

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ANDREIA COSTA BARBOSA**

**CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM  
LATOSSOLOS DA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2019**

**ANDREIA COSTA BARBOSA**

**CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM  
LATOSSOLOS DA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hidemassa Anami

**LONDRINA**

**2019**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do**  
**Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

### CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLO DA REGIÃO TRIÂNGULO MINEIRO

por

**ANDREIA COSTA BARBOSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 6 de Dezembro de 2019 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos  
(UTFPR)

---

Prof. Mr. Adriana Zemiani  
(PITAGORAS)

---

Prof. Dr. Marcelo Hidemassa Anami  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sempre me indicar os caminhos a seguir e por possibilitar que eu enfrente os desafios com saúde e coragem.

Aos meus pais, José Carlos e Rosalva, pelo amor incondicional, apoio em todos os momentos, e não medirem esforços ao me ajudar, e aos meus irmãos Carlos Eduardo e Ciro José por mesmo longe sempre estarem presente, dando suporte. E ao meu namorado Fabrício que esteve presente nessa caminhada, me dando todo o suporte, companheirismo e todo amor.

Agradeço a todos os meus amigos que fez parte dessa caminhada direta e indiretamente, especialmente as minhas amigas desde começo da Graduação Audrey e Vanessa pela grande jornada até aqui.

Agradeço ao meu orientador Dr. Marcelo Hidemassa Anami pela orientação, toda paciência, dedicação e a oportunidade de poder estar realizando este trabalho e colaboração em meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a Prof.<sup>a</sup> MSc. Adriana Zemiani e ao Prof. Dr. Maurício Santos que se disponibilizaram a avaliar este trabalho.

## RESUMO

BARBOSA, A. C. CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS DA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2019.

O fósforo é essencial para o crescimento das plantas, e seu desenvolvimento saudável, portanto quanto maior a sua disponibilidade no solo, melhor para as culturas, em função do aumento da absorção pelas plantas. A adsorção faz com que o fósforo fique retido e não o deixe disponível para as culturas. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar a capacidade máxima de adsorção de fósforo para três classes de latossolos, sendo Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), Latossolo Vermelho Distroférico (Lvdf) e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), nas profundidades de 20 cm, e 1 metro, para cada classe de solo no Estado de Minas Gerais, na mesorregião do Triângulo Mineiro. A Matéria orgânica no solo variou de 8,59 a 32,93 gdm<sup>-3</sup> tendo uma maior concentração nas áreas superficiais. A capacidade máxima de P foi estimada pelo modelo Langmuir e Freundlich e correlacionada com os atributos químicos, Ponto de Carga Zero (PCZ) e Fósforo Remanescente (P-Rem). Já que se trata de regiões agricultáveis que necessitam de uma quantidade favorável disponível de fósforo para o crescimento saudável das plantas. Os valores de CMAP variaram 49,08 a 110,37 (mg/g), tendo uma maior relação CMAP para as classes de solo LVAd, que é a classe de solo que tem maior concentração de goethita. Os valores de P-rem a maioria foram classificados como muito baixo, e apenas o LVef na profundidade de 20 cm, foi classificado como baixo. Pode-se concluir, que solos com maior quantidade de matéria orgânica, tem uma menor capacidade máxima de adsorção de fósforo, o que consequentemente vai ter maior quantidade de fósforo disponível para as plantas, e que todas as classes de solo em estudo, teve pouca quantidade de fósforo disponível para as culturas, o que faz com que os produtores agrícolas usem uma grande quantidade de adubo fosfatados, que trazem grandes riscos e danos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Latossolos. Adsorção de fósforo. Fósforo remanescente. Atributos químicos. Ponto de Carga Zero.

## ABSTRACT

BARBOSA, A. C. MAXIMUM PHOSPHORUS ADSORPTION CAPACITY IN OXISOL OF THE TRIANGULO MINEIRO REGION. 2019. Conclusion course project (Environmental Engineering Bachelor degree) – Bachelor degree in Environmental Engineering, Federal University of Technology – Paraná (UTFPR). Londrina, 2019.

Phosphorus is essential for plant's growth and healthy development, therefore the higher is its soil availability, the better it is for crops depending on increasing plant uptake. Adsorption retains phosphorus and makes it not available to crops. This present work was developed to determine the maximum phosphorus adsorption capacity for three oxisols classes: Eutroferric Red Latosol (LVef), Dystroferric Red Latosol (Lvdf) and Dystrophic Red Latosol (LVAd) at depths of 20 cm, and 1 meter, for each soil class in the state of Minas Gerais, in the Triangulo Mineiro mesoregion. The soil organic matter ranged from 8.59 to 32.93 gdm<sup>-3</sup> with higher surface area concentration. The maximum capacity of P was estimated by Langmuir and Freundlich model and correlated with chemical attributes, Zero Charge Point (PCZ) and Remnant Phosphorus (P-Rem). Since these are arable regions that need an appropriate amount of phosphorus available for healthy plant growth. CMAP values ranged from 49.08 to 110.37 (mg/g), with a higher CMAP ratio for soil classes LVAd, which is the soil class that has the highest goethite concentration. Most of the P-rem values were rated as very low, and only LVef at a depth of 20 cm was rated low. It can be concluded that soils with a higher amount of organic matter have a lower maximum phosphorus adsorption capacity, which consequently will have a higher amount of phosphorus available to plants, and that all soil classes understudy had little amount of phosphorus available to crops, which causes farmers to use a large number of phosphate fertilizers, which pose great risks and damage to the environment.

Key-words: Oxisol. Phosphorus adsorption. Remaining match. Chemical attributes. Point of Zero Charge

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da mesorregião do Triângulo Mineiro	13
Figura 2 - Latossolo vermelho	16
Figura 3 - Latossolo vermelho-amarelo.	17
Figura 4 - Trado motorizado.	26
Figura 5 - Local aonde foi coletado as amostras dos solos LVAd.	27
Figura 6 - Local aonde foram coletadas as amostras dos solos LVef.	28
Figura 7 - Local aonde foram coletadas as amostras dos solos LVdf.	29
Figura 8 - Amostras dos solos	29
Figura 9 - Peneiramento das amostras	30
Figura 10 - Localização esquemática da amostragem dos solos	31
Figura 11 - Tubos de ensaios e os reagentes	33
Figura 12 - Curvas de calibração de P	34
Figura 13 - Amostras com os reagentes para cada concentração de P	35
Figura 14 - Amostras de solos organizadas em fileiras	38
Figura 15 - Amostras de solos com seus respectivos reagentes	40
Figura 16 - amostras de solo em repouso	41
Figura 17 - Curvas de calibração de P remanescente	42
Gráfico 1 - CMAP do LVAD – 20 cm	12
Gráfico 2 - CMAP do LVAd – 1m	13
Gráfico 3 - CMAP do LVdf- 20 cm	13
Gráfico 4 - CMAP do LVdf – 1m	14
Gráfico 5 - CMAP do LVef – 20 cm	14
Gráfico 6 - CMAP do LVef – 1m	15
Gráfico 7 - PCZ em LVef – 20cm	20
Gráfico 8 - PCZ em LVef – 1m	21
Gráfico 9 - PCZ em LVdf – 20 cm	22
Gráfico 10 - PCZ em LVdf – 1m	23
Gráfico 11 - PCZ em LVAd – 20 cm	24
Gráfico 12 - LVAd – 1m	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Municípios que foram realizados as coletas	31
Tabela 2 - Volume de água deionizada	39
Tabela 3 - Alíquotas de solução padrão de 25 mg / L de P, H <sub>2</sub> O, e CaCl <sub>2</sub> 0,020 mol / L, para preparo das soluções da curva de calibração de fósforo	41
Tabela 4 - Valores de pH em cloreto de potássio, cloreto de cálcio e água, teores de cálcio + magnésio, cálcio, alumínio, hidrogênio + alumínio (acidez potencial), matéria orgânica, , teores de potássio disponível , teores de fósforo disponível, soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC), e saturação por bases das amostras de solos nas profundidades 20 cm e 1 m na região do Triângulo Mineiro.	10
Tabela 5 - CMAP das classes de solos estudadas e suas respectivas profundidades	15
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de determinação PCZ	25
Tabela 7 - P – rem, $\delta$ , C.V, NCP, e PR, para cada classe de solo em estudo	26



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
3.1	ESTADO DE MINAS GERAIS	13
3.2	LATOSSOLOS	14
3.2.1	LATOSSOLOS VERMELHOS	15
3.2.2	LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS	16
3.3	FÓSFORO	17
3.4	MINERAIS DOS SOLOS	18
3.4.1	Caulinita	18
3.4.2	Haloisita	20
3.4.3	Óxidos de ferro	20
3.4.3.1	<i>Magnetita</i>	21
3.4.3.2	<i>Goethita</i>	21
3.4.3.3	<i>Hematita</i>	22
3.4.4	Óxidos de alumínio	22
3.4.5	Óxidos de silício	22
3.5	PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)	23
3.6	ADSORÇÃO	23
3.7	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO	24
3.7.1	Isoterma de Langmuir	25
3.7.2	Isoterma de Freundlich	25
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
4.1	AMOSTRAS DOS SOLOS	26
4.2.	ANÁLISE QUÍMICA DE ROTINA	32
4.3	CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO (CMAP)	33
4.4	ISOTERMA DE LANGMUIR	35
4.5	ISOTERMA DE FREUMDLICH	36
4.6	PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)	38
4.7	FÓSFORO REMANESCENTE	40

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>10</b>
5.1	ANÁLISE QUÍMICA DE ROTINA	10
5.2	CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO (CMAP)	12
<b>5.3</b>	<b>PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)</b>	<b>20</b>
<b>5.4</b>	<b>FÓSFORO REMANESCENTE</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo é vital para o crescimento e desenvolvimento dos seres vivos. Atualmente apenas dez países detêm 95% das reservas, 72% delas no Marrocos. O Brasil com rochas de baixo teor de fósforo e de difícil extração, importa 57% do fosfato que usa, fazendo com que o fosfato tenha um preço elevado. Os solos tropicais são pobres em nutrientes e precisam de uma quantidade maior de fósforo de que solos de clima temperado (LOPES, 2019).

Nos solos altamente intemperizados o fósforo tem uma grande relação com os constituintes mineralógicos, fazendo com que a maior parte do P esteja adsorvido, tornando-se indisponível às plantas. A capacidade de adsorver fósforo no solo em regiões tropicais e subtropical geralmente é de 1000 vezes maior que a adubação fosfatada, que costuma ser aplicada tendo uma tendência de ter deficiência desse elemento, fazendo com que necessite de grandes aplicações de fosfato (VILAR et al., 2019). Solos intemperizados têm na sua constituição alguns minerais que estão em maior quantidade, como a caulinita, a gibsitita, a hematita, a goethita e magnetita. A adsorção de fósforo acontece mais intensamente nesses solos, devido a sua constituição que é complexo de superfície de esfera interna de ânions fosfato com minerais dessas classes de solos (VILAR, et al., 2010).

A Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) é um dos atributos utilizado para analisar o nível de relação do fósforo (P) com as partículas do solo, pode ser determinada pela isoterma de Langmuir e Freundlich.

A fração argila é a porção mais reativa para essa ocorrência devido à sua alta área superficial específica e também por ter uma maior densidade de sítios ácidos de Lewis na superfície dos coloides.

Os óxidos de Fe, que geralmente são os mais estudados em relação à adsorção de P são a goethita (Gt) e a hematita (Hm), são os mais encontrados em solos oxidicos, A presença de magnetita é comum em vários tipos de solos, principalmente os que são constituídos de rochas vulcânicas básicas, como o basalto (VILAR, et al., 2010).

A adsorção de fósforo pela Gt, geralmente ocasiona elevada CMAP em função de que a adsorção de fósforo por este mineral é simples e ocorre principalmente na face do cristal. E a Hm tem adsorção de P nas faces não basais do mineral portanto

a presença de Gt aumenta mais a adsorção de P quando comparado com a Hm (VILAR, et al., 2010).

A ligação dos teores de óxidos de Al com a adsorção de P pode ser maior ou equivalente à dos óxidos de Fe. A caulinita é outro mineral que pode apresentar baixa ou elevada atuação na adsorção de P, isto pode depender do pH do solo.

Os latossolos são caracterizados pela sua intensa intemperização, são profundos de coloração homogêna com matizes avermelhadas ou amareladas, tem distribuição uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila, tendo como principais minerais na fração argila a caulinita (Ct), gibbsita (Gb), goethita (Gt) e hematita (HM) (KER, 1997; GHIDIN et al., 2006).

O fósforo é essencial para o crescimento das plantas e seu desenvolvimento saudável. Portanto quanto maior a sua disponibilidade no solo, melhor para as culturas, em função do aumento da absorção pelas plantas. Essa disponibilidade pode ser influenciada pela textura, dose do fertilizante fosfatado e pelo tempo de contato com o solo. A adsorção faz com que o fósforo fique retido e não o deixe disponível para as culturas, fazendo com que os agricultores tenha que usar uma grande quantidade de adubo fosfatados, fazendo com que possam se lixiviados para corpos de água causando diversos impactos ambientais como a eutroficação dos mesmos (FEY, 2017).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade máxima de adsorção de fósforo em três diferentes classes de solos, Latossolos Vermelho eutroférico (LVef), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), situados na zona rural do Triângulo Mineiro no Estado de Minas Gerais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

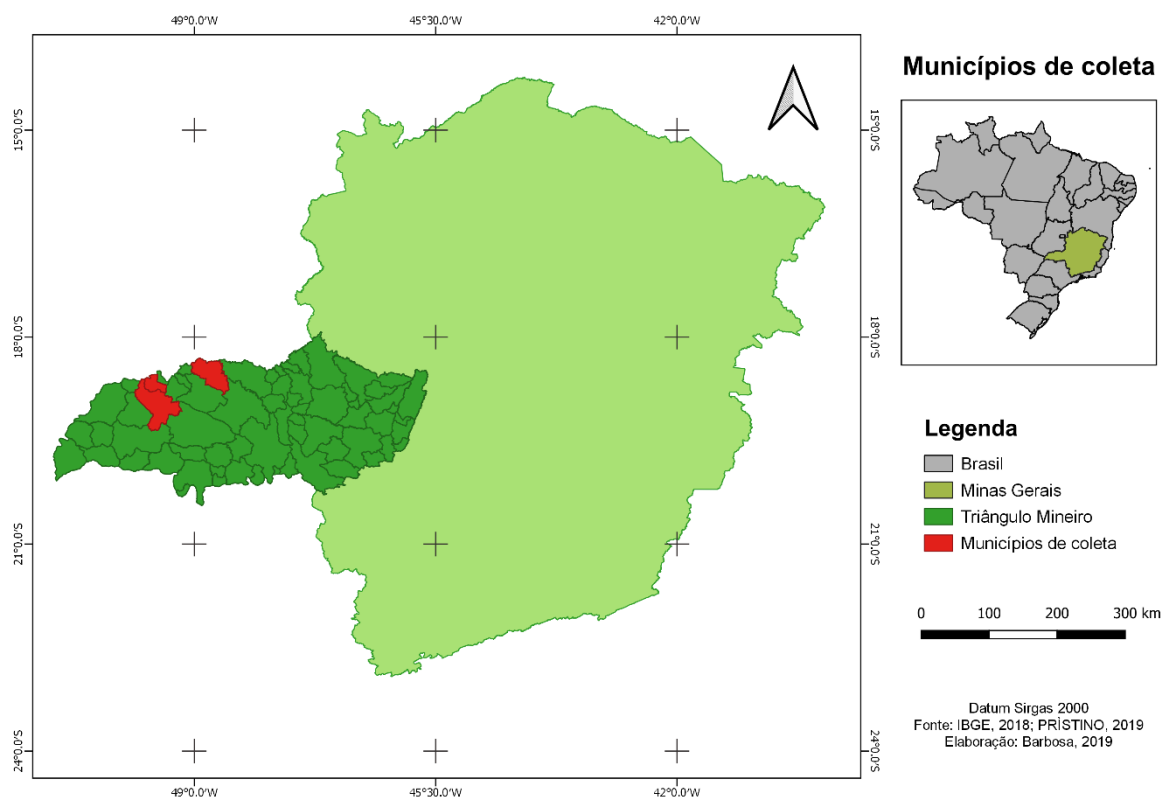
- Desenvolver o referencial teórico sobre o comportamento adsorptivo de fósforo no solo;
- Coletar amostras de solo do horizonte A e B de latossolos vermelho eutroférico (LVef), latossolo vermelho distroférico (LVdf) e Latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd);
- Fazer a caracterização química;
- Determinar e avaliar capacidade máxima de adsorção de P, da TFSA para as classes de solos LVef, LVdf e LVAd;
- Determinar e avaliar o Ponto de Carga Zero (PCZ);
- Determinar e avaliar o Fósforo Remanescente (P – rem)

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 ESTADO DE MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais situado na região Sudeste do país, é dividido em doze mesorregiões Geográficas (MSG), sendo uma delas o Triângulo Mineiro, que se situa no oeste do estado, sendo composta por sete microrregiões geográficas (MRG). Uma delas a cidade de Ituiutaba, no qual abrange a cidade de Capinópolis (SILVEIRA ET AL., 2014). Outra microrregião é a de Uberlândia no qual Tupaciguara pertence a este distrito. Conforme pode ser verificado na Figura 1.

