



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO PROF<sup>a</sup> CINOBELINA ELVAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**



**GABRIEL DOS SANTOS DA CRUZ**

# **DINÂMICA DO FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DO CERRADO PIAUIENSE**

**Bom Jesus - PI**

**2020**

**GABRIEL DOS SANTOS DA CRUZ**

**DINÂMICA DO FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DO CERRADO PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí, Campus Prof<sup>a</sup> Cinobelina Elvas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Cácio Luiz Boechat

Coorientadora: Ruthanna Isabelle de Oliveira

**Bom Jesus - PI**

**2020**

FICHA CATALOGRÁFICA

Universidade Federal do Piauí

Biblioteca Setorial de Bom Jesus

Serviço de Processamento Técnico

C957d Cruz, Gabriel dos Santos da.

Dinâmica do fósforo inorgânico em solos do cerrado piauiense.  
/ Gabriel dos Santos da Cruz. – 2020.

78 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,  
Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-Graduação  
em Agronomia, Bom Jesus – PI, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat

**GABRIEL DOS SANTOS DA CRUZ**

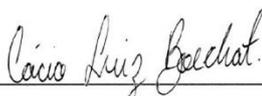
**DINÂMICA DO FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DO CERRADO  
PIAUIENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí, Campus Profª Cinobelina Elvas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

**Área de Concentração: Ciência do Solo**

**Aprovada em: 27/07/2020**

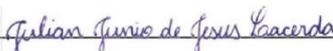
**BANCA EXAMINADORA**



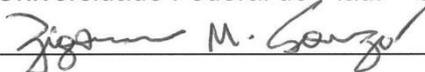
Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat (Orientador)  
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Drª. Ruthanna Isabelle de Oliveira (Coorientadora)  
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Prof. Dr. Julian Junio de Jesus Lacerda  
Universidade Federal do Piauí – UFPI



Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza  
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

**Bom Jesus - PI**

**2020**

Cos meus amados pais,  
Deuziite e João (*in memoriam*), sendo este  
último uma das pessoas que mais me influenciaram, e  
que eu menos convivi  
dedico

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família pelo apoio incondicional.

Aos Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat e Dr<sup>a</sup> Ruthanna Isabelle de Oliveira, pela orientação, ensinamentos e paciência.

Ao Prof. Dr. Julian Junio de Jesus Lacerda, que se mostrou disponível a colaborar com a pesquisa.

Aos laboratoristas Estéfenson Marques Morais e Marcus Vinicius Beserra dos Santos que são exemplos de profissionais em suas áreas e no serviço público.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí que por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (PPGEM-IFPI) por ceder sua infraestrutura para realização de análises.

Ao Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados da Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, por ceder sua infraestrutura para realização de análises.

Ao Grupo de Pesquisa MARS, pois sem a ajuda conjunta não teria obtido êxito no trabalho realizado. Tanto aos presentes como aos predecessores pois foram eles que pavimentaram o caminho para que eu o pudesse percorrer.

Aos meus caros colegas de mestrado, que mesmo em tempos difíceis, em que o valor da ciência é questionado constantemente e os pesquisadores são desvalorizados, mostraram-se fonte inesgotável de apoio, compreensão e de acolhimento.

Ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal do Piauí - PPGSNP/UFPI.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado.

## RESUMO

A dinâmica do fósforo em solos tropicais tem causado prejuízos a produção agrícola em áreas do Cerrado, pois devido as interações desse nutriente com os componentes inorgânicos do solo a sua disponibilidade é limitada. Objetivou-se avaliar a quantidade e a disponibilidade do fósforo; as formas inorgânicas de fósforo no solo, a fração mais retida no solo e identificar a área com maior retenção de fósforo via adsorção dos óxidos em cinco áreas com tempos de uso sob sistema convencional localizadas na Fazenda Emílio, Uruçuí-PI, coordenadas: 07°13'46"S e 44°33'22" W. As amostras de solos foram coletadas em 36 pontos georreferenciados na profundidade de 0,00-0,20 m nas áreas: sob vegetação nativa; com 1 ano de abertura; com 7 anos de cultivo; com 11 anos de cultivo e com 17 anos de cultivo sob sistema de plantio convencional. Em seguida, as amostras foram submetidas a análise química para a determinação do fósforo disponível e ao fracionamento químico sequencial de fósforo inorgânico. Na sequência, foi avaliada a suscetibilidade magnética em alta e baixa frequência e a caracterização química e mineralógica da fração argila por fluorescência e difratometria de raio-X. Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva e análise multivariada. Os maiores teores para o P adsorvido foram observados nas áreas com 1, 7, 11 e 17 anos de uso. A fração P-Al apresentou maiores teores de P adsorvido em quatro das cinco áreas avaliadas, a área com 7 anos de uso apresentou maiores concentrações das frações P-Al e P-Fe, a área com 11 anos de uso teve os maiores valores para a fração P-Ca,  $\chi$ FD e P-Mehlich-1, a SM teve maiores valores na área com 17 anos de uso. As frações de fósforo inorgânico sofreram influência do tempo e manejo empregado nas áreas.

**Palavras-chave:** Sistema convencional. Fracionamento do fósforo. Óxidos de ferro. Óxidos de alumínio.

## ABSTRACT

The dynamics of phosphorus in tropical soils has caused damage to agricultural production in Cerrado areas, because due to the interactions of this nutrient with the inorganic components of the soil, its availability is limited. The objective was to evaluate the quantity and availability of phosphorus; the inorganic forms of phosphorus in the soil, the fraction most retained in the soil and identify the area with the highest phosphorus retention via oxide adsorption in five areas with different times of use located at Fazenda Emílio, Uruçuí-PI, coordinates: 07°13'46 " S and 44°33'22 "W. Soil samples were collected at 36 georeferenced points at a depth of 0.00-0.20 m in each selected area (VN = area of native vegetation; T1 = newly opened area; T7 = area with 7 years of cultivation; T10 = area with 11 years of cultivation; T17 = area with 17 years of cultivation). Then, the samples were subjected to chemical analysis to determine the available phosphorus and sequential chemical fractionation of inorganic phosphorus. Then, the high and low frequency magnetic susceptibility and the chemical and mineralogical characterization of the clay fraction were evaluated by fluorescence and X-ray diffractometry. The data were submitted to descriptive statistical analysis and multivariate analysis. The highest levels for the adsorbed P were observed in areas with 1, 7, 11 and 17 years of use. The P-Al fraction showed the highest content of P adsorbed in four of the five evaluated areas, the area with 7 years of use showed the highest concentrations of the P-Al and P-Fe fractions, the area with 11 years of use had the highest values for the fraction P-Ca,  $\chi$ FD and P-Mehlich-1, SM had higher values in the area with 17 years of use. The inorganic phosphorus fractions were influenced by the time and management used in the areas.

**Keywords:** Conventional system. Phosphorus fractionation. Iron oxides. Aluminum Oxides.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Reações do P no solo.....  | 12 |
| <b>Figura 2</b> - Localização da área de estudo em Uruçuí -PI.....   | 33 |
| <b>Figura 3</b> - Difrátogramas da fração argila dos solos avaliados das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....                                 | 44 |
| <b>Figura 4</b> - Difrátograma conjunto da fração argila dos solos avaliados das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....                         | 45 |
| <b>Figura 5</b> - Frações inorgânicas de fósforo nos solos das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....   | 47 |
| <b>Figura 6</b> - Distribuição percentual das frações de fósforo inorgânico nos pontos de coleta das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....     | 49 |
| <b>Figura 7</b> - Médias percentuais das frações de fósforo inorgânico das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....                               | 52 |
| <b>Figura 8</b> - Heatmap baseado na matriz de correlação das variáveis usando agrupamentos hierárquicos de ligação completa baseados em distâncias euclidianas..... | 56 |
| <b>Figura 9</b> - Gráfico de scores dos componentes 1 e 2 e para os atributos químicos e mineralógicos do solo das áreas agrícolas e vegetação nativa.....           | 61 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> – Histórico das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado avaliadas.....  | 34 |
| <b>Tabela 2</b> – Análise química das amostras de solo das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....   | 36 |
| <b>Tabela 3</b> – Estatística descritiva para os atributos químicos e mineralógicos solos das áreas agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.....                  | 41 |
| <b>Tabela 4</b> – Resultados da caracterização química das amostras de argila por fluorescência de raio-X.....   | 43 |
| <b>Tabela 5</b> – Correlação entre variáveis originais e componentes principais dos atributos químicos e mineralógicos do solo das áreas agrícolas e vegetação nativa..... | 58 |
| <b>Tabela 6</b> – Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos químicos e mineralógicos do solo das áreas agrícolas e vegetação nativa.....                    | 63 |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2</b>   | <b>CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>3</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>3.1</b> | Formas de fósforo no solo.....   | 15        |
| <b>3.2</b> | Uso do solo.....   | 16        |
| <b>3.3</b> | Métodos de avaliação de disponibilidade do fósforo no solo.....                          | 17        |
| <b>3.4</b> | Solos do cerrado.....  | 18        |
| <b>4</b>   | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>5</b>   | <b>CAPÍTULO 2 - FRAÇÕES DE FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DO<br/>CERRADO PIAUIENSE.....</b> | <b>26</b> |

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A quantidade e a disponibilidade de fósforo (P) no solo está diretamente relacionada com os processos pedogenéticos e com o intemperismo. Refletindo na produção agrícola, uma vez que tal elemento é considerado um nutriente essencial e um macronutriente para o desenvolvimento das plantas. Embora, se comparado aos demais, o fósforo (P) é o macronutriente requerido em menores quantidades pelos vegetais (Furtini Neto et al., 2001; Araújo & Santos Júnior, 2009).

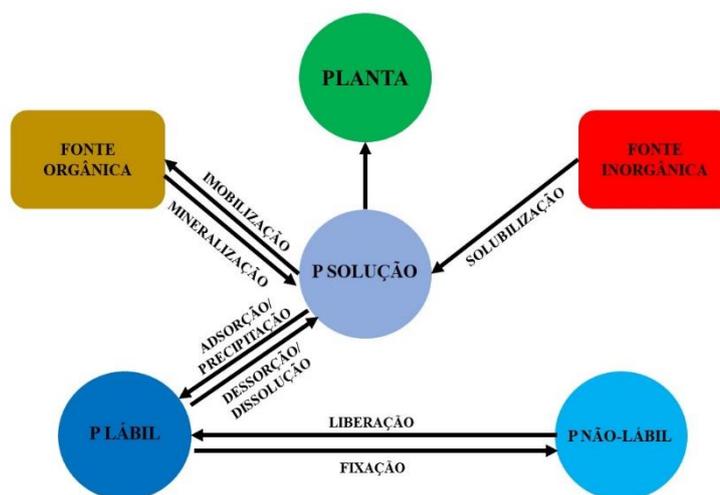
No entanto, este nutriente é deficitário nos solos brasileiros e há uma tendência a reagir com os demais componentes do solo e formar compostos de baixa solubilidade, dessa forma, a adubação fosfatada tem a peculiaridade de ser aplicada com o intuito não apenas de suprir a necessidade nutricional das plantas, mas também as exigências edáficas, resultando na necessidade de grandes quantidades de adubos fosfatados. Atualmente, o gasto econômico brasileiro com adubação fosfatada é potencializado devido a dependência pela importação desse produto, uma vez que tem apenas 1,7% das reservas de rochas fosfáticas mundiais (Usgs, 2009; Yang et al., 2018).

Ainda que haja grandes reservas de minério de fosfato, sendo considerado o décimo segundo elemento químico encontrado em maior abundância na crosta terrestre, aquelas com exploração economicamente viáveis, segundo estimativas, podem ser extinguidas dentre 50 a 100 anos, dessa forma, encarecendo a extração e levando a uma queda na qualidade do produto, tornando o fósforo o segundo nutriente mais limitante da produtividade nos solos tropicais (Schulze, 1989; Gatiboni, 2003; Cordell et al., 2009; Vaccari, 2009).

O teor de fósforo (P) presente nos solos brasileiros, naturais e agrícolas, varia entre  $0,2 \text{ g kg}^{-1}$  e  $0,5 \text{ g kg}^{-1}$ , porém, apenas uma parte desse elemento está acessível para as plantas, pois, o mesmo forma compostos de alta energia de ligação com os colóides, tendo alta estabilidade na fase sólida, a retenção deve-se da precipitação do fósforo (P) com o alumínio (Al), ferro (Fe) e cálcio (Ca), ou ainda, ser adsorvido pelas partículas de argila, MOS e óxidos de Fe e Al (colóides do solo) (Barber, 1984; Resende; Furtini Neto, 2007).

Ainda que o nível de fósforo no solo esteja alto, quando comparado ao requerido pelas plantas, uma fração mínima fica disponível para o uso das mesmas, isso deve-se as várias reações que ocorrem no solo, como mostrado na Figura 1. Para a fração tornar-se biodisponível a ligação com os colóides precisa ser fraca, o que

facilitaria sua dessorção. Pois o fósforo ligado aos colóides (Q) torna-se incapaz de repor o fósforo presente na solução do solo (I), esta relação entra em colapso, resultando num déficit na taxa de absorção das plantas, o que causa a necessidade de aumentar o conteúdo desse elemento no solo (Gatiboni, 2003).



**Figura 1.** Reações do P no solo

Fonte: Adaptado de Novais & Smyth (1999)

No entanto, existem outras variáveis que exercem influência sobre a absorção do fósforo pelas plantas, tais como, espécie cultivada, textura do solo, minerais de argila, acidez do solo, teor de matéria orgânica do solo, doses, fontes, granulometria e forma de aplicação do fertilizante fosfatado e do sistema de preparo do solo (Lacerda, 2011).

O fósforo é recurso natural finito, portanto, há a necessidade de realizar-se pesquisas com o intuito de proporcionar maior conhecimento sobre sua dinâmica no solo, potencializando o seu aproveitamento. Essa dinâmica pode ser melhor compreendida em áreas agrícolas em que se faz uso do sistema de plantio convencional, pois tal sistema proporciona a aceleração da decomposição da matéria orgânica, dificultando a retenção do fósforo pela mesma, o que faz com que o fósforo retido seja em sua maior parte ligado a fração inorgânica do solo. O tempo de uso do solo também é um fator que influencia na retenção do fósforo, pois com o passar do tempo as forças de ligação entre os óxidos e os íons fosfáticos diminuem, fazendo com que o fósforo retido se torne disponível. Com isso, objetivou-se avaliar a

quantidade e a disponibilidade do fósforo inorgânico em cinco áreas com diferentes tempos de uso do solo sob sistema de plantio convencional.

## **2. CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA**

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O fósforo encontrado em qualquer solo é oriundo da ação intempérica do mineral primário apatita, no entanto, apenas 0,1% de todo fósforo no solo encontra-se na solução do solo. Nos solos de uso agrícola os teores de fósforo na solução podem variar entre 0,002 e 2,0 mg L<sup>-1</sup> e esses valores podem ser reduzidos em solos muito intemperizados, uma vez que os mesmos têm predominância de argilominerais 1:1 e óxidos de ferro (Fe) e de alumínio (Al), fazendo o fósforo ser adsorvido com mais força e limitando a disponibilidade para as plantas, estimando-se valores em torno de 2 mg cm<sup>-3</sup> de fósforo adsorvido por esses minerais, o que faz com que o estudos sobre o comportamento do fósforo nesses solos sejam importantes para a compreensão da sua dinâmica (Fardeau 1996; Ker et al., 1996; Stauffer, 2016).

#### 3.1 Formas de fósforo no solo

As formas moleculares de fósforo no solo podem variar sua dinâmica de acordo com tipo de solo, entretanto, este elemento se apresenta basicamente em duas formas, inorgânica (Pi) e orgânica (Po). O fósforo é encontrado ligado aos demais elementos presentes naquele meio, tais como Ca, Fe e Al tornando-se dependente do conteúdo dos mesmos. Outra forma encontrada do fósforo é o P-ocluído, referindo-se a mais fortemente ligada aos minerais do solo, e por fim, ainda apresenta-se como P-H<sub>2</sub>O (disponível), sendo aquela absorvida pelas plantas. Já a fração orgânica se apresenta imobilizada nos tecidos vegetais, microrganismos, fosfoproteínas, ácidos nucleicos, fosfolípidios e, majoritariamente, fosfatos de inositol (Costa, 2019).

No solo, a fração inorgânica (Pi) é encontrada em três formas, sendo elas: P-solúvel - presente na solução do solo; P-lábil - adsorvida nos minerais do solo ou precipitada, no entanto, estando em equilíbrio com o fósforo presente na solução do solo; P-não lábil - na qual a passagem para a solução do solo é lenta, tal forma no Latossolo Vermelho distroférrico pode corresponder entre 49 e 57% do fósforo presente, estando limitado a quantidade de fertilizante fosfatado aplicado no solo (Larsen, 1967; Gatiboni et al., 2007).

A fração orgânica do fósforo, é dividida em quatro formas: fosfatos de inositol, representando de 10% a 80% do fósforo orgânico total (Po-total) encontrado no solo, fosfolípidios representando de 0,5 a 7%, ácidos nucleicos que representam até 3% e outros ésteres fosfato, representando até 5% do Po-total. A fração orgânica do fósforo desempenha funções importantes no meio edáfico, uma vez que são fontes de

carbono e elétrons para os microrganismos, resultando na disponibilidade as plantas pelo processo de mineralização (Santos et al., 2008).

A disposição de P no solo nas formas orgânicas e inorgânicas depende de fatores, como: tipos e as doses dos fertilizantes fosfatados, que já foi comprovado que em Latossolos do Cerrado onde o fósforo aplicado em elevadas concentrações tende a acumular-se na fração inorgânica, por outro lado, em concentrações baixas este acumula-se preferencialmente na fração orgânica; a textura do solo, pois solos mais argilosos a fração orgânica se apresenta de forma mais considerável, no entanto, a medida em que a proporção de argila diminui o comportamento do fósforo torna-se mais independente desse fator (Cardoso et al., 2003; Santos et al., 2008; Partell et al., 2009).

O sistema de manejo também exerce influência sob o fósforo, pois técnicas que buscam conservar as características naturais do solo favorecem a manutenção e o acúmulo do fósforo orgânico e lábil, convertendo parte da fração inorgânica em fósforo orgânico; Outro fator importante é a relação entre a mineralização e a imobilização, uma vez que a matéria orgânica do solo atua como fonte e dreno do fósforo em áreas tropicais (Daroub et al., 2000; Cardoso et al., 2003; Santos et al., 2008; Partell et al., 2009; Ceretta et al., 2010; Lacerda, 2011).

### **3.2 Uso do solo**

Quando se maneja o solo, para qualquer finalidade, corre-se o risco de causar algum tipo de degradação no mesmo, esses riscos são bastante evidenciados em práticas agrícolas, pois utilizadas de forma equivocada, tais práticas deixam o solo susceptível aos processos erosivos, ao aumento da temperatura e a outros impactos prejudiciais que tendem a comprometer a sua qualidade, causando prejuízos ambientais, econômicos e sociais, impactando toda a sociedade a medida que tal problema é negligenciado. Portanto, é necessário práticas de manejo que auxiliem a manutenção da qualidade edáfica dos solos agrícolas, evitando possíveis impactos socioeconômicos e ambientais (Rodrigues et al., 2018).

