados com a fertilidade sugere que os solos apresentam uma fertilidade inferior quando comparado aos solos dos outros grupos, podendo apresentar limitações que necessitam de técnicas mais específicas que promovam o aumento da fertilidade, assim como o cultivo de plantas com sistemas radiculares mais agressivos, que permitam uma melhor absorção de nutrientes e água do solo.

#### 4.6 Predição dos atributos indicadores da adsorção de P, sua disponibilidade e matéria orgânica

Na Tabela 7 é apresentada a performance dos modelos de predição usando o algoritmo Random Forest.

Tabela 7 – Desempenho dos modelos de predição da MOS, CMAP, P-rem, P-disponível e índice  $K_L$ .

(Continua)

Variáveis	Modelos	Validação cruzada		Validação		
		RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RPD
MOS	pXRF	0,53	0,83	0,42	0,87	2,74
	Fertilidade	0,57	0,81	0,43	0,87	2,61
	<b>pXRF + Fertilidade</b>	<b>0,51</b>	<b>0,85</b>	<b>0,36</b>	<b>0,90</b>	<b>3,26</b>
	pXRF + Nix	0,52	0,83	0,42	0,87	2,71
	pXRF + IOS_ME	0,52	0,84	0,44	0,86	2,54
	pXRF + IOS_SN	0,52	0,84	0,42	0,87	2,76
	pXRF + A_ME	0,52	0,85	0,42	0,87	2,78
	pXRF + A_SN	0,52	0,84	0,42	0,87	2,76

Tabela 7 – Desempenho dos modelos de predição da MOS, CMAP, P-rem, P-disponível e índice  $K_L$ .

(Continuação)

Variáveis	Modelos	Validação cruzada		Validação		
		RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RPD
MOS	Fertilidade + Nix	0,56	0,82	0,45	0,85	2,61
	Fertilidade + IOS_ME	0,55	0,82	0,44	0,86	2,69
	Fertilidade + IOS_SN	0,55	0,82	0,45	0,86	2,61
	Fertilidade + A_ME	0,56	0,81	0,43	0,87	2,64
	Fertilidade + A_SN	0,55	0,82	0,41	0,88	2,87
CMAP	pXRF	262,25	0,70	297,42	0,69	1,71
	Fertilidade	313,55	0,57	373,60	0,51	1,36
	pXRF + Fertilidade	263,88	0,70	294,38	0,69	1,73
	pXRF + Nix	266,49	0,70	314,22	0,65	1,60
	pXRF + IOS_ME	262,98	0,71	313,88	0,65	1,65
	<b>pXRF + IOS_SN</b>	<b>266,46</b>	<b>0,70</b>	<b>284,54</b>	<b>0,71</b>	<b>1,74</b>
	pXRF + A_ME	265,56	0,70	296,26	0,69	1,70
	pXRF + A_SN	260,38	0,71	310,40	0,66	1,64
	Fertilidade + Nix	323,43	0,55	369,39	0,52	1,34
	Fertilidade + IOS_ME	316,87	0,56	384,73	0,48	1,35
	Fertilidade + IOS_SN	310,83	0,58	392,51	0,46	1,32
	Fertilidade + A_ME	321,28	0,55	379,21	0,49	1,35
Fertilidade + A_SN	312,65	0,57	384,79	0,48	1,34	
P-rem	pXRF	7,02	0,82	6,23	0,74	1,92
	Fertilidade	10,93	0,58	6,40	0,72	1,85
	<b>pXRF + Fertilidade</b>	<b>7,49</b>	<b>0,80</b>	<b>5,14</b>	<b>0,82</b>	<b>2,19</b>
	pXRF + Nix	7,37	0,80	5,96	0,76	1,97
	pXRF + IOS_ME	7,26	0,81	5,98	0,76	1,98
	pXRF + IOS_SN	7,19	0,81	5,99	0,76	1,96
	pXRF + A_ME	7,19	0,81	5,57	0,79	2,12
	pXRF + A_SN	7,30	0,81	5,98	0,76	1,95
	Fertilidade + Nix	10,99	0,58	6,32	0,73	1,82
	Fertilidade + IOS_ME	10,93	0,59	6,82	0,68	1,65
	Fertilidade + IOS_SN	10,79	0,60	6,87	0,68	1,74
	Fertilidade + A_ME	11,03	0,58	6,03	0,75	1,92
Fertilidade + A_SN	10,91	0,59	7,04	0,66	1,67	

Tabela 7 – Desempenho dos modelos de predição da MOS, CMAP, P-rem, P-disponível e índice  $K_L$ .

(Conclusão)

Variáveis	Modelos	Validação cruzada		Validação		
		RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RPD
P-Mehlich	<b>pXRF</b>	<b>14,66</b>	<b>0,82</b>	<b>13,83</b>	<b>0,85</b>	<b>2,53</b>
	Fertilidade	22,85	0,64	25,01	0,50	1,44
	pXRF + Fertilidade	15,47	0,80	13,99	0,84	2,51
	pXRF + Nix	15,84	0,78	15,04	0,82	2,36
	pXRF + IOS_ME	15,78	0,78	13,98	0,84	2,52
	pXRF + IOS_SN	15,70	0,79	14,54	0,83	2,42
	pXRF + A_ME	15,43	0,80	15,39	0,81	2,27
	pXRF + A_SN	15,17	0,80	14,08	0,84	2,51
	Fertilidade + Nix	21,25	0,66	25,74	0,47	1,39
	Fertilidade + IOS_ME	21,09	0,67	25,45	0,48	1,41
	Fertilidade + IOS_SN	21,92	0,66	26,21	0,45	1,37
	Fertilidade + A_ME	21,03	0,66	25,03	0,50	1,43
	Fertilidade + A_SN	21,81	0,65	24,17	0,53	1,49
	$K_L$	pXRF	0,34	0,22	0,325	0,06
<b>Fertilidade</b>		<b>0,35</b>	<b>0,16</b>	<b>0,318</b>	<b>0,10</b>	<b>1,07</b>
pXRF + Fertilidade		0,34	0,21	0,325	0,06	1,03
pXRF + Nix		0,34	0,23	0,332	0,02	0,97
pXRF + IOS_ME		0,34	0,20	0,328	0,04	1,00
pXRF + IOS_SN		0,35	0,17	0,329	0,04	0,99
pXRF + A_ME		0,34	0,20	0,329	0,04	1,00
pXRF + A_SN		0,35	0,18	0,325	0,06	1,02
Fertilidade + Nix		0,35	0,18	0,333	0,01	0,98
Fertilidade + IOS_ME		0,35	0,17	0,328	0,04	1,02
Fertilidade + IOS_SN		0,35	0,16	0,329	0,04	1,02
Fertilidade + A_ME		0,35	0,19	0,325	0,06	1,02
Fertilidade + A_SN		0,36	0,12	0,321	0,08	1,06

\*Nix: sensor Nix Pro; A\_LA: Dispositivo Android sob luz artificial; A\_ME: Dispositivo Android sob mini estúdio; A\_SN: Dispositivo Android sob sombra natural; I\_LA: Dispositivo iOS sob luz artificial; I\_ME: Dispositivo iOS sob mini estúdio; I\_SN: Dispositivo iOS sob sombra natural.

Fonte: Autora (2024).

