



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

TATIANE MELO DE LIMA

**DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO E DO NÍVEL
TECNOLÓGICO DE PROPRIEDADES RURAIS NO TRIÂNGULO
MINEIRO E ALTO PARANAÍBA**

UBERLÂNDIA

2019

TATIANE MELO DE LIMA

DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO E DO NÍVEL TECNOLÓGICO DE
PROPRIEDADES RURAIS NO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Agronomia –
Doutorado, área de concentração em Fitotecnia,
para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador: Profa. Regina Maria Quintão Lana

UBERLÂNDIA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

L732d Lima, Tatiane Melo de, 1985-
2019 Diagnóstico da fertilidade do solo e do nível tecnológico de
propriedades rurais no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba [recurso
eletrônico] / Tatiane Melo de Lima. - 2019.

Orientadora: Regina Maria Quintão Lana.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.1>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. 2. Fitotecnia. 3. Solos - Fertilidade. 4. Extensão rural.
5. Cerrados - Solos. 6. Agricultura. I. Lana, Regina Maria Quintão,
1958-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

TATIANE MELO DE LIMA

DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO E DO NÍVEL TECNOLÓGICO DE
PROPRIEDADES RURAIS NO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Agronomia –
Doutorado, área de concentração em Fitotecnia,
para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA, 21 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira	UFU
Prof. Dr. Enio Tarso Sousa Costa	UFU
Prof. Dr. Guilherme Lopes	UFLA
Prof. Dr. Angélica Araújo Queiroz	IFTM

Profa. Dra. Regina Maria Quintão Lana

UFU

(Orientadora)

UBERLÂNDIA

2019

"O correr da vida embrulha tudo,
a vida é assim: esquenta e esfria,
aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.
O que Deus quer é ver a gente
aprendendo a ser capaz de ficar alegre a mais,
no meio da alegria,
e inda mais alegre ainda no meio da tristeza!
A vida inventa!
A gente principia as coisas,
no não saber por que,
e desde aí perde o poder de continuação
porque a vida é mutirão de todos,
por todos remexida e temperada.
O mais importante e bonito, do mundo, é isto:
que as pessoas não estão sempre iguais,
ainda não foram terminadas,
mas que elas vão sempre mudando.
Afinam ou desafinam. Verdade maior."

João Guimarães Rosa - Grande Sertão: Veredas

*À comunidade científica, extensionistas e agricultores,
Ofereço.*

*À minha família,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida, por todas as bênçãos concedidas e por sua proteção. Obrigada por me dar sabedoria para superar os momentos difíceis e coragem para ir em busca dos meus objetivos.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pela oportunidade de realização do curso e por investir na minha capacitação profissional.

Ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG/UFU) pelo tempo de afastamento concedido. Esse