Quando fala-se em manejo de solo para fins agrícolas refere-se a um aglomerado de técnicas usadas com o intuito de proporcionar condições adequadas para a produção das culturas. Tais técnicas, utilizadas de forma adequada favorecem o aumento da produtividade a baixo custo. Entretanto, quando inadequadas, resultam

na perda da qualidade física, química e biológica do solo, reduzindo o potencial produtivo da área (Embrapa, 2013).

O manejo inadequado do solo é refletido em impactos diretos na receita do produtor, pois a produtividade sofre um déficit à medida que há uma queda da fertilidade do solo gerando gastos extras para recuperar a qualidade do solo como um todo. Esses impactos são mais evidenciados em práticas que revolvem o solo, pois desestruturam o solo, pela ruptura dos agregados, expondo a macrofauna, gerando uma queda no teor de MOS, que estava protegida anteriormente pelos agregados (Loss et al., 2015).

### **3.3 Métodos de avaliação da disponibilidade do fósforo no solo**

Nas análises de rotina realizadas para fins de fertilidade do solo a determinação do fósforo disponível é de suma importância, pois estas visam estimar o conteúdo desse nutriente na solução do solo que se encontra acessível para a planta (Teixeira et al., 2017).

Devido a necessidade de compreender a dinâmica e o comportamento do fósforo no solo foram desenvolvidas diversas metodologias analíticas, que buscam fracionar este elemento de acordo com sua disponibilidade. Com essas metodologias é possível não apenas quantificar as frações de fósforo no solo, mas também, as frações que estão ligadas as superfícies ou espécies químicas específicas (Raij & Feitosa, 1980; Torrent, 2010).

Os pioneiros a desenvolverem uma metodologia de fracionamento de fósforo foram Chang & Jackson (1957), onde se baseia na extração do fósforo ocorrente em diferentes formas e estados de energia utilizando extratores químicos, no entanto, tal método surtia efeito apenas na fração inorgânica, dessa forma, tal metodologia não é considerada completa, pois é de suma importância avaliar por completo todo o conteúdo de fósforo disponível para as plantas (Fixen & Grove, 1990; Lacerda, 2011).

Outra metodologia bastante difundida é a proposta por Hedley et al. (1982), que consiste na adição sequencial de extratores de menor à maior força de extração, contemplando formas orgânicas e inorgânicas de fósforo, esse método consegue extrair o fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po), desde a fração contida na solução do solo (disponível) a fração ligada aos coloides do solo (estável) (Martinez, 2015).

Tal metodologia, acima citada, sofreu diversas adaptações desde a sua publicação, cujo intuito dessas modificações e adequações é tornar a execução

possível em laboratórios com infraestrutura limitada. Exemplificando, temos o caso de Condrón et al. (1985), que na ausência do aparelho de ultrassom demonstraram que é possível fazer a extração utilizando NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> + ultrasonificação por extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

A quantificação das diferentes frações de fósforo dos solos é determinante para inferir sobre a eficiência dos extratores utilizados em laboratórios de rotina para a avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas, assim, relacionando-se de forma positiva com o fósforo absorvido pelas plantas (Souza Júnior et al., 2012).

### **3.4 Solos do Cerrado**

A população mundial tem aumentado substancialmente nos últimos séculos, devido a este aumento surgiu a necessidade de aumentar a produtividade das atuais áreas agrícolas em todo o globo. Dito isso, o Cerrado devido as suas características edáficas, tais como, boas propriedades físicas e com uma favorável topografia à mecanização tornou-se uma das maiores áreas agrícolas do mundo (Novais et al., 2007; Santos et al., 2008).

O Cerrado, ocupa aproximadamente 2.036.448 km<sup>2</sup>, representando 23,92% do território brasileiro, sendo a nível nacional, o segundo maior bioma atrás apenas da Amazônia, estendendo-se do litoral maranhense até o Centro-Oeste (IBGE, 2004).

Os Argissolos, Neossolos e Latossolos são as classes de solo mais facilmente encontradas no Cerrado, sendo predominantemente ocupado por este último. Tais solos, muito intemperizados, com fertilidade natural baixa, acidez alta, sendo constituído em sua maior parte por argilas de baixa atividade (caulinitas e oxihidróxidos de Fe e Al), argilosos, bem estruturados, agregados altamente estáveis, CTC baixa fazendo com que a troca catiônica seja dependente quase que inteiramente da matéria orgânica do solo (Goedert et al., 1980; Sousa & Lobato, 2004; Rossi, 2009).

A alta taxa de fixação do fósforo aos colóides causa as lavouras na região do Cerrado gastos dispendiosos com a adubação fosfatada. A fixação ainda pode variar de acordo com a fonte do elemento usada podendo gerar um aumento nos gastos se levar em consideração o tempo determinado para o retorno do investimento (Sousa et al., 2002).

Nos Latossolos, o fósforo se apresenta em maior quantidade na sua forma inorgânica ligada a fração mineral altamente adsorvido, já a fração orgânica, entrada

em menor quantidade nesse tipo de solo, encontra-se estabilizada química e fisicamente e apenas 0,1% encontra-se na solução do solo disponível para as plantas (Fardeau, 1996; Rheinheimer et al., 2008).

#### 4. REFERÊNCIAS

Anjos LHC, Pereira MG, Pérez DV, Ramos DP. Caracterização e classificação de plintossolos no Município de Pinheiro-MA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 1035-1044, 2007.

Araújo FF, Santos Júnior JD. Desenvolvimento e nutrição de milho em solo degradado biofertilizado com fosfato natural, enxofre e *Acidithiobacillus*. *Revista Caatinga*, 22: 98-103, 2009.

Barber SA. *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. New York, Wiley – Interscience, 1984. 398 p.

Bortoleti Junior A, Gonçalves LG, Ribeiro MAR, Afonso RO, Santos RF, Souza CSS. A importância do plantio direto e do plantio convencional e as suas relações com o manejo e conservação do solo. *Revista Conexão Eletrônica*, 12: 1-11, 2015.

Brown V, Barbosa FT, Bertol I, Mafra ÁL, Muzeka LM. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 13: 1-7, 2018.

Cardoso IM, Meer PVD, Oenema O, Janssen BH, Kuyper TW. Analysis of phosphorus by <sup>31</sup>P-NMR in oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. *Geoderma*, 112: 51-70, 2003.

Ceretta CA, Lorensini F, Brunetto G, Giroto E, Gatiboni LC, Lourenzi CR, Tiecher TL, Conti L, Trentin G, Miotto A. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 45: 593-602, 2010.

- Chang SC, Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 84: 133-144, 1957.
- Condon LM, Goh KM, Newman RH. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, 36: 199-207, 1985.
- Corbeels M, Marchão RL, Siqueira Neto M, Ferreira EG, Madari BE, Scopel E, Brito OR. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Scientific reports*, 6: 1-8, 2016.
- Cordell D, Drangert J, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19: 292-305, 2009.
- Costa DD. *A. Fracionamento do fósforo no solo em função dos sistemas de manejo*. 2019. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. 2019. 50 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).
- Daroub SH, Pierce FJ, Ellis BG. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 170-176, 2000.
- Driessen PM, Dudal R. *Lecture notes on the geograpy, formation, properties and use of the major soils of the word*. Wageningen, Agricultural University/Katholiek, University Leuven, 1989. 296 p.
- Eberhardt DN, Vendrame PRS, Becquer T, Guimarães MF. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1009-1016, 2008.
- Embrapa Soja. Embrapa. *Sistemas de Produção: Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014*. Embrapa, Londrina, Brasil. 2013. 265 p.

- Fardeau JC. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Research*, 45: 91-100, 1995.
- Fixen PE, Grove JH. Testing Soils for Phosphorus. In: Westerman, R.L. (3 ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Sssa Book Series, Madison, EUA. 2018.141-180 p.
- Furtini Neto AE, Vale FR, Resende AV, Guilherme LRG, Guedes GAA. *Fertilidade do solo*. UFLA/FAEPE, Lavras, Brasil. 2001. 261 p.
- Gatiboni LC. *Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas*. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Agronomia).
- Gatiboni LC, Kaminski J, Rheinheimer DS, Flores JPC. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 691-699, 2007.
- Goedert WJ, Lobato E, Wagner E. Potencial agrícola da região dos cerrados brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 15: 1-17, 1980.
- Hedley MJ, Stewart JWB, Chauhan BS. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 970-976, 1982.
- Horta MC, Torrent J. *Dinâmica do fósforo no solo: perspectiva agrônômica ambiental*. IPBC, Castelo Branco, Portugal. 2010. 97 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – *Mapas de Biomas e de Vegetação*. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>  
Acesso em: junho de 2019.

Ker JC, Fontes MPF, Souza AR, Resende M. Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. *Revista Ceres*, 43: 216-226, 1996.

Lacerda JJJ. *Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em latossolos com diferentes mineralogia e histórico de uso, adubados com fosfato reativo*. Universidade Federal de Lavras (UFV), Minas Gerais, Brasil. 2011. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo).

Larsen S. Soil Phosphorus. *Advances in Agronomy*, [S.L.], p. 151-210, 1967. Elsevier.

Lima JGC, Schulze SMBB, Ribeiro MR, Barreto SB. Mineralogia de um Argissolo Vermelho-Amarelo da zona úmida costeira do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 881-892, 2008.

Loss A, Basso A, Oliveira BS, Koucher LP, Oliveira RA, Kurtz C, Lovato PE, Curmi P, Brunetto G, Comin JJ. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39: 1212-1224, 2015.

Loss, A, Costa EM, Pereira MG, Beutler SJ. Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 113: 1-8, 2014.

Machado SRV. *Caracterização química, física e mineralógica de saprolitos do estado de São Paulo e suas implicações na taxonomia e uso agrícola*. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), São Paulo, Brasil. 1997. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).

Martinez MA. *Frações de fósforo em experimento de longa duração em milho consorciado com brachiaria brizantha cv. Marandu, sob diferentes fontes de nitrogênio*. Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. 2015. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

- Motta PEF, Carvalho Filho A, Ker JC, Pereira NR, Carvalho Junior W, Blancaneaux P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37: 869-878, 2002.
- Novais RF, Smyth TJ, Nunes FN. “Fósforo”, in.: Novais RF, Alvarez VVH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. (1 ed.). *Fertilidade do Solo*. SBCS, Viçosa, Brasil. 2007. 1017 p.
- Partelli FL, Busato JG, Vieira HD, Viana AP, Canellas LP. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. *Ciência Rural*, 39: 2065-2072, 2009.
- Pittelkow CM, Linqvist BA, Lundy ME, Liang X, Van Groenigen KJ, Lee J, Van Gestel N, Siz J, Venterea RT, Van Kessel C. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183: 156-168, 2015.
- Raij BV, Feitosa CT. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. *Bragantia*, 39: 51-57, 1980.
- Resende AV, Furtini Neto AE. *Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado*. Embrapa Cerrados, Planaltina, Brasil. 2007. 32 p.
- Rodrigues GA, Santos GO, Carrasqueira A, Machado ER, Assirati ET, Macri RCV. Oscilações da temperatura do solo em função de quantidades de palha e horários ao longo do dia. *Revista Interface Tecnológica*, 15: 293-304, 2018.
- Rossi CQ. *Dinâmica da matéria orgânica em área de soja cultivada sobre palhada de Braquiária e Sorgo*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Rio de Janeiro, Brasil. 2009. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia em Ciência do Solo).
- Santos DR, Gatiboni LC, Kaminski J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38: 576-586, 2008.

- Santos GA, Silva LS, Canellas LP, Camargo FA. O. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2 ed, Metrópole, Porto Alegre, Brasil, 2008. p. 654.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB. *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. 3.ed. rev. ampl. Embrapa, Brasília, Brasil. 2013. 353 p.
- Santos RD, Curi N, Shimizu SH. *Guia Prático para Classificação de Solos Brasileiros*. Produção independente, Lavras, Brasil. 2015. 82 p.
- Schulze DG. An introduction to soil mineralogy. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) *Minerals in soil environments*. SSSA, Madison, EUA. 1989.1207 p.
- Silva AA, Galon L, Ferreira FA, Tironi SP, Ferreira EA, Silva AF, Aspiazú I, Agnes EL. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. *Revista Ceres*, 56: 496-506, 2009.
- Sousa DMG, Lobato E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. Embrapa, Brasília, Brasil, 2004. 416 p.
- Sousa DMG, Lobato E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. Embrapa, Brasília, Brasil, 2002. 416 p.
- Souza Júnior RF, Oliveira FHT, Santos HC, Freire FJ, Arruda J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 159-169, 2012.
- Stauffer E. *Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo*. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Brasil. 2016. 79 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal).

Teixeira PC, Campos DVB, Saldanha MFC. (3 Ed.). In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Embrapa, Brasília, Brasil. 2017. 203-208 p.

Usgs. United States Geological Survey. *Mineral commodity summaries 2009*. Reston, 2009. Disponível em <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf> Acesso em: 20 jun. 2019.

Vaccari DA. Phosphorus: a looming crisis. *Scientific American*, 300: 54-59, 2009.

Yang J, Bai J, Liu M, Chen Y, Wang S, Yang Q. Determination of phosphorus in soil by icp-oes using an improved standard addition method. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2018: 1-8, 2018.

**5. CAPÍTULO 2 – FRAÇÕES DE FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DO  
CERRADO PIAUIENSE**

**Artigo nas normas do periódico *Catena* ISSN: 0341-8162**

1 **RESUMO** – O comportamento do fósforo em solos tropicais tem causado perdas para  
2 a produção agrícola em áreas do Cerrado, pois devido as interações desse nutriente  
3 com os componentes inorgânicos do solo a sua disponibilidade é limitada. Objetivou-  
4 se avaliar a quantidade e a disponibilidade do fósforo; as formas inorgânicas de fósforo  
5 no solo, a fração mais retida no solo e indicar qual área teve maior retenção de fósforo  
6 no solo via adsorção dos óxidos. As amostras de solos foram coletadas em 36 pontos  
7 georreferenciados na profundidade de 0,00-0,20 m em cada área selecionada na  
8 Fazenda Emilio, Uruçuí-Pi. Em seguida, as amostras foram submetidas a análise  
9 química para a determinação do fósforo disponível e ao fracionamento químico  
10 sequencial de fósforo inorgânico. Na sequência, foi avaliada a suscetibilidade  
11 magnética em alta e baixa frequência e a caracterização química e mineralógica da  
12 fração argila por fluorescência e difratometria de raio-X. Os dados foram submetidos  
13 a análise estatística descritiva e análise multivariada. Os maiores teores para o P  
14 adsorvido foram observados nas áreas com 1, 7, 11 e 17 anos de uso. A fração P-Al  
15 apresentou maiores teores de P adsorvido em quatro das cinco áreas avaliadas, a  
16 área com 7 anos de uso apresentou maiores concentrações das frações P-Al e P-Fe,  
17 a área com 11 anos de uso teve os maiores valores para a fração P-Ca,  $\chi_{FD}$  e P-  
18 Mehlich-1, a SM teve maiores valores na área com 17 anos de uso. As frações de  
19 fósforo inorgânico sofreram influência do tempo e manejo empregado nas áreas.

20

21 **Palavras-chave:** Sistema convencional. Fracionamento do fósforo. Óxidos de ferro.  
22 Óxidos de alumínio.

23

24 **ABSTRACT** - The behavior of phosphorus in tropical soils has caused losses for  
25 agricultural production in Cerrado areas, because due to the interactions of this nutrient  
26 with the inorganic components of the soil, its availability is limited. The objective was  
27 to evaluate the quantity and availability of phosphorus; the inorganic forms of  
28 phosphorus in the soil, the fraction most retained in the soil and identifying the area  
29 with the highest phosphorus retention via oxide adsorption in five areas with different  
30 times of use. Soil samples were collected at 36 georeferenced points at a depth of  
31 0.00-0.20 m in each selected area. Then, the samples were submitted to chemical  
32 analysis to determine the available phosphorus and to the sequential chemical  
33 fractionation of inorganic phosphorus. Then, the high and low frequency magnetic  
34 susceptibility and the chemical and mineralogical characterization of the clay fraction  
35 by fluorescence and X-ray diffractometry were evaluated. The data were submitted to  
36 descriptive statistical analysis and multivariate analysis. The highest levels for P  
37 adsorbed were observed in areas with 1, 7, 11 and 17 years of use. The P-Al fraction  
38 showed the highest content of P adsorbed in four of the five evaluated areas, the area  
39 with 7 years of use had the highest concentrations of the fractions P-Al and P-Fe, the  
40 area with 11 years of use had the highest values for the fraction P-Ca,  $\chi$ FD, P-Mehlich-  
41 1, SM had higher values in the area with 17 years of use. The inorganic phosphorus  
42 fractions were influenced by the time and management used in the areas.

43

44 **Keywords:** Conventional system. Phosphorus fractionation. Iron oxides. Aluminum  
45 Oxides.

46

47

## 1. INTRODUÇÃO

48

49

50 O manejo do fósforo (P) é um grande desafio em solos altamente  
51 intemperizados o que causa limitações na produtividade. Tais solos apresentam  
52 naturalmente baixo conteúdo desse nutriente, necessitando a aplicação de adubos  
53 fosfatados para suprir essa carência. No entanto, as características físico-químicas  
54 dos solos tropicais impedem que o fósforo disponibilizado por esses adubos seja  
55 aproveitado em sua totalidade pelas plantas, pois ocorre a retenção do P pelos  
56 colóides do solo através de atividades eletroquímicas como a adsorção e precipitação.

57 Uma das principais características dos solos com elevado grau de  
58 intemperização é a sua acidez elevada, resultando na limitação da produtividade  
59 agrícola dessas áreas devido à baixa saturação por bases (V%) e da atividade tóxica  
60 do alumínio. Os Latossolos devido ao seu processo de formação, que consiste na  
61 remoção da maior parte da sílica e dos hidróxidos pela ação do intemperismo  
62 (latolização), também apresentam altos teores de óxidos de ferro (Nóia et al., 2014;  
63 Embrapa, 2018).

64 A retenção do P no solo é resultado da forte afinidade com os óxidos que  
65 compõe a fração argila do solo. Os principais óxidos encontrados em solos tropicais  
66 com elevado grau de intemperização são os óxidos de Fe (goethita e hematita) e de  
67 alumínio (gibbsita). Esses óxidos retém o P aplicado ao solo, reduzindo a  
68 disponibilidade para as plantas e tornando-o mais susceptível a perda por escoamento  
69 superficial (Bertol et al., 2011).

70 Embora outros fatores possam influenciar como o pH, conteúdo de matéria  
71 orgânica do solo, CTC e CTA. Os óxidos de Al, Fe e caulinita tem grande participação  
72 na retenção do P aplicado nos solos, devido a mineralogia dos mesmos, o que implica

73 em contínuas aplicações de fósforo afim de suprir a exigências edáficas e nutricionais  
74 da planta, comprometendo a viabilidade econômica de projetos agrícolas e, portanto,  
75 a necessidade de entender a dinâmica desse nutriente em solos agrícolas  
76 encontrados no Cerrado Piauiense (Broggi, 2011; Moura et al., 2018; Melese et al.,  
77 2015).