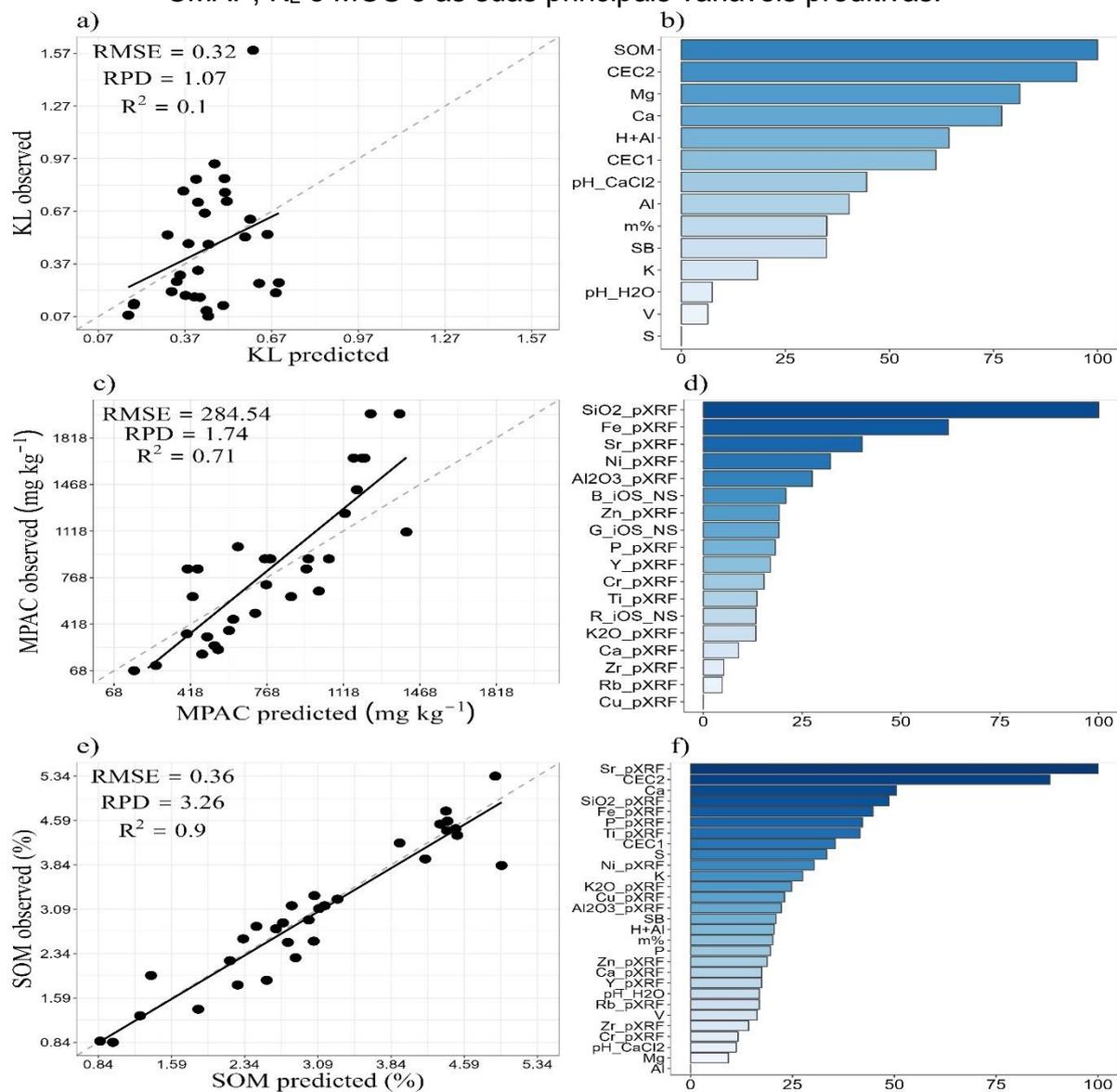
A MOS foi acuradamente predita por meio de qualquer combinação de dados usadas neste trabalho. Os modelos de predição foram considerados acurados (Chang et al. 2001), com RMSE variando de 0,36 a 0,45, RPD variando de 2,54 a 3,36 e R<sup>2</sup> de 0,85 a 0,90. O modelo que mais se destacou, sendo considerado o melhor, foi aquele que combinou os dados de pXRF + atributos de fertilidade do solo, apresentando o menor RMSE (0,36) e os maiores valores de RPD (3,26) e R<sup>2</sup> (0,90).

Evidencia-se que o uso rápido do pXRF ou a combinação de dados entre pXRF e atributos de cor com qualquer dispositivo permitiu alcançar predições satisfatórias, com valores de  $R^2$  variando de 0,86 a 0,87 e RPD de 2,54 a 2,78. Esses resultados foram considerados superiores aos resultados encontrados por Yang et al. (2024), que ao criar modelos de predição da MOS, usando apenas dados de cores obtidas por smartphones encontraram valores de  $R^2$  variando de 0,53 a 0,69. Bem como, ao estudo de Silva et al. (2017), que ao predizer a MOS usando a combinação de pXRF com o algoritmo Random Forest, encontram valores de  $R^2$  igual a 0,77 e RMSE igual 0,8.

Salienta-se que o uso do pXRF com os dados de cor além de predizer a MOS de forma acurada, permite uma análise rápida e de baixo custo, podendo facilitar as análises *in situ*. Segundo Yang et al. (2024) quanto melhor for a calibração das imagens digitais, mais acurados serão os modelos de predição da MOS. Tais resultados se diferenciam dos encontrados no estudo de Benedet et al. (2021), que não obtiveram modelos preditivos acurados para a MOS, usando dados de pXRF e este mesmo algoritmo. Apesar disto, os autores verificaram que o Al e o estrôncio (Sr) foram as principais variáveis preditoras.

Corroborando com os resultados de Benedet et al. (2021), neste trabalho foi observado que o Sr foi considerado a principal variável preditora (Figura 13f). Estes mesmos autores justificam este resultado devido a dinâmica deste elemento no solo, que é influenciada pela MOS, uma vez que a MOS exerce influência direta nos seus teores (Araujo et al. 2017), podendo determinar a sua disponibilidade e mobilidade, juntamente com o teor e o tipo de argila, pH e força iônica (Lawson et al. 2016).

Figura 13 - Valores observados e preditos para os melhores modelos de predição para CMAP,  $K_L$  e MOS e as suas principais variáveis preditivas.



Fonte: Autora (2024).

A segunda variável preditora mais importante foi a CTC efetiva (Figura 13f). Estes resultados podem ser justificados pelo papel da MOS na CTC, uma vez que ela é considerada um dos principais componentes responsáveis pela CTC dos solos sob condições tropicais, juntamente com as argilas minerais e os óxidos de Fe e Al (EMBRAPA, 2010). Vale destacar a presença do Fe e Al, obtidos com pXRF, como variáveis preditoras importantes, podendo ser justificado pelos altos teores desses elementos nos solos estudados e suas interações com a MOS, visto que os ácidos orgânicos podem formar complexos organometálicos estáveis com o Fe e o Al em uma larga escala de pH (Sposito, 1989; Pavinato; Rosolem, 2008), e essas reações podem alterar tanto o teor quanto a qualidade da MOS (Santana et al. 2011).

Para a predição da CMAP foi observado que, no geral os modelos que apresentaram dados de fertilidade não foram considerados modelos satisfatórios (Tabela 5). Contudo, o uso de dados de pXRF ou a combinação de dados de pXRF com a cor foram considerados moderadamente acurados. Sendo o modelo pXRF + dados do dispositivo iOS na condição de sombra natural o que mais se destacou, obtendo o menor RMSE (284,54) e maiores valores de RPD (1,74) e  $R^2$  (0,71).

Não há registros de estudos que utilizaram dados de pXRF para predição da CMAP. Contudo, foram encontrados trabalhos que relatam a predição da CMAP por meio de outros métodos, como os de Burkitt et al. (2002); Mozaffari; Sims, (1994) e Brock et al. (2007), que usaram o índice de sorção de ponto único (PSI) para prever adsorção de P, no qual obtiveram modelos de predição baseados em quantidades molares do extrator Mehlich-3, Fe, Al, e Ca. Além disto, foi visto no estudo de Parra (2020), o uso de técnicas de mineração de dados, que possibilitaram a criação de modelos acurados para a adsorção de P.