Figura 1 - Localização da mesorregião do Triângulo Mineiro



Fonte: Autoria própria (2019).

As cidades que foram coletadas as amostras foram Capinópolis – MG, Ituiutaba- MG, e Tupaciguara - MG ficam próximas dos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, sendo ambos grandes produtores agrícolas, conseqüentemente a região tem como predominância a agricultura. Essas regiões têm clima quente o ano

todo, tendo como maior precipitação os meses de outubro a abril. A classificação do solo da maior parte do Triângulo Mineiro é de Latossolo.

Minas Gerais possui 6 % da produção nacional de grãos produzindo, principalmente, milho, feijão, soja, algodão, trigo, sorgo, amendoim, girassol e mamona. Em 2017 o estado de Minas Gerais apresentou uma área colhida de 3,4 milhões de hectares, produzindo 14,3 milhões de toneladas, a maior parte dessa produção está concentrada no Triângulo Mineiro. A cultura de cana-de-açúcar é uma das mais expressivas e tem as maiores produções na região do Triângulo Mineiro, representando 29,7% da produção do estado (EMATER, 2017).

Minas gerais é o 6º maior produtor de carne do Brasil, também se destaca nacionalmente por ter o segundo maior rebanho bovino (leite e corte) entre os demais estados, com cerca de 23,5 milhões de cabeças. Nos últimos anos, o Triângulo liderou o *ranking* das principais regiões do estado com maior número de animais, isso ocorre pelas condições favoráveis, como a alta produção de grãos, tecnologias e técnicas de produção, que auxilia para o avanço contínuo da pecuária nessa região (EMATER, 2017).

### 3.2 LATOSSOLOS

O termo Latossolo foi a princípio proposto pelo americano Charles E. Kellog, em 1949, é derivado da palavra em latim “laterite” e “solum”, tijolo e solo, indicando material altamente intemperizado. São solos minerais, homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes. São formados pelo processo chamado latolização que se baseia na remoção da sílica e das bases do perfil ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , etc), após transformação dos minerais primários constituintes (SOUZA et. al, 2019; VILAR, 2010).

Existem sete diferentes classes de Latossolo, que se diferenciam na combinação de características com teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cor do solo e relação  $\text{K}_i$  ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). São solos profundos, com horizonte B espesso superior a 50 cm, com sequência de A, B e C com pouca diferença; as cores variam de vermelha muito escura e amareladas, costuma ser mais escura no A, e vivas no B, e mais clara no C (SOUZA et. al., 2019).

A mineralogia dos Latossolos é composta essencialmente por caulinita, gibbsita, óxidos de ferro e alumínio. Nesses solos as condições de pluviosidade,

drenagem, pH e potencial de sílica, alumínio e ferro são determinantes na predominância de um mineral sobre o outro (VILAR, 2010).

Latossolos são os solos mais representativos do Brasil, ocupa 38,7% da área total do país e distribui-se em praticamente todo o território nacional (MATOS; CARRASCHI, 2019). A sua maior ocorrência é no Brasil, mais frequente em regiões equatoriais e tropicais, mas pode ocorrer em zonas subtropicais (SANTOS; ZARONI, 2019).

Devido às boas condições físicas e relevos mais suaves os Latossolos apresentam alto potencial para o uso agrícola, sendo largamente utilizado com produção de grãos: soja, milho, arroz, etc. A sua limitação é possuir baixa fertilidade, constatada na maioria dos latossolos e elevada capacidade de reter umidade (SANTOS; ZARONI, 2019).

No estado de Minas Gerais os Latossolos são de grande importância para o desenvolvimento agrícola com predominância para as culturas de soja, milho e café. As frações de argila do Latossolo do Triângulo Mineiro é composta basicamente por caulinita gibsita e goethita com presença eventual de anatásio (ROLIM et al., 2009).

### 3.2.1 LATOSSOLOS VERMELHOS

Os Latossolos Vermelhos apresentam cores avermelhadas acentuadas, por ter quantidades elevadas de óxidos de ferro que estavam presentes no material originário em ambientes bem drenados, tendo a característica de cor, textura e estrutura uniformes em profundidade. São comuns em extensas áreas na região Centro-Oeste, Sul e Sudeste do país, é responsável pela maior parte da produção de grãos do país, por ocorrer principalmente em áreas de relevo plano e suave ondulado, permitindo a mecanização agrícola (ALMEIDA et al., 2019). Na Figura 2, observa-se o perfil do Latossolo vermelho:



Figura 2 - Latossolo vermelho



Fonte - Almeida (2019).

Os Latossolos Vermelhos eutroféricos são solos de alta fertilidade e com altos teores de ferro, com textura muito argilosa (SOUZA et al., 2005).

Os Latossolos Vermelhos distroféricos são derivados de rochas básicas, contém teores elevados de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{TiO}_2$ , são muito profundos, argilosos ou muito argilosos e de boas condições físicas, tem baixa fertilidade e alto teores de ferro (LABORSOLO, 2019).

### 3.2.2 LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS

Os Latossolos Vermelho-Amarelo são comuns em diversas áreas no território brasileiro, associados aos relevos plano, suave ondulado ou ondulado. Estão em ambientes bem drenados, são mais profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura em profundidade, são mais aplicados para a agropecuária (ALMEIDA et al., 2019).

São solos com teores medianos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sendo ácidos e muito ácidos, com saturação de bases baixa e teor de alumínio trocável normalmente alto. Suas

principais limitações são justamente a acidez elevada e a fertilidade química baixa (LABORSOLO, 2019). Na Figura 3 abaixo, nota-se o perfil do Latossolo vermelho-amarelo:

Figura 3 - Latossolo vermelho-amarelo.



Fonte: Almeida (2019).

O solo Vermelho-Amarelo distrófico são solos de baixa fertilidade natural, apresenta limitações de ordem química em profundidade ao desenvolvimento do sistema radicular, os teores de fósforos são baixos, e tem baixa quantidade de água disponível para a vegetação (CÔRREA, 2002; ALMEIDA et al., 2019).

### 3.3 FÓSFORO

O fósforo é um dos dezesseis elementos essenciais no metabolismo das plantas e um dos três macronutrientes primários, tendo como fundamental importância na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. Tem como componente estrutural dos ácidos nucléicos de genes e cromossomos, e também de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolípídeos. A sua não disponibilidade de P no começo do ciclo vegetativo pode resultar em restrições desenvolvimento, no qual depois a planta não consegue recuperar, mesmo se aumentar o suprimento de fósforo

aos níveis adequados as plantas. Portanto, o P é essencial desde o início do crescimento da planta (GRANT et al., 2001; FÓSFORO E SUA IMPORTÂNCIA, 2016)

O fósforo apresenta deficiência nos solos por causa da sua “fixação”, o que pode tornar indisponível para as plantas, mesmo que os solos tenham uma certa disponibilidade de fósforo, uma pequena fração é absorvida pelas culturas diretamente (FÓSFORO E SUA IMPORTÂNCIA, 2016).

A deficiência do fósforo nas plantas pode diminuir a respiração como também a fotossíntese; pode também reduzir a síntese de ácido nucléico e de proteína, podendo ocorrer a acumulação de compostos nitrogenados solúveis (N) no tecido. O crescimento da célula é atrasado e potencialmente paralisado (GRANT et al., 2001).

O conteúdo de fósforo é baixo na maioria da superfície do solo, com média de 0,6%. O fósforo do solo é classificado em dois grupos, orgânico e inorgânico. O fósforo orgânico pode ser achado em resíduos de planta, esterco e tecidos microbianos. Solos que são baixos em matéria orgânica podem ter somente 3% do seu total de fósforo na forma orgânica, mas solos que são ricos em matéria orgânica podem ter mais de 50% do conteúdo total de fósforo na forma orgânica (FÓSFORO, 2014).

Fósforo inorgânico no solo é constituído de apatita, complexos de ferro e fosfatos de alumínio e fósforo adsorvido nas partículas de argila. A solubilidade de fósforo orgânico e inorgânico é muito reduzida e apenas quantidades pequenas de fósforo de solo estão em solução a qualquer momento. Em geral os solos têm menos de uma libra por acre (0,000112085116 kg / m<sup>2</sup>) de fósforo solúvel, podendo essa quantidade ser menor em alguns solos (FÓSFORO, 2014).

O fósforo é pouco móvel no solo, não sofrendo com percolação e perdas desprezíveis, sendo a erosão a principal causa de perdas de fósforo contido na matéria orgânica e partículas coloidais (FÓSFORO E SUA IMPORTÂNCIA, 2016).

### 3.4 MINERAIS DOS SOLOS

#### 3.4.1 CAULINITA

Em solos com condições tropicais úmidas, a caulinita geralmente é o principal mineral da fração argila, a sua formação é ocasionada por condições de intenso intemperismo químico e lixiviação dos produtos da dissolução dos minerais,

principalmente cátions de caráter básico ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) e sílica (MELO; WYPYCH, 2009).

A caulinita mostra crescimento preferencial no plano X-Y (largura e comprimento) em detrimento do crescimento no sentido do eixo Z (espessura), como resultado o mineral pertence à classe dos filossilicatos e apresenta na forma de camadas (MELO; WYPYCH, 2009).

Tem grande importância como mineral sobre as propriedades físico-química do solo, quanto maior a área superficial específica (ASE), maior a adsorção de P devido à maior exposição de grupos Al-OH das bordas de lâminas octaédricas (MELO; WYPYCH, 2009).

Na classe de solo Lvdf, os teores de caulinita ao longo da topossequência apresentaram-se semelhantes, geralmente por essa classe de solo ter uma melhor condição de drenagem em todas as posições de paisagem (MELO; WYPYCH, 2009).

A caulinita não é formada somente a partir do intemperismo de minerais primários, depende das condições pedobioclimáticas, a caulinita pode ser formada a partir de outros minerais secundários, mais ricos em sílica, eventualmente existentes na fração argila do solo (MELO; WYPYCH, 2009).

A formação de caulinita também pode ocorrer com a precipitação do Si e Al da solução do solo, liberados com o intemperismo e dissolução da esmectita (MELO; WYPYCH, 2009).

O principal processo de formação da caulinita na fração argila dos solos do Brasil é por dissolução de minerais primários e precipitação do Si e Al a partir da solução do solo (MELO; WYPYCH, 2009).

A caulinita é um dos minerais mais importantes na definição do comportamento químico dos solos de clima tropical úmido, mesmo que apresente baixa densidade de carga superficial (CTC de 30 a 150  $\text{mmol kg}^{-1}$ ) e baixo valor de área superficial específica (10 a 20  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ) (MELO; WYPYCH, 2009).

A adsorção de nutrientes na superfície da caulinita também é um processo considerável para aumentar a fertilidade dos solos, a produção das plantas e reduzir a lixiviação dessas espécies químicas. Mesmo com menor quantidade de cargas positivas, a adsorção de ânions, principalmente  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , na caulinita também favorece a nutrição das plantas. O fosfato é um ânion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  podendo formar ligações com dois átomos de Al adjacentes, criando, assim, uma estrutura na forma de anel de

seis membros. Essa adsorção, de natureza específica, reduz drasticamente a disponibilidade do nutriente para as plantas (MELO; WYPYCH, 2009).

### 3.4.2 HALOISITA

Rochas ricas em mica e feldspato formam haloisita em horizontes mais jovens, elas prevalecem no saprolito. A haloisita pode ser constituída diretamente de materiais vulcânicos sob condições limitadas de lixiviação, por exemplo, em horizontes mais profundos, com restrições de drenagem, ou em climas mais secos (menor dessilicação). Na maioria dos estudos de saprolitos de solos formados de rochas graníticas a haloisita é formada principalmente em associação com o intemperismo dos feldspatos (MELO; WYPYCH, 2009).

### 3.4.3 ÓXIDOS DE FERRO

Os óxidos de ferro compreendem um grupo de minerais, que são encontrados em grandes quantidades na natureza e são considerados os mais abundantes óxidos metálicos no solo. Nos solos, os óxidos ocorrem em partículas muito pequenas, submicroscópicas e, por causa da sua natureza química e alta área superficial específica, atuam com eficiência na adsorção de ânions inorgânicos, orgânicos, vários biocidas, cátions, além de facilitar a formação de agregados e a cimentação de outros componentes do solo (COSTA; BIGHAM, 2009)

No solo, o Fe encontra-se na solução do solo (dissolvido ou formando complexos orgânicos) e dentro da estrutura cristalina de grande variedade de minerais (principalmente, silicatos e óxidos do metal). Os óxidos de ferro nos solos são classificados em minerais primários, encontrados frequentemente na fração silte e areia, ou, ainda, como minerais primários ricos em Fe. O Fe liberados por estes minerais primários pode seguir diferentes caminhos, dependendo das condições ambientais (pH, temperatura, umidade, composição da solução do solo, teor de matéria orgânica) e formar óxidos de Fe, inicialmente com baixo grau de cristalinidade (COSTA; BIGHAM, 2009).

O baixo grau de cristalinidade está associado à rapidez de formação desses minerais, em comparação com os filossilicatos, e à presença de um variável número de cátion metálicos que substituem o Fe na sua estrutura cristalina, o que reflete,

dessa forma, o ambiente químico de sua formação. Uma vez formados os óxidos de Fe permanecem sujeitos à contínua modificação de acordo com as mudanças ambientais. Na ausência de processos de oxidação e redução, tendem a acumular nos solos em relação a outros minerais mais solúveis. Processos de oxidação e redução, mesmo por períodos curtos, associados à presença de matéria orgânica, são suficientes para que a atividade biológica reduza as formas oxidadas ( $\text{Fe}^{3+}$ ) presentes na estrutura dos óxidos de Fe à forma reduzida  $\text{Fe}^{2+}$ , solúvel, e que pode ser removida do *solum*, ocasionando solos claros, acinzentados, praticamente livres desses minerais (COSTA; BIGHAM, 2009).

#### 3.4.3.1 MAGNETITA

Mineral primário acessório comum em rochas magmáticas e metamórficas. No processo de intemperismo dessas rochas, a magnetita tende a acumular nas frações mais grosseiras de solos e sedimentos. Diferentemente dos outros óxidos de Fe, a magnetita apresenta  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  em sua constituição química. Esse mineral é facilmente identificável em campo por causa de sua forte atração magnética a um ímã comum e acumula-se na fração areia (partículas pretas) nos sulcos de erosão de solos derivados de rochas eruptivas básicas (COSTA; BIGHAM, 2009).

#### 3.4.3.2 GOETHITA

É o mineral mais comum dos óxidos de Fe e ocorre em quase todos ambientes pedogênicos, ocorre em solos formados a partir de rochas com baixa concentração de Fe em sua composição, em climas regionais mais frios e úmidos ou posições no relevo que facilitam o acúmulo de água ou temperaturas mais baixas, e formada nas primeiras etapas do intemperismo dos minerais primários e acumula, portanto, em solos jovens ou nos horizontes próximos às rochas (COSTA; BIGHAM, 2009).

### 3.4.3.3 HEMATITA

Segundo tipo de óxido de Fe mais encontrado na natureza, é comum em solos e nas rochas sedimentares, metamórficas e magmáticas. Há a formação de hematita durante o resfriamento de rochas ígneas (basalto), bem como por metamorfismo (itabirito), hidrotermalismo e diagênese. É um óxido de ferro comum na região tropical quente e úmida, acumulando em solos de drenagem livre, geralmente, presentes nas posições mais estáveis do relevo (plano a suave ondulado), geralmente, presentes nas posições mais estáveis do relevo (plano a suave ondulado), derivados de diferentes materiais de origem (COSTA; BIGHAM, 2009).