78 A principal forma de classificar o P, além da separação entre fósforo orgânico  
79 (Po) e fósforo inorgânico (Pi) é de acordo com a sua labilidade no solo, o que facilita  
80 a compreensão em relação ao comportamento do nutriente quando em contato os  
81 componentes do solo. Para melhor avaliar a labilidade desse nutriente no solo se  
82 fazem uso de metodologias que dividem o P em frações. Dentre diversos métodos, o  
83 proposto por Chang & Jackson (1957) é um dos mais difundidos, em que baseia-se  
84 no princípio de uma suposta especificidade de cada extrator utilizado para obter desde  
85 a forma mais lábil de P no solo até a mais fortemente retida (Ceretta et al., 2010).

86 O manejo do solo também exerce influência na dinâmica do P no solo, onde,  
87 sistemas conservacionistas, comparativamente a sistemas convencionais, possuem  
88 características que melhoram a resposta das culturas a adubação fosfatada, tais  
89 como, redução da erosão, facilita a difusão por ter maior conteúdo de água, dificulta a  
90 adsorção por meio da diminuição do contato do íon com o colóide. Além disso,  
91 algumas plantas forrageiras têm a capacidade de reciclar o P, pois conseguem  
92 absorver esse nutriente nas formas não-lábeis, tornando-o disponíveis para as  
93 culturas posteriores juntamente com o Po oriundo da mineralização lenta e gradual  
94 dos resíduos orgânicos (Carneiro et al., 2011; Merlin et al., 2013).

95 O tempo de uso do solo deve ser considerado em estudos de disponibilidade  
96 de fósforo, pois ocorre a redução da retenção de P em solos manejados por vários  
97 anos, causando o decréscimo das frações, tanto inorgânicas como orgânicas, com

98 variados graus de labilidade. Isso ocorre em função da diminuição das forças de  
99 atração entre os íons fosfáticos e os colóides do solo (Gatiboni et al., 2007; Santos et  
100 al., 2008).

101 Os benefícios da calagem em relação ao combate da acidez, efeitos fitotóxicos  
102 do Al e o aumento de bases no solo são bastante difundidos, no entanto, a relação  
103 dessa técnica com a biodisponibilidade do P é bastante contraditória, pois enquanto  
104 alguns estudos apontam um duplo efeito da calagem, reduzindo a adsorção de P e  
105 aumentando a dessorção de P, outros indicam que o impacto dessa técnica sob a  
106 dinâmica do fósforo em Latossolos é mínima (Ferreira et al., 2013; Teixeira et al.,  
107 2015).

108 Há diversos métodos para estimar os atributos do solo, no entanto,  
109 metodologias alternativas têm sido utilizadas com frequência para a avaliação de tais  
110 atributos. Nos últimos anos a análise da suscetibilidade magnética dos solos tem sido  
111 bastante difundida com uma técnica capaz de predizer de forma indireta esses  
112 atributos, isso deve-se, principalmente, as vantagens apresentadas por seu uso, pois  
113 não há necessidade do emprego de reagentes químicos, contaminação e/ou  
114 destruição da amostra (Matias et al., 2014; Marques Jr. et al., 2014).

115 Com isso, este estudo foi desenvolvido com a hipótese de que a variabilidade  
116 mineralógica em áreas com diferentes tempos de uso e manejo do solo influenciam a  
117 disponibilidade do fósforo. Objetivou-se com o estudo avaliar a quantidade e a  
118 disponibilidade do fósforo em 5 (cinco) áreas com diferentes tempos de uso, as formas  
119 inorgânicas de fósforo no solo, a fração inorgânica que mais retém fósforo no solo e  
120 indicar qual área teve maior retenção de fósforo no solo via adsorção dos óxidos.

121

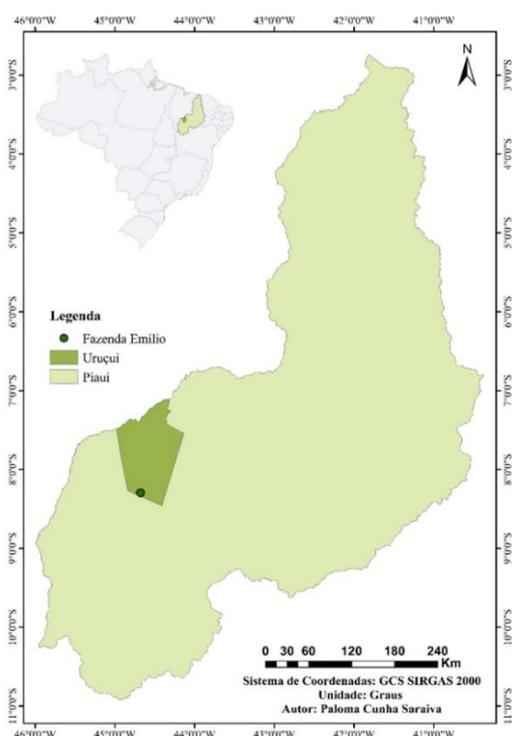
122

## 2. METODOLOGIA

## 123 2.1 Área de Estudo e Coleta de Solo

124 O estudo foi realizado na Fazenda Emílio (Figura 2) localizada no município de  
125 Uruçuí, estado do Piauí, Brasil nas coordenadas geográficas: 07°13'46"S e 44°33'22"  
126 W em uma altitude de 167 m em outubro do ano de 2017 (início do período chuvoso).  
127 A área da fazenda corresponde a cerca de 8.600 hectares e está inserida dentro do  
128 bioma Cerrado. O clima da região é Aw tropical de savana, de acordo com a  
129 classificação de Köppen, predominando a estação chuvosa entre os meses de outubro  
130 a março, temperatura média anual de 26,1 °C e precipitação média anual irregular de  
131 900 mm.

132



134 **Figura 2.** Localização da Fazenda Emílio no Cerrado piauiense. Uruçuí – PI, Brasil.

135

136 Os tratamentos consistiram em quatro áreas sob sistema de plantio  
137 convencional com tempo de uso e manejo diferentes (área recém aberta; área com 7  
138 anos de cultivo; área com 11 anos de cultivo; área com 17 anos de cultivo) e uma área

139 sob vegetação nativa conservada (Tabela 1). Foram coletadas 36 amostras  
 140 compostas em cada área com distribuição equidistante na profundidade de 0,00-0,20  
 141 m, com o auxílio de um trado holandês de aço inoxidável e georreferenciadas com o  
 142 GPS Garmin modelo 78s. Cada amostra composta foi formada a partir de cinco  
 143 amostras simples. As amostras foram identificadas encaminhadas ao laboratório de  
 144 Geociências e Recursos Ambientais da Universidade Federal do Piauí em Bom Jesus-  
 145 PI. Em seguida, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em  
 146 peneira com malha de 2 mm (ABNT 10).  
 147

**Tabela 1.** Histórico de uso e manejo das áreas agrícolas e sob vegetação nativa no Cerrado piauiense.

| Área | Sistema de manejo                                       | Tempo de Uso          | Culturas  | Adubação Fosfatada (Mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ) | Calcário dolomítico (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Gesso agrícola (Mg ha <sup>-1</sup> ) |
|------|---|-----------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| VN   |   | -                     | Área de reserva legal da fazenda, prevalecendo às características originais e remanescentes da vegetação de Cerrado | -   | -  | -                                     |
| T1   | Aração e passagem de grade pesada na ocasião da calagem | Recém-aberta (1º ano) | -   |   | 5 Mg ha <sup>-1</sup> (2014);              | -                                     |

## CONTINUAÇÃO

|     |  |         |  |  |   |  |
|-----|--|---------|--|--|---|--|
| T7  | Passagem de grade pesada anualmente no pré-plantio | 7 anos  | Soja (2010/2011 e 2011/2012);<br>Pousio (2012/2013 e 2013/2014); Soja (2014/2015 a 2017/2018)<br>Milheto e Sorgo entre safras  | 0,5 Mg ha <sup>-1</sup> - grade intermediária (2013) | 5 Mg ha <sup>-1</sup> (2003/2004);<br>2 Mg ha <sup>-1</sup> (2010/2011)   | -  |
| T10 | Passagem de grade pesada anualmente no pré-plantio | 11 anos | Soja (2005/2006 a 2007/2008);<br>Milho (2008/2009);<br>Soja (2009/2010);<br>Milho (2010/2011);<br>Feijão e Milho (2011/2012);<br>Pousio (2012/2013 a 2013/2014);<br>Milho (2014/2015 a 2017/2018)              | 0,4 Mg ha <sup>-1</sup> (2005)                       | 5 Mg ha <sup>-1</sup> (2005); 1 Mg ha <sup>-1</sup> (2007); 2 Mg ha <sup>-1</sup> (2012);   | 0,5 Mg ha <sup>-1</sup> (2008)   |
| T17 | Passagem de grade pesada anualmente no pré-plantio | 17 anos | Arroz (2000/2001 a 2001/2002);<br>Soja (2002/2003 a 2008/2009);<br>Milho (2009/2010);<br>Soja (2010/2011 a 2011/2012);<br>Pousio (2012/2013);<br>Soja (2013/2014 a 2017/2018);<br>Sorgo e Milheto entre safras | 0,4 Mg ha <sup>-1</sup> (2004/2005)                  | 5 Mg ha <sup>-1</sup> (2001/2002);<br>1 Mg ha <sup>-1</sup> (2007/2008);<br>1,7 Mg ha <sup>-1</sup> (2011); 2 Mg ha <sup>-1</sup> (2014);<br>1,5 Mg ha <sup>-1</sup> (2015) | 0,5 Mg ha <sup>-1</sup> (2009/2010); 0,5 Mg ha <sup>-1</sup> (2012/2013) |

VN150 = área de vegetação nativa; T1 = área recém aberta; T7 = área com 7 anos de cultivo; T10 = área com 11 anos de cultivo; T17 = área com 17 anos de cultivo.

## 153 2.2 Análises Químicas e Físicas

154 As amostras de solo foram submetidas as análises de fertilidade e  
 155 granulometria de acordo com as metodologias descritas em Silva (2009). O pH foi  
 156 determinado em água (1:2,5 m/v), P e K extraídos com solução de Mehlich 1, sendo,  
 157 o P foi determinado pelo método colorimétrico, enquanto, o K por fotômetro de chama;  
 158 extração de Ca, Mg e Al foi feita com KCl a 1M, sendo, a determinação de Ca e Mg  
 159 em espectrofotômetro de absorção atômica e Al pela titulação com solução de NaOH  
 160 a 0,025M; acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ) por extração com solução de acetato de cálcio  
 161 a 0,5M (pH 7,1-7,2); saturação por bases, saturação por alumínio, soma das bases,  
 162 capacidade de troca catiônica, Cu, Fe, Mn e Zn extraídos com solução de Mehlich 1 e  
 163 determinação espectrofotômetro de absorção atômica calculados de acordo com  
 164 Donagema et al. (2011) e o carbono orgânico total (COT) determinado pela oxidação  
 165 a quente pelo método de Walkley-Black (Mendonça & Matos, 2005). Os resultados  
 166 das análises do solo se encontram na Tabela 2.

167

168 **Tabela 2.** Análise química e granulométrica das amostras de solo das áreas  
 169 agrícolas e sob vegetação nativa no Cerrado piauiense.

| Área | pH   | P                      | K                      | Ca                     | Mg                 | Al                                    | H+Al | SB   | CO    | T    | V     | m     |
|------|------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
|      |      | mg<br>dm <sup>-3</sup> | -----cmol <sub>c</sub> | dm <sup>-3</sup> ----- | g kg <sup>-1</sup> | cmol <sub>c</sub><br>dm <sup>-3</sup> | %    | %    |       |      |       |       |
| VN   | 4,42 | 2,70                   | 0,03                   | 0,12                   | 0,10               | 1,63                                  | 4,73 | 0,25 | 7,98  | 4,98 | 5,21  | 74,28 |
| T1   | 5,32 | 16,51                  | 0,22                   | 2,08                   | 1,76               | 0,3                                   | 4,49 | 4,06 | 9,26  | 8,50 | 45,68 | 2,96  |
| T7   | 5,86 | 38,78                  | 0,17                   | 2,92                   | 1,29               | 0,02                                  | 1,77 | 4,38 | 7,49  | 6,15 | 71,54 | 0,27  |
| T10  | 5,58 | 54,53                  | 0,31                   | 3,18                   | 1,46               | 0,02                                  | 3,01 | 4,95 | 9,79  | 7,96 | 61,77 | 0,31  |
| T17  | 6,21 | 48,26                  | 0,25                   | 4,09                   | 1,73               | 0                                     | 2,45 | 6,07 | 10,16 | 8,52 | 71,57 | 0,00  |

|    | Profundidade | Areia       | Silte | Argila | Class. textural |
|----|--------------|-------------|-------|--------|-----------------|
|    |              | -----%----- |       |        |                 |
| VN | 0,0-0,20 m   | 88,74       | 1,34  | 9,92   | Arenosa         |
| T1 | 0,0-0,20 m   | 79,49       | 4,23  | 16,28  | Média           |
| T7 | 0,0-0,20 m   | 83,93       | 2,38  | 13,69  | Arenosa         |

## CONTINUAÇÃO

|     |            |       |      |       |         |
|-----|------------|-------|------|-------|---------|
| T10 | 0,0-0,20 m | 86,25 | 3,35 | 10,40 | Arenosa |
| T17 | 0,0-0,20 m | 79,16 | 8,78 | 12,07 | Média   |

170 SB = soma de bases; m = saturação em alumínio; CO = carbono orgânico; T = CTC  
 171 a pH 7.0; V = saturação por bases; VN = área de vegetação nativa; T1 = área recém  
 172 aberta; T7 = área com 7 anos de cultivo; T10 = área com 11 anos de cultivo; T17 =  
 173 área com 17 anos de cultivo.

174

## 175 2.2.1 Fluorescência de Raios-X

176 As argilas foram moídas e peneiradas até granulometria inferior à peneira de  
 177 nº 200 (0,075 mm) e colocadas no porta-amostra sobre um filme de prolene (Embrapa,  
 178 2017; Prandel et al., 2014). A caracterização dos óxidos presentes na fração argila foi  
 179 realizada por análise quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raio X (FRX)  
 180 no equipamento modelo Epsilon 3 XL da Panalytical.

181

## 182 2.2.2 Fracionamento do Fósforo Inorgânico

183 As análises foram realizadas segundo a metodologia de Chang & Jackson  
 184 (1957) transcrita por Kuo (1996), sendo pesada 0,5 g de TFSA, acondicionadas em  
 185 tubos tipo falcon de 50 mL e submetidas a dessorção de P por extratores com  
 186 diferentes forças. A princípio, realizou-se uma lavagem com o intuito de extrair o cálcio  
 187 (Ca) e o alumínio (Al) trocáveis, evitando que interfiram nas reações subsequentes.  
 188 Em seguida, foi iniciado o fracionamento do P para as frações do P retido pelos óxidos  
 189 de Al (Pi-Al), Fe (Pi-Fe) e Ca (Pi-Ca).

190 Na determinação da concentração de P, foi transferida uma alíquota contendo  
 191 de 2 mL de P, 0,5 mL de solução sulfomolibdica, 1,5 mL de solução H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub> 0,8 mol L<sup>-1</sup>  
 192 <sup>1</sup> (adicionada apenas à alíquota de Pi-Al), e por fim, completada com água deionizada

193 até volume de 5 mL em copos plásticos de 50 mL. No extrato do P-Fe foram  
194 adicionadas cinco gotas de p-nitrofenol e o pH do extrato ajustado, adicionando  
195 solução de NaOH 2,0 mol L<sup>-1</sup> até a mudança de cor do indicador. As concentrações  
196 de P foram determinadas utilizando o método do azul de molibdênio (Murphy &  
197 Riley, 1962).

198

## 199 **2.3 Análise Mineralógica**

### 200 2.3.1 Identificação dos componentes da fração argila

201 A caracterização mineralógica da fração argila foi precedida pela separação  
202 das frações granulométricas do solo com o intuito de obter tal fração para análise. O  
203 estudo da estrutura cristalina das argilas utilizado na pesquisa ocorreu por meio da  
204 difratometria de raio-X. O estudo foi subsidiado por um difratograma LABX – XDR 600,  
205 Shimadzu, Cu – K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406\text{\AA}$ ) com  $2\theta$  no intervalo de 10° a 75°, com taxa de  
206 varredura de 2°min<sup>-1</sup> e com tempo de exposição de 40 minutos.

207

### 208 2.3.2 Suscetibilidade magnética do solo

209 A determinação da suscetibilidade magnética (SM) foi realizada pesando-se 10  
210 g de terra fina seca ao ar (TFSA). Estas foram analisadas em um medidor MS2, da  
211 Bartington Instruments Ltd., o qual é acoplado a um sensor de laboratório MS2B de  
212 baixa (0,47 Hz) e alta (4,7 Hz) frequência. Esse sensor permite determinar a SM  
213 utilizando um campo magnético alternado, de intensidade de -80 A m<sup>-1</sup> (10<sup>-4</sup> T) e de  
214 frequência variada. As maiores leituras da SMLf têm, em sua maior parte, contribuição  
215 de minerais estáveis com domínio simples (SD) e diâmetro próximo a 0,03, este  
216 comportamento não é observado nas medições em alta frequência. As medidas em  
217 alta frequência fornecem informações mais associadas a presença de minerais

218 superparamagnéticos (SP). A partir das leituras, a SM foi calculada usando a seguinte  
219 expressão:  $SM = \text{Leitura} / (10 \times \text{peso da amostra})$ . Com as medições da  
220 susceptibilidade magnética, baixa e alta frequência, foi realizada percentagem de  
221 frequência dependente da suscetibilidade magnética ( $\chi_{FD}$ ) a partir da seguinte  
222 expressão:  $\chi_{FD} = 100 \times [(\chi_{BF} - \chi_{AF})/\chi_{BF}]$  (Costa et al., 1999; Dearing, 1994; Dearing,  
223 1999).

224

## 225 **2.4 Análise Estatística**

226 Os dados foram submetidos a análise descritiva utilizando o software Minitab  
227 Statitital Software (Minitab) versão 19. A análise de cluster (*Cluster Analyses*), por  
228 meio da distância euclidiana quadrática, permitiu a classificação dos atributos do solo  
229 avaliados em relação a medidas e distâncias e realizar a divisão em grupos dos  
230 atributos mais semelhantes entre si (Palácio et al., 2011; Araújo Neto et al., 2018).

231 A análise de cluster foi complementada com a de componentes principais, com  
232 o intuito de chegar a um conjunto de dados menor de combinações lineares que  
233 mantenha o máximo de informação obtidas pelas variáveis inicialmente. Tal recurso  
234 foi empregado por meio do software Statistica, onde os dados foram normalizados (Z-  
235 scores) e foi adotado o método da mínima variância (Ward's method), a partir da  
236 distância euclidiana quadrática, para descrever a similaridade entre as áreas  
237 estudadas. Em seguida, empregou-se o teste coeficiente de correlação de Pearson  
238 pelo software SigmaPlot Software (Systat Software, Inc.) com o objetivo de observar  
239 a interação das variáveis analisadas entre si (Andrade et al., 2011; Palácio et al.,  
240 2011).