Dentre as variáveis preditoras destaca-se as mais relevantes e para o fenômeno da adsorção de P (Figura 13d), como por exemplo,  $\text{SiO}_2$ , Fe,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ti e P obtidos via pXRF, os quais estão relacionados com a textura e mineralogia dos solos tropicais, que por sua vez influenciam de forma direta a capacidade de adsorção do P (Ranno et al. 2007; Vilar et al. 2010).

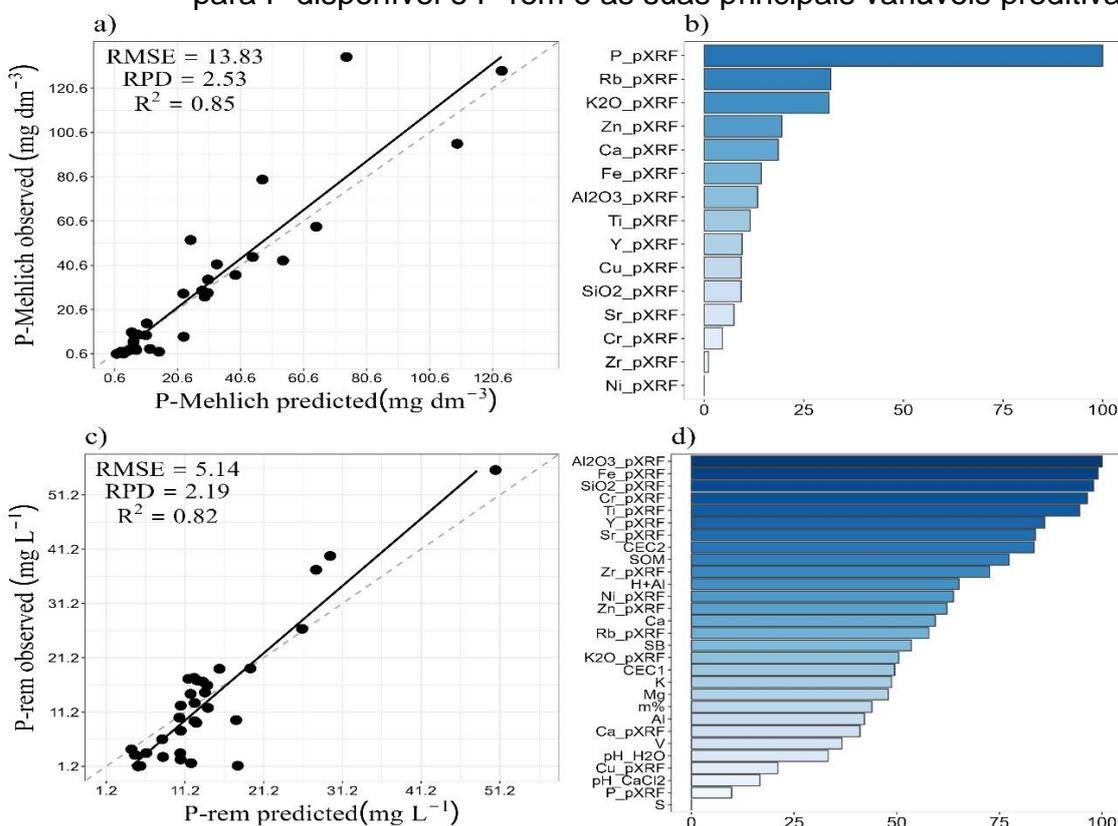
Salienta-se que os parâmetros RGB foram consideradas importantes variáveis preditoras para a CMAP, corroborando com os trabalhos de diversos autores que afirmam uma maior capacidade de adsorção em solos com predominância de minerais que apresentam poder pigmentante ao solo, como a goethita que proporciona uma coloração mais brunada ou amarelada e a hemathita que desenvolve solos de cores mais avermelhadas (Cury; Franzmeier; Fink et al. 2015).

Se tratando do P-rem, verifica-se que, no geral todos os modelos utilizando dados de pXRF foram considerados moderadamente acurados, apresentando os menores erros e os maiores valores de RPD e  $R^2$ . Sendo que o modelo com a combinação de dados de pXRF + atributos de fertilidade do solo foi considerado acurado, com RMSE igual a 5,14 e RPD igual a 2,19. Contudo, podemos destacar que o segundo melhor modelo de predição foi utilizando dados de pXRF + imagens obtidas em dispositivo Android na condição de Miniestúdio. Salienta-se que este modelo possibilita ao usuário a obtenção de resultados de forma mais rápida e fácil em comparação aos modelos operados com dados de fertilidade.

Vale salientar que os modelos com o uso de atributos da fertilidade acrescidos da cor também foram considerados moderadamente precisos, com RMSE variando de 6,2 a 7,04 e RPD variando de 1,65 a 1,92. Esses modelos permitem a expansão na base de usuários potenciais, visto que os dados relacionados a fertilidade do solo são amplamente empregados em contextos agrícolas e rurais.

No que diz respeito as variáveis preditoras, destaca-se a presença do  $Al_2O_3$ , Fe,  $SiO_2$ , Cr e Ti (Figura 14d), corroborando com os resultados de Silva et al. (2017) que também identificaram estas variáveis como significativas na predição do P-rem. Ressalta-se que tais variáveis apresentam estreita relação com a mineralogia do solo, a qual exerce uma influência direta sobre o teor de P- rem (Fontana et al. 2013).

Figura 14 – Valores observados e preditos para os melhores modelos de predição para P disponível e P-rem e as suas principais variáveis preditivas.



Fonte: Autora (2024).

Com relação ao P disponível, foi observado que apenas os dados de fertilidade, bem como a sua combinação com os dados de cores, usando o dispositivo iOS na condição de miniestúdio, bem como o dispositivo Android nas condições de miniestúdio e sombra natural, permitiram alcançar modelos moderadamente acurados. Contudo, o P disponível foi acuradamente predito pelo modelo usando apenas dados do pXRF, apresentando valor de RMSE igual a 13,84 e R<sup>2</sup> igual a 0,85

e RPD igual a 2,53. Além disto, vale destacar que a combinação de dados de pXRF + a cor obtida por qualquer dispositivo também permitiu a obtenção de modelos acurados, com RMSE variando de 3,98 a 15,39 e RPD variando de 2,27 a 2,52.

Por meio dos valores de  $R^2$  e RMSE, pode-se constatar que estes modelos foram considerado mais acurados do que o modelo obtido no estudo de Melo et al. (2019), que verificaram valores de  $R^2$  igual 0,49 e RMSE igual a 33, obtendo assim, a pior predição de P disponível usando apenas dados de pXRF, com métodos simples de regressão linear múltipla. Também foi observado que os modelos de predição deste estudo foram mais precisos do que o de Andrade et al. (2020), que não conseguiram gerar modelos de predição confiáveis para o P disponível, principalmente devido ao limite de detecção das amostras que foram muito baixos, diferente dos limites encontrados nos solos deste estudo.

Contraopondo estes dados, Teixeira et al. (2019) obtiveram modelos de regressão precisos para determinar diversos nutrientes do solo, incluindo o P, com o valor de  $R^2$  igual a 0,90. Vale salientar que estes mesmos autores usaram apenas o teor de  $P_2O_5$  obtido via pXRF para esta modelagem, corroborando com os dados deste estudo, no qual teve como principal variável preditora o P obtido via pXRF (Figura 14b).

Com relação ao índice  $K_L$ , não foram obtidos modelos de predição acurados. Entre todos os modelos foram encontrados valores de  $R^2$  variando de 0,01 a 0,10 e valores de RPD abaixo de 1,4, indicando modelos preditivos não confiáveis. Também não foram encontrados trabalhos relacionados a predição deste índice com dados de pXRF. No entanto, Dunne et al. (2020) encontraram valores de  $R^2$  superiores aos deste trabalho ao testarem o uso de reflectância difusa no infravermelho para predizer as propriedades de sorção de P em solos agrícolas e dentre elas o índice K,

## 5 CONCLUSÕES

As isotermas de Langmuir se ajustaram bem aos dados obtidos pelos ensaios de adsorção de P nos solos agrícolas.