### 3.4.4 ÓXIDOS DE ALUMÍNIO

A uma menor frequência dos óxidos de Al no solo, em contraste com os óxidos de Fe, seus análogos isoestruturais, pode ser explicado pelo fato de sua formação competir com a dos argilominerais, bem como pela dificuldade na identificação de baixos teores por difratometria de raios-X. Os óxidos de alumínio apresentam elevada área superficial específica (100 a 220 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>), ponto de carga zero (PCZ), e pH 9,5 a 10 e carga superficial variável. A faces dominante no cristal, (001) na gibsite e (020) na boehmita, compreende grupos OH<sup>-</sup> estruturais coordenados cada um por dois íons Al<sup>3+</sup>, supostamente não-reativos graças à estabilidade de sua ligação. Assim, a adsorção estaria limitada aos grupos OH<sup>-</sup> coordenados por um único íon Al<sup>3+</sup>, situados nas superfícies laterais (KAMPF; CURI, 2009).

### 3.4.5 ÓXIDOS DE SILÍCIO

Os óxidos de Si constituem o segundo grupo mineral em abundância na crosta terrestre, sendo excedido apenas pelo grupo dos silicatos. Os óxidos de Si de tectossilicatos, com a estrutura formada pela repetição de tetraedros SiO<sub>4</sub>, em que cada O está ligado ao Si de tetraedros adjacentes, constituindo uma armação tridimensional. Minerais de sílica geralmente tem baixa capacidade de adsorção de íons por ser sua carga muito baixa, com CTC em torno de 10 a 20 kg<sup>-1</sup> no quartzo, resultante de pouca substituição isomórfica na estrutura e da baixa proporção de ligações quebradas na superfície desses minerais (KAMPF; CURI, 2009).

### 3.5 PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)

O PCZ corresponde a um valor de pH no qual a carga líquida resultante de todas as fontes da superfície de um coloide reduz-se a zero. Este ponto é um valor característico para dado sistema e pode fornecer informações úteis a respeito das propriedades eletroquímicas do sistema (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2009).

No PCZ, a diferença de potencial na interface não é necessariamente zero, já que ela depende de efeitos de polarização (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2009).

Os óxidos de ferro e alumínio, como hematita, goethita e gibsitita, apresentam radicais de superfícies únicos, o que os torna mais previsíveis em relação ao PCZ dos minerais, dependendo de diferenças de cristalinidade e substituição de  $\text{Fe}^{3+}$  por  $\text{Al}^{3+}$  nos óxidos de Fe (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2009).

### 3.6 ADSORÇÃO

Adsorção é um fenômeno físico-químico que ocorre onde o acúmulo de determinado componente na interação entre a superfície sólida e a solução adjacente, é um processo que uma substância é acumulada numa interface entre fases. Os componentes que se unem à superfície são chamados adsorvatos, já a fase sólida que retém o adsorvato é chamada adsorvente. A remoção das substâncias a partir da superfície é chamada dessorção (VINHAL-FREITAS et al., 2010).

A retenção de fósforo pelo solo é algo interessante para as plantas, mas o “envelhecimento” desse fenômeno pode ser problemático, com isso o P passaria de uma forma lábil que define as formas em equilíbrio rápido com a solução do solo para outra não-lábil que representa compostos insolúveis e que só lentamente podem passar para a solução do solo (VILAR, 2010).

Um dos modos do P ficar retido no solo é através da precipitação. Fenômeno comum com as formas iônicas de ferro e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), em solos ácidos, ou de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), em solos neutros ou calcários isotermas de solubilidade de compostos fosfatados em função do pH mostram que os fosfatos de Al (variscita) e de Fe (estregita) são mais estáveis em meio ácido e os fosfatos de Ca (apatita) são menos estáveis (VILAR, 2010).



De maneira geral, quanto maior a proporção de argila maior será a área superficial específica e maior a adsorção de P, muito mais do que o teor de argila presente nos solos o que mais influencia na adsorção de P é sua composição mineralógica, os componentes presentes na fração argila (NOVAIS; SMITH, 1999).

Os óxidos de Fe que são mais pesquisados quanto à adsorção de P são a goethita (Gt) e a hematita (Hm), pois são os mais abundantes em solos oxidicos. A adsorção de P pela Gt, o aumento da adsorção com o teor desta e com o aumento da substituição isomórfica (SI) de Fe por Al em sua estrutura (AINSWORTH et al., 1985).

### 3.7 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

Uma forma de estudar o comportamento de adsorção de fósforo no solo é pela utilização de modelos físico-químicos, como as isotermas de adsorção. São equações matemáticas que são utilizadas para descrever, em termos quantitativos, a adsorção de solutos por sólidos, a temperaturas constantes. Uma isoterma de adsorção mostra a quantidade um determinado soluto adsorvido por uma superfície adsorvente, em função da concentração de equilíbrio do soluto. A técnica usada para obter dados de adsorção é bastante simples, uma quantidade conhecida de soluto é adicionada ao sistema contendo uma quantidade conhecida de adsorvente. Admite-se que a diferença entre a quantidade adicionada e a remanescente na solução encontra-se adsorvida na superfície do adsorvente (ALLEONI et al., 1998).

Na área de ciência do solo, as isotermas que são mais comumente utilizadas e conhecidas encontram-se as equações de Langmuir e Freundlich. Na isoterma de Langmuir sua maior utilização é devido ao fato de prever a capacidade máxima de adsorção máxima do adsorvato, pois presume que a superfície do adsorvente é homogênea, e que teoricamente permite a formação de uma camada monoelementar completa do adsorvato sobre a superfície adsorvente. A isoterma de Freundlich admite que a superfície de adsorção é heterogênea e que a energia de adsorção decresce logaritmicamente à medida que a superfície se torna coberta de adsorvato (KUMMER, 2014).

### 3.7.1 ISOTERMA DE LANGMUIR

O modelo de Langmuir é uma das equações mais utilizadas para representação de processos de adsorção e fornece uma expressão matemática relativamente simples, foi originalmente desenvolvida para descrever gases em superfícies sólidas (ANDIA, 2009).

A equação apresenta os seguintes pressupostos, existe um número definido de sítios, que têm energia equivalente e as moléculas adsorvidas não interagem com as outras, a adsorção ocorre em uma monocamada, e cada sítios pode comportar apenas uma molécula adsorvida (NASCIMENTO et al., 2014).

Suas suposições não e somente aplicadas ao sistema solo, o mais interessante do modelo Langmuir é a viabilidade de obtenção da adsorção máxima (ALLEONI et al., 2009).

### 3.7.2 ISOTERMA DE FREUNDLICH

O modelo proposto por Freudlich foi um dos pioneiros a equacionar a relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução em um modelo com características empíricas (Nascimento et al., 2014). É considerada a não uniformidade das superfícies reais e, aplicando ao solo, relata bem a adsorção iônica dentro de certos limites de concentração, mas apresenta dificuldade em considerar a quantidade de íons presentes no solo (Barrow, 1978).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

As coletas dos solos foram feitas em Minas Gerais no Triângulo Mineiro, nas cidades de Capinópolis, Ituiutaba e Tupaciguara.

As análises laboratoriais foram realizadas nos laboratórios de solos e de saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Londrina. Os ensaios de Capacidade máxima de adsorção de fósforo foram feitos em quintuplicatas, os de Ponto de Carga Zero não foram feitas repetições, e o fósforo remanescente em triplicata.

#### 4.1 AMOSTRAS DOS SOLOS

Foram coletadas amostras de três diferentes classes de Latossolos do Estado de Minas Gerais sendo escolhido esses locais por se tratar de regiões agricultáveis é o fósforo e fundamental para as plantas, portanto sabendo o quando o solo está adsorvendo, pode se ter uma base de quanto P aplicar nas cultuvas. As coletas das amostras foram realizadas utilizando um trado motorizado coletando aproximadamente 5 kg de amostra do horizonte A e 5 kg do horizonte B para cada classe de solo de 3 municípios do Triângulo Mineiro, foram registradas as coordenadas com o auxílio de um sistema de posicionamento global (GPS). Na Figura 4 tem-se a imagem do trado motorizado que foi utilizado para coletar as amostras:

Figura 4 - Trado motorizado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 5 observa-se o local aonde foram coletadas as amostras de solo LVAd, na zona rural no distrito de Tupaciguara-MG

Figura 5 - Local aonde foi coletado as amostras dos solos LVAd.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 6 o local aonde foram, realizadas as coletas das amostras dos solos LVef, na zona rural no distrito de Capinópolis – MG.

Figura 6 - Local aonde foram coletadas as amostras dos solos LVef.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 7 estão o local que foram realizadas as coletas dos solos LVdf, na zona rural no distrito de Ituiutaba - MG

Figura 7 - Local aonde foram coletadas as amostras dos solos LVdf.



Fonte: Aatoria própria (2019).

Para obtenção de Terra fina seca ao ar (TFSA), as amostras foram colocadas em bandejas e secas em estufa com circulação de ar forçado e passadas em peneiras com abertura de 2 mm. Na Figura 8 tem-se as amostras nas bandejas antes de ser colocadas na estufa.

Figura 8 - Amostras dos solos



Fonte: Aatoria própria (2019).

Na Figura 9 o momento em que as amostras estão sendo passadas na peneira.

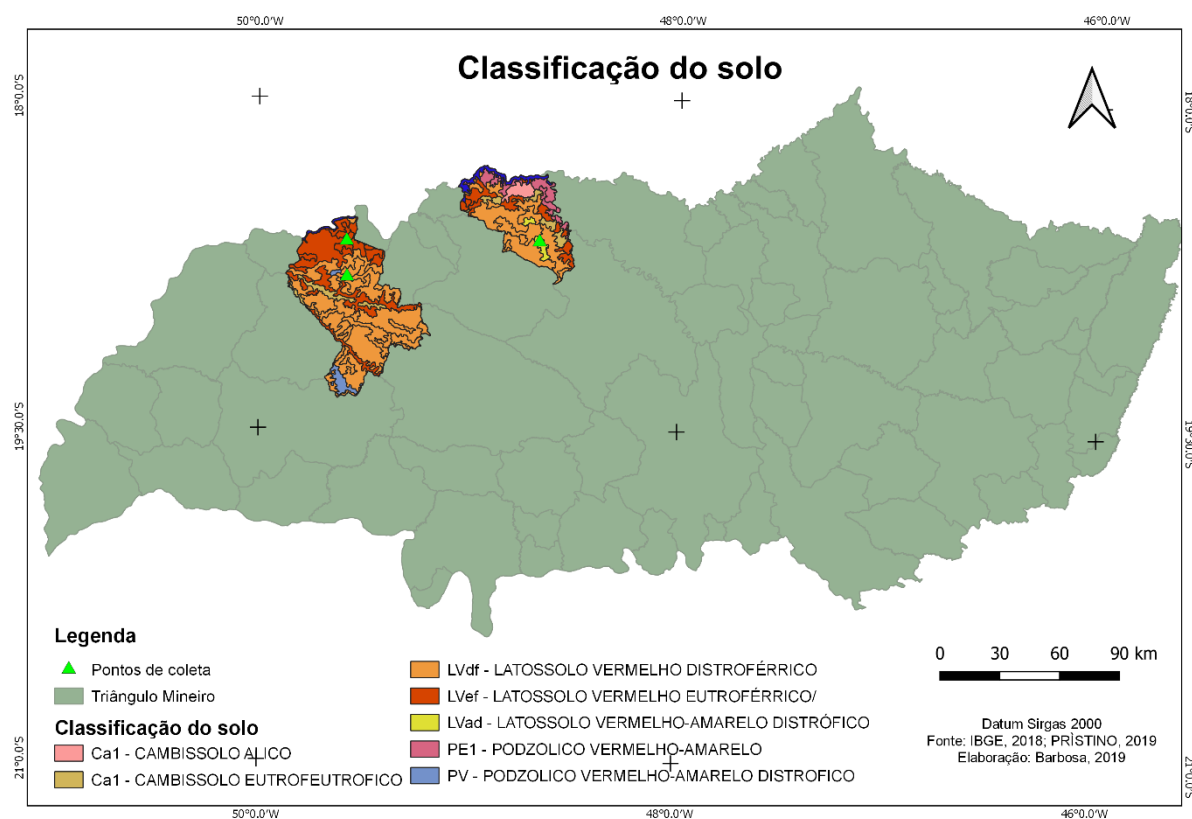
Figura 9 - Peneiramento das amostras



Fonte: Autoria própria (2019).

Posteriormente as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, na sombra e em local fresco. Os pontos das coletas são evidenciados na Figura 10:

Figura 10 - Localização esquemática da amostragem dos solos



Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 1, é possível verificar as cidades que foram realizadas as coletas.

Tabela 1 - Municípios que foram realizados as coletas

Número	Município
1	Capinópolis
2	Ituiutaba
3	Tupaciguara

Fonte: Autoria própria (2019).

No ponto 1, está localizado nas coordenadas S 18°39.065', W 49°34.967', altitude 533 m. No ponto 2, nas coordenadas S 18°48.809', W 49°34.824', altitude 572 m. No ponto 3, nas coordenadas S 18°38'57.8", W 48°39'55.6".



## 4.2. ANÁLISE QUÍMICA DE ROTINA

As análises químicas de rotina da TFSA foram feitas no Laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. As metodologias de análise foram baseadas nos protocolos descritos em (EMBRAPA, 1997).

O pH dos solos foram determinados em água e em KCL 0,01 mol L<sup>-1</sup>. Cerca de 10 cm<sup>3</sup> de cada amostra agitando (160 rpm) por 10 minutos, com as respectivas soluções. Após repouso de 30 minutos, o sobrenadante foi utilizado para determinar o pH, com o auxílio de eletrodo e termômetro.

A acidez potencial (Al<sup>3+</sup> + H<sup>+</sup>) foi determinado por titulação em acetato de cálcio 1 mol L<sup>-1</sup>. Dez cm<sup>3</sup> de cada amostra e 75 mL de acetato de cálcio foram agitados a 160 rpm, por 10 minutos. Após 12 horas de repouso, 25 mL do extrato foi titulado com solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, na presença de fenolftaleína como indicadores de ácido.

Os cátions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos com solução de KCL 1 mol L<sup>-1</sup>. Utilizando-se relação solo: solução da ordem de 1:10. Os elementos Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram determinados no sobrenadante por espectrofotometria de absorção atômica. O Al<sup>3+</sup> foram determinados por titulação. Uma alíquota de 25 mL foi retirada do sobrenadante para titulação com uma solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, na presença de fenolftaleína como indicador.

Os teores de P e K<sup>+</sup> disponíveis foram extraídos com solução Mehlich-1 com relação solo solução de 1:10. Os elementos foram determinados no sobrenadante após 10 minutos de agitação (160 rpm) e 30 minutos de repouso. O P foi determinado pelo método do colorimétrico e o potássio por fotometria de emissão de chama.

O teor de carbono orgânico foi determinado conforme metodologia descrita em (RAIJ, 2001), pela decomposição do material orgânico através da oxidação (Walkley – Black). Foram utilizados dicromato de potássio como agente oxidante e ácido sulfúrico como fornecedor de energia para a reação. O oxidante e ácido sulfúrico como fornecedor de energia para a reação. O dicromato de potássio excedente, no sobrenadante, foi utilizado com solução padronizada de sulfato ferroso. O indicador utilizado foi a difenilalanina.

### 4.3 CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO (CMAP)

As análises de adsorção de fósforo foram feitas no Laboratório de solos e no laboratório de saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. A capacidade máxima de adsorção de P foi obtida através de amostras de TFSA, feitas em quintuplicatas.

A determinação da CMAP foi realizada a partir de uma série de tubos de 15 mL, nos quais foram utilizadas para cada amostra uma série de tubos adicionando 1,0 g de amostra de solo que foram pesados em balança analítica.

Em cada série de tubos, foi adicionado soluções de KCL  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , pH 6, contendo 0; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 60; 80; e  $120 \text{ mg L}^{-1}$  de P, na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . As concentrações iniciais escolhidas para constituição das isotermas variaram entre as amostras. Foi utilizada uma relação solo: solução da ordem 1:10. Como pode verificar na Figura 11, os tubos de ensaios com 1 g de solo e os respectivos reagentes.

Figura 11 - Tubos de ensaios e os reagentes



Fonte: Autoria própria (2019).

Posteriormente o conjunto foi colocado em mesa agitadora a 160 oscilações/minuto, durante 4 horas, e logo após foi centrifugado as amostras por 10 minutos a 3000 rpm.