241 Construiu-se os diagramas de ternário a partir da transformação dos valores  
242 obtidos de P adsorvido em porcentagem. Em que, o primeiro foi realizado a soma das

243 3 frações analisadas (P-Al, P-Fe e P-Ca), em seguida, o somatório foi dividido por estas  
244 frações e o valor final foi multiplicado por 100 para obter a porcentagem. Os diagramas  
245 foram plotados utilizando o software SigmaPlot Software (Systat Software, Inc.).

246

### 247 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

248

#### 249 3.1 Fósforo inorgânico do solo

250 Na estatística descritiva (Tabela 3) verifica-se a classificação da variabilidade  
251 dos dados, de acordo com Warrick & Nielsen (1980), como baixa ( $CV < 12\%$ ), média  
252 ( $12 \leq CV \leq 62\%$ ) e alta ( $CV > 62\%$ ). Observa-se que as maiores variações do CV  
253 foram obtidas na área sob vegetação natural, sendo normal que haja uma variação  
254 em suas características químicas.

255 A maior parte dos atributos apresentaram assimetria positiva significando que  
256 a distribuição assimétrica à direita, enquanto os atributos que apresentaram assimetria  
257 negativa (P-Al/T1, P-Fe/T7, SMLf e SMHf/T10 e P-Al) indicando assimetria a  
258 esquerda. A assimetria é utilizada para apontar um possível afastamento da simetria  
259 e mostrar a distribuição em torno da mesma (Zanão Junior et al., 2010). Outro  
260 coeficiente utilizado para representar a distribuição normal dos dados é a curtose,  
261 onde, embora valores nulos sejam preferenciais, resultados entre +2 e -2 são  
262 aceitáveis (Negreiros Neto et al., 2014). Na Tabela 3 observa-se que a maior parte  
263 dos valores são considerados aceitáveis, com exceção dos resultados referentes aos  
264 atributos P-Ca e P-Meh/MA, SMLf e SMHf/T1, P-Al, P-Ca e SMHf/T7 e P-Fe/T17.

265 A fração P-Al apresentou os maiores valores de P adsorvido nas áreas VN, T1,  
266 T10 e T17, como podemos observar na Tabela 3. Esse comportamento era esperado  
267 pois os Latossolos, solos comumente encontrados no Cerrado, apresentam

268 naturalmente elevados teores de óxidos de Al, resultando em elevados teores de P  
 269 adsorvido por esses óxidos (Tabelas 3 e 4). O tratamento T7 apresentou os maiores  
 270 valores para as frações P-Al e P-Fe em comparação as demais áreas agrícolas e a  
 271 vegetação natural, enquanto a fração P-Ca e o P disponível extraído via método de  
 272 Mehlich-1 tiveram seus maiores teores no tratamento T10.

273

**Tabela 3.** Estatística descritiva para os atributos químicos e mineralógicos das amostras de solo das áreas agrícolas e sob vegetação nativa no Cerrado piauiense.

| Área | Variável   | Média  | Mediana | Mín    | Máx    | Variância | CV     | Ass   | Curtose |
|------|--|--------|---------|--------|--------|-----------|--------|-------|---------|
| VN   | P-Al (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 138,40 | 53,60   | 24,20  | 333,80 | 12236,20  | 79,95  | 0,43  | -1,58   |
|      | P-Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 84,97  | 78,76   | 41,03  | 194,12 | 1156,79   | 40,03  | 1,34  | 2,02    |
|      | P-Ca (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 77,40  | 19,60   | 0,00   | 566,80 | 23701,30  | 198,92 | 2,44  | 4,93    |
|      | P-Meh (mg kg <sup>-1</sup> )                             | 2,70   | 2,60    | 1,56   | 5,06   | 0,52      | 26,73  | 1,37  | 2,64    |
|      | SMLf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,52   | 0,52    | 0,44   | 0,62   | 0,00      | 8,79   | 0,55  | 0,11    |
|      | SMHf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,50   | 0,50    | 0,41   | 0,61   | 0,00      | 9,72   | 0,26  | -0,20   |
|      | χFD (%)  | 3,06   | 3,43    | 0,00   | 8,16   | 5,44      | 76,16  | 0,27  | -0,83   |
| T1   | P-Al (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 273,83 | 276,07  | 244,94 | 290,07 | 165,82    | 4,70   | -0,74 | -0,47   |
|      | P-Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 119,65 | 101,74  | 47,95  | 263,44 | 3076,54   | 46,36  | 1,07  | 0,61    |
|      | P-Ca (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 110,20 | 102,60  | 10,70  | 225,00 | 3710,40   | 55,27  | 0,45  | -0,53   |
|      | P-Meh (mg kg <sup>-1</sup> )                             | 16,51  | 14,77   | 0,65   | 55,42  | 100,64    | 60,78  | 1,95  | 5,82    |
|      | SMLf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,95   | 0,88    | 0,79   | 1,86   | 0,04      | 20,51  | 3,38  | 13,94   |
|      | SMHf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,92   | 0,86    | 0,75   | 1,75   | 0,03      | 19,78  | 3,22  | 12,70   |
|      | χFD (%)  | 3,16   | 3,12    | 0,00   | 7,41   | 3,18      | 56,40  | 0,46  | -0,21   |
| T7   | P-Al (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 366,34 | 355,45  | 313,42 | 615,38 | 3020,79   | 15,00  | 3,03  | 12,05   |
|      | P-Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 550,10 | 596,70  | 132,50 | 790,30 | 23953,60  | 28,13  | -1,31 | 1,36    |
|      | P-Ca (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 179,50 | 145,90  | 31,10  | 551,50 | 14712,90  | 67,57  | 1,61  | 2,56    |
|      | P-Meh (mg kg <sup>-1</sup> )                             | 38,78  | 36,60   | 24,14  | 61,32  | 95,90     | 25,25  | 0,88  | 0,06    |
|      | SMLf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,60   | 0,60    | 0,57   | 0,67   | 0,00      | 3,43   | 1,22  | 2,08    |
|      | SMHf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,59   | 0,59    | 0,55   | 0,66   | 0,00      | 3,73   | 0,93  | 2,15    |
|      | χFD (%)  | 2,44   | 1,72    | 0,00   | 6,35   | 3,03      | 71,42  | 0,26  | -0,64   |

## CONTINUAÇÃO

|     |  |        |        |        |        |         |        |       |       |
|-----|--|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|-------|
|     | P-Al (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 301,07 | 295,52 | 235,60 | 388,13 | 1093,58 | 10,98  | 0,44  | -0,06 |
|     | P-Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 95,79  | 90,98  | 59,32  | 150,93 | 482,59  | 22,93  | 1,15  | 1,11  |
|     | P-Ca (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 200,60 | 202,00 | 77,00  | 418,90 | 6376,90 | 39,80  | 0,81  | 0,70  |
| T10 | P-Meh (mg kg <sup>-1</sup> )                             | 54,53  | 50,46  | 3,22   | 110,38 | 429,98  | 38,03  | 0,72  | 1,61  |
|     | SMLf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,45   | 0,47   | 0,37   | 0,53   | 0,00    | 10,32  | -0,20 | -1,20 |
|     | SMHf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 0,40   | 0,41   | 0,21   | 0,59   | 0,01    | 24,30  | -0,20 | -0,75 |
|     | χFD (%)  | 14,12  | 4,65   | 0,00   | 44,74  | 271,41  | 116,70 | 0,94  | -1,03 |
|     | P-Al (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 295,50 | 315,05 | 192,95 | 359,80 | 2253,88 | 16,07  | -0,98 | -0,43 |
|     | P-Fe (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 112,75 | 108,58 | 57,78  | 232,54 | 1176,13 | 30,42  | 1,38  | 3,33  |
|     | P-Ca (mg kg <sup>-1</sup> )                              | 89,72  | 79,59  | 13,27  | 217,35 | 3229,07 | 63,33  | 0,56  | -0,64 |
| T17 | P-Meh (mg kg <sup>-1</sup> )                             | 48,26  | 48,38  | 6,49   | 96,50  | 381,43  | 40,47  | 0,42  | 0,50  |
|     | SMLf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 1,29   | 1,25   | 1,05   | 1,87   | 0,04    | 16,10  | 1,53  | 1,95  |
|     | SMHf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 1,27   | 1,23   | 1,03   | 1,83   | 0,04    | 16,24  | 1,47  | 1,71  |
|     | χFD (%)  | 2,25   | 2,39   | 0,00   | 4,17   | 0,97    | 43,77  | -0,58 | 0,69  |

Assimetria; CV = coeficiente de variação; Máx = valor máximo; Mín = valor mínimo; SMHf = susceptibilidade magnética em alta frequência; SMLf = susceptibilidade magnética em baixa frequência; χFD = frequência dependente da susceptibilidade magnética; VN = área de vegetação nativa; T1 = área recém-aberta; T7 = área com 7 anos de cultivo; T10 = área com 11 anos de cultivo; T17 = área com 17 anos de cultivo.

281

282 Tais resultados (Tabela 3) ocorreram uma vez que o fósforo tem uma alta  
 283 capacidade de adsorção e precipitação com os óxidos de Fe e Al, apresentados na  
 284 Tabela 4, portanto, quando se é realizada uma adubação do solo utilizando-se de  
 285 fertilizantes fosfatados grande parte do P aplicado é sorvida por causa dessas reações  
 286 químicas, tendo destaque a adsorção e a precipitação. Os minerais goethita, hematita  
 287 e outros óxidos de Fe juntamente com a gibbsita (óxido de Al) tendem a adsorver em  
 288 sua superfície o P aplicado no solo. O íon de fosfato encontrado em adubos  
 289 fosfatados, juntamente com os íons Al<sup>3+</sup> e, ou, Fe<sup>3+</sup> oriundos de solos ácidos, ou com

290 os íons  $\text{Ca}^{2+}$  encontrados em solos alcalinos geram uma reação química originando a  
 291 precipitação (Pinto et al., 2013; Vieira, 2017).

292

**Tabela 4.** Resultados da caracterização química das amostras de argila por fluorescência de raios-X.

| Área | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | KCl  | $\text{K}_2\text{O}$ | CaO  | $\text{TiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{ZrO}_2$ | Ki   | Kr   |
|------|-----------------------|-------------------------|----------------|------------------------|------|----------------------|------|----------------|-------------------------|----------------|------|------|
| %    |                       |                         |                |                        |      |                      |      |                |                         |                |      |      |
| VN   | 12,21                 | 29,43                   | 30,99          | 0,35                   | 0,09 | 0,13                 | 0,20 | 2,81           | 23,71                   | 0,10           | 1,79 | 1,18 |
| T1   | 8,88                  | 29,71                   | 29,61          | 0,29                   | 0,00 | 0,14                 | 0,41 | 3,14           | 27,71                   | 0,12           | 1,69 | 1,06 |
| T7   | 9,77                  | 28,75                   | 29,47          | 0,35                   | 0,00 | 0,15                 | 0,79 | 3,79           | 26,80                   | 0,15           | 1,74 | 1,09 |
| T10  | 12,29                 | 29,51                   | 31,17          | 0,45                   | 0,17 | 0,33                 | 0,91 | 2,76           | 22,30                   | 0,10           | 1,80 | 1,21 |
| T17  | 9,95                  | 28,91                   | 28,93          | 0,45                   | 0,14 | 0,25                 | 1,12 | 2,61           | 27,64                   | 0,00           | 1,70 | 1,06 |

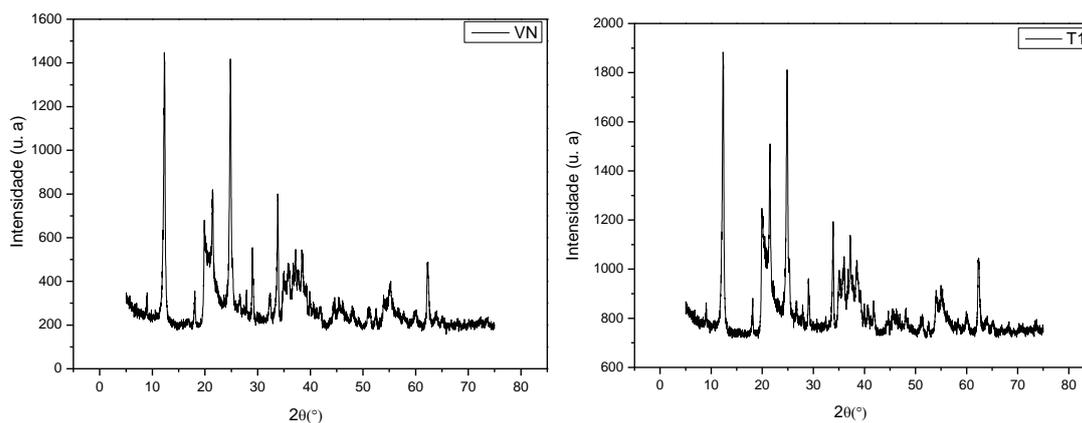
293 VN = área de vegetação nativa; T1 = área recém aberta; T7 = área com 7 anos de cultivo; T10

294 = área com 11 anos de cultivo; T17 = área com 17 anos de cultivo.

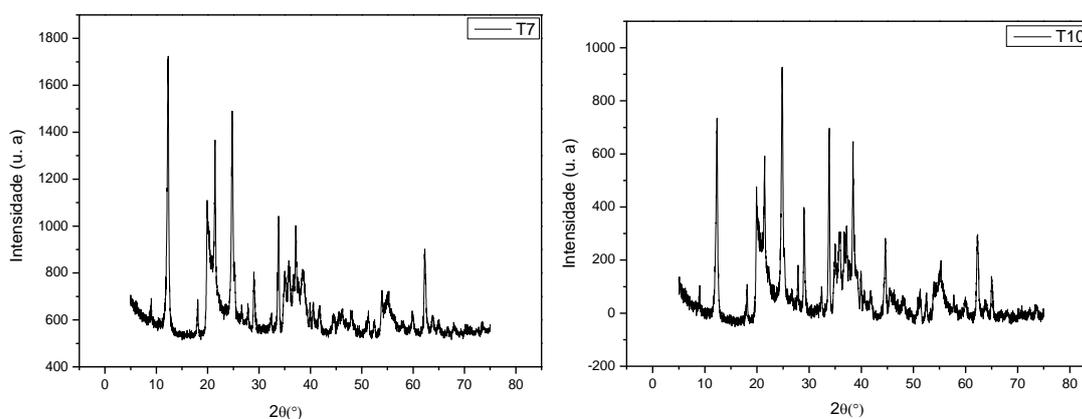
297

298 No perfil cristalográfico a fração argila da área VN mostrou-se ser composta por  
 299 caulinita (62%), trona (31%) e goethita (7%). A fração argila da área T1 é composta  
 300 por caulinita (78,8%), goethita (11,1%) e dióxido de silício (10,1%). A área T7 tem sua  
 301 fração argila composta por caulinita (59%), trona (31%) e goethita (10%). A  
 302 composição da fração argila da área T10 consiste em caulinita (54%), trona (39%) e  
 303 goethita (7%). Por fim, a fração argila da área T17 é composta por caulinita (56%),  
 304 trona (35%) e goethita (9%) (Figura 3).

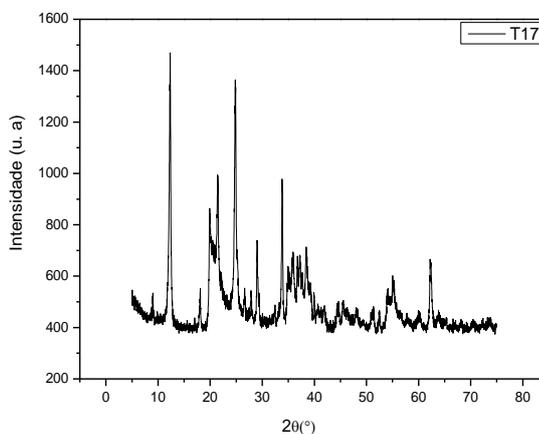
305



306



307



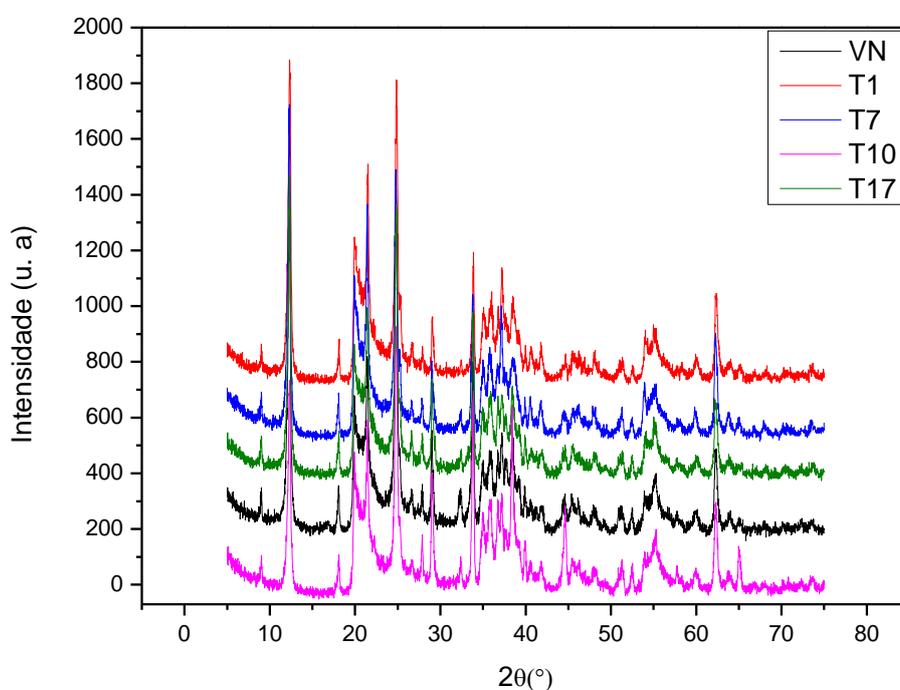
308

309 **Figura 3.** Difratogramas da fração argila dos solos avaliados das áreas agrícolas e de  
 310 vegetação nativa do bioma Cerrado.

311

312 O estudo dos difratogramas obtidos ocorreu com o auxílio do banco de dados  
 313 do software *X'Pert HighScorePlus*. Verifica-se semelhança nos picos entre os  
 314 difratogramas dos solos das áreas estudadas (Figura 4). A análise do difratograma

315 permitiu encontrar uma mistura de duas fases cristalina, revelando assim que as  
316 argilas resultam da combinação de dois tipos de diferentes minerais, sendo eles a  
317 goethita (COD - 9003079) e a caulinita (ICSD – 063192), cada argila com seu  
318 respectivo código de arquivo cristalográfico. A separação foi possível com a análise  
319 separada dos picos cristalográficos, onde cada fase tem seu pico de difração  
320 específico. O software *X'Pert HighScorePlus* também permitiu mostrar que a  
321 composição das argilas estudadas se dá por 85% de caulinita e 15% de goethita.  
322



323  
324 **Figura 4.** Difratoograma conjunto da fração argila dos solos avaliados das áreas  
325 agrícolas e de vegetação nativa do bioma Cerrado.