A combinação de dados de fluorescência de raios X portátil, fertilidade do solo e imagens digitais permitiu a diferenciação dos solos cultivados em seis grupos distintos. Esses grupos se diferenciaram claramente, também, quanto à capacidade sortiva de P.

Os resultados demonstraram um potencial promissor no uso das imagens digitais para a determinação das cores do solo, assim como, o uso da espectrometria de fluorescência de raios X para a predição da capacidade máxima de adsorção de P em solos tropicais.

A combinação inédita dos dados obtidos via pXRF + dados de cores obtidos via smartphone permitiram o desenvolvimento de modelos de predição satisfatoriamente acurados para CMAP, P-disponível e MOS. E os dados de Fertilidade acrescidos da cor obtiveram modelos de predição acurados para MOS e moderadamente acurados para P-rem e P disponível.

A MOS e disponibilidade de P avaliada pela extração em solução em Mehlich 1, foi acuradamente predita utilizando apenas dados de pXRF. O P obtido com pXRF foi marcadamente a variável mais importante para a predição do P-disponível.

## REFERÊNCIAS

ABREU, C. A. et al. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP OES determination. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 19-20, p. 3321-3333, 1994.

AFIF, E.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, v. 159, n. 3, p. 207-211, 1995.

AFSAR, M. Z.; HOSSAIN, M. E. Characterization of some representative calcareous soils of Bangladesh with respect to soil phosphorus requirements. **International Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 8, p. 388-397, 2012.

AITKENHEAD, M. et al. Digital RGB photography and visible-range spectroscopy for soil composition analysis. **Geoderma**, v. 313, p. 265-275, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.020>. Acesso em: 09 jan. 2024.

AITKENHEAD, M. et al. E-SMART: Environmental Sensing for Monitoring and Advising In: Hřebíček, J. et al. **Environmental Software Systems**. Fostering Information Sharing. Advances in Information and Communication Technology, v. 413, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41151-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41151-9_13). Acesso em: 09 jan. 2024.

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 985-1002, 2003.

ALVAREZ, V. H. V. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ÁLVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ALVES, C. N. et al., Carbono orgânico e atributos físicos-químicos de um solo do município de Paragominas-PA. **Research, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 9, n.11, p. e98191110518, 2020.

ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Remaining phosphorus and sodium fluoride pH in soils with different clay contents and clay mineralogies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 241-246, 2004.

ANDRADE, R. et al. Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. **Geoderma**, v. 357, p. 113960, 2020.

ARAUJO, M. A. et al. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. **Geoderma**, v. 300, p. 1-10, 2017.

ARRUDA, J. A. et al. Fósforo remanescente em solos do Seridó Paraibano. **Revista Principia**, n.35, 2017.

ASFORA, V. K. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 2004, 100 p.

BAEK, S. et al. A Novel Method for Calibration of Digital Soil Images Captured under Irregular Lighting Conditions. **Sensors**, v. 23, n. 1, p. 296, 2023b.

BAEK, S. et al. Color calibration of moist soil images captured under irregular lighting conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 214, p. 108299, 2023.

BAHIA FILHO, A. F. C. et al. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. **Bras. Ci. Solo**, v. 7, n. 1, p. 221-226, 1983.

BALDOTTO M, A. et al. Redox index of soil carbon stability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1543-1551, 2010.

BALDOTTO, M. A; VELLOSO, A. C. X. Pontos de carga zero, potenciais da dupla camada elétrica e eletroquímica do húmus de solos tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2013, Florianópolis. **Anais...**, 2013. Disponível em: <https://eventosolos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/137.pdf>. Acesso: 23 jan. 2023.

BENEDET, L et al. Espectrometria de fluorescência de raios X aplicada ao mapeamento digital de atributos de fertilidade do solo em região tropical com elevada variabilidade espacial. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021. Disponível em: DOI: 10.1590/0001-3765202120200646. Acesso: 10 de out. 2022.

BEZERRA, R. P. M. et al. Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3, p. 1287-1306, 2015.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecological with R**. New York: Springer, 2011. 306p

BOTELHO, M. R. et al. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1179-1185, 2006.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **R. Ceres**, v.21, p.73-85,1974.

BROCK, E. H. et al. Measuring and predicting the phosphorus sorption capacity of manure-amended soils. **Soil science**, v. 172, n. 4, p. 266-278, 2007.

BROWER, P. Theory of EDXRF: **Getting acquainted with the principles**. 3. ed. 2010. PANalytical B.V, Netherlands, 2010.

BUOL, S.W. et al. **Soil genesis and classification**. 4. Ed. Ames: Iowa State University, 1997, 527 p.

BURKITT, L. L. et al. A simple phosphorus buffering index for Australian soils. **Australian Journal of Soil Research** v.40, n.3, p. 497–513, 2002.

CADONÁ, E. A. et al. Índices de fósforo em diferentes usos da terra em bacia hidrográfica no Sul do Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 7, p. 314-323, 2022.

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais Soil attributes and risk of leaching of heavy metals in tropical soils. **Ambiência**, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2010.

CAMPOS, R. L. C. **Métodos de análise química para determinação da matéria orgânica total e suas frações em amostras de solo**. Monografia (Especialista em Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras: Minas Gerais, 2018

CARNEIRO, J. S. S. et al. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.14, n. 2, p. 10-21, 2016.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CARNEIRO, J. S. C. et al. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 38-49, 2016.

CARVALHO, L. M. T.; SCOLFORO, J. R. **Inventário Florestal de Minas Gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007**. Lavras: Editora UFLA, 2008, 357 p.

CARVALHO, M. P. et al. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.

CAVALCANTE, P. H. M. **Isotermas de adsorção de langmuir para fósforo em solos de Alagoas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) – Universidade Federal de Alagoas, 2022.

CECAGNO, D. **Dinâmica de fósforo no solo sob efeito de raízes em sistema integrado de produção agropecuária**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2019.

CHANG, C. et al. Near-infrared reflectance spectroscopy–principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 2, p. 480-490, 2001.

CHIODINI, B. M. et al. Matéria orgânica e a sua influência na nutrição de plantas. **Revista Cultivando o Saber**, v. 6, n. 1, p. 181-190, 2013.

CIOTTA, M.N., BAYER, C., FONTOURA, S. M.V.; HERNANI, P.R., ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.1161-1164, 2003.

CONCEIÇÃO, P.C et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.777-788, 2005.

CORRÊA, R. M. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 153-159, 2011.

COSTA, E.; SILVA, H.; RIBEIRO, P. R. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

CUNHA, T. J.; Mendes, A. M. S.; Giongo, V. (2015). Matéria orgânica do solo. In R. R. Nunes & M. O. O. Rezende, **Recurso solo: Propriedades e usos**. 1 ed. 2015, 273-293 p.

CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of oxisols from central plateau of Brazil. **Soil Sci. Soc. Am. J**, v.48, p.341-346, 1984.

CURI, N.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; de Menezes, M. D. **Mapeamento de Solos e Magnetismo No Campus Da UFLA Como Traçadores Ambientais**, 1 ed. Editora UFLA: Lavras, v. 1, 2017.

CURI, N; KÄMPF, N. Caracterização do Solo. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. (Orgs.) **Pedologia – Fundamentos**. 1 ed. Viçosa: SBCS, 2012, 147-169 p.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 453-461, 2012.

DAMACENO, J. B. D. et al. **Adsorção, cinética e disponibilidade de fósforo em latossolo amarelo e gleissolo háplico na Amazônia Central**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas, 2020

DANTAS, A. A. A. et al. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007

DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In Dixon J.B.; Well S. B. **Minerals in soil environments**. Soil Science Society of America, Madison, 1989, 467-526 p.

DONAGEMMA, G. K. et al. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1785-1791, 2008.