As concentrações de P nas soluções sobrenadantes foram determinadas através do método colorimétrico (EMBRAPA, 1997).

Foram preparadas as curvas de calibração nas concentrações de 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; e  $10,0 \text{ mg /L}$  de P, na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ .

Posteriormente foi preparado a solução de molibdato diluído em uma proveta de 1000 mL de vidro, colocando 300 mL de molibdato concentrado e completando com água deionizada.

Inicialmente foram feitas as análises das curvas de calibração, colocando 5 ml de cada concentração das curvas de calibração de P e pipetando 10 mL de molibdato diluído nos copos descartáveis de 50 mL e foi colocado 2 pitadas de ácido ascórbico e logo em seguida fazendo sua leitura em um espectrofotômetro no comprimento de onda de 725 nm. Na Figura 12 observa-se as curvas de calibração de P, já com os seus respectivos reagentes.

Figura 12 - Curvas de calibração de P



Fonte: Autoria própria (2019).

Depois de analisadas as curvas de calibração, foram analisadas as amostras para cada concentração de P, transferindo 5 mL do sobrenadante para os copos descartáveis e pipetando 10 mL do molibdato diluído, acrescentou-se 2 pitadas de ácido ascórbico e fez-se a leitura no espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm. Como pode observar na Figura 13 as amostras com os reagentes para da concentração de P.

Figura 13 - Amostras com os reagentes para cada concentração de P



Fonte: Autoria própria (2019).

Para as amostras acima de LVdf 1m, LVdf 20 cm, LVerf 20 cm, LVad 1m e LVad 20 cm, foram feitas a diluição de dez vezes para as concentrações a partir de 20 mg/L de P, já na amostra LVerf 1m foi feito a diluição a partir de 60 mg/L de P. Para as diluições são feito a transferência de 1 mL da solução para outro copo descartável e pipetado 10 mL KCL 0,01 M, e feito a leitura espectrofotômetro no comprimento de onda de 725 nm.

As quantidades de P adsorvidas foram determinadas pela diferença entre as concentrações iniciais e as concentrações da solução de equilíbrio. As concentrações de equilíbrio ( $C_{eq}$ ) e os respectivos valores de P adsorvidos foram submetidos ao ajuste da isoterma de Langmuir (OLSEN; WATANABE, 1957).

#### 4.4 ISOTERMA DE LANGMUIR

A equação de Langmuir foi escolhida em razão de seu uso ser comum na literatura e ter se ajustado muito bem aos dados de adsorção em solos.

(CASAGRANDE, 2003; PIERANGELI et al., 2007; LINHARES et al., 2010; ARAÚJO, 2009). Ela é equacionada da seguinte maneira:

$$X/M = (abC)/(1+aC)$$

Onde:

X/M é a concentração de P adsorvido,

b é a capacidade máxima de adsorção do elemento (CMAP);

C é a concentração do elemento na solução de equilíbrio (sobrenadante); e

a é a constante relacionada com a energia de ligação do elemento ao solo.

Os valores de a e b são obtidos através do da equação da reta de ajuste do gráfico de Concentração do sobrenadante pela concentração adsorvida da seguinte maneira:

$$b^* = 1/\tan \alpha$$

$$b \text{ (intersecção da reta)} = 1/(ab^*)$$

#### 4.5 ISOTERMA DE FREUNDLICH

A equação de isoterma de Freundlich e representado pela equação:

$$q = K C_{eq}^{1/n}$$

q- massa do elemento adsorvido em relação à massa da fase sólida adsorvente;

$C_{eq}$  – concentração de equilíbrio do adsorvato em solução;

K e n – constantes experimentais.

K indica a capacidade da adsorção do adsorvente, podendo sugerir a adsorção do íon no solo, n o efeito da concentração na capacidade da adsorção e representa a intensidade da adsorção, indicando qualitativamente, a reatividade dos sítios energéticos do solo (Andia, 2009).

O modelo de Freundlich também pode ser utilizado na forma linearizada, obtendo após aplicar o logaritmo em ambos lados da equação, facilitando o ajuste de

modelo aos dados experimentais e seus parâmetros de avaliação (Andia, 2009). Como representado na equação:

$$\log q = \log k + \frac{1}{n} \log C_{eq}$$

A forma linearizada pode ser usada para relacionar a quantidade de metal absorvido no solo e a concentração de íons metálicos dissolvidos. Valores de  $n > 1$  indica que o processo de adsorção é favorável (Kummer, 2014).

#### 4.6 PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)

Inicialmente pesou-se 4g de solo, que foram pesadas em balança semi-analítica, depois transferiu-se as amostras já pesadas para 45 copos descartáveis de 50 mL e foi ordenado em três filas de 15. Como pode observar na Figura 14.

Figura 14 - Amostras de solos organizadas em fileiras



Fonte: Autoria própria (2019).

Posteriormente foi adicionado 10 mL de KCL 0,2M, 0,02M, e 0,002M nos copos das filas I, II e III, respectivamente. O copo mediano (no 8) foi chamado de zero, porque só recebeu a solução de KCL.

Nos copos de 1 a 7 foram adicionados 0,25, 0,50, 1,0, 2,0, 2,5, e 3,0mL de HCL 0,1N e nos de 9 a 15 0,25, 0,50, 1,0, 2,0, 2,5, e 3,0mL de NaOH 0,1N.

Depois foram adicionados água deionizada em cada um dos copos até completar o volume de 20mL. Os volumes de água deionizada que foram colocados, está evidenciados na Tabela 2:

Tabela 2 - Volume de água deionizada

	I (mL)	II (mL)	III (mL)
1	9,75	9,75	9,75
2	9,5	9,5	9,5
3	9,0	9,0	9,0
4	8,5	8,5	8,5
5	8,0	8,0	8,0
6	7,5	7,5	7,5
7	7,0	7,0	7,0
8	10,0	10,0	10,0
9	9,75	9,75	9,75
10	9,5	9,5	9,5
11	9,0	9,0	9,0
12	8,5	8,5	8,5
13	8,0	8,0	8,0
14	7,5	7,5	7,5
15	7,0	7,0	7,0

Fonte: Autoria própria (2019).

As amostras foram deixadas em equilíbrio durante 4 dias. Na Figura 15 é possível observar as amostras com os seus respectivos reagentes.



Figura 15 - Amostras de solos com seus respectivos reagentes



Fonte: Autoria própria (2019).

Após o repouso de 4 dias, foram determinados o pH das suspensões com um pHmetro portátil e calculado as adsorções de  $H^+$  e  $OH^-$  adicionados.

Foram plotadas as concentrações de  $H^+$  e  $OH^-$  adsorvidos contra o pH de cada concentração eletrolítica empregada, de forma que se obteve um gráfico. As concentrações finais das três curvas foram respectivamente:  $10^{-1} \text{ mol dm}^{-3}$ ,  $10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$  e  $10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$ .

O ponto de cruzamento comum as três curvas de titulação potenciométricas corresponderam às adsorções iguais de  $H^+$  e  $OH^-$  e, portanto, o PCZ desejado.

#### 4.7 FÓSFORO REMANESCENTE

Essa metodologia foi feita em triplicata, inicialmente mediu-se em um cachimbo dosador de amostra de solo  $5 \text{ cm}^3$  de solo, transferiu-se para os Erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 50 mL da solução  $\text{CaCl}_2$   $0,010 \text{ mol / L}$  de  $\text{CaCl}_2$  contendo  $60 \text{ mg / L}$  de P.

Agitou as amostras em mesa agitadora por 5 minutos, e deixou em repouso por cerca de 23 horas. Como pode observar na Figura 16:

Figura 16 - amostras de solo em repouso



Fonte: Autoria própria (2019).

Foi preparado as curvas de calibração de fósforo, em balões volumétricos de 250 mL, pipetou, sucessivamente, alíquotas de solução padrão de 25 mg / L de P, H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub> 0,020 mol / L, de acordo com a Tabela 3. Foram guardadas as soluções em frascos tampados, com a indicação das concentrações nos rótulos.

Tabela 3 - Alíquotas de solução padrão de 25 mg / L de P, H<sub>2</sub>O, e CaCl<sub>2</sub> 0,020 mol / L, para preparo das soluções da curva de calibração de fósforo

P	Curva de	H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
	calibração de P			
mg / L		-----mL-----		
0,0	0	20	125	105
0,4	4	16	125	105
0,8	8	12	125	105
1,2	12	8	125	105
1,6	16	4	125	105
2,0	20	0	125	105

Fonte: Autoria própria (2019).

Para uma série de análises, inicialmente colocou-se 5,0 mL de cada solução da curva de calibração de P em copos descartáveis e adicionou 10 mL de ácido de molibdato de amônio diluído que foi preparado colocando 300 mL de ácido molibdato diluído em uma proveta de 1000 mL e completando com água deionizada, e por final colocou-se 2 pitadas de ácido ascórbico. Na Figura 17 observa-se as curvas de calibração de P com seus respectivos reagentes.

Figura 17 - Curvas de calibração de P remanescente



Fonte: Autoria própria (2019).

Posteriormente fez a leitura das curvas de calibração de P no espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm.

Depois foram feitas as análises das amostras colocando-se 0,3 mL do sobrenadante de cada amostra em 10 mL de água deionizada em copos descartáveis e transferiu-se 5 mL dessas soluções para outro copo descartáveis e completou com 10 mL de molibdato de amônio diluído e colocou 2 pitadas de ácido ascórbico, e fez-se a leitura no espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA DE ROTINA

Os atributos químicos dos solos analisados apresentaram-se bem diferentes. A diversidade das amostras de solo sob diferentes, material de origem, favoreceu essa amplitude. Como pode observar na Tabela 4:

*Tabela 4 - Valores de pH em cloreto de potássio, cloreto de cálcio e água, teores de cálcio + magnésio, cálcio, alumínio, hidrogênio + alumínio (acidez potencial), matéria orgânica, , teores de potássio disponível , teores de fósforo disponível, soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC), e saturação por bases das amostras de solos nas profundidades 20 cm e 1 m na região do Triângulo Mineiro.*

<b>Classes de Solos</b>	<b>Lvef – 20 cm</b>	<b>Lvef – 1m</b>	<b>Lvdf - 20 cm</b>	<b>Lvdf - 1m</b>	<b>LVAAd - 20cm</b>	<b>LVAAd - 1m</b>
<b>pH KCL</b>	4,65	5,18	4,37	4,90	4,35	4,75
<b>pH CaCl<sub>2</sub></b>	4,93	5,29	4,46	4,98	4,30	4,40
<b>pH H<sub>2</sub>O</b>	5,25	6,12	4,67	6,44	4,87	5,17
<b>Ca + Mg cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	5,3	3,5	2,0	0,9	1,3	0,7
<b>Ca cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	0,5	3,0	1,1	0,5	0,5	0,4
<b>Al cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	0	0	0	0	0	0
<b>H + Al cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	7,7	12,4	8,0	9,7	20,4	16,3
<b>Matéria orgânica gdm<sup>-3</sup></b>	32,95	8,59	24,23	5,51	18,08	10,13
<b>K cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	0,04	0,003	0,01	0,003	0,01	0,003
<b>P mgdm<sup>-3</sup></b>	4,09	1,06	2,37	0,00	1,14	0,00
<b>Soma de base cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	5,34	3,503	2,01	0,903	1,301	0,703
<b>CTC cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup></b>	13,04	15,903	10,01	10,603	21,71	17,003
<b>Saturação por bases %</b>	40,95	22,02	20,01	8,52	5,99	4,13

Fonte: Autoria própria (2019).

O pH das amostras revelou a predominância de solos ácidos (tabela 4). O menor valor de pH em água foi determinado para a classe de solo LVdf na profundidade de 20 cm, e o maior para o LVdf na profundidade de 1 metro. O pH em KCL foram menores do que os em água em todas as classes de solo, já em relação ao  $\text{CaCl}_2$  a maioria foram maiores do que o KCL, exceto o LVAd 20 cm e LVAd 1m. E os pH de  $\text{CaCl}_2$  também foram todos menores do que os de água. A acidez potencial variou de 7,7 a 20,4  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ , com média de 12,4  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ . Os baixos valores de pH e elevados valores de acidez potencial (H + Al) observados, favorecem a formação de sítios ácidos de Lewis, que pode interferir na adsorção de íons (VILAR, 2010). Outra característica de grande importância é a capacidade de troca catiônica (CTC), por representar diretamente a adsorção não específica de íons. Nas amostras de solos que foram analisadas, a CTC teve uma variação de 10 a 21,7  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ .

Os teores de bases trocáveis (Ca + Mg, Ca, K) dos solos em estudo foram baixos em relação a CTC (tabela 4). A soma de bases variou entre 0,703 até 5,34  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ . Com isso, a saturação por bases também apresentou uma grande variação, sendo o menor valor de 4,13 % no solo LVAd a 1m de profundidade, e o maior valor no LVEf a 20 cm que foi de 40,95%. Com isso os solos foram classificados como distróficos (saturação por bases < 50 %) de acordo com o oposto em (EMBRAPA, 2006).

O teor de Al foi de 0,00 para todas as classes de solos em estudo, o que é um valor satisfatório para solos em regiões agricultáveis já que o alumínio em excesso é tóxico às plantas, limita o crescimento das raízes e o desenvolvimento das plantas, interfere diretamente na disponibilidade de fósforo e inibe a absorção de ferro, além de causar efeito tóxico ao metabolismo vegetal e reduzir a condutividade de água aparente das raízes (CONCEIÇÃO, 2019).

A presença de matéria orgânica no horizonte A (a profundidade de 20 cm) dos solos podem promover a mudança de carga elétrica líquida dessa camada, influenciando significativamente a adsorção de íons (VILAR, 2010). Para os solos em estudo, o valor de matéria orgânica foi maior a 20 cm de profundidade (horizonte A), quando comparado aos de profundidade de 1 m (Horizonte B). Isso ocorre, principalmente porque, os valores de pH a 20 cm de profundidade (Horizonte A) desses solos são menores, a saturação por bases e o teor de P disponível a 20 cm de profundidade são maiores. Sendo esses fatos confirmando a hipótese de maior carga líquida negativa para essa camada promovida pela matéria orgânica. A Classe

de solo LVef foi a com maior quantidade de matéria orgânica e fósforo disponível no solo e o de LVAd com menor quantidade. Por se tratar de solos destinados ao cultivo de plantas utilizando a técnica de plantio direto e a camada mais superficial ter maior quantidade de matéria orgânica, isso significa que a grande quantidade de palhas e de raízes que são de compostas, fazendo com que aumente a matéria orgânica presente no solo (BORGES, 2017).

## 5.2 CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO (CMAP)

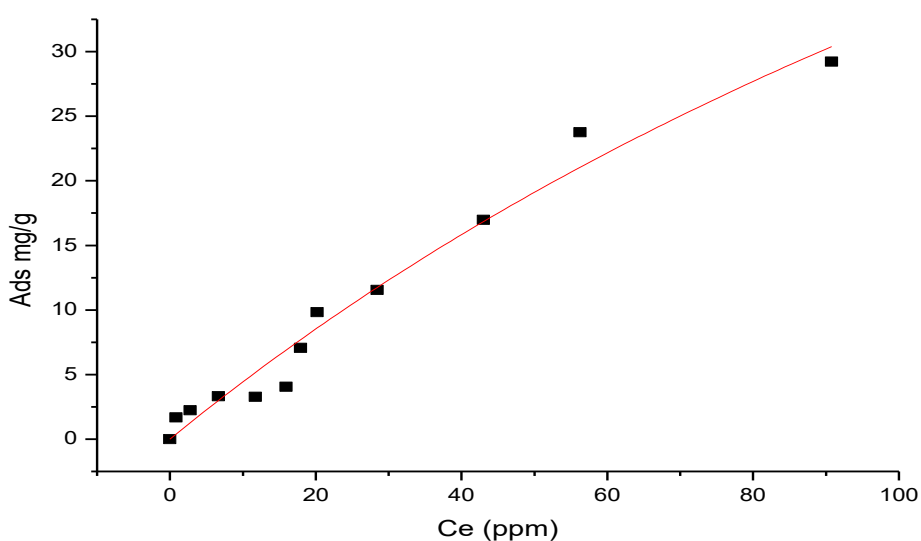
### 5.2.1 ISOTERMA DE LANGMUIR

Após a realização dos experimentos, que visava a determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, através da relação de 1:10.