326

327 Observou-se no tratamento T10 que a fração P-Ca foi influenciada pelas  
328 sucessivas aplicações de calcário (aplicação de 5 Mg ha<sup>-1</sup> em 2005/2006; 1 Mg ha<sup>-1</sup>  
329 em 2007/2008; 2 Mg ha<sup>-1</sup> em 2012/2013) e gesso agrícola (0,5 Mg ha<sup>-1</sup> em 2005/2006),  
330 uma vez que que esta fração é susceptível a adição de fontes de cálcio, essas adições

331 somadas as aplicações fosfatadas, 0,4 Mg ha<sup>-1</sup> (2005/2006), promoveram o aumento  
332 significativo dessa fração na área avaliada. Essas aplicações influenciaram  
333 diretamente os valores de P disponível extraída via Mehlich-1, pois tal procedimento  
334 dissolve predominantemente o fósforo ligado ao cálcio, dessa forma, superestimando  
335 o P em solos com grande aporte de cálcio e/ou com pH mais elevado, como  
336 constatado por Silva & Raij (1999), Tokura et al. (2011) e Albuquerque et al. (2018).

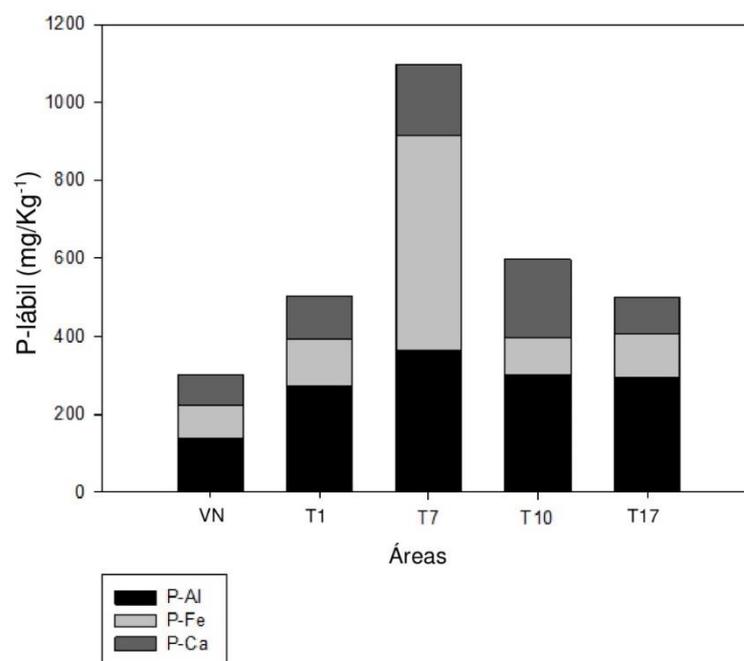
337 O pH é um dos fatores que influenciam de forma direta na disponibilidade de P  
338 no solo, uma vez que regula a quantidade de cargas positivas, portanto, é de suma  
339 importância a avaliação desse fator para a compreensão da dinâmica da  
340 disponibilidade do P. Na Tabela 2 observou-se que as áreas estudadas apresentaram  
341 pH de 4,42 (VN); 5,32 (T1); 5,86 (T7); 5,58 (T10) e 6,21 (T17), o que já era esperado  
342 em resposta ao aporte anual de calcário dolomítico nas áreas agrícolas (Tabela 1). O  
343 aumento do pH afeta positivamente a disponibilidade de P no solo, isso fica  
344 evidenciado nas áreas nas áreas T17, T7 e T10, que são respectivamente as áreas  
345 que apresentaram o pH menos ácidos e, conseqüentemente, maiores teores de P  
346 extraído via Mehlich-1 (Broggi, 2011; Viviani et al., 2010).

347 Outro fator importante para a dinâmica do P no solo é o seu conteúdo de  
348 matéria orgânica, pois tem a capacidade de reduzir os sítios de adsorção dos  
349 principais adsorventes de P no solo, óxidos de Fe e Al, em que, por meio da interação  
350 com esses óxidos, a superfície dos mesmos é revestida por moléculas de ácidos  
351 húmicos, acético e málico e/ou a formação de compostos. Segundo Moura et al.  
352 (2015) na camada 0,0-0,2 m o maior teor de matéria orgânica reduzirá a adsorção do  
353 P pelos óxidos (Moura et al., 2018).

354 Os resultados do fracionamento do fósforo inorgânico (Pi) das áreas estudadas  
355 estão apresentados na Figura 5. Na variação das médias das frações de Pi avaliadas

356 (P-Al, P-Fe e P-Ca), observou-se que o tratamento T7 apresentou aporte de Pi e, esse  
 357 comportamento é esperado, uma vez que o Pi tende a aumentar sua concentração  
 358 em áreas que são aplicadas fontes inorgânicas de P, estando compatível com o  
 359 histórico da área, pois a mesma recebeu a adição de 0,5 Mg ha<sup>-1</sup> de adubação  
 360 fosfatada, 0,1 Mg ha<sup>-1</sup> a mais que os tratamentos T17 e T10 (T1 e VN não receberam  
 361 adubação alguma), outro fator que contribuiu para os altos valores de P adsorvido foi  
 362 o conteúdo de matéria orgânica, sendo o menor conteúdo de carbono orgânico (7,49  
 363 g. kg<sup>-1</sup>) observado nas áreas estudadas.

364



365

366 **Figura 5.** Frações inorgânicas de fósforo nos solos das áreas agrícolas e sob  
 367 vegetação nativa no Cerrado piauiense.

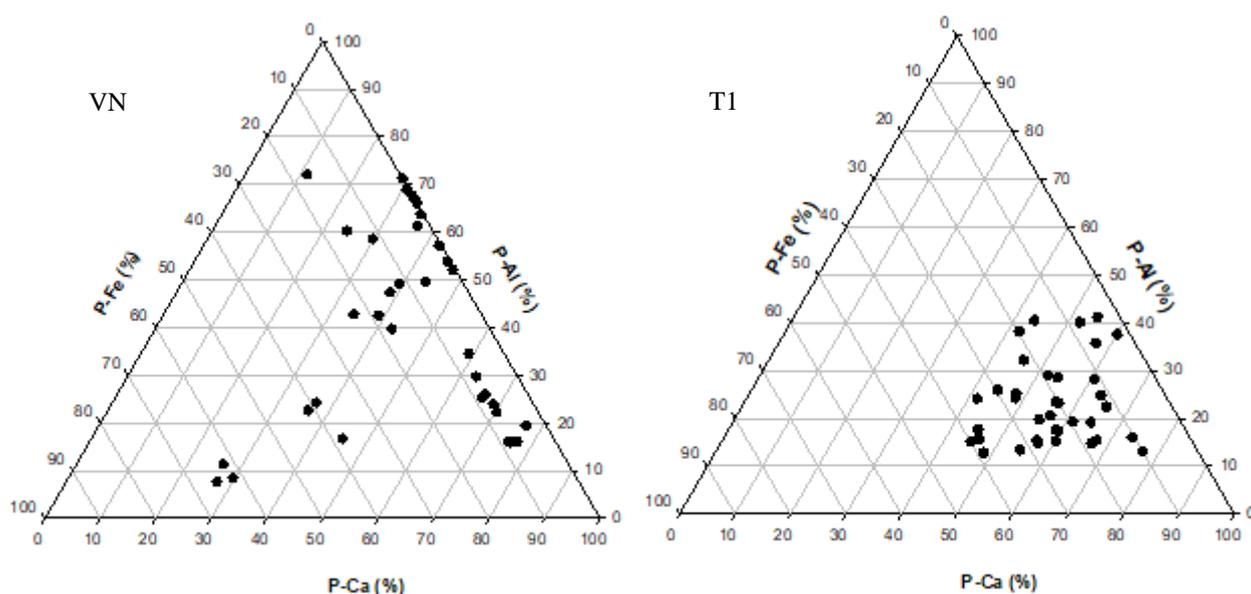
368

369 Verificou-se que as frações mais expressivas nestas áreas foram P-Al e P-Fe  
 370 (Tabela 3, Figura 5), esses resultados são inerentes a solos altamente intemperizados  
 371 e ácidos, onde as frações P-Al e P-Fe são abundantes, enquanto em solos  
 372 calcarizados mais jovens de áreas áridas e semiáridas, que possuem geralmente pH

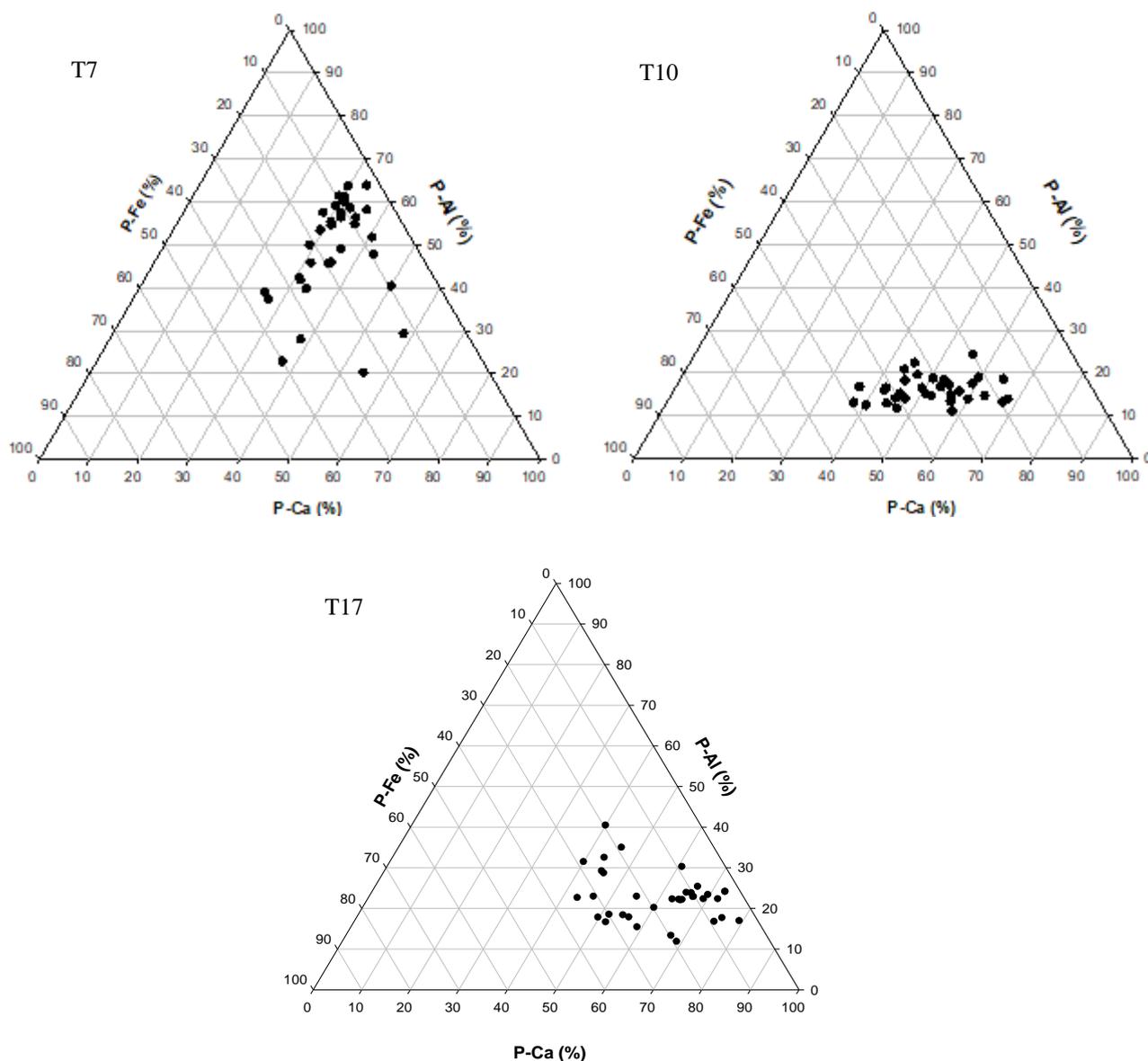
373 alcalino, há a predominância da fração P-Ca. Esses altos valores são em decorrência  
 374 da presença dos óxidos de Fe e Al. A predominância do P-Fe deve-se a mineralogia  
 375 da área, pois, como observado na Figura 4, a fração argila é composta por caulinita e  
 376 goethita, onde, embora a caulinita seja predominante nos solos (85%), solos ricos em  
 377 caulinita tem uma menor capacidade de retenção de P, mostrando que esse mineral  
 378 tem baixa participação na dinâmica do P em Latossolos do Cerrado (Amaizah et al.,  
 379 2012; Eberhardt et al., 2008; Melese et al., 2015).

380 A Figura 6 apresenta a distribuição percentual das frações de fósforo inorgânico  
 381 de cada ponto coletado em cada área avaliada. Na área de vegetação nativa verifica-  
 382 se que a maioria dos pontos contém altos valores de P ligados aos óxidos de Fe e Al  
 383 com valores mínimos de P-Ca, já sendo previsto, pois os Latossolos do Cerrado  
 384 piauiense são altamente intemperizados, ou seja, em decorrência da exposição aos  
 385 fatores intempéricos a longo prazo são encontrados neles altos teores de óxidos de  
 386 Fe (goethita e hematita) e óxidos de Al (gibbsita) e baixos valores de bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  
 387  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ), portanto, é comum que a maior dos íons fosfáticos sejam adsorvidos por  
 388 esses óxidos resultando em baixos teores na solução do solo (Embrapa, 2018).

389



390



391

392

393 **Figura 6.** Distribuição percentual das frações de fósforo inorgânico nos solos das  
 394 áreas agrícolas e sob vegetação natural no Cerrado piauiense.

395

396 Na área T1 (área derrubada e destocada para primeiro cultivo) observou-se o  
 397 efeito causado pela decomposição da matéria orgânica sobre a capacidade de  
 398 adsorção de P pelos óxidos de Fe e Al, pois quando comparada a área sob vegetação  
 399 natural (VN), identifica-se uma mudança em relação aos sítios de preferência de  
 400 adsorção do Pi (Figura 6). Tal mudança é decorrente da presença da matéria orgânica  
 401 remanescente da área de vegetação nativa, pois os ácidos orgânicos competem pelos

402 sítios de adsorção dos óxidos e uma vez adsorvidos eles alteram as cargas  
403 superficiais por meio do aumento das cargas negativas da superfície dos minerais  
404 causando uma repulsa eletroestática dos íons de fosfato, assim, ocorrendo a  
405 diminuição de adsorção do P por esses mesmos óxidos (Andrade et al., 2002; Antelo  
406 et al., 2007; Fink et al., 2016, b), o que explica os baixos valores percentuais referente  
407 ao P-Al.

408 Os altos valores de óxidos de Si (29,61%) nos solos da área T1, área derrubada  
409 e destocada para primeiro cultivo, podem ter contribuído para esses baixos teores de  
410 P-Al (Tabela 4), pois segundo Pozza et al. (2007), os íons de Si e de P podem competir  
411 pelos sítios de adsorção da gibbsita. Esses fatores, juntamente com a aplicação de  
412 calcário na área T1, fizeram com que os valores de P-Al fossem reduzidos  
413 (Schwertmann et al., 1986; Sibanda & Young, 1986; Fink et al., 2016, c).

414 No entanto, a reação com os íons de silício ocasionou o aumento da adsorção  
415 pelos óxidos de Fe e pelas bases de  $\text{Ca}^{2+}$ , esse comportamento ocorre devido a força  
416 de atração dos óxidos de Fe ser maior que dos ácidos orgânicos, ou seja, embora  
417 haja presença de matéria orgânica no solo a mesma não interfere de forma  
418 significativa na capacidade de adsorção dos óxidos de Fe, uma vez que a matéria  
419 orgânica pode causar o retardamento da adsorção pelos óxidos de Fe, mas não o  
420 impede. Segundo Borggaard et al. (2005) e Guan et al. (2006), solos ricos em goethita  
421 e gibbsita o conteúdo de matéria orgânica não interfere na adsorção do P, pois esses  
422 minerais têm grande afinidade com o fosfato.

423 O uso intensivo do sistema de plantio convencional na área T7, causou a  
424 aceleração do processo de degradação da matéria orgânica e, portanto, sem a  
425 competição pelos sítios de adsorção com os ácidos orgânicos, a maior parte dos  
426 pontos avaliados apresentaram percentagem de adsorção pelos óxidos de Al maiores

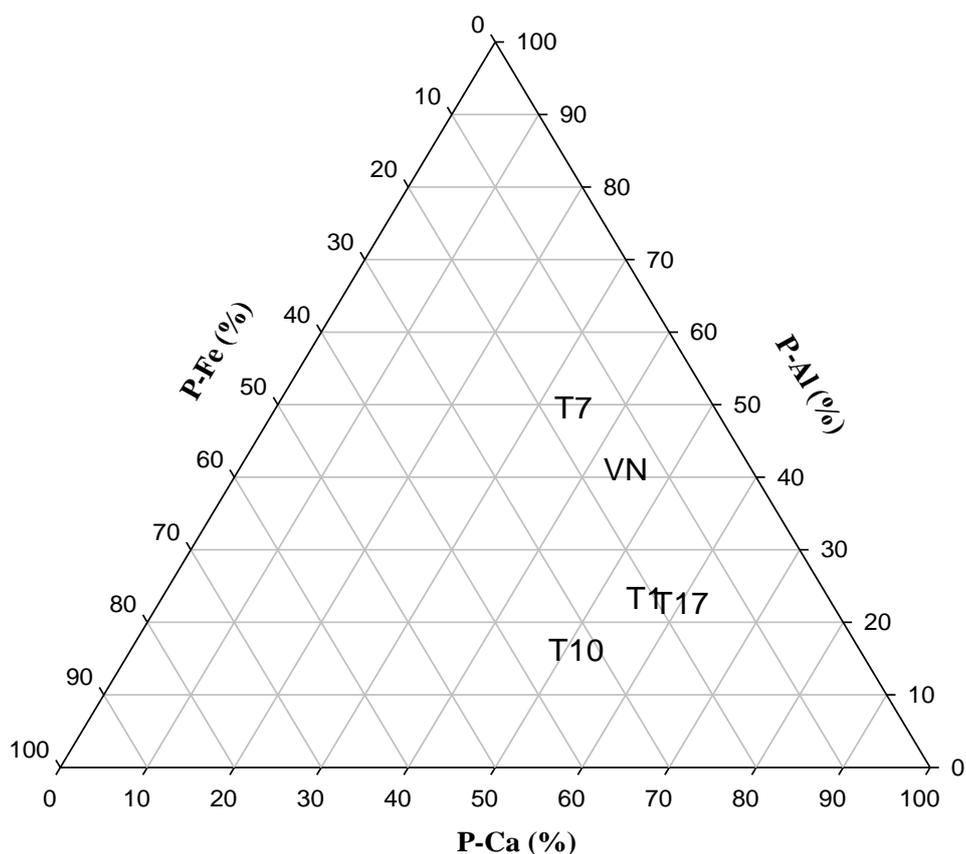
427 que a área T1, esses altos valores de adsorção também são provenientes da  
428 adubação fosfatada ( $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Além disso, a aplicação de calcário dolomítico  
429 (Tabela 1) compete com os óxidos de Fe pelos íons de fosfatos e atua como  
430 neutralizador de parte do alumínio disponível no solo, gerando um equilíbrio  
431 percentual aparente entre as frações de P-Fe e P-Ca (Figura 6).