DUNNE, K. S. et al. Prediction of phosphorus sorption indices and isotherm parameters in agricultural soils using mid-infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 358, p. 113981, 2020.

EBERHARDT, D. N. et al. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1009-1016, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas, SP. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, p. 30, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, Serviço de Produção de Informação. 1999, 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Ed. 2. Rio de Janeiro, p. 306, 2006.

FALCÃO, N. P. S. et al. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, p. 337-342, 2004.

FALLEIRO, R. M. et al. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1097-1104, 2003.

FERNANDES, J. D. et al. Phosphorus availability in soil incubated with biochar: adsorption study. **Revista Caatinga**, v. 35, p. 206-215, 2022.

FERNANDÉZ, Z. H. **Análise de metais pesados em solos de Pernambuco com diferentes atividades antrópicas**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Pernambuco. 2017.

FERREIRA, P. P. L. et al. Adsorção de Cu 2+ e Cr 3+ em efluentes líquidos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **Cerâmica**, v. 61, p. 435-441, 2015.

FINK, J. R. et al. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, p. 379-387, 2014.

FINK, J. S. et al. Sorção e difusão de fósforo em solos com mineralogias diferentes e sob preparo convencional ou plantio direto no sul do Brasil. **Anais...** 2015. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Natal, 2015. Disponível em: <https://eventosolos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/173.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

FIXEN, P. E.; LUDWICK, A. E. Residual available phosphorus in near-neutral and alkaline soils: I. Solubility and capacity relationships. **Soil Science Society of America Journal**. v. 46, p. 332 – 334, 1982.

FONTANA, A et al. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um Latossolo Vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 14, n. 1, 2008.

FONTANA, A. et al. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 545-550, 2011

FONTANA, A. et al. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de textura arenosa com fertilidade construída. **Revista Agrogeoambiental**, v. 13, n. 3, p. 606-614, 2021.

FONTANA, A. et al. Fósforo remanescente em solos formados sob diferentes materiais de origem em três topossequências, Pinheiral-RJ. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2089-2102, 2013.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, n. 1-2, p. 37-51, 1996.

FONTES, M. R. et al. Association of microcrystalline goethite and humic acid in some Oxisols from Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p 982-990, 1992.

FOX, R. L.; SEARLE, P. G. E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. *IN: DROSDOFF, M. Diversity of Soils in the Tropics*. Madison: American Society of Agronomy 1978, 97-119 p.

FREITAS, L. A. et al. Atributos físicos do solo e fenológicos da soja em diferentes sistemas de manejo e gesso. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.4, p. 508-515, 2017.

FROSSARD, E.; BROSSARD, M.; HEDLEY, M.J.; METHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soils. *In: TIESSSEN, H., P cycling in terrestrial and aquatic ecosystem; a global perspective*. New York: John Wiley, 1994, 1-65 p.

FU, Y. et al. Predicting soil organic matter from cellular phone images under varying soil moisture. **Geoderma**, v. 361, p. 114020, 2020.

GAO, W. et al. Towards convergence rate analysis of random forests for classification. **Artificial Intelligence**. v. 313, p. 103788. 2022.

GASPARI, M. C. et al. Natureza poligenética de latossolo bruno em patamares extensos no Meio-Oeste catarinense–Planalto das Araucárias. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. 23, 2020

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. 2003.

GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**, v.385, p.1-9, 2021.

GHIDIN, A. A. et al. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n. 2, p. 292-306, 2006.

GÓMEZ ROBLEDO, L. et al. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 200-208, 2013.

GONÇALVES, G. K. et al. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1633-1639, 2011.

GUARESCHI, R. F. et al. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.909-20, 2012.

GUARNERI, V. A. O. **Adsorção de fósforo em solos desenvolvidos sobre basaltos e riolitos**. 2019. TCC (Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

GUEDES, R. S. et al. Maximum Phosphorus Adsorption Capacity Adjusted to Isotherm Models in Representative Soils of Eastern Amazon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, p. 2615–2627, 2015.

GUIMARÃES, T. A. et al. Estudo da Influência do Tempo de Agitação na Adsorção de Cromo e Magnésio em Solo Laterítico. **Anais... in: GEOCENTRO**. Distrito Federal, Brasília. 2019. Disponível em: <https://qe.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/05j5A6ae8TjgX5vhDwubTUnWkNr9.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2024.

GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Austr. J. Soil Res.**, v.43, n. 2, p.189-202, 2005.

HOLLER, F.J. et al. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2009. 1056 p.

HONG, G. et al. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling. **Color Research and Application**, v. 26, n. 1, p. 76-84, 2001.

HSU P.H. Aluminum oxides and oxyhydroxides. *In: Dixon J.B.; Weed S.B. Minerals in soil environments.* **Soil Science Society of America**, Madison, 1989, 331-378 p.

IBIA, T.O; UDO, E.J. Phosphorus forms and fixation capacity of representative soils in Akwa Ibom State of Nigeria. **Geoderma**, 58:95–106, 1993.

INDA JUNIOR, A. V. **Caracterização de goethita e hematita em solos poligenéticos**. 2002. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

INDA JUNIOR, A.V; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, p. 851-866, 2005.

INDA, A. V. et al. Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 33-41, 2010.

INDA, A. V. et al. Óxidos de ferro e área superficial de Latossolo subtropical sob campo e floresta nativa. **Ciência Rural**, v. 44, p. 289-292, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. Ed. 2, Rio de Janeiro, 2007, 316 p.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advanced course**. Libraries parallel press, 2005.

JANEGITZ, M. C et al. Disponibilidade de fósforo, cálcio e magnésio no solo em função da aplicação de corretivos e sistema de manejo. 2015. **Anais...**  
*In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 2015. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/19.pdf>. Acesso em: 22 de dez. de 2023.

JANUARIO, M. E. **Desenvolvimento de método colorimétrico utilizando imagens digitais capturadas por smartphones para a quantificação de ureia no suor**. 2021. TCC (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2021.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere - A critical review. **Plant Soil**, n.205, p.25-44, 1998.

KARLEN, D. L. et al. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. **Soil & Tillage Research**, v. 130, p. 24-41, 2013.

KHORRAMDEL, S. et al. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. **Soil & Tillage Research**, v.133, p.25-31, 2013.

KORNDÖRFER, G. H.; MELO, S. P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33 n.1, p. 92-97. 2009.

KUHN, M. Building Predictive Models in R Using the Caret Package. **J. Stat. Softw.** v.28, p. 1–26, 2008.

LAWSON L. S. et al. Binding, fractionation, and distribution of Cs, Co, and Sr in a US coastal soil under saturated and field capacity moisture regimes. **J Soils Sediments** v.16, n. 2, p. 497-508, 2016.

LEITE, L. F. C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003.

LEPSCH, IGO. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, p. 178, 2002.

LEVIN, N. et al. Uma câmera digital como ferramenta para medir índices de cor e propriedades relacionadas de solos arenosos em ambientes semiáridos. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, n.24, p.5475–5492.

LIMA, T. M. et al. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**, v. 353, p. 264-272, 2019

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; ABICHEQUER, A. D.; DORNELES, E. P.; CAPITANI, B. Determinação do fósforo remanescente como método alternativo à textura na indicação da classe de disponibilidade de fósforo em três solos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 18, n. 1, p. 81-84. 2012

LIU, X. et al. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 7-8, p. 973-984, 2003.

MALAVOLTA, E. **Nutri-Fatos: informação agronômica sobre nutrientes para as culturas**. Piracicaba: POTAFOS Arquivo do agrônomo, n.10, 1996, 3-4 p.

MANCINI, M. et al. From sensor data to Munsell color system: Machine learning algorithm applied to tropical soil color classification via Nix™ Pro sensor. **Geoderma**, v. 375, p. 114471, 2020.

MANCINI, M. et al. Parent material distribution mapping from tropical soils data via machine learning and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry in Brazil. **Geoderma**, v. 354, p. 113885, 2019.