Foram feitas as variações de concentração de P na solução em contato com o solo. As concentrações foram 0; 2,5; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0; 40,0; 60,0; 80,0 e 120,0 mg/L.

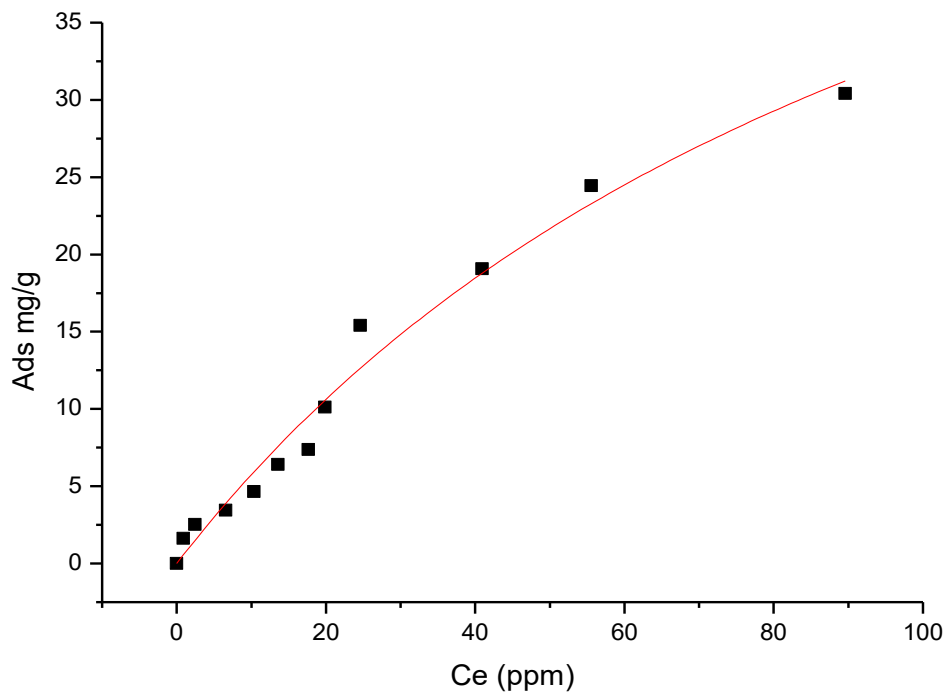
Os resultados de adsorção de P da solução pelo solo, são apresentados através da isoterma de Langmuir e estão evidenciados nos Gráficos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, em mg de P por grama de adsorvente. E organizados na Tabela 5.

Gráfico 1 – CMAP Langmuir do LVAD – 20 cm



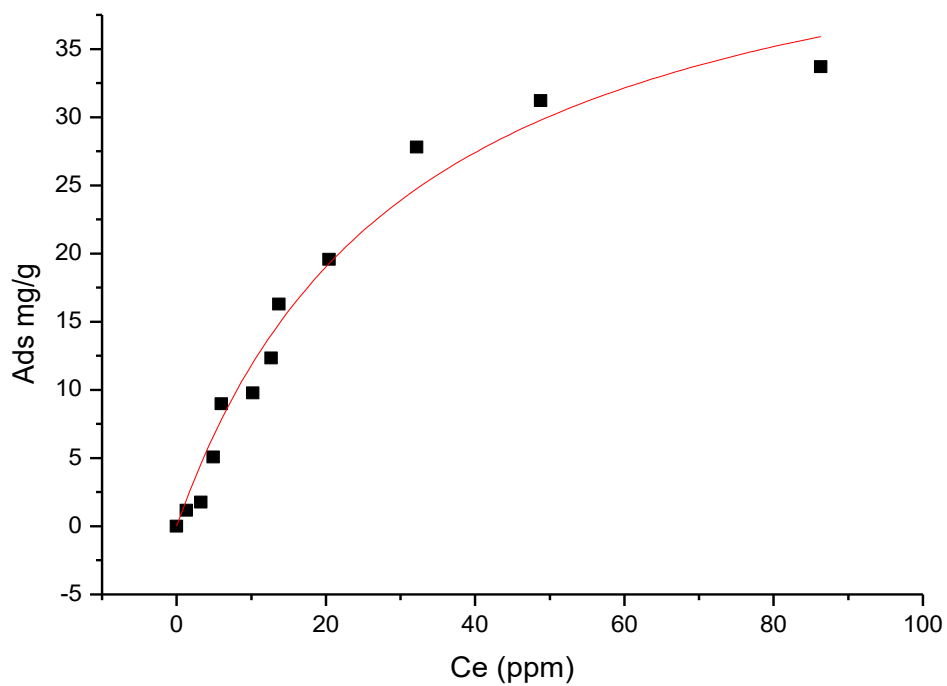
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 2 - CMAP Langmuir do LVAd – 1m



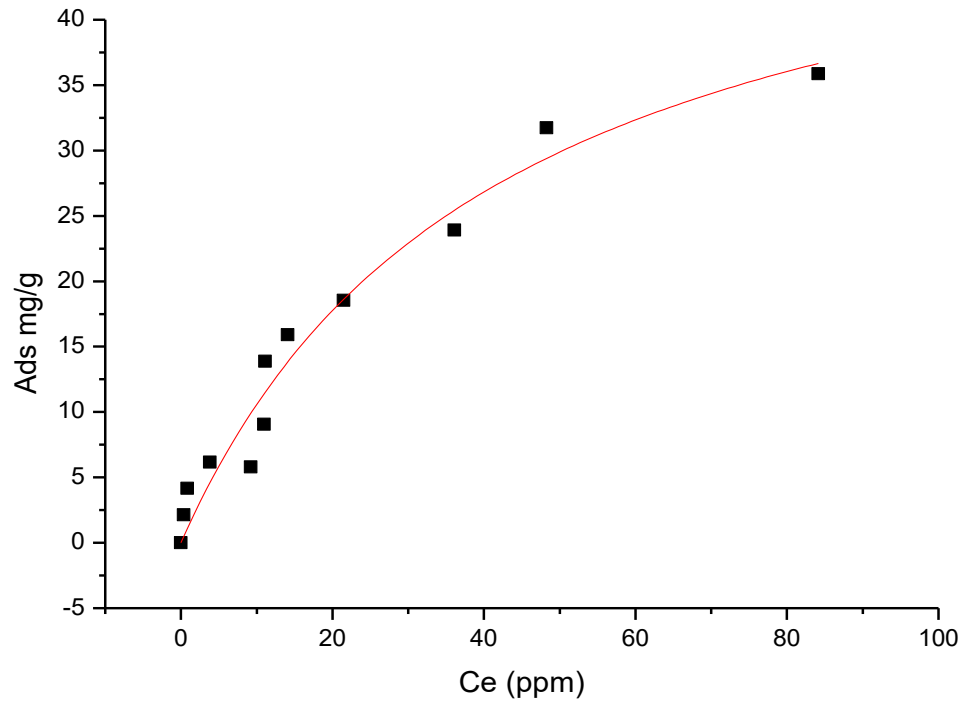
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 3 - CMAP Langmuir do LVdf- 20 cm



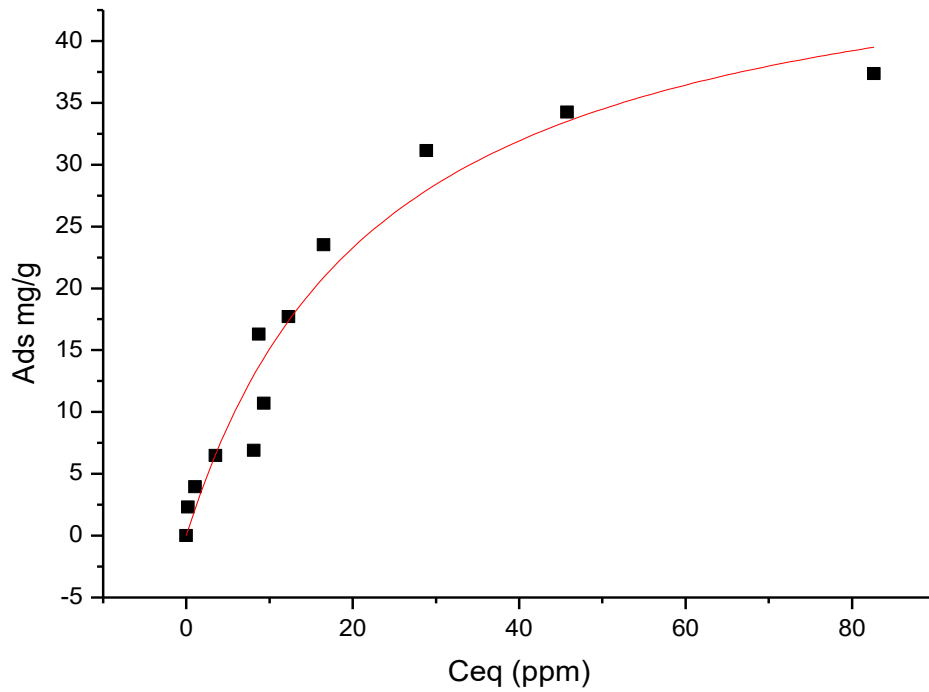
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 4 – CMAP Langmuir do LVdf – 1m



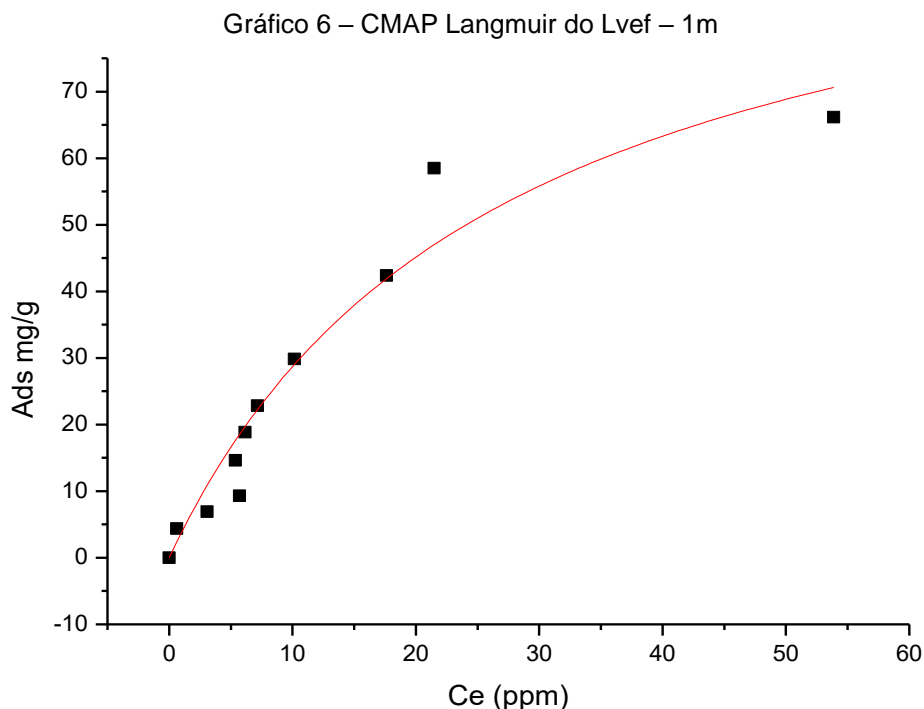
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 5 – CMAP Langmuir do LVef – 20 cm



Fonte: Autoria própria (2019).





Fonte: Autorial própria (2019).

Tabela 5 – CMAP Langmuir das classes de solos estudadas e suas respectivas profundidades

Classes de solos e suas profundidades	CMAP (mg/g)	DP	K	DP	R <sup>2</sup>
LVAAd – 20 cm	110,37	41,81	41,81	0,002	0,97
LVAAd – 1m	70,63	12,21	12,21	0,002	0,98
LVdf – 20 cm	49,08	4,28	4,28	0,006	0,97
LVdf – 1m	54,89	6,81	6,81	0,006	0,96
LVef – 20 cm	50,80	5,31	5,31	0,010	0,95
LVef – 1m	105,87	16,32	16,32	0,010	0,94

Fonte: Autorial própria (2019).

A CMAP variou entre 49,08 mg/g na classe de solo LVdf na profundidade de 20 cm, e 110,37 na classe de solo LVAAd na profundidade 20 cm.

A isoterma de Langmuir ajustou, com altos coeficientes de correlação, com média dos valores de R<sup>2</sup> de 0,96 de todas isotermas que foram estudadas neste trabalho.

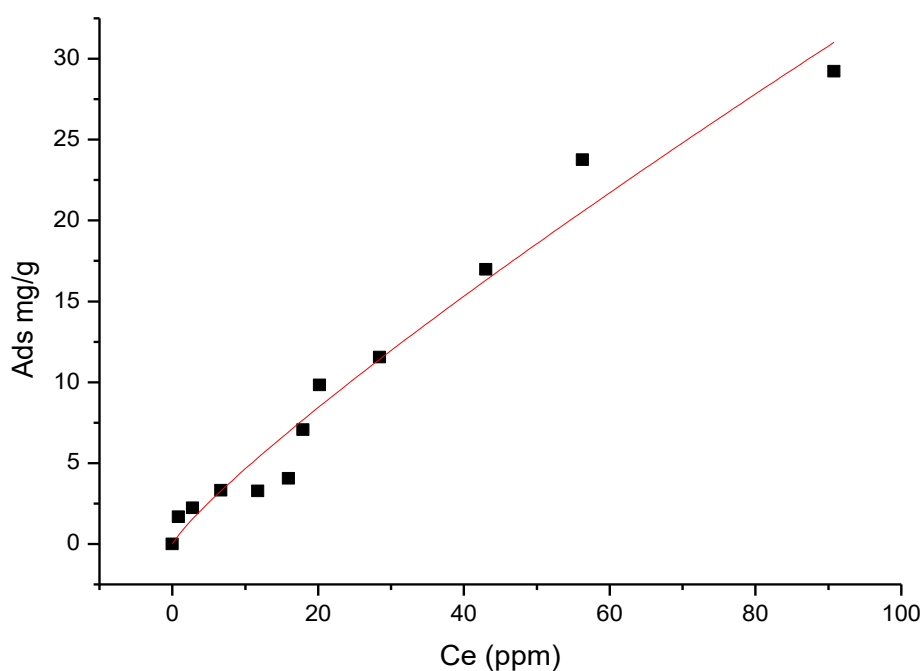
Segundo a literatura a goethita tem sido considerada como o principal componente da fração argila responsável pela adsorção de P em solo no Brasil, A influência da substituição isomórfica de Fe por Al e da maior superfície específica da goethita sobre o fenômeno de adsorção de P também tem sido citada na literatura, bem como efeito de morfologia dos cristais (SOUZA et. al., 2006). O solo que apresentou maior valor de CMAP foi a classe de solo LVAAd que tem maior concentração de goethita.

Os solos originados de basalto possuem maior capacidade máxima de adsorção de fósforo, porque apresentam normalmente altos teores de argila e maiores conteúdos de óxidos de ferro e alumínio (hematita e goethita, respectivamente). Também verificando na literatura que aumentando os teores de argila ocorre o aumento da capacidade máxima de adsorção de fósforo em solos (RICHART, et. al., 2006). Por isso o solo LVef teve uma maior capacidade máxima de adsorção de fósforo em relação ao LVdf por ser um solo mais argiloso. O fato do LVef – 1m adsorver mais P do que o a 20 cm, pode ser explicado por no LVef – 1m ter pouca quantidade de matéria orgânica em relação ao LVef – 20 cm (Tabela 4), já que a matéria orgânica presente no solo, ela pode adsorver indiretamente o P pela formação de pontes de cátions com o Al, Fe e Ca adsorvidos a ela (pois a matéria orgânica é um ligante e não adsorve o P diretamente) (BOITT, 2014).