432 Na área T10 a percentagem de P adsorvido pelos óxidos de Al caiu  
433 drasticamente, com essa diminuição do P-Al as outras frações tiveram um aumento  
434 (Figura 6). Essa queda nos valores de P-Al era esperada, uma vez que a calagem  
435 realizada sucessivas vezes na área ( $5 \text{ Mg ha}^{-1}$  em 2005;  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  em 2007 e em 2012  
436  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) com o neutraliza o alumínio trocável, aumenta os teores de Ca e,  
437 conseqüentemente, a saturação de bases. Então, com o Al lixiviado da área  
438 agricultável, e com o solo carregado de bases de  $\text{Ca}^{2+}$  e com elevados teores naturais  
439 de óxidos de Fe (22,30%), o P aplicado no solo foi adsorvido, resultando nos altos  
440 valores das frações P-Ca e P-Fe (Dadalto & Fullin, 2001; Embrapa, 2013).

441 Ao analisar o gráfico da área T17 observa-se semelhanças com o gráfico da  
442 área T10 com pequenas diferenças, pois alguns pontos apresentaram maior  
443 percentual para a fração P-Al, entretanto, os valores não são tão elevados como os  
444 encontrados na área T7 (Figura 6). Este comportamento se dá pelo uso a longo prazo  
445 do sistema convencional, o que ocasiona a aceleração do processo de decomposição  
446 da matéria orgânica e, quando comparados aos demais tratamentos, pelos baixos  
447 valores de silício (28,93%), resultando em uma baixa competição pelos sítios de  
448 adsorção dos óxidos de Al (Tabela 4) e valores altos para a fração P-Ca decorrentes  
449 das sucessivas calagens e da gessagem na área T17 (Tabelas 1 e 3)

450 O tratamento T7 apresentou os valores percentuais mais equilibrados entre as  
451 três frações em análise (P-Al, P-Fe e P-Ca) de acordo com a Figura 7. Esse

452 comportamento é resultado da correção de acidez do solo realizada nesse tratamento  
 453 por meio da aplicação de calcário, que limita a atividade do alumínio, no entanto, a  
 454 aplicação de calcário fornece consigo íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que podem adsorver os  
 455 íons de P, assim, competindo com os óxidos de Fe e Al por esses íons.



456

457 **Figura 7.** Médias percentuais das frações de fósforo inorgânico nos solos das áreas  
 458 agrícolas e sob vegetação nativa no Cerrado piuiense.

459

460 As médias percentuais nas áreas T1 e T17 foram muito próximas, quase  
 461 sobrepondo uma à outra (Figura 7). Estes resultados são explicados devido à  
 462 presença de agentes que inibem a atividade do alumínio no solo (T17) e/ou agentes  
 463 que competem pelos sítios de adsorção dos óxidos de Al (T1). A presença desses  
 464 agentes (calcário e ácidos orgânicos), além de inibir a atividade dos óxidos de Al, tais  
 465 agentes podem adsorver os íons de P (calcário) e liberar o P retido pela matéria

466 orgânica (ácidos orgânicos) alimentando a solução e os demais agentes adsorventes  
467 de P (Pozza et al. 2007; Fink et al., 2016, b, c).

468

### 469 **3.2 Susceptibilidade Magnética do Solo**

470 Os maiores valores de susceptibilidade magnética, em alta (SM<sub>Hf</sub>) e baixa  
471 frequência (SM<sub>Lf</sub>), foram observados nas áreas T17 e T1, respectivamente (Tabela  
472 3), esses resultados são compatíveis com os altos teores de óxidos de ferro (Óxidos-  
473 Fe) nos solos estudados (Tabela 4), pois essas variáveis estão intrinsecamente  
474 relacionadas. Estudos apontam que a assinatura magnética do solo pode ser usada  
475 para identificar ambientes pedogênicos distintos, diferentes ambientes de formação  
476 de óxido de Fe, alterações nos atributos físicos, químicos e mineralógicos em  
477 Latossolos, além de permitir a geração de resultados que podem ser utilizados para  
478 a neoformação de minerais com expressão magnética em Latossolos (Barbieri et al.,  
479 2013, 2014; Camargo et al., 2014, 2016; Barrios, 2016).

480 Trabalhos têm comprovado que a SM pode ser utilizada como indicador e  
481 quantificador indireto dos atributos do solo. Com isso a SM pode auxiliar a delimitar  
482 áreas com alta variabilidade dos atributos do solo, pois a mesma aumenta a precisão  
483 de outros métodos utilizados para padronizar tais propriedades (Matias et al., 2014;  
484 Marques Jr. et al., 2014).

485 Mesmo em solos com baixos teores de Óxidos-Fe, 4% na forma de  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
486 (hematita), a SM tem-se mostrado útil na quantificação de atributos físicos, químicos  
487 e mineralógicos como comprovado por Siqueira et al. (2010). Também tem mostrado  
488 relação com o CO<sub>2</sub> presente no solo, pois estudos feitos em cultivos de cana-de-  
489 açúcar utilizaram a SM para apontar áreas com potenciais de emissão de CO<sub>2</sub>. Ainda,  
490 fazendo-se uso da SM, quantificou o fósforo adsorvido no solo, uma vez que o P é

491 facilmente adsorvido pelos óxidos de ferro encontrados no solo, e esses têm  
492 comportamento magnético variado (Barrios et al., 2012; Leal et al., 2015; Peluco et  
493 al., 2015).

494 Os menores valores observados para a variável SM foram obtidos nos solos  
495 das áreas T10 e VN (Tabela 3). Estes resultados são condizentes com os valores  
496 encontrados na Tabela 4, uma vez que apresentam os menores teores de óxidos de  
497 Fe. Tais óxidos são os minerais magnéticos mais encontrados na natureza, o seu  
498 magnetismo deve-se a sua estrutura, pois os mesmos possuem uma estrutura  
499 cristalina formada por uma rede de íons de oxigênio com espaços estruturais, que  
500 embora sejam pequenos, são preenchidos de forma regular por íons de ferro férrico  
501 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e/ou íons de ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), e esses íons são os responsáveis por  
502 determinar o comportamento magnético desses óxidos (Dunlop & Ozdemir, 1997;  
503 Silva, 2016).

504 Nos solos das áreas T10 e VN foram observados valores baixos para os  
505 dióxidos de Ti (Tabela 4), que embora sejam encontrados em valores bem abaixo dos  
506 demais óxidos predominantes no solo, tais como, óxidos de Al, Fe e Si, tem papel tão  
507 importante na susceptibilidade magnética do solo quanto os Óxidos-Fe. Os dióxidos  
508 de Ti ( $\text{TiO}_2$ ) se apresentam como minerais magnéticos, quando encontrados em  
509 conjunto com os óxidos de Fe ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_3$  e  $\text{FeTiO}_3$ ), nessas formas o  $\text{TiO}_2$  tem seu  
510 comportamento magnético semelhante aos de óxidos de Fe (Dunlop & Ozdemir, 1997;  
511 Silva, 2016).

512 De forma geral os valores de SM indicam a presença de hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )  
513 e/ou goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) (Figura 4). Embora tais minerais sejam óxidos de Fe,  
514 apresentam comportamento antiferromagnético, isto é, existe um pareamento do  
515 momento magnético de materiais com ligações iônicas em direções opostas

516 promovendo o cancelamento dos momentos de spin, sendo assim, o mineral não  
517 apresenta momento magnético algum (Thompson & Oldfield, 1986). No entanto,  
518 devido a sua estrutura antiferromagnética inclinada, a hematita apresenta um  
519 momento magnético macroscópico, assim, apresentando ferromagnetismo fraco,  
520 podendo torna-se ferrimagnética com o aumento do teor de Ti, já a goethita apresenta  
521 estado ferromagnético superimposto mas de baixa intensidade (Dunlop & Ozdemir,  
522 1997; Dearing, 1999; Callister, 2002; Matias et al., 2013; Matias et al., 2015).

523 A frequência dependente da suscetibilidade magnética ( $\chi_{FD}$ ) é obtida por meio  
524 da diferença entre campos magnéticos fraco/forte (alta e baixa frequência)  
525 encontrados nas amostras, onde é possível avaliar a presença de partículas  
526 ferrimagnéticas superparamagnéticas (SP) ou de multidomínios (MD), e tal parâmetro  
527 fornece uma estimativa de contribuição dessas partículas no solo. A  $\chi_{FD}$  é útil para o  
528 entendimento das condições edafoclimáticas e dos processos pedogenéticos que  
529 atuam no solo (Dearing, 1999).

530 Para Dearing (1999), solos com  $\chi_{FD} < 2\%$  predominam minerais de grãos  
531 multidomínios, com os superparamagnéticos  $< 10\%$ ; solos com  $\chi_{FD}$  entre 2 e 10%  
532 indicam que os grãos superparamagnéticos e multidomínios estão em proporções  
533 próximas ou iguais no solo; valores da  $\chi_{FD}$  entre 10 e 14% apontam os grãos  
534 superparamagnéticos tem teores  $> 75\%$ ;  $\chi_{FD} > 14\%$  são considerados raros, erro na  
535 medição ou anisotropia.

536 Nos solos das áreas VN, T1, T7 e T17 observou-se que a  $\chi_{FD}$  está entre 2 e  
537 10%, ou seja, os minerais SP e MD estão em proporções próximas no solo, sendo um  
538 indicativo de que os solos dessas áreas são provenientes de materiais geológicos com  
539 baixos teor Fe (Tabela 4). Entretanto, os solos da área T10 apresentaram a  $\chi_{FD} >$   
540 14%, esse percentual não deve ser visto como um erro de leitura, mas como um

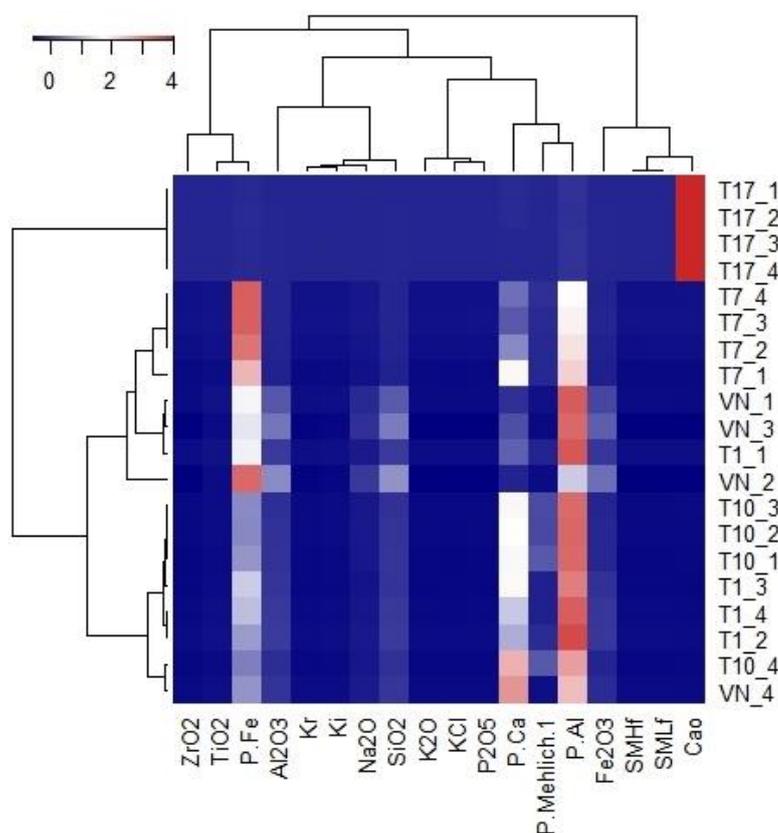
541 indicativo de que o solo dessa área é oriundo de rochas magmáticas, o que justifica  
 542 os teores elevados de partículas superparamagnéticas.

543 Outra possível justificativa para tal ocorrido é que o material avaliado tenha  
 544 comportamento anisotrópico, ou seja, a suscetibilidade magnética sofre variação  
 545 quando medida ao longo de três eixos perpendiculares entre si (Silva, 2010). No  
 546 entanto, tais valores de  $\chi_{FD}$  nos solos da área T10 podem ainda ser um indicativo de  
 547 queimadas, algo que é intrínseco ao bioma Cerrado e que é inerente a técnica de  
 548 Coivaras (derrubada e queima da mata nativa) bastante difundida na região.

549

### 550 3.3 Análise de Agrupamento e Componentes Principais

551 A análise de agrupamentos das áreas estudadas forneceu um dendrograma  
 552 com a formação de 3 grupos distintos (Figura 8).



553

554 **Figura 8.** Heatmap baseado na matriz de correlação das variáveis usando  
 555 agrupamentos hierárquicos de ligação completa baseados em distâncias euclidianas.

556 VN = área de vegetação nativa; T1 = área recém aberta; T7 = área com 7 anos de  
557 cultivo; T10 = área com 11 anos de cultivo; T17 = área com 17 anos de cultivo.

558

559 No primeiro grupo apenas as médias da área T17 foram agrupadas, isso  
560 ocorreu devido aos altos valores de CaO que ocasionou formação de um cluster entre  
561 a susceptibilidade magnética, alta e baixa frequência, e esse cluster se correlacionou  
562 com o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Essa correlação forte entre o CaO e a área T17 é compatível com o seu  
563 histórico, pois esta área foi dentre todas a que mais recebeu calcário dolomítico  
564 (Tabela 1), sendo aplicada  $3,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  a mais que o aplicado nos solos das áreas T10  
565 e T1 e  $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  em relação a área T7.

566 O segundo grupo é formado por todas as médias da área T7, 3 da área VN e 1  
567 da área T1. Onde o P-Fe forma o primeiro cluster com o  $\text{TiO}_2$ , indicando que os íons  
568 de Ti estão associados com os Óxidos-Fe, que em seguida, correlacionaram com o  
569  $\text{ZrO}_2$ , o que pode ser explicado devido ao Zr ser encontrado na natureza associado  
570 ao Fe e ao Ti. A forte correlação entre as médias da área T7 e o P-Fe é justificada  
571 devido a essa fração do Pi ter sido a mais expressiva encontrada nessa área, a  
572 correlação com as 3 médias da área VN deve-se ao teor elevado dessa fração de Pi  
573 na mesma, abaixo apenas da fração P-Al (Tabela 3; Figura 5). Na Figura 6 observou-  
574 se uma quantidade considerável de pontos que apresentaram percentual alto para a  
575 fração P-Fe, assim, justificando a presença de 1 média da área T1 no segundo grupo.

576 Por fim, o terceiro grupo é constituído de todas as médias da área T10, 3 da  
577 área T1 e 1 da área VN. Observa-se que os primeiros clusters são formados entres  
578 os óxidos e os índices de intemperismo, e os clusters seguintes são formados pelas  
579 frações do Pi. As variáveis mais expressivas nesse grupo foram as frações de Pi, P-  
580 Al e P-Ca, o que corrobora com os dados apresentados na Tabela 3, que apontam

581 que na área T10 encontram-se os maiores teores, dentre todas as áreas avaliadas,  
 582 de P-Ca e o segundo maior teor de P-Al, com praticamente todos os pontos de coleta  
 583 apresentando percentual elevado de P-Ca (Figura 5). Um raciocínio análogo pode ser  
 584 utilizado para compreender o que levou as médias das áreas VN e T1 a serem  
 585 inseridas neste grupo, pois na Figura 6 observou-se uma boa quantidade de pontos  
 586 com percentual alto de P-Al na área VN, enquanto na área T1 apresenta pontos com  
 587 alta porcentagem de P-Ca.

588 Para complementar a classificação obtida por meio da análise de agrupamento,  
 589 a matriz de dados (frações de P, óxidos, susceptibilidade magnética e índices de  
 590 intemperismos) foi escalonada por Z-escores e em seguida processou-se a análise de  
 591 componentes principais (ACP). Foram selecionados três componentes principais  
 592 obtidos por rotação varimax conjugada com teste normalização de Kaiser, onde o  
 593 primeiro componente concentrou 40,60% da variância total, o segundo 29,19% e o  
 594 terceiro 15,42%, acumulando 85,68% na variância total (Tabela 5).

595

596 **Tabela 5.** Correlação entre variáveis originais e componentes principais dos atributos  
 597 químicos e mineralógicos do solo das áreas agrícolas e vegetação nativa avaliadas.

| Variável                       | CP1   | CP2   | CP3   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| P-Al                           | -0,36 | 0,03  | -0,74 |
| P-Fe                           | -0,31 | 0,55  | -0,64 |
| P-Ca                           | 0,15  | 0,08  | -0,53 |
| P-Meh                          | -0,05 | -0,47 | -0,71 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,44  | 0,10  | 0,61  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0,99 | 0,09  | 0,07  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,98  | 0,10  | 0,13  |
| CaO                            | -0,53 | -0,80 | -0,01 |
| TiO <sub>2</sub>               | -0,31 | 0,82  | -0,44 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,27  | -0,85 | -0,42 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,36  | -0,73 | -0,43 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,93  | -0,24 | -0,01 |
| KCl                            | 0,52  | -0,85 | -0,09 |
| Zr <sub>2</sub> O              | 0,24  | 0,92  | -0,20 |

## CONTINUAÇÃO

|                           |                      |                |              |
|---------------------------|----------------------|----------------|--------------|
| Ki                        | 0,95                 | 0,08           | -0,15        |
| Kr                        | 0,99                 | -0,02          | -0,05        |
| SMLf                      | -0,79                | -0,51          | 0,20         |
| SMHf                      | -0,80                | -0,48          | 0,21         |
| Variância total explicada |                      |                |              |
| Componente                | Autovalores iniciais |                |              |
|                           | Total                | % de variância | % cumulativa |
| 1                         | 7,31                 | 40,60          | 40,60        |
| 2                         | 5,25                 | 29,19          | 69,79        |
| 3                         | 2,86                 | 15,42          | 85,68        |

598

599 O primeiro componente (CP1) apresenta correlações elevadas e positivas com  
600 as variáveis SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, Ki e Kr. Ainda se observa correlações elevadas e negativas  
601 para as variáveis Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SMLf e SMHf. O comportamento opositor das variáveis SMLf,  
602 SMHf e Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em relação a variável SiO<sub>2</sub> é em função do comportamento  
603 diamagnético dos óxidos de silício (quartzo), isto é, se apresenta magneticamente  
604 neutro, no entanto, sobre um campo magnético indutor adquire magnetização  
605 antiparalela, essa magnetização é dependente do campo uma vez que se reduz a  
606 zero na ausência do mesmo, portanto, a SM desses minerais é negativa e da ordem  
607 de 10<sup>-6</sup> (SI). Sendo assim, à medida em que as concentrações dos óxidos de silício se  
608 elevam, a SM decresce, por outro lado, quanto maior os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> proporcional  
609 será o crescimento dos valores da SM.