MARCOLIN, L.; CALEGARI, M.R. Atributos químicos, físicos e mineralogia de Latossolos e sua relação com a paisagem no oeste do Paraná. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 39, p. 48-61, 23 jun. 2020.

MARQUES, J. S. **Adsorção de fósforo em latossolo e argissolo misturado com carbono pirolisado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Acre – Pós-graduação em agronomia, Rio Branco, 2016.

MASINI, J.C. Demonstrando os fundamentos, potencialidades e limitações da análise por injeção sequencial. **Química Nova**, v.31, p.704-708, 2008.

MATIAS, S. S. R. et al. Influência de diferentes sistemas de cultivo nos atributos físicos e no carbono orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 3, p. 414-420, 2012.

MATOS, C. H. D. L. et al. Adsorção de fósforo em solos sob floresta e savana do Norte Amazônico, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 5, p. 2909-2920, 2017.

- MCLEAN, E.O. et al. Aluminum in soils: I. Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 22, n. 5, p. 382–387, 1958.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub>**. North Carolina Soil Testing Division, Raleigh, NC. 1953.
- MEHRA, O.P; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays & Clay Mineral Conference**, London, p.317- 327, 1958.
- MELFI, A. J.; PEDRO, G. Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. **Revista Brasileira de Geociências**. V. 7, p. 271- 286, 1977.
- MELLO, V.F. et al. Reserva mineral do solo. In: MELLO, V.F. e ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo. Parte I – Conceitos básicos**. SBCS, Viçosa, 2009, 251-332 p.
- MICHELON, C. J. et al. Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 230-239, 2019.
- MONTEIRO, P. F. C. et al. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos e químicos do solo e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 179-194, 2019.
- MORAIS, B. G. **Imagens digitais para determinação da concentração de fósforo em amostras de solo por meio do aplicativo Photometrix**. 2023. TCC (Bacharelado em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual Paulista, 2023.
- MOREIRA, F. L. M. et al. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônoma**, v. 37, n. 1, p. 7-12, 2006.
- MOTCHI, E. P. **Características e gênese de uma sequência de oxissolos no Planalto Central Brasileiro**. 1977. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.
- MOTTA, P. E. F. et al. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: Influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 349-359, 2002.
- MOUAZEN, A. M. et al. Potential of visible and near-infrared spectroscopy to derive colour groups utilising the Munsell soil colour charts. **Biosystems Engineering**, v. 97, n. 2, p. 131-143, 2007.
- MOURA, A et al. Teor de fósforo no solo: um caso de um ninhal da Garça-vaqueira (*Bubulcus ibis*), no sul do estado de Minas Gerais. **Agri-environmental sciences**, v. 9, n. 1, p. 4-4, 2023.

MOURA, J. B. et al. Adsorção de fósforo em latossolo vermelho distrófico sob vegetação de cerrado em Rio Verde-GO. **J Soc Technol Environ Sci**, v. 4, p. 199-208, 2015.

MOZAFFARI, M.; SIMS, J. T. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. **Soil Science**, v. 157, n. 2, p. 97-107, 1994.

MURPHY, J; RILEY, J. P. A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2 ed. Imprensa Universitária: Fortaleza, 2020.

NETO, D. E. S. et al. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009.

NOVAIS R. F; SMYTH T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, (Informações agronômicas n. 87), 1999, 10-11 p.

OLIVEIRA, C. M. B. et al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em latossolo bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1805-1815, 2014.

OLIVEIRA, C.; VENDRAME, Z. B. Análise química do solo no campus Caçapava do Sul utilizando espectrometria de fluorescência de raios-X. **Anais... 2018. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO**, v. 10, n. 2, 2018.

Disponível em:

[https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq\\_trabalhos/16459/seer\\_16459.pdf](https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/16459/seer_16459.pdf).

Acesso: 10 de out. 2022.

OLIVEIRA, D. A. **Valores orientadores de prevenção para cobre e zinco em solos do estado de Santa Catarina**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lages. Santa Catarina, 2019.

OLIVEIRA, D. R. M. et al. **Caracterização pedogeoquímica das formações superficiais representativas da superfície geomorfológica de Erval Grande – planalto das araucárias**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

OLIVEIRA, F. M. et al. Avaliação de processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante azul de metileno. **Matéria**, v. 23, 2018.

OLIVEIRA, J. S. **Mineralogia e adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

PANTANO, G. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

PAPA, R. A. et al. Qualidade de Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos sob vegetação nativa de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 564-571, 2011.

PARRA, J. A. S. **Modelo preditivo de adsorção de fósforo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar utilizando técnicas de mineração de dados. 2020.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2020.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.911-920, 2008.

PELUCO, R. R. et al. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 3, p. 259-266, 2015.

PENN, C. H, CAMBERATO, J. J. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9. n. 6. p. 120, 2019.

PEREIRA, L. M. et al. Correlação da produtividade da soja com os atributos químicos do solo e o NDVI. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 430-438, 2021.

PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 45, p. 508-514, 2010.

PEREIRA, S. D. et al. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agrônômica Brasileira**, v. 5, 2021.

PEREIRA, T. T. C et al. A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Geonomos**, v. 28, n.1, p. 1-14, 2020.

PÉREZ, C. A. S. et al. Caracterização de argilas encontradas em solos de Terras Indígenas do RS com o auxílio da espectroscopia Mössbauer de <sup>57</sup>Fe. **Cerâmica**, v. 50, p. 115-121, 2004.

PINTO, L. V. A. et al. Caracterização física da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG e uso conflitante da terra em suas áreas de preservação permanente. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 49-60, 2005.

POGGERE G. C. et al. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 385-394, 2018.

POGGERE, G. C. et al. Linking phosphorus sorption and magnetic susceptibility in clays and tropical soils. **Soil Research**, v. 58, n.5, p. 430-440, 2020.

POSSEBON, Eduardo; VIEIRA, M. F. Isotermas de adsorção de ivermectina em carvão ativado funcionalizado com grafeno. **Engineering Sciences**, v. 9, n. 2, p. 101-109, 2021.

POZZA, A. A. A. et al. Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. **Química Nova**, n. 32, p. 99-105, 2009.

PRADO, T. G. et al. Caracterização mineral de um Latossolo vermelho distrófico da região dos Campos Gerais utilizando Difração de raios-x, Espectroscopia do Infravermelho e Fluorescência de Raios-X. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 51-59, 2018.

R Core Team. R. **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.

RANNO, S. S. et al. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 21-28, 2007.

REIS, J. A. et al. Determinação de metanol em bebidas alcoólicas utilizando colorimetria por imagens digitais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 16, p. 455-468, 2020.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**, (Ed.6). Editora UFLA, Lavras, 2014.

RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. 1976. Tese (Doutorado)– Purdue University, West Lafayette, p.237, 1976.

REZENDE, A. V.; NETO, A. E. F. Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado.: **Embrapa Cerrados**, p. 11-14, 2007.

RIBEIRO, A. C. et al. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. p.359, 1999.

RIBEIRO, B. T. et al. Aplicações de fluorescência de raios X portátil (pXRF) na ciência do solo tropical. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 245-254, 2017.

RIBEIRO, J. V. et al. Optimization of pXRF instrumentation conditions and multivariate modeling in soil fertility attributes determination. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 211, p. 106835, 2024.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 297-303, 2002

RODRIGUES, T. E. **Mineralogia e gênese de uma sequência de solos dos Cerrados, no Distrito Federal**. 1977. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 953-964, 2004.

RONZANI, P. E. **Adsorção de fósforo em novas áreas de uso agrícola no Brasil**. 2023. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2023.

ROSSET, J. S. et al. Phosphorus fractions and correlation with soil attributes in a chronosequence of agricultural under no-tillage. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 6, p. 3915-3926, 2016.

ROTTA, L. R. **Fracionamento e disponibilidade de fósforo em uma cronossequência de cultivos sob plantio direto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Jataí. 2012.