### 5.2.2 ISOTERMA DE FREUNDLICH

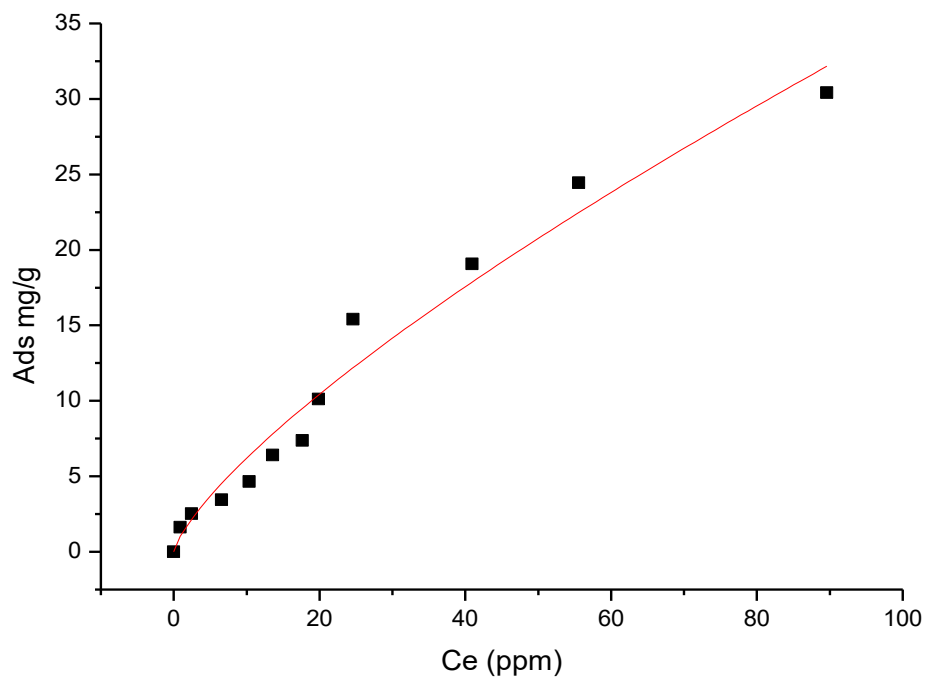
Os resultados de adsorção de P da solução pelo solo, são apresentados através da isoterma de Freundlich e estão evidenciados nos Gráficos 7, 8, 9, 10, 11 e 12, em mg de P por grama de adsorvente. E organizados na Tabela 6.

Gráfico 7- CMAP Freundlich do LVAd – 20cm



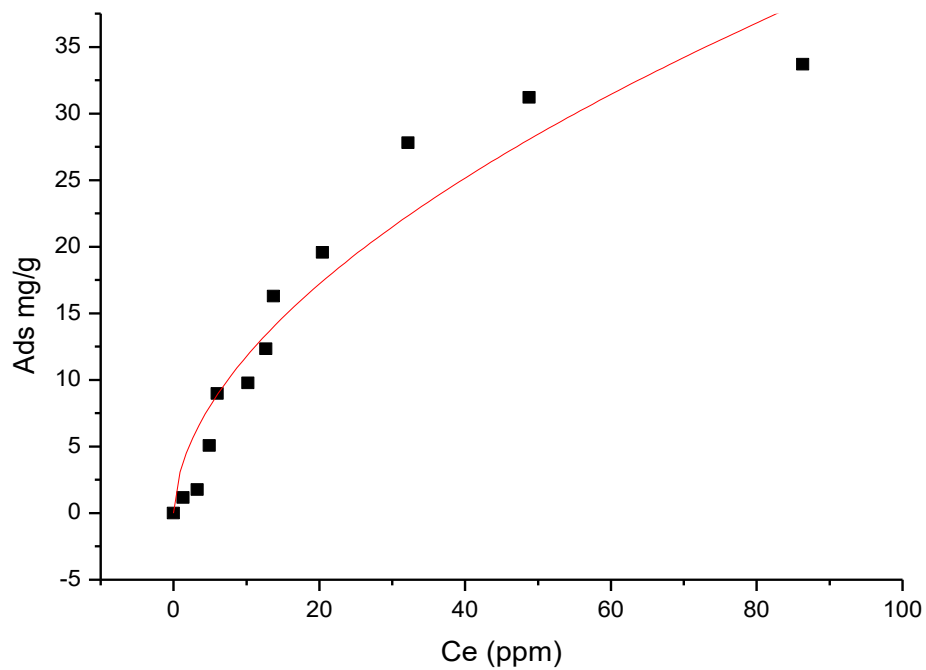
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 8- CMAP Freundlich do LVAd – 1m



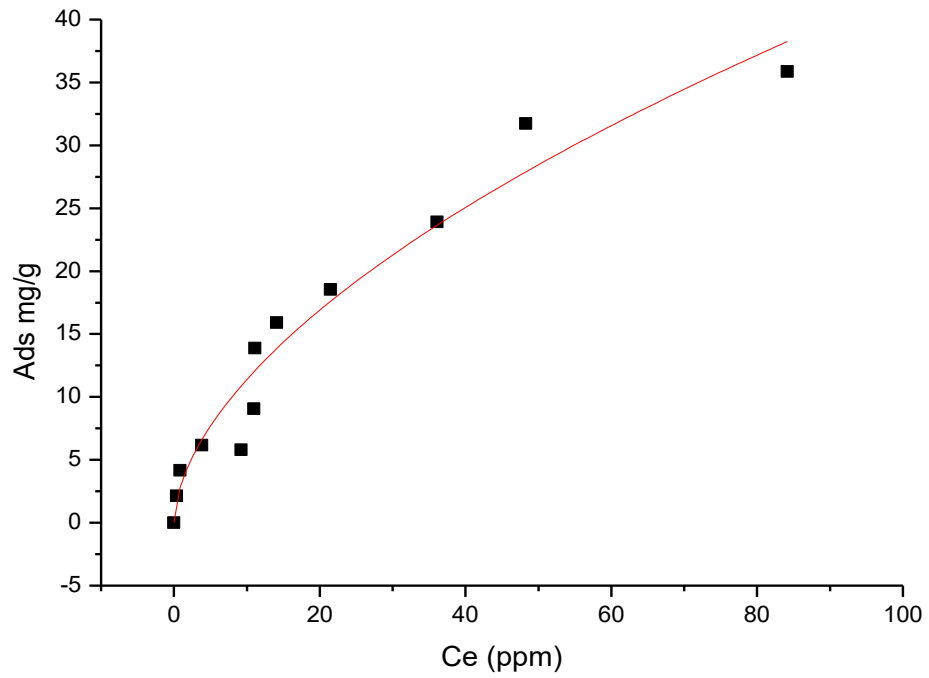
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 9- CMAP Freundlich do LVdf – 20cm



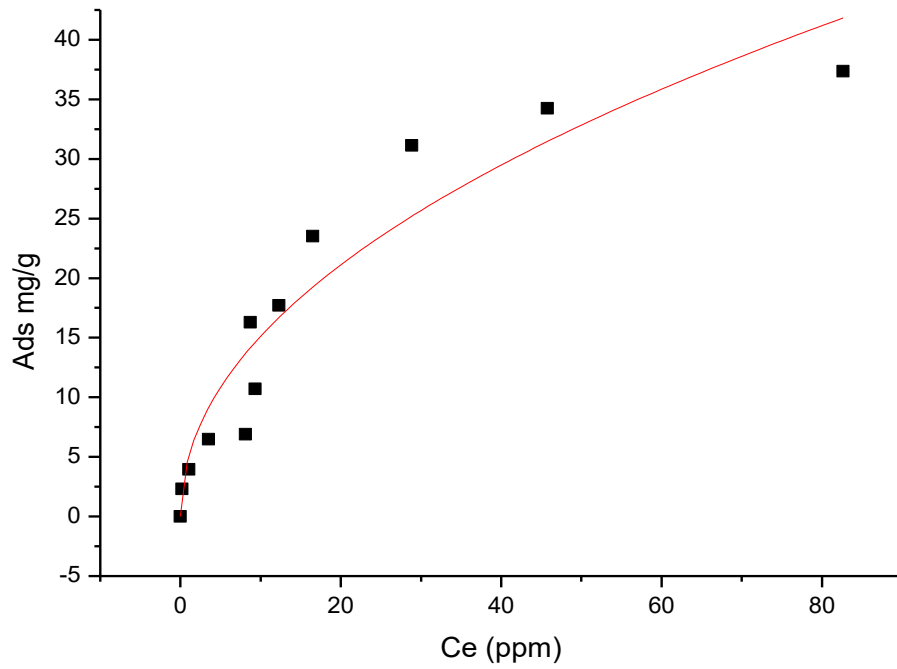
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 10- CMAP Freundlich do LVdf – 1m



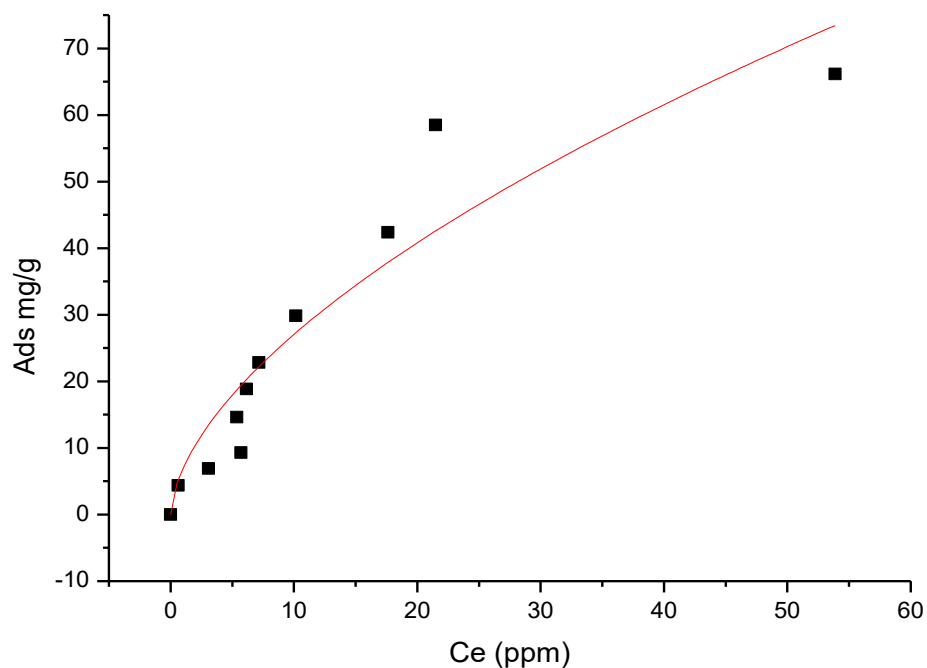
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 11- CMAP Freundlich do LVef – 20cm



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 12- CMAP Freundlich do LVef – 1m



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 6 – CMAP Freundlich das classes de solos estudadas e suas respectivas profundidades

<b>Classes de solos e suas profundidades</b>	<b>K</b>	<b>DP</b>	<b>N</b>	<b>DP</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
LVA <sub>d</sub> – 20 cm	0,64	0,18	1,16	0,1	0,96
LVA <sub>d</sub> – 1m	1,10	0,24	1,33	0,1	0,97
LV <sub>d</sub> <sub>f</sub> – 20 cm	3,32	0,81	1,80	0,22	0,92
LV <sub>d</sub> <sub>f</sub> – 1m	3,07	0,62	1,76	0,16	0,95
LV <sub>e</sub> <sub>f</sub> – 20 cm	4,99	1,15	2,07	0,27	0,91
LV <sub>e</sub> <sub>f</sub> – 1m	6,91	1,87	1,69	0,23	0,89

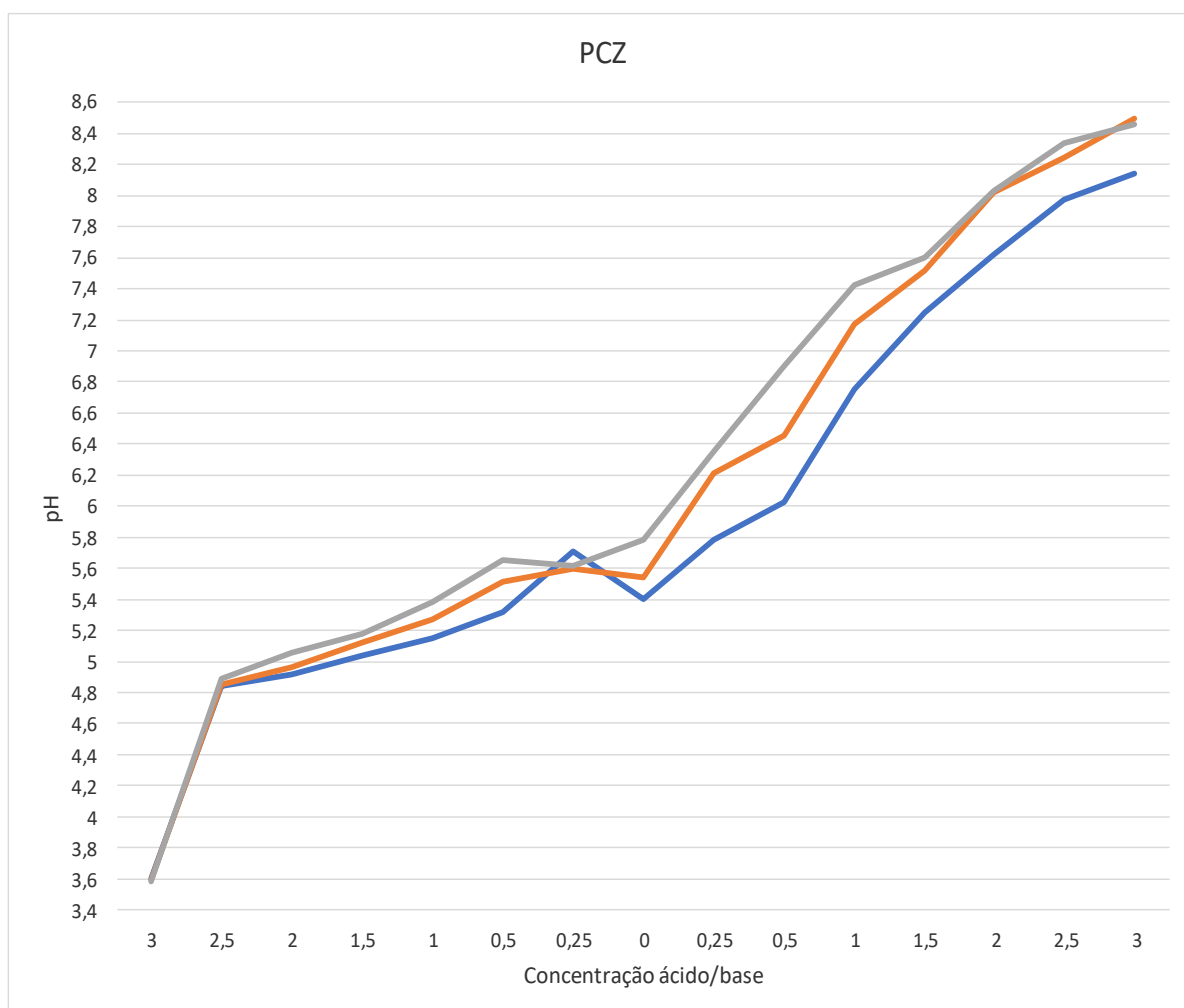
Fonte: Autoria própria (2019).

Tanto para a equação de Langmuir como para a de Freundlich, conseguiram-se ajustes satisfatórios, com valores de  $R^2$  acima de 0,89. Entretanto a isoterma de Freundlich ajustou, com coeficientes de correlação inferiores aos do Langmuir, com média dos valores de  $R^2$  de 0,93 de todas isotermas que foram estudadas neste trabalho. Com isso pode constatar que a isoterma de Langmuir para este trabalho foi mais satisfatória.