610 Tal comportamento, o diamagnetismo dos óxidos de silício, também pode  
611 explicar a divergência da SM com as os índices Ki e Kr, pois eles são oriundos da  
612 relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e as áreas avaliadas apresentaram como muito intemperizadas e  
613 com caráter caulínítico (Tabela 4; Figura 4). Esse componente reflete o  
614 comportamento magnético das áreas avaliadas (Butler, 2004; Carvalho et al., 2016).

615 O segundo componente (CP2) apresenta correlações elevadas e positivas com  
616 a variáveis Zr<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub>, correlação elevada negativa com as variáveis CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O

617 e KCl, e uma correlação positiva moderada com o P-Fe. As correlações positivas com  
618 as variáveis  $Zr_2O$  e  $TiO_2$  justificam-se, pois, como dito anteriormente, esses óxidos  
619 podem ser encontrados associados na natureza. A correlação moderada como P-Fe  
620 pode indicar que esses óxidos,  $Zr_2O$  e  $TiO_2$ , podem estar em conjunto com os Óxidos-  
621 Fe. O comportamento opositor do  $P_2O_5$  deve-se ao fato desses óxidos, quando  
622 associados ao Óxidos-Fe, participarem da adsorção do P no solo, e  
623 conseqüentemente, contribuirão com a fração P-Fe. Enquanto a divergência com o  
624 CaO é explicada pela relação direta desse óxido com a fração P-Ca, que pode  
625 competir pelos íons fosfáticos com a fração P-Fe (Figura 6). Esse componente reflete  
626 a adsorção de P pelos Óxidos-Fe do solo.

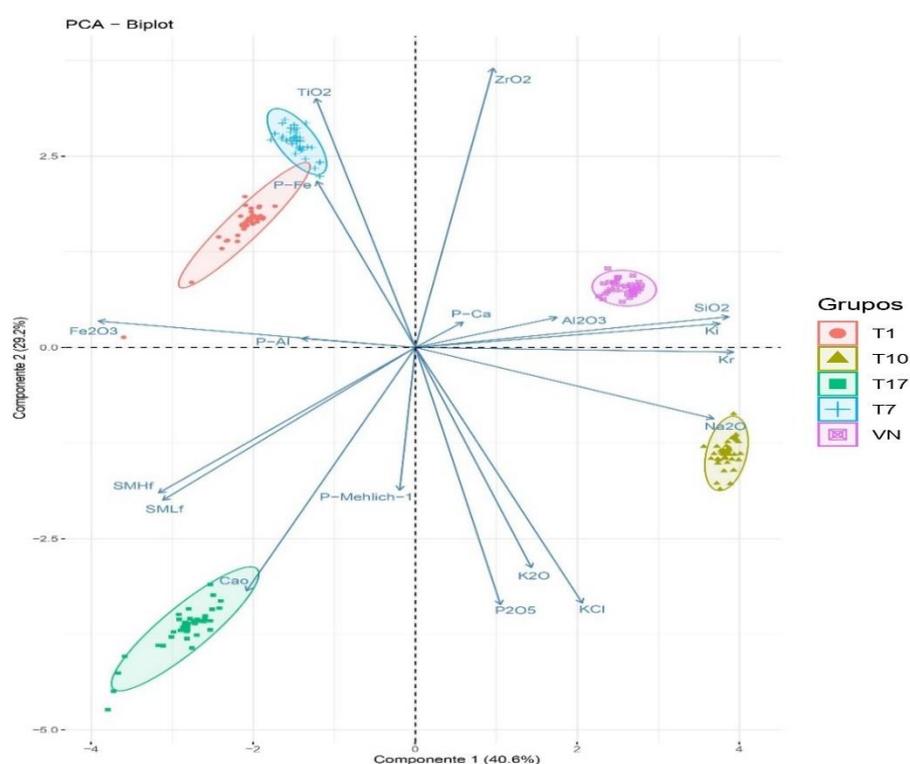
627 O terceiro componente (CP3) apresenta correlação moderada e positiva com a  
628 variável  $Al_2O_3$  correlações elevadas e negativas com as variáveis P-Mehlich-1 e P-Al,  
629 ainda apresentou correlação moderada negativa com P-Ca. O comportamento  
630 divergente entre as frações de P para com  $Al_2O_3$  pode ser explicado devido a aplicação  
631 de fontes de Ca, por meio da calagem e gessagem, que inibem a atividade do Al no  
632 solo, essas técnicas são empregadas nas áreas de plantio anterior ou  
633 concomitantemente com a aplicação da adubação fosfatada, dessa forma, sempre  
634 que o conteúdo de P no solo foi elevado por meio da adubação, o  $Al_2O_3$  foi  
635 neutralizado. Esse componente reflete a relação entre os óxidos de Al, adubação  
636 fosfatada e fontes de Ca.

637 A caracterização de tendências entre as variáveis está exposta no gráfico de  
638 scores (Figura 9). Verifica-se que o grupo da área T17 foi influenciado pelos valores  
639 negativos, ao longo do eixo do CP1, por SMHf, SMLf e CaO, isso pode ser explicado,  
640 pois nessa área foram aplicadas as maiores quantidades de calcário, dentre todas as  
641 áreas, e encontrados as maiores leituras da susceptibilidade magnética (Tabela 3). O

642 grupo da área T10, ao longo do eixo do CP1, foi influenciado pelos valores do  $\text{Na}_2\text{O}$  e  
 643 pelo Kr, uma vez que essa área apresentou os maiores valores para estas variáveis  
 644 (Tabela 4), outros óxidos,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e KCl, podem também ter influenciado o  
 645 comportamento desse grupo.

646 O grupo formado pela área VN, ao longo do eixo do CP1, teve influência dos  
 647 valores dos óxidos de Al e Si em conjunto com o índice Ki, o que ocorreu em função  
 648 dos valores desses índices, pois essa área apresentou altos valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o maior  
 649 valor de  $\text{SiO}_2$ , e o segundo maior percentual de Ki, atrás apenas da área T10 (Tabela  
 650 4). Por fim, os grupos das áreas T1 e T7, ao longo do eixo do CP2, ficaram próximos  
 651 um ao outro, a proximidade dessas áreas deve-se aos valores do  $\text{TiO}_2$ , mas  
 652 principalmente, aos valores da fração P-Fe, em que essas áreas apresentaram os  
 653 teores mais elevados dessa fração do Pi, especialmente a T7.

654



655

656 **Figura 9.** Gráfico de scores dos componentes 1 e 2 e para os atributos químicos e  
 657 mineralógicos do solo das áreas agrícolas e vegetação nativa.

658

659           Na Tabela 6 se encontram os valores das correlações entre os atributos do solo  
660 nas áreas estudadas. Correlações negativas e positivas foram constatadas entre a  
661 SM (alta e baixa frequência) e os óxidos presentes na fração argila do solo, frações  
662 de P, as variáveis P-Al e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não foram significativas a 5%. A SM apresentou  
663 correlação negativa com todas as variáveis de P (frações e disponibilidade), com  
664 exceção da variável P-Mehlich-1 que apresentou correlação positiva com SMLf e não  
665 significativa a 5% com a SMHf.

666 **Tabela 6.** Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos químicos e mineralógicos do solo das áreas agrícolas e  
 667 vegetação nativa avaliadas.

|                                | P-Fe    | P-Ca    | P-Meh   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO      | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | KCl      | ZrO <sub>2</sub> | Ki       | Kr       | SMLf     | SMHf     |
|--------------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|----------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| P-Al                           | 0,469** | 0,352** | 0,477** | -0,401**                       | 0,302**                        | -0,411**         | 0,106    | 0,415**          | 0,163*                        | 0,25**           | -0,396**          | -0,142   | 0,121            | -0,29**  | -0,322** | 0,131    | 0,114    |
| P-Fe                           |         | 0,163*  | 0,161*  | -0,642**                       | 0,295**                        | -0,344**         | -0,205** | 0,847**          | -0,24**                       | -0,297**         | -0,34**           | -0,544** | 0,513**          | -0,0869  | -0,26**  | -0,178*  | -0,158*  |
| P-Ca                           |         |         | 0,292** | -0,055                         | -0,16*                         | 0,11             | -0,187*  | 0,191*           | 0,118                         | 0,219**          | 0,0692            | 0,0329   | 0,226**          | 0,161*   | 0,154*   | -0,183*  | -0,185*  |
| P-Meh                          |         |         |         | -0,349**                       | -0,0386                        | -0,166*          | 0,335**  | -0,0574          | 0,642**                       | 0,679**          | 0,0088            | 0,41**   | -0,244**         | -0,0267  | -0,0124  | 0,159*   | 0,14     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         |         |         |                                | -0,375**                       | 0,573**          | -0,479** | -0,383**         | -0,29**                       | 0,0112           | 0,226**           | 0,0678   | 0,181*           | 0,186*   | 0,374**  | -0,224** | -0,243** |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         |         |         |                                |                                | -0,956**         | 0,453**  | 0,344**          | -0,367**                      | -0,446**         | -0,954**          | -0,596** | -0,177*          | -0,958** | -0,997** | 0,733**  | 0,748**  |
| SiO <sub>2</sub>               |         |         |         |                                |                                |                  | -0,623** | -0,286**         | 0,103                         | 0,233**          | 0,878**           | 0,407**  | 0,32**           | 0,912**  | 0,968**  | -0,768** | -0,779** |
| CaO                            |         |         |         |                                |                                |                  |          | -0,487**         | 0,571**                       | 0,319**          | -0,241**          | 0,418**  | -0,925**         | -0,512** | -0,505** | 0,779**  | 0,774**  |
| TiO <sub>2</sub>               |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  | -0,577**                      | -0,519**         | -0,47**           | -0,816** | 0,781**          | -0,145   | -0,292** | -0,259** | -0,237** |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               | 0,903**          | 0,462**           | 0,906**  | -0,645**         | 0,263**  | 0,3**    | 0,115    | 0,0884   |
| K <sub>2</sub> O               |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  | 0,413**           | 0,843**  | -0,43**          | 0,269**  | 0,373**  | 0,000404 | -0,0377  |
| Na <sub>2</sub> O              |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   | 0,692**  | -0,0356          | 0,938**  | 0,949**  | -0,614** | -0,624** |
| KCl                            |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   |          | -0,644**         | 0,448**  | 0,536**  | -0,0109  | -0,0385  |
| ZrO <sub>2</sub>               |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   |          |                  | 0,3**    | 0,235**  | -0,667** | -0,656** |
| Ki                             |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   |          |                  |          | 0,972**  | -0,811** | -0,816** |
| Kr                             |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   |          |                  |          |          | -0,768** | -0,78**  |
| SMLf                           |         |         |         |                                |                                |                  |          |                  |                               |                  |                   |          |                  |          |          |          | 0,992**  |

668 SMHf = susceptibilidade magnética de alta frequência; SMLf = susceptibilidade magnética de baixa frequência;  $\chi$ FD = frequência

669 dependente da susceptibilidade magnética; \* = significativo a 5 % de probabilidade; \*\* = significativo a 1 % de probabilidade.

670 As variáveis  $\text{Fe}_2\text{O}_2$  e  $\text{CaO}$  mostraram-se correlacionadas positivamente com a  
671 SM, já os óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  apresentaram correlação negativa com a SM, o  
672 que indica que esses óxidos têm o comportamento diamagnético, como o  $\text{SiO}_2$ , ou  
673 apresenta momento magnético nulo como o caso do alumínio (Tabela 6).

674 A correlação negativa para os óxidos  $\text{TiO}_2$  e  $\text{ZrO}_2$  é em virtude desses óxidos  
675 estarem em percentual baixo, quando comparado aos percentuais do mesmo óxido  
676 em outras áreas, na área que foram obtidos os maiores valores de SM, área T17, ou  
677 nem se encontravam na mesma. As altas correlações entre o óxido de Fe e a SM é  
678 esperado uma vez que estas variáveis estão intrinsecamente ligadas, já a alta  
679 correlação da SM com a  $\text{CaO}$  ocorre em decorrência da atividade desse óxido em  
680 neutralizar e retirar da zona agricultável do solo o alumínio, que como dito  
681 anteriormente, tem atividade magnética nula (Carvalho et al., 2016; Ferraz, 2016).

682 Correlações negativas entre frações de fósforo e a susceptibilidade magnética  
683 também foram encontradas por Oliveira (2015) em solos do Rio Grande do Sul,  
684 indicando que a SM e a Área Superficial Específica (ASE) quando encontras em  
685 valores elevados podem ter como consequência a meteorização das partículas e  
686 concentração relativa dos minerais coloidais resultando no aumento de sítios de  
687 adsorção do fósforo.

688 As frações P-Al e P-Fe apresentaram correlações com a maioria das variáveis  
689 estudadas (Tabela 6). Dentre essas correlações as únicas que não apresentaram  
690 significância a 1% foi a com  $\text{P}_2\text{O}_5$ , para P-Al, e P-Mehlich-1 para P-Fe. As correlações  
691 positivas entre as frações de P e com P disponível extraído via método Mehlich-1 eram  
692 esperadas pois essas variáveis são dependentes diretamente da aplicação de fontes  
693 de P, assim como a correlação negativa com a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pois a adubação fosfatada era  
694 precedida pela calagem.

695 A fração P-Fe só não apresentou correlação com o índice Ki. As correlações  
696 positivas com Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e TiO<sub>2</sub> eram esperadas pois esses influenciam na adsorção do P  
697 (Tabela 5). Assim como as correlações negativas com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO também eram  
698 esperadas pois esses óxidos competem pela adsorção de P com os óxidos de Fe. Por  
699 fim, a fração P-Ca apresentou correlação com a maioria das variáveis envolvidas neste  
700 estudo. A correlação positiva com o P-Meh é oriunda da interação do método de  
701 extração do P Melich-1 com os óxidos de Ca presente no solo ou nos produtos  
702 aplicados nele (gesso e calcário). As correlações positivas entre P-Ca e os índices de  
703 intemperismo, Ki e Kr, devem-se ao fato de que na área onde foram encontrados os  
704 maiores teores dessa fração, área T10, também foram obtidos os maiores valores  
705 desses índices (Tabelas 3 e 4).

706

707

#### 4. CONCLUSÕES

708

709 A área com 7 anos de uso (T7), dentre as áreas avaliadas, foi a que mais  
710 adsorveu fósforo inorgânico (Pi). Esse comportamento indica que mesmo solos  
711 caulínicos podem ter um grande aporte de P adsorvido pelos óxidos de Fe, no caso  
712 a goethita, e que tem alta capacidade de adsorção de P, uma vez que foi responsivo  
713 a maior quantidade de P aplicada no solo.

714 As frações de fósforo inorgânico (Pi) sofreram influência do tempo e do manejo  
715 empregado nas áreas estudadas. A fração referente ao P-Al foi a que mais adsorveu  
716 P em 4 (quatro) das 5 (cinco) áreas avaliadas. Indicando que em solos compostos  
717 majoritariamente pela caulinita a P-Al é responsável por grande parte do P adsorvido.

718 Os óxidos de Fe mostraram-se ter grande capacidade de adsorção de P,  
719 podendo superar o fósforo adsorvido pelos óxidos de Al em áreas em que há um

720 grande aporte de fosfato e ocorre o uso de calagem e gessagem com o intuito de  
721 neutralizar a atividade do Al na área agricultável do solo

722 O uso das técnicas de susceptibilidade magnética, fluorescência de raio-X e  
723 difratometria de raio-X mostraram-se úteis para compreender como os componentes  
724 mineralógicos do solo podem influenciar na dinâmica do fósforo inorgânico (Pi). Isso  
725 fica evidenciado nas técnicas de multivariada utilizadas, onde os resultados dessas  
726 análises tiveram grande participação tanto na formação de grupos da análise de  
727 agrupamentos, como na identificação dos componentes principais.

728

729

## 5. REFERÊNCIAS

730

731 Albuquerque, A. S.; Fonsêca, N. C.; Santos, R. V.; Medeiros, W. P. Atributos químicos  
732 em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis*  
733 *juliflora*. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 61, p. 1-8, 2018. Tikinet Edicao Ltda. -  
734 EPP. <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2811>.

735

736 Amaizah, N.; Cakmak, D.; Saljnikov, E.; Roglic, G.; Mrvic, V.; Krgovic, R.; Manojlovic,  
737 D. Fractionation of soil phosphorus in a long-term phosphate fertilization. *Journal of*  
738 *The Serbian Chemical Society*, v. 77, n. 7, p. 971-981, 2012. National Library of  
739 Serbia. <http://dx.doi.org/10.2298/jsc110927208a>.

740

741 Andrade, A. T.; Fernandes, L. A.; Faquin, V. Organic residue, limestone, gypsum, and  
742 phosphorus adsorption by lowland soils. *Scientia Agricola*, v. 59, n. 2, p. 349-355,  
743 jun. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162002000200022>.

744

745 Andrade, E. M.; Meireles, A. C. M.; Alexandre, D. M. B.; Palácio, H. A. Q.; Lima, C. A.  
746 Investigação de mudanças do status salino do solo pelo emprego de análise  
747 multivariada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 4, p.  
748 410-415, abr. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662011000400013>.