SANTANA, G. S. et al. Substâncias húmicas e suas interações com Fe e Al em Latossolo subtropical sob diferentes sistemas de manejo de pastagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 461-472, 2011

SANTIAGO, J. V. B. **Desenvolvimento de método analítico para a determinação do herbicida *PARAQUAT* em urina humana**. 2018. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista. Araraquara, 2018.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576-586, 2008.

SANTOS, E. et al. Espectrometria de fluorescência de raios-X na determinação de espécies químicas. **Enciclopédia biosfera**. v. 9, n.17, p. 3413, 2013.

SANYAL, S. K.; DE DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v.16, p.1-120, 1991.

SCHAEFER, C.E.G.R.; Fabris J.D.; Ker J.C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, p.137-154, 2008.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. **Soils: Genesis and Geomorphology**. Cambridge University, 2005, 832, 2005 p.

SCHMIDT, S. A. et al. Analysis of soil color variables and their relationships between two field-based methods and its potential application for wetland soils. **Science of The Total Environment**, v. 783, p. 147005, 2021.

SCHMIDT, T. et al. Análise de ferro em solos com diferentes tipos de manejo no município de São Borja-RS. **Anais...** 2018, *In*:SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO. Universidade Federal do Pampa. v. 10, n. 2, 2018. Disponível em:  
[https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq\\_trabalhos/17041/seer\\_17041.pdf](https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/17041/seer_17041.pdf).  
Acesso: 10 de out. 2022.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-lösung. **Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkd**, 105:194-202, 1964.

SEVERO, E. A. **Desenvolvimento de spot test para determinação de fósforo em solos com quantificação por imagem digital**. 2021. TCC (Licenciatura em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. 2021.

SHARMA, A. et al. Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. Cation exchange capacity (CEC). *Geoderma*, 239:130-134, 2015

SHOEMAKER, H.E. et al. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, p. 274-277, 1961.

SILVA, G. A. V. **Utilização de Fluorescência de Raios-X (XRF) para a caracterização expedita de solos contaminados por metais pesados: Aplicação a obra de construção civil para a identificação em tempo real de resíduos perigosos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada) – Universidade de Lisboa. Lisboa, 2020.

SILVA, S. H. G. et al. Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 648-664, 2017.

SILVA, S. H. G. et al. pXRF em solos tropicais: Metodologia, aplicações, conquistas e desafios. **Avanços em Agronomia**, v. 167, p. 1-62, 2021.

SILVA, V. G et al., Comportamento espectral dos solos, uma relação de cores e mineralogia. **Anais...** 2018. *In: SEMINÁRIOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, n. 22, 2018. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.13102/semic.v0i22.4046>. Acesso: 28 out. 2022.

SIMONETE, M. A. et al. Phosphorus adsorption in lowlands of Santa Catarina cultivated with rice and its relation with soil properties1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, p. 566-573, 2018.

SKORUPA, A. L. A. et al. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 11-22, 2012.

SOARES, M. R. **Separação e caracterização da fração nanométrica dos minerais dos solos e sua importância na sorção de nutrientes e qualidade estrutural dos solos**. 2020. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Modelos descritivos da adsorção de íons em solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 46-50, 2006.

SOUZA, R. F. de et al. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 975-983, 2006.

SOUZA, R. F. et al. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 656-664, 2006.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989, 304 p.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions**. Ed 2. New York, Willey, 1994, 496 p.

STIGLITZ, R. et al. Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 121, p.141-148. 2016.

SWETHA, R. K. et al., Using Nix color sensor and Munsell soil color variables to classify contrasting soil types and predict soil organic carbon in Eastern India. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 199, p. 107192, 2022.

SWETHA, R. K.; CHAKRABORTY, S. Combination of soil texture with Nix color sensor can improve soil organic carbon prediction. **Geoderma**, v. 382, p.114775, 2021.

TAROUCO, C. P. et al. Atividade fotossintética e produção de biomassa de clones de batata em função da disponibilidade de fósforo no solo. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 8, pág. e24310817326-e24310817326, 2021.

TEIXEIRA P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. EMBRAPA Solo. v. 3, p. 574, 2017.

TEIXEIRA, A. F. S. et al. Portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry applied to the prediction of chemical attributes in Inceptisols under different land uses. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, p. 501-512, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; RIBEIRO, G. A. A.; RODRIGUES, M. R. L. Características de adsorção de fósforo em solos da bacia petrolífera de Urucu. **Anais...** 2008. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, v. 17, 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/111964/1/trab-1678-157.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

TOLEDO, B. I. et al. Bisphenol a removal from water by activated carbon, Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science Technology**, v. 39, p. 6246–6250, 9 jul. 2005.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. **Clays Clay Miner.**, v. 1, p. 14-21, 1992.

TROEH, F.R. et al. Soil and water conservation: for productivity and environment protection. New Jersey, **Prentice-Hall**, p. 718, 1980.

TROLEIS, M. J. B. et al. Sistemas de manejo e qualidade do solo na produção de soja no cerrado de baixa altitude. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e571985862-e571985862, 2020.

TROYACK, I. B. **Avaliação de teores de prata em solo contaminado com uso da técnica de fluorescência de raios X (pXRF): estudo de caso em Resende-RJ.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

USEPA. **Method 6200:** Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment, 2007.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, v. 62, p. 111-118, 2003.

VASQUES, G. M. et al. Espectrometria de fluorescência de raio x de campo melhora a qualidade de mapas de teores de ferro do solo. **Anais... 2024, In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA.** Embrapa Solos. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167723/1/2017-059.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

VENDRAME, P. R. S. et al. Predição da granulometria e mineralogia de Latossolos do Cerrado utilizando espectroscopia de infravermelho próximo. **Boletim de Pesquisa e desenvolvimento EMBRAPA**, 2015.

VIEIRA, M.S. et al. Phosphorus sorption isotherms in soils of the semiarid region of Brazil. **Revista Caatinga**, v. 34, p. 166-176, 2021

VIEIRA, N. I. M. **Validação de metodologia de análise de elementos minoritários em rochas por espectroscopia de fluorescência de raios x com dispersão em comprimento de onda.** 2022. TCC (Bacharel em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2022.

VILAR, C. C. et al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1059-1068, 2010.

VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Revista Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30-35, 2021.

WANDT, P. G. S.; SILVA, L. M. da. **Determinação do fósforo remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre.** Comunicado Técnico da Embrapa, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/916454/1/24134.PDF>. Acesso em: 08 jan. 2024.

WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, Y. Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications **Advances in Agronomy**, v. 128, p. 1-45, 2014.

WEINDORF, D. C; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.84, n.5, p. 1384–1392, 2020.

YANG, J. et al. Effect of colour calibration on the prediction of soil organic matter content based on original soil images obtained from smartphones under different lighting conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 238, p. 106018, 2024.

YANG, J. et al. Effect of smart phone cameras on color-based prediction of soil organic matter content. **Geoderma**, v. 402, p. 115365, 2021.

## ANEXO 1

Tabela 8 – Equações linearizadas das isotermas de Langmuir, índice  $K_L$  e CMAP das amostras de solo cultivados e não cultivados.