### 5.3 PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)

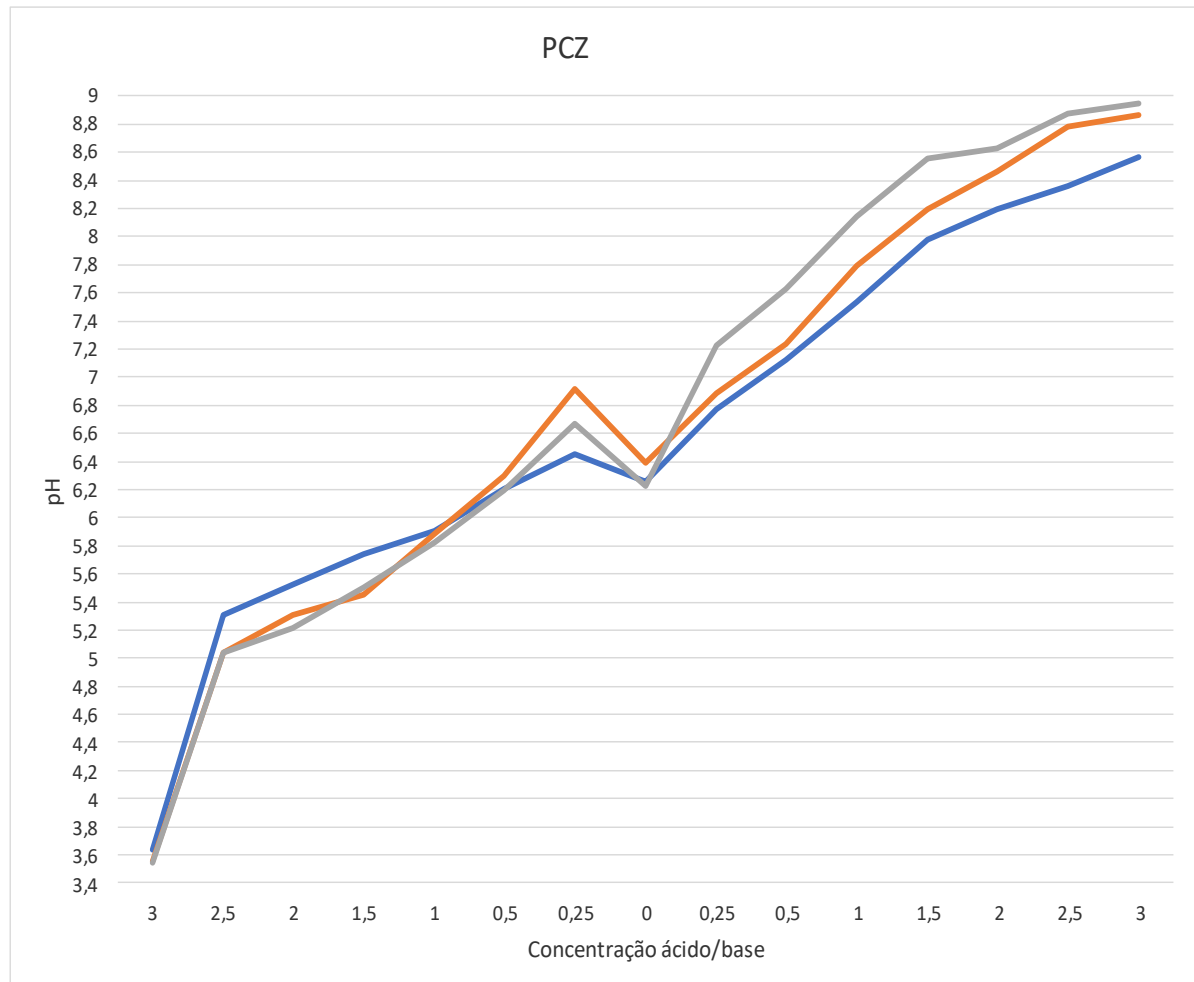
Os valores PCZ corresponde ao ponto em que o pH em que a adsorção de íons determinantes de potencial ( $H^+$  e  $OH^-$ ) é igual. (PÉREZ; CAMPOS; TEIXEIRA, 2017). Nos Gráficos 13, 14, 15, 16, 17, e 18 apresenta a relação entre o pH inicial e o final das soluções. A partir daí é possível se calcular o ponto de carga zero, que é o ponto de cruzamento entre essas diferentes curvas eletrolíticas. dos pontos que o pH final se mantêm constante.

Gráfico 13 - PCZ em L<sub>Vef</sub> – 20cm



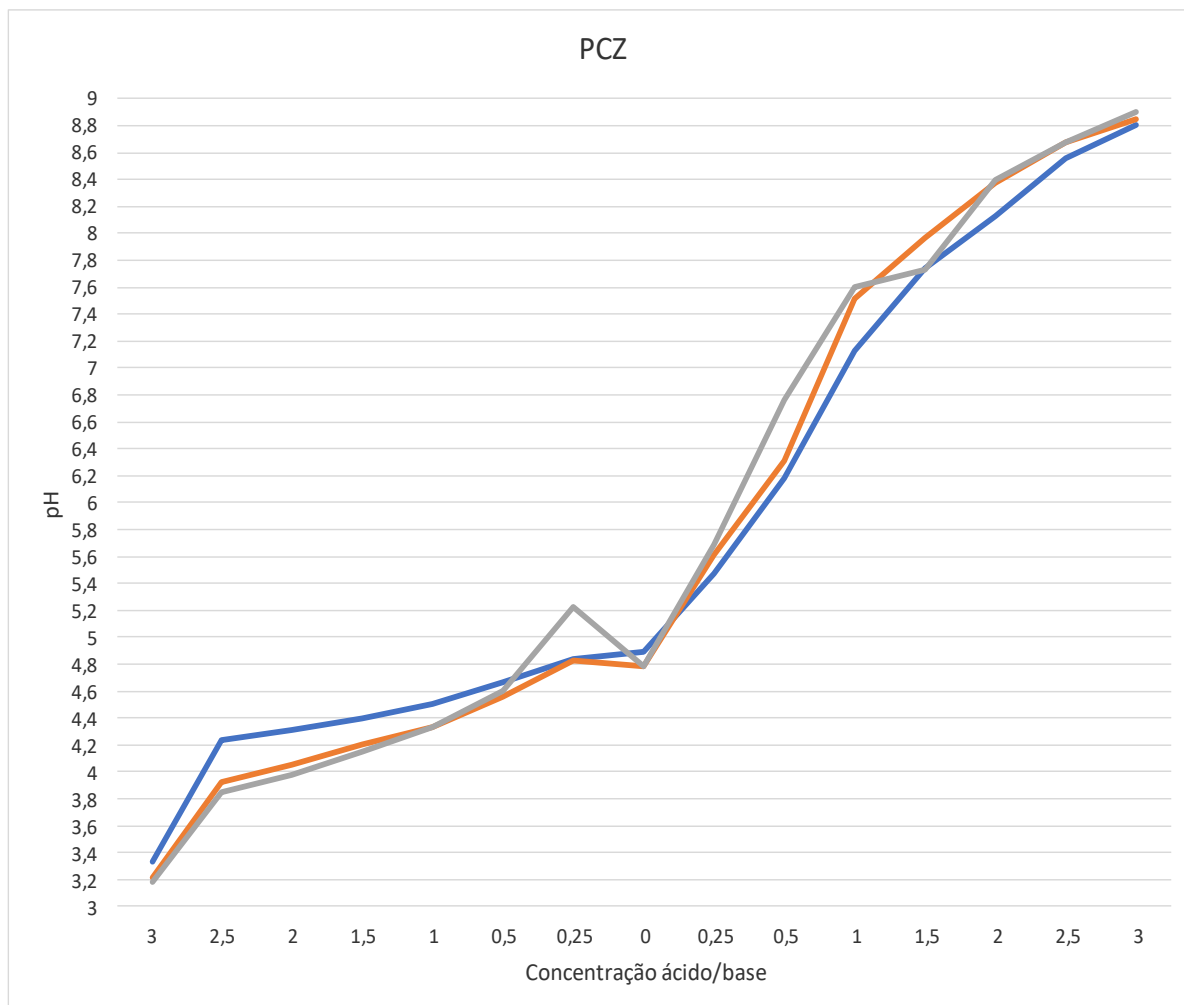
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 14 - PCZ em LVeF – 1m



Fonte: Autoria própria (2019).

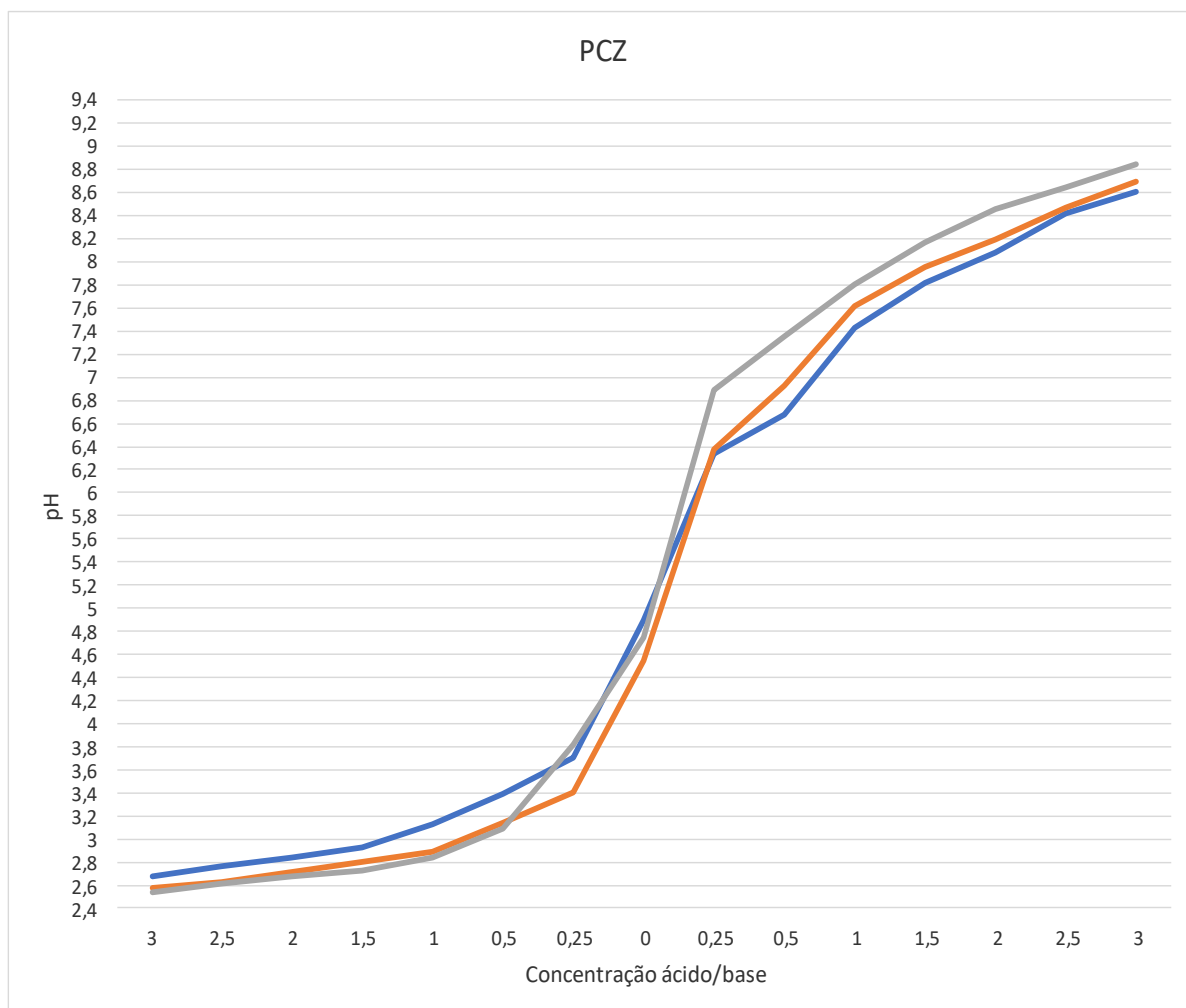
Gráfico 15 - PCZ em LVdf – 20 cm



Fonte: Autoria própria (2019).

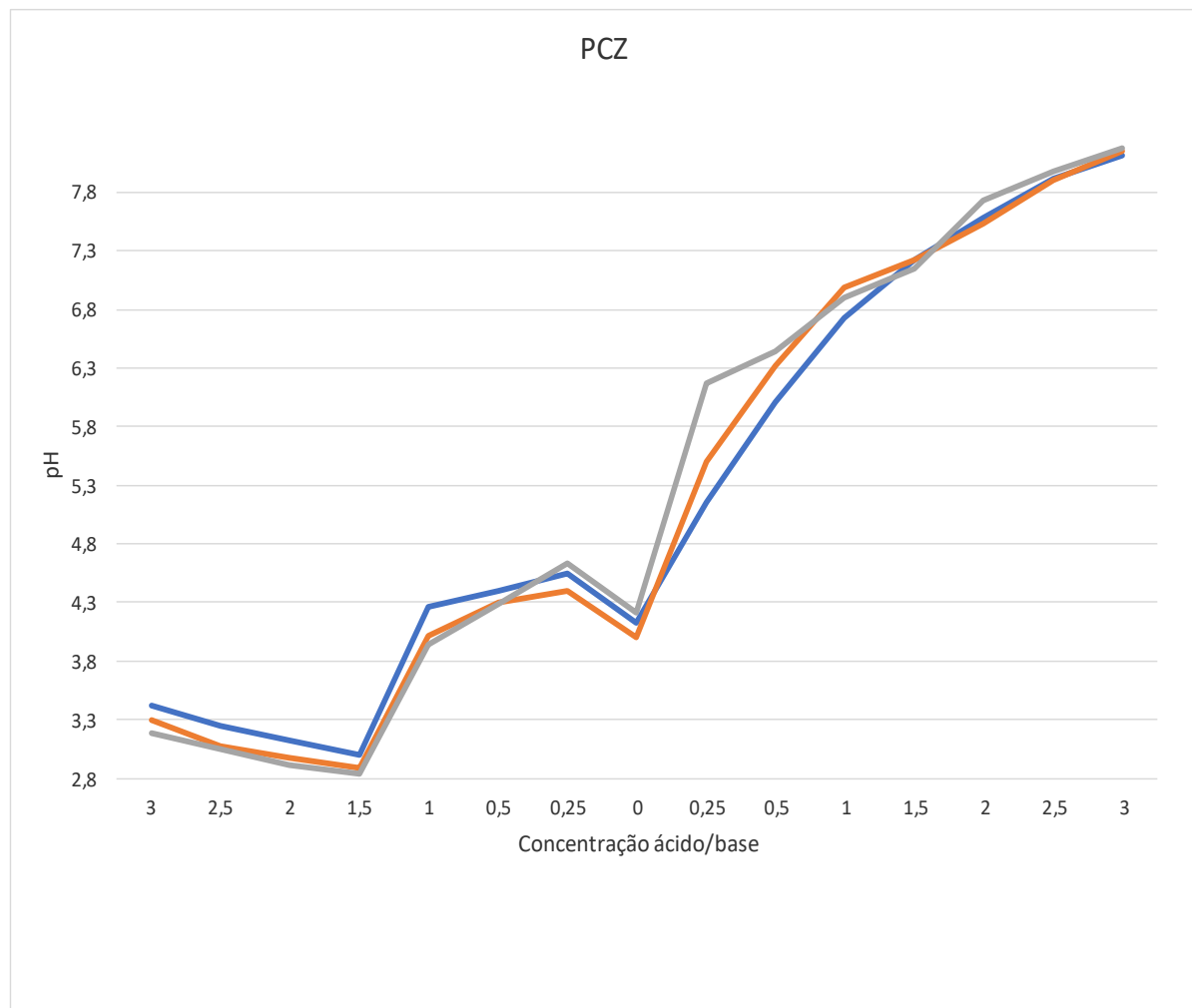


Gráfico 16 - PCZ em LVdf – 1m



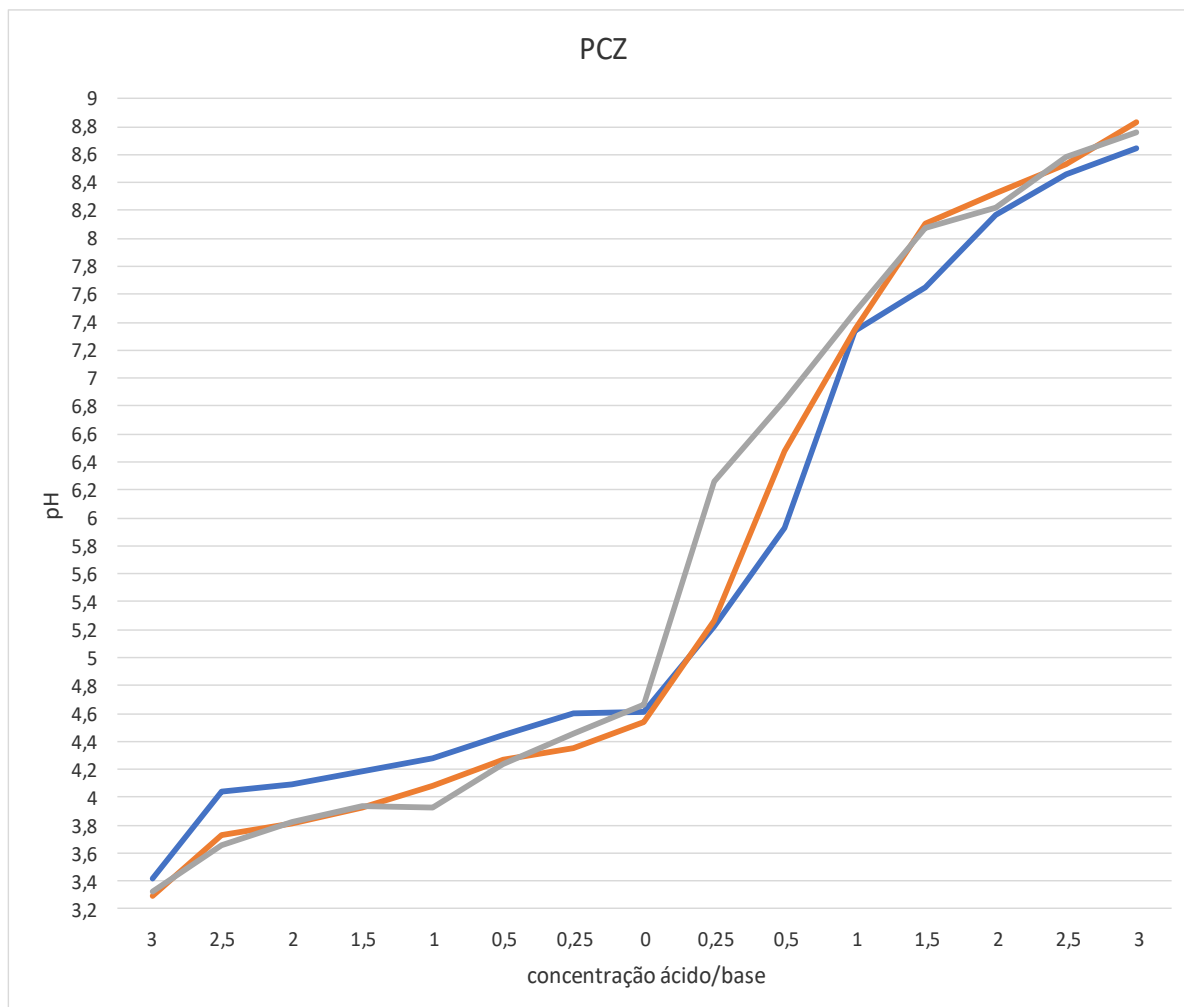
Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 17 - PCZ em LVAd – 20 cm



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 18 - LVAd – 1m



Fonte: Aatoria própria (2019).