749

- 750 Antelo, J.; Arce, F.; Avena, M.; Fiol, S.; López, R.; Macías, F. Adsorption of a soil humic  
751 acid at the surface of goethite and its competitive interaction with  
752 phosphate. *Geoderma*, v. 138, n. 1-2, p. 12-19, fev. 2007. Elsevier BV.  
753 <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.011>.  
754
- 755 Araújo Neto, J. R.; Gomes, F. E. F.; Palácio, H. A. Q.; Silva, E. B.; Brasil, P. P.  
756 Similaridade de solos quanto a salinidade no Vale Perenizado do Rio Trussu,  
757 Ceará. *Irriga*, v. 21, n. 2, p. 327, 18 jun. 2018. Brazilian Journal of Irrigation and  
758 Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v21n2p327-341>.  
759
- 760 Barbieri, D. M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Lascala Junior, N.; Siqueira, D. S.;  
761 Panosso, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo  
762 adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. *Revista*  
763 *Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 6, p. 1557-1568, dez. 2013.  
764 <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000600012>.  
765
- 766 Barbieri, D. M.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. B.; Panosso, A. R.;  
767 Pereira, G. T.; Lascala Junior, N. Iron oxides and quality of organic matter in  
768 sugarcane harvesting systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 4, p.  
769 1143-1152, ago. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832014000400010>.  
770
- 771 Barrios, M. R.; Marques Junior, J.; Matias, S. S. R.; Panosso, A. R.; Siqueira, D. S.;  
772 Scala Junior, N. Magnetic susceptibility as indicator of soil quality in sugarcane  
773 fields. *Revista Caatinga*, v. 30, n. 2, p. 287-295, jun. 2017.  
774 <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n203rc>.  
775
- 776 Barrios, M. R.; Marques Junior, J.; Panosso, A. R.; Siqueira, D. S.; Lascala Junior, N.  
777 Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the  
778 region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.  
779 36, n. 4, p. 1073-1082, ago. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000400002>.  
780  
781
- 782 Bertol, I.; Gobbi, E.; Barbosa, F. T.; Paz-Ferreiro, J.; Gebler, L.; Ramos, J. C.; Werner,  
783 R. S. Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos: perdas de água e solo

- 784 e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada. *Revista Brasileira de Ciência*  
785 *do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1421-1430, ago. 2011. [http://dx.doi.org/10.1590/s0100-](http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000400036)  
786 06832011000400036.
- 787
- 788 Blum, S Churka; Caires, E. F; Alleoni, L. R. F. Lime and phosphogypsum application  
789 and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. *Journal Of Soil*  
790 *Science And Plant Nutrition*, v. 13, p. 279-300, 2013. Springer Science and  
791 Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162013005000024>.
- 792
- 793 Borggaard, O.K.; Raben-Lange, B.; Gimsing, A.L.; Strobel, B.W. Influence of humic  
794 substances on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides. *Geoderma*, v.  
795 127, n. 3-4, p. 270-279, ago. 2005. Elsevier BV.  
796 <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.011>.
- 797
- 798 Broggi, F. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente  
799 diferentes e influência do ph na capacidade máxima de adsorção. *Ciênc. Agrotec.*,  
800 v. 35, n. 1, p. 77-83, fev. 2011.
- 801
- 802 Butler R.F. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Department of  
803 Chemistry and Physics University of Portland, Portland, Oregon. Eletronic Edition,  
804 p 16-20. September 2004.
- 805
- 806 Callister, D. W. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 5. ed. LTC: Rio  
807 de Janeiro, Brasil. 2002. p. 35-35.
- 808
- 809 Camargo, L. A.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Bahia, A. S. R. S. Clay mineralogy  
810 and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Scientia Agricola*, v.  
811 71, n. 3, p. 244-256, jun. 2014. [http://dx.doi.org/10.1590/s0103-](http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162014000300010)  
812 90162014000300010.
- 813
- 814 Camargo, L. A.; Marques, J.; Pereira, G. T.; Alleoni, L. R. F. Spatial correlation  
815 between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus  
816 of an Oxisol at hillslope scale. *Catena*, v. 100, p. 100-106, jan. 2013. Elsevier BV.  
817 <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.016>.

818

819 Camargo, L. A.; Marques, J.; Pereira, G. T.; Alleoni, L. R. F.; Bahia, A. S. R. De S.;  
820 Teixeira, D. de B. Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron  
821 oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. *Soil Use and Management*,  
822 v. 32, n. 2, p. 172-182, 26 fev. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12255>.

823

824 Carneiro, L. F.; Resende, Á. V.; Furtini Neto, A. E.; Santos, J. Z. L.; Curi, N.; Reis, T.  
825 H. P.; Valle, L. A. R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada  
826 em um Latossolo com diferentes históricos de uso. *Revista Brasileira de Ciência do*  
827 *Solo*, v. 35, n. 2, p. 483-491, abr. 2011. [http://dx.doi.org/10.1590/s0100-](http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000200017)  
828 [06832011000200017](http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000200017).

829

830 Carvalho, M. H.; Lima, R. J. S.; Meneses, C. T.; Folly, W. S. D.; Sarmiento, V. H. V.;  
831 Coelho, A. A.; Duque, J. G. S. Determination of the effective anisotropy constant of  
832 CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles through the T-dependence of the coercive field. *Journal of*  
833 *Applied Physics*, v. 119, n. 9, p. 093909, 7 mar. 2016. AIP Publishing.  
834 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4942535>.

835

836 Ceretta, C. A.; Lorensini, F.; Brunetto, G.; Giroto, E.; Gatiboni, L. C.; Lourenzi, C. R.;  
837 Tiecher, T. L.; Conti, L.; Trentin, G.; Miotto, A. Frações de fósforo no solo após  
838 sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. *Pesquisa*  
839 *Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 6, p. 593-602, jun. 2010.  
840 <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2010000600009>.

841

842 Chang, S. C.; Jackson, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore,  
843 v. 84, n. 1, p. 133-144, July 1957.

844

845 COSTA, A. C. S. da. Quantification and Characterization of Maghemite in Soils Derived  
846 from Volcanic Rocks in Southern Brazil. *Clays and Clay Minerals*, [S.L.], v. 47, n. 4,  
847 p. 466-473, 1999. Springer Science and Business Media LLC.  
848 <http://dx.doi.org/10.1346/ccmn.1999.0470408>.

849

850 Cruz CD (2006) *Análise multivariada e simulação*. Editora UFV, Viçosa, Brasil. 175 p.

851

- 852 Dadalto, G. G.; Fullin, E. A. *Manual de recomendação de calagem e adubação para o*  
853 *estado do Espírito Santo*. 4 ed. SSEA/INCAPER, Vitória, Brasil. 2001, 266 p.
- 854
- 855 Dearing, J. A. *Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2*  
856 *system*. England: British Library. 1994. 104 p.
- 857
- 858 Dearing, J. *Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 System*.  
859 2.ed. Kenilworth, Chi Publishing, 1999. 54p.
- 860
- 861 Donagema, G.K.; Campos, D.V.B. De; Calderano, S.B.; Teixeira, W.G.; Viana, J.H.M.  
862 (Org.). *Manual de métodos de análise de solos*. 2.ed. rev. Embrapa Solos, Rio de  
863 Janeiro, Brasil. 2011. 230p.
- 864
- 865 Dunlop, D., & Özdemir, Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers* (Cambridge  
866 *Studies in Magnetism*). Cambridge: Cambridge University Press. 1997.  
867 doi:10.1017/CBO9780511612794
- 868 Eberhardt, D. N.; Vendrame, P. R. S.; Becquer, T.; Guimarães, M. F. Influência da  
869 granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob  
870 pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 1009-  
871 1016, jun. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000300010>.
- 872
- 873 Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de*  
874 *Classificação de Solos*. 5º ed. E-book. Embrapa, Brasília, Brasil. 2018. 590 p.
- 875
- 876 Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual De Calagem E*  
877 *Adubação Do Estado Do Rio De Janeiro*. 1 ed. Embrapa, Rio de Janeiro, Brasil.  
878 2013. 430 p.
- 879
- 880 Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de Métodos de*  
881 *Análise de Solo*. 3. ed. Embrapa, Brasília, Brasil. 2017. 439 p.
- 882
- 883 Ferraz, Í. S. B. *Estudo das propriedades estruturais e magnéticas da ferrita de*  
884 *Cobalto-Alumínio*. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de  
885 Pós-graduação em Física, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

886

887 Fink, J. R.; Inda, A. V.; Bavaresco, Jovana; Barrón, V.; Torrent, J.; Bayer, C. Adsorption  
888 and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management  
889 system and mineralogy. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 62-68, jan. 2016a.  
890 Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>.

891

892 Fink, J. R.; Inda, A. V.; Bavaresco, Jovana; Barrón, V.; Torrent, J.; Bayer, C.  
893 Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical  
894 soils under conventional tillage or no-tillage. *Journal of Plant Nutrition and Soil  
895 Science*, v. 179, n. 2, p. 198-205, 12 fev. 2016b. Wiley.  
896 <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201500017>.

897

898 Fink, J. R.; Inda, A. V.; Tiecher, T.; Barrón, V. Iron oxides and organic matter on soil  
899 phosphorus availability. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 4, p. 369-379, ago.  
900 2016c. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>.

901

902 Gatiboni, L. C.; Kaminski, J.; Rheinheimer, D. S.; Flores, J. P. C. Biodisponibilidade de  
903 formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira  
904 de Ciência do Solo*, v. 31, n. 4, p. 691-699, ago. 2007.  
905 <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000400010>.

906

907 Guan, X.; Shang, C.; Chen, G. Competitive adsorption of organic matter with  
908 phosphate on aluminum hydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 296,  
909 n. 1, p. 51-58, abr. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.08.050>.

910

911 KUO, S. Phosphorus. *SSSA Book Series*, [S.L.], p. 869-919, 11 set. 2018. Soil Science  
912 Society of America, American Society of Agronomy.  
913 <http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c32>.

914

915 Leal, F. T.; França, A. B. C.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. B.; Marques Júnior, J.; Lascala  
916 Júnior, N. Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using  
917 magnetic susceptibility. *Scientia Agricola*, v. 72, n. 6, p. 535-539, dez. 2015.  
918 <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0420>.

919

- 920 Marques Jr., J.; Siqueira, D.S.; Camargo, L.A.; Teixeira, D.D.B.; Barrón, V.; Torrent, J.  
921 Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the  
922 spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma*, v.219, p.63-  
923 71, 2014. DOI: 10.1016/j. geoderma.2013.12.007.  
924
- 925 Matias, S. S. R.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Siqueira, D. S. Ferramentas  
926 matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na  
927 delimitação de áreas de manejo específico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*,  
928 v. 39, n. 4, p. 968-980, ago. 2015.  
929 <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140638>.  
930
- 931 Matias, S. S. R.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T. Modelos de  
932 paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do  
933 solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 43, n. 1, p. 93-103, mar. 2013.  
934 <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-40632013000100003>.  
935
- 936 Matias, S.S.R.; Marques Júnior, J., Siqueira, D.S.; Pereira, G.T. Outlining precision  
937 boundaries among areas with different variability standards using magnetic  
938 susceptibility and geomorphic surfaces. *Engenharia Agrícola*, v.34, p.695-706,  
939 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000400009.  
940
- 941 Melese, A.; Gebrekidan, H.; Yli-Halla, M.; Yitaferu, B. Phosphorus status, inorganic  
942 phosphorus forms, and other physicochemical properties of acid soils of farta,  
943 District, Northwestern Highlands of Ethiopia. *Applied and Environmental Soil  
944 Science*, v. 2015, p. 1-11, 2015. Hindawi Limited.  
945 <http://dx.doi.org/10.1155/2015/748390>.  
946
- 947 Mendonça, E. S.; Matos, E. S. *Matéria orgânica: Métodos de análises*. UFV, Viçosa,  
948 Brasil. 2005. 24-27 p.  
949
- 950 Merlin, A.; He, Z. L.; Rosolem, C. A. Ruzigrass affecting soil-phosphorus  
951 availability. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, n. 12, p. 1583-1588, dez. 2013.  
952 <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2013001200007>.  
953

- 954 Moura, I. N. B. M.; Souza, C. M. M.; Silva, A. C. R.; Lima, R. N. S.; Rêgo, L. G. S.;  
955 Ambrósio, M. M. Q. Disponibilidade de fósforo em solos sob produção  
956 agroecológica em Governador Dix-Sept Rosado, Rio Grande do Norte. *Revista*  
957 *Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 12, n. 5, p. 862, 12 mar.  
958 2018. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas.  
959 <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v12i5.5573>.  
960
- 961 Moura, J. B.; Ventura, M. V. A.; Cabral, J. S. R.; Azevedo, W. R. Adsorção de fósforo  
962 em latossolo vermelho distrófico sob vegetação de Cerrado em Rio Verde-  
963 Go. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, v. 4,  
964 n. 3, p. 199, 20 dez. 2015. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and*  
965 *Environmental Science*. <http://dx.doi.org/10.21664/2238-8869.2015v4i3.p199-208>.  
966
- 967 Murphy, J.; Riley, J.P. A modified single solution method for the determination of  
968 phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, v. 27, p. 31-36, 1962. Elsevier  
969 BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5).  
970
- 971 Negassa, W. and Gebrekidan, H. Forms of phosphorus and status of available  
972 micronutrients under different land-use systems of Alfisols in Bako area of Ethiopia.  
973 *Ethiopian Journal of Natural Resources*, v. 5, pp. 17–37, 2003.  
974
- 975 Negreiros Neto, J. V. de; Santos, A. C. dos; Guarnieri, A.; Souza, D. J. de A. T.;  
976 Daronch, D. J.; Dotto, M. A.; Araújo, A. dos S. Variabilidade espacial de atributos  
977 físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio  
978 direto. *Semina: Ciências Agrárias*, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 193-204, 26 fev. 2014.  
979 Universidade Estadual de Londrina. [http://dx.doi.org/10.5433/1679-  
980 0359.2014v35n1p193](http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n1p193).  
981
- 982 Nóia, N. R. C.; Cruz, M. C. P.; Davalo, M. J.; Oliveira, M. C.; Fujita, C. K. Produção de  
983 matéria seca de alfafa (*Medicago sativa* L.) em função de doses de calcário.  
984 *Científica*, [S.L.], v. 42, n. 3, p. 310-315, 10 set. 2014. FUNEP.  
985 <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2014v42n3p310-315>.  
986

- 987 Oliveira, J. S. *Mineralogia e adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul*. 2015.  
988 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência  
989 do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.  
990
- 991 Palácio H. A. Q.; Araújo Neto, J. R.; Meireles, A. C. M.; Andrade, E. M.; Santos, J. C.  
992 N.; Chaves, L. C. G. Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas  
993 superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. 2011. *Revista Brasileira de*  
994 *Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15(4), 395-402. [https://doi.org/10.1590/S1415-](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400011)  
995 [43662011000400011](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400011).  
996
- 997 Peluco, R.G.; Marques Júnior, J.; Siqueira, D.S.; Pereira, G.T.; Barbosa, R.S.;  
998 Teixeira, D. de B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da  
999 suscetibilidade magnética do solo. 2015. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50,  
1000 n. 3, 259-266. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>.  
1001
- 1002 Pinto, F. A.; Souza, E. D.; Paulino, H. B.; Curi, N; Carneiro, M. A. C. P-sorption and  
1003 desorption in Savanna Brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer  
1004 management. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 6, p.521-530, dez. 2013.  
1005 <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542013000600005>.  
1006
- 1007 Pozza, A.A.A.; Curi, N.; Costa, E.T.S.; Guilherme, L.R.G.; Marques, J.J.G.S.M.; Mota,  
1008 P.E.F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita  
1009 natural de solo. 2007. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 11, 1627-1633.  
1010 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100015>.  
1011
- 1012 Prandel, L.V.; Saab, S.C.; Brinatti, A.M.; Giarola, N.F.B.; Leite, W.C.; Cassaro, F.A.M.  
1013 Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence  
1014 and X-ray diffraction using Rietveld method. *Radiation Physics and Chemistry*, v.  
1015 95, p.65-68, fev. 2014. Elsevier BV.  
1016 <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.12.017>.  
1017
- 1018 Rangel, F. R.; Rao, I. M.; Horst, W. J. Intracellular distribution and binding state of  
1019 aluminum in root apices of two common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes in

- 1020 relation to Al toxicity. *Physiologia Plantarum*, [S.L.], v. 135, n. 2, p. 162-173, fev.  
1021 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01183.x>.
- 1022
- 1023 Santos, J. Z. L.; Furtini Neto, A. E.; Resende, Á. V.; Curi, N.; Carneiro, L. F.; Costa, S.  
1024 E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos  
1025 de aplicação e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n.  
1026 2, p. 705-714, abr. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000200025>.
- 1027
- 1028 Schwertmann, U.; Kodama, H.; Fischer, W.R. Mutual Interactions Between Organics  
1029 and Iron Oxides. *SSSA Special Publications*, [S.L.], p. 223-250, 26 out. 2015. Soil  
1030 Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub17.c7>.
- 1031
- 1032 Sibanda, H. M.; Young, S. D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate  
1033 on goethite, gibbsite and two tropical soils. *Journal of Soil Science*, [S.L.], v. 37, n.  
1034 2, p. 197-204, jun. 1986. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-  
1035 2389.1986.tb00020.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00020.x).
- 1036
- 1037 Silva, A. R.; Souza Junior, I. G.; Costa, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte  
1038 B de solos do Estado do Paraná. 2010. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34,  
1039 n. 2, 329-338. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200006>.
- 1040
- 1041 Silva, A. L. *Caracterização de fases magnéticas de solos de Roraima*. 2016. 91 f.  
1042 Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Física,  
1043 Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2016.
- 1044
- 1045 Silva, F. C. Da. (Ed.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*.  
1046 Embrapa Informação Tecnológica; 2ª ed. Embrapa Solos, Brasília Brasil. 2009. 627  
1047 p.
- 1048
- 1049 Silva, F. C.; Raij, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes  
1050 extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999. doi:  
1051 10.1590/S0100-204X1999000200016.
- 1052

- 1053 Siqueira, D.S.; Marques Jr., J.; Matias, S.S.R.; Barrón, V.; Torrent, J.; Baffa, O.;  
1054 Oliveira, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic  
1055 susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, v. 26, p.425-431, 2010.  
1056 DOI: 10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x.  
1057
- 1058 Souza, H. A.; Natale, W.; Rozane, D. E.; Hernandez, A.; Romualdo, L. M. Calagem e  
1059 adubação boratada na produção de feijoeiro. *Revista Ciência Agronômica*, [S.L.], v.  
1060 42, n. 2, p. 249-257, jun. 2011. [http://dx.doi.org/10.1590/s1806-](http://dx.doi.org/10.1590/s1806-66902011000200001)  
1061 [66902011000200001](http://dx.doi.org/10.1590/s1806-66902011000200001).  
1062
- 1063 Teixeira, P. C.; Mesquita, I. L.; Macedo, S. T.; Teixeira, W. G.; Lima, W. A. A. de.  
1064 Resposta de vetiver à aplicação de calcário e fósforo em três classes de  
1065 solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 99-105,  
1066 fev. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p99-105>.  
1067
- 1068 Thompson, R., Oldfield, F. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London,  
1069 England.1986. 227 p.  
1070
- 1071 Tokura, A. M.; Furtini Neto, A. E.; Carneiro, L. F.; Curi, N.; Santos, J. Z. L.; Alovisi, A.  
1072 A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes  
1073 cultivados com arroz. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, n. 1, p.171-179, 2 mar.  
1074 2011. Universidade Estadual de Maringá.  
1075 <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.1435>.  
1076
- 1077 Vieira, M. S. *Sorção de fósforo em solos do semiárido*. 37 f. Tese (Doutorado em  
1078 Manejo de Solo e Água). Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró,  
1079 2017.  
1080
- 1081 Viviani, C. A.; Marchetti, M. E.; Vitorino, A. C. T.; Novelino, J. O.; Gonçalves, M. C.  
1082 (2010). Disponibilidade de fósforo em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em  
1083 plantas de soja, em função do aumento do pH. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, n.1,  
1084 61-67. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000100007>.  
1085

- 1086 Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. *Spatial variability of soil physical properties in the field*.  
1087 In: Hillel, D. (ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980.  
1088 p.319-344.  
1089
- 1090 Zanão Júnior, L.A.; Lana, R.M.Q.; Carvalho-Zanão, M.P.; Guimarães, E.D.  
1091 Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um  
1092 Latossolo em sistema de plantio direto. *Revista Ceres*, [S.L.], v. 57, n. 3, p. 429-  
1093 438, jun. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-737x2010000300021>.