(Continua)

Amostra	R <sup>2</sup>	K <sub>L</sub>	CMAP	Equação
1	0.98	0.22	345	(Ce/Pads) = 0.0029B + 0.0131
2	0.99	0.31	500	(Ce/Pads) = 0.002B + 0.0064
3	0.96	0.19	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0065
4	1.00	1.05	500	(Ce/Pads) = 0.002B + 0.0019
5	0.98	0.35	1667	(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0017
6	0.99	0.40	588	(Ce/Pads) = 0.0017B + 0.0043
7	0.99	0.27	156	(Ce/Pads) = 0.0064B + 0.0237
8	0.98	0.47	1250	(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0017
9	0.98	0.29	435	(Ce/Pads) = 0.0023B + 0.0079
10	0.98	0.22	400	(Ce/Pads) = 0.0025B + 0.0116
11	0.96	0.17	667	(Ce/Pads) = 0.0015B + 0.0089
12	0.99	0.39	100	(Ce/Pads) = 0.01B + 0.0255
13	0.93	0.12	294	(Ce/Pads) = 0.0034B + 0.0277
14	1.00	0.85	108	(Ce/Pads) = 0.0093B + 0.0109
15	1.00	0.76	625	(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0023
16	1.00	0.92	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0013
17	0.99	0.44	476	(Ce/Pads) = 0.0021B + 0.0048
18	1.00	0.38	345	(Ce/Pads) = 0.0029B + 0.0076
19	0.95	0.15	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0078
20	0.90	0.11	37	(Ce/Pads) = 0.0267B + 0.2534
21	1.00	0.86	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0014
22	0.99	0.64	1111	(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0014
23	0.99	0.64	714	(Ce/Pads) = 0.0014B + 0.0022
24	1.00	0.63	1000	(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0016
25	0.94	0.52	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.009
26	1.00	0.13	833	(Ce/Pads) = 0.0024B + 0.0074
27	0.99	0.32	417	(Ce/Pads) = 0.0027B + 0.0034
28	1.00	0.79	370	(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0009
29	0.95	0.78	1429	(Ce/Pads) = 0.0046B + 0.0452
30	0.93	0.08	68	(Ce/Pads) = 0.0146B + 0.1871
31	0.95	0.10	217	(Ce/Pads) = 0.0046B + 0.0452
32	<b>0.76</b>	0.04	217	<b>(Ce/Pads) = 0.0046B + 0.1275</b>
33	0.96	0.14	118	(Ce/Pads) = 0.0085B + 0.0624
34	0.98	0.15	61	(Ce/Pads) = 0.0163B + 0.1128
35	<b>0.52</b>	0.02	323	<b>(Ce/Pads) = 0.0031B + 0.1297</b>
36	0.99	0.30	227	(Ce/Pads) = 0.0044B + 0.0147
37	0.97	0.14	109	(Ce/Pads) = 0.0092B + 0.0651
38	1.00	1.59	370	(Ce/Pads) = 0.0027B + 0.0017

Tabela 8 – Equações linearizadas das isotermas de Langmuir, índice  $K_L$  e CMAP das amostras de solo cultivados e não cultivados.

(Continuação)

Amostra	$R^2$	$K_L$	CMAP	Equação
39	0.93	0.21	1250	$(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0039$
40	1.00	0.66	303	$(Ce/Pads) = 0.0033B + 0.005$
41	0.97	0.21	714	$(Ce/Pads) = 0.0014B + 0.0066$
42	0.97	0.19	625	$(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0084$
43	0.90	0.13	1111	$(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0071$
44	0.97	0.20	909	$(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0056$
45	1.00	1.71	833	$(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0007$
46	0.99	0.50	1667	$(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0012$
47	1.00	3.00	667	$(Ce/Pads) = 0.0015B + 0.0005$
48	0.99	0.35	1250	$(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0023$
49	1.00	0.67	1667	$(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0007$
50	0.99	0.30	417	$(Ce/Pads) = 0.0024B + 0.0081$
51	0.99	0.21	182	$(Ce/Pads) = 0.0055B + 0.0259$
52	0.95	0.18	1000	$(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0057$
53	0.99	0.75	1667	$(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0008$
54	1.00	0.77	417	$(Ce/Pads) = 0.0024B + 0.0031$
55	1.00	0.70	714	$(Ce/Pads) = 0.0014B + 0.002$
56	1.00	0.94	625	$(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0017$
57	<b>0.40</b>	0.02	323	<b><math>(Ce/Pads) = 0.0031B + 0.1526</math></b>
58	0.92	0.12	192	$(Ce/Pads) = 0.0052B + 0.0445$
59	1.00	0.40	256	$(Ce/Pads) = 0.0039B + 0.0097$
60	1.00	0.72	227	$(Ce/Pads) = 0.0044B + 0.0061$
61	1.00	0.52	455	$(Ce/Pads) = 0.0022B + 0.0042$
62	1.00	1.00	769	$(Ce/Pads) = 0.0013B + 0.0013$
63	1.00	0.82	1111	$(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0011$
64	1.00	0.82	1111	$(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0011$
65	1.00	0.77	1000	$(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0013$
66	1.00	0.73	1250	$(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0011$
67	1.00	0.54	1429	$(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0013$
68	0.99	0.50	1667	$(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0012$
69	1.00	1.00	1250	$(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0008$
70	0.97	0.29	2000	$(Ce/Pads) = 0.0005B + 0.0017$
71	0.97	0.29	2000	$(Ce/Pads) = 0.0005B + 0.0017$
72	0.97	0.28	2000	$(Ce/Pads) = 0.0005B + 0.0018$
73	0.94	0.26	2000	$(Ce/Pads) = 0.0005B + 0.0019$
74	1.00	1.25	1000	$(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0008$
75	0.98	0.30	1429	$(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0023$
76	0.99	0.44	1250	$(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0018$
77	0.99	1.00	1429	$(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0007$

Tabela 8 – Equações linearizadas das isotermas de Langmuir, índice  $K_L$  e CMAP das amostras de solo cultivados e não cultivados.

(Conclusão)

Amostra	R <sup>2</sup>	K <sub>L</sub>	CMAP	Equação
78	1.00	0.53	1111	(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0017
79	1.00	0.79	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0014
80	0.97	0.24	1250	(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0034
81	0.97	0.19	833	(Ce/Pads) = 0.0012B + 0.0065
82	0.94	0.14	1000	(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0069
83	0.91	0.12	1111	(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0076
84	0.95	0.19	769	(Ce/Pads) = 0.0013B + 0.0073
85	0.92	0.13	1111	(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0069
86	1.00	0.54	667	(Ce/Pads) = 0.0015B + 0.0028
87	0.88	0.11	1111	(Ce/Pads) = 0.0009B + 0.0085
88	0.99	0.31	667	(Ce/Pads) = 0.0015B + 0.0049
89	1.00	0.38	625	(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0042
90	0.94	0.18	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0061
91	1.00	1.56	714	(Ce/Pads) = 0.0014B + 0.0009
92	1.00	0.62	625	(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0026
93	1.00	0.49	588	(Ce/Pads) = 0.0017B + 0.0035
94	0.98	0.24	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0046
95	1.00	0.64	714	(Ce/Pads) = 0.0014B + 0.0022
96	0.96	0.19	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0058
97	0.97	0.20	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0056
98	1.00	0.48	769	(Ce/Pads) = 0.0013B + 0.0027
99	1.00	0.77	769	(Ce/Pads) = 0.0013B + 0.0017
100	0.95	0.23	1000	(Ce/Pads) = 0.001B + 0.0043
101	1.00	1.69	625	(Ce/Pads) = 0.0016B + 0.0027
102	0.98	0.33	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0033
103	1.00	0.79	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0014
104	0.97	0.21	909	(Ce/Pads) = 0.0011B + 0.0053
105	0.92	0.10	1250	(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0077
106	0.90	0.07	1429	(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0097
107	0.95	0.18	1250	(Ce/Pads) = 0.0008B + 0.0044
108	0.98	0.26	1429	(Ce/Pads) = 0.0007B + 0.0027
CXBd	0.99	0.33	476	(Ce/Pads) = 0.0021B + 0.0063
CXBd	0.99	0.36	769	(Ce/Pads) = 0.0013B + 0.0036
LVdf	0.98	0.82	435	(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0018
LVdf	1.00	1.50	3333	(Ce/Pads) = 0.0006B + 0.0004
PVAd	1.00	0.33	1667	(Ce/Pads) = 0.0023B + 0.0028
PVAd	0.99	1.50	1667	(Ce/Pads) = 0.0003B + 0.0002

Fonte: Autora (2024).