Os valores encontrados para os adsorventes utilizados encontram-se na Tabela 7:

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de determinação PCZ

Classes de solos	PCZ
LVef – 20cm	5,6
LVef – 1m	6,0
LVdf – 20cm	5,2
LVdf – 1m	5,4
LVAd – 20cm	5,08
LVAd – 1m	4,6

Fonte: Aatoria própria (2019).

Os valores determinados para o PCZ das amostras estudadas variaram de 4,6 a 6,0 (Tabela 6). Variando de 5,29 a 20 cm e 5,33 a 1m, e de se esperar que o

PCZ aumente em profundidade, pois a matéria orgânica é um fator que ajuda a manter cargas negativas no solo. Segundo a literatura demonstram que, em um perfil latossólico com mineralogia predominantemente oxídica, o horizonte A apresenta potencial elétrico negativo, provavelmente pela presença de matéria orgânica. O potencial elétrico torna-se eletropositivo, à medida que se aprofunda no perfil, atingindo o que esses autores denominam de domínio oxídico (BENITES; MEDONÇA, 1998).

O valor de PCZ está um pouco acima aos obtidos pela literatura em Latossolos (entre 3,6 e 4,6), semelhante ao da caulinita (4,6) e gibbsita (5,1), e inferior aos da Goethita (6,4). A diminuição dos teores de matéria orgânica pode ter influenciado de duas maneiras o aumento do PCZ do solo: (a) pela diminuição do número de grupos carboxílicos, que são os principais responsáveis pelas cargas negativas da matéria orgânica, e (b) pela diminuição na adsorção específica de ânions orgânicos. A adsorção específica de Ca e Mg, através de complexos de esfera interna, que ocorre com a elevação do pH, incorpora cargas positivas às superfícies sólidas do solo, diminuindo com isso a carga líquida negativa, com reflexos no aumento do PCZ (ALBUQUERQUE ET AL., 2000).

#### 5.4 FÓSFORO REMANESCENTE

A determinação de Fósforo remanescente (P – rem), que significa a quantidade de P adicionado que fica na solução de equilíbrio após definido tempo de contato com o solo, tem como objetivo estimar o nível crítico de P-disponível e a declividade do P-disponível com função do P adicionado no solo (LABORSOLO, 2013).

Está análise foi realizada em triplicata, os resultados estão evidenciados na Tabela 7 abaixo, que são as médias dos resultados de P – rem, desvio padrão ( $\sigma$ ), coeficiente de variação (C.V), nível crítico de fósforo (NCP), e o fósforo relativo (PR), para cada classe de solo em estudo.

Tabela 6 - P – rem,  $\sigma$ , C.V, NCP, e PR, para cada classe de solo em estudo

Classes de solo	P – rem (mg/dm <sup>3</sup> )	$\sigma$	C.V (%)	NCP (mg/dm <sup>3</sup> )	PR (%)
Lvef – 20cm	5,36	0,49	9,18	6,41	63,8
LVef – 1m	1,38	0,13	9,73	5,07	20,85

<b>LVdf – 20cm</b>	8,50	0,70	8,20	7,50	31,6
<b>LVdf – 1m</b>	1,88	0,16	8,73	5,24	0,00
<b>LVAd – 20cm</b>	6,06	0,49	8,13	6,65	17,13
<b>LVAd – 1m</b>	5,60	0,16	2,93	6,49	0,00

Fonte: Autoria própria (2019).

O maior valor de PR foi para a classe de solo LVef – 20 cm, e LVdf – 20 cm que são também os que tiveram a menor relação CMAP (tabela 5), e tiveram o maior valor de M.O (tabela 4). Segundo a literatura quanto maior o PR, menor é a adsorção de fósforo no solo, isso se verifica quanto for a quantidade de matéria orgânica no solo. A remoção de matéria orgânica no solo provoca uma exposição de cargas positivas que adsorvem os fosfatos, diminuindo a concentração de P na solução de equilíbrio (BRAGA, 2012).

Segundo a literatura apenas o LVef – 20 cm é classificado como baixa para a disponibilidade de P, os outros são classificados como muito baixa (BRAGA, 2012), o que não é uma resposta favorável, já que se trata de locais que realizam a cultura de plantas, e o P é essencial para o crescimento saudável delas.

## 6 CONCLUSÕES

A acidez potencial (AL+H) não apresenta valores suficientes para o caráter alumínico, entretanto, os valores encontrados são considerados altos para solos agricultáveis. Foi determinado pH em KCl muito baixo nos solos, variando entre 4,35 e 5,18. Com isso, a saturação por bases natural também foi reduzida, sendo o mínimo de 4,12%. A Matéria orgânica no solo variou de 8,59 a 32,93 gdm<sup>-3</sup> tendo uma maior concentração nas áreas superficiais.

Os valores de CMAP variou de 49,08 a 110,37 (mg/g), tendo uma maior relação CMAP para as classes de solo LVAd.

O PCZ variou de 4,6 a 5,0, sendo os valores semelhantes ao da gibbsita e caulinita e inferior ao da Goethita. Sendo que na classe de solo mais subsuperficial teve um maior valor de PCZ.

Os valores de p-rem a maioria foram classificados como muito baixo, e apenas o LVef na profundidade de 20 cm, foi classificado como baixo.

Com isso, pode-se concluir, que solos com maior quantidade de matéria orgânica, tem uma menor capacidade máxima de adsorção de fósforo, o que conseqüentemente vai ter maior quantidade de fósforo disponível para as plantas, e que todas as classes de solo em estudo, teve pouca quantidade de fósforo disponível para as culturas, o que faz com que os produtores agrícolas usem uma grande quantidade de adubo fosfatados, que trazem grandes riscos e danos ao meio ambiente, o que torna fundamental o estudo química e de relação CMAP no solo, afim de evitar o uso exagerado de produtos agrícolas, que pode ocasionar em diversos impactos ambientais, como a contaminação de lençóis freáticos, e corpos hídricos superficiais por meio da percolação e lixiviação.

## REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, C. C.; SUMNER, M. E.; HURST, V.J. Effect of aluminum substitution in goethite on phosphorus adsorption: I. Adsorption and isotopic exchange. *Soil Science Society American Journal*, v. 49, p. 1142-1149, 1985.
- ALBUQUERQUE, J. A., Bayer, C., Ernani, P. R., & Fontana, E. C. (2000). Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(2), 295-300.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C. Isotermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. *Scientia Agrícola*, v. 55, n. 3, p. 379-387, 1998.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. XII - ELETROQUÍMICA, ADSORÇÃO E TROCA IÔNICA NO SOLO. In: FREITAS, Vander de; ALLEONI, Luís Reynaldo F. *Química e Mineralogia do Solo: Parte II - Aplicações*. Viçosa - Mg: SbcS, 2009. p. 70-129.
- ALMEIDA, E. P. C.; SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. *Árvore do Conhecimento: Solos tropicais*. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000g05ip3qr02wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000g05ip3qr02wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html)>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- ANDIA, J. P. M. Remoção de boro de águas e efluentes de petróleo por adsorção. 2009. Tese de Doutorado. PUC-Rio.
- ARAÚJO, A. L. P. et al. Estudo termodinâmico da adsorção de zinco em argila bentonita bofe calcinada. *Scientia plena*, v. 5, n. 12, 2009.
- BARROW, N. J. The description of phosphorus adsorption curves. *Journal of Soil Science*, online, v.29, p. 447-462, 1978.
- BENITES, V. M., & Mendonça, E. S. (1998). Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(2), 215-221.
- BOITT, Gustavo. **MINERALOGIA E DISTRIBUIÇÃO DAS FORMAS DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS COM DIFERENTES GRAUS DE INTEMPERISMO**. 2014. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, Lages, 2014.
- BORGES, Sílvia Z.. **Manejar a matéria orgânica do solo é manejar a qualidade do sistema do solo**. 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/19773148/manejar-a-materia-organica-do-solo-e-manejar-a-qualidade-do-sistema-do-solo>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

BRAGA, Gastão Ney Monte. Fósforo Remanescente, Nível Crítico, Fósforo Relativo. 2012. Disponível em: <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2012/03/fosforo-remanescente-nivel-critico.html>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

CASAGRANDE, J. C. et al. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 1, p. 51-59, 2003.

CONCEIÇÃO, Iara Generosa da; JARDIM, Andreia Nunes de Oliveira. **O alumínio no solo do Cerrado**. 2019. Disponível em: <<http://www.sbpnet.org.br/livro/63ra/resumos/resumos/5301.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

CORRÊA, J. Carlos. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, n. 2, p. 203-209, 2002.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. VIII - ÓXIDOS DE FERRO. In: FREITAS, Vander de; ALLEONI, L. R. F. Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos. Maringá, Pr e Columbus, Oh: Sbc, 2009. p. 506-572.

EMATER-MG; EPAMIG; IMA. PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO MINEIRO 2017 A 2027. 3. ed. Belo - Horizonte: Seapa, 2017.

EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CNPS, 1997.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CNPS, 2006.

FEY, Angela. Quais são os efeitos nocivos do fosfato para o meio ambiente? 2017. Disponível em: <<http://www.bioblog.com.br/quais-sao-os-efeitos-nocivos-do-fosfato-para-o-meio-ambiente/>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

FÓSFORO. São Paulo - Sp: Nutrição de Safras, 2014. Disponível em: <<https://www.nutricaoadesafras.com.br/fosforo#overview>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

FÓSFORO E SUA IMPORTÂNCIA. Mogi Mirim - Sp: Pompéia Rural, 01 set. 2016. Disponível em: <<https://pompeiarural.com.br/fosforo-e-sua-importancia/>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

GRANT, C. A.; et al. IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DA PLANTA. Informações Agronômicas. Piracicaba - Sp, p. 1-55. set. 2001. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/43C5E32F5587415C83257AA30063E620/\\$FILE/Page1-5-95.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/43C5E32F5587415C83257AA30063E620/$FILE/Page1-5-95.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2019.

GHIDIN, A. A.; et al. Toposseqüências de latossolos originados de rochas basálticas no paraná. II-Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 2, 2006.

KAMPF, N. C. N. IX - ÓXIDOS DE ALUMÍNIO, SILÍCIO, MANGANÊS E TITÂNIO. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luís Reynaldo F.; MARQUES, João José.



Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos. Porto Alegre, Rs e Lavras, Mg: SbcS, 2009. p. 574-610.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. Revista Geonomos, v. 5, n. 1, 1997.

KUMMER, L. Remediação de solos contaminados por metais pesados usando biossurfactante produzido a partir de resíduo agroindustrial. 2014.

LABORSOLO. Conhecendo os solos brasileiros: Latossolos. Disponível em: <<https://www.laborsolo.com.br/analise-quimica-de-solo/conhecendo-os-solos-brasileiros-latossolos/>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

LABORSOLO. Determinação e uso do fósforo remanescente (P-rem). 2013. Disponível em: <<https://www.laborsolo.com.br/analise-quimica-de-solo/determinacao-e-uso-do-fosforo-remanescente-p-rem/>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

LINHARES, Lucília Alves et al. Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. Acta Agronômica, v. 59, n. 3, p. 303315, 2010

LOPES, M. A. Fósforo é nutriente vital e finito para a agricultura, diz engenheiro agrônomo. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/noticia/2018/11/fosforo-e-nutriente-vital-e-finito-para-agricultura-diz-engenheiro-agronomo.html>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

MELO, V. de F.; WYPYCH, F. VII - CAULINITA E HALOISITA. In: MELO, Vander de Freitas; ALLEONIV, Luís Reynaldo F. Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos Básicos. Curitiba: SbcS, 2009. p. 428-504.

NASCIMENTO, R. F.; et al. Adsorção: aspectos teóricos e ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLSEN, Sterling R.; WATANABE, Frank S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. Soil Science Society of America Journal, v. 21, n. 2, p. 144-149, 1957.

PÉREZ, Daniel Vidal; CAMPOS, David Vilas Boas de; TEIXEIRA, Paulo César. PONTO DE CARGA ZERO (PCZ). In: TEIXEIRA, Paulo César et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017. p. 4-9.

PIERANGELI, Maria Aparecida Pereira et al. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, n. 4, p. 819-826, 2007.

RAIJ, B. van. et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001.

RÍCHART, Alfredo et al. CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO PARA QUATRO SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ. In: FERTBIO2006, 5., 2006, Bonito. **SBCS**. Bonito: Alice, 2006. p. 1 - 4.

ROLIM N., F. C.; et al. Topolitossequências de solos do Alto Paranaíba: atributos físicos, químicos e mineralógicos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 6, 2009.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. ÁRVORE DO CONHECIMENTO Solos Tropicais. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG01\\_11\\_2212200611540.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_11_2212200611540.html)>. Acesso em: 13 fev. 2019.

SILVEIRA, Eduardo Marques; MORETTI, Patrícia Inagué; CASTANHO, Roberto Barboza. A produção agropecuária do município Capinópolis/MG nos anos de 1990, 200, 2010, 2011 e 2012: uma análise com auxílio de produtos cartográficos. In: VII - CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, VII., 2014, Vitória - Es. **Anais**. Vitória - Es: Agb, 2014. p. 1 - 12.

SOUSA, D. M. G.; L., E. Latossolos. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_96\\_10112005101956.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html)>. Acesso em: 13 fev. 2019.

SOUZA, Renato Ferreira de et al. CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA: INFLUÊNCIA NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Lavras - Mg, v. 1, n. 30, p.975-983, nov. 2006.

SOUZA, Z. M.; et al. Variabilidade espacial de fatores de erosão em Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola, p. 105-114, 2005.

VILAR, C. C. Interação entre atributos físicos, químicos e mineralógicos com a capacidade máxima de adsorção de fósforo e chumbo de amostras do horizonte A e B de Latossolos do Estado do Paraná tratadas com calcário e fosfato. 2010. 142p. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

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, n. 4, 2010.

VILAR, C. C., et al. **Fósforo no solo e eficiência de utilização pelas plantas**. Disponível em: <[www.diadecampo.com.br](http://www.diadecampo.com.br)>. Acesso em: 11 jun. 2019.

VINHAL-FREITAS, I. C.; et al. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. Agropecuária técnica, v. 31, n. 2, p. 155-163, 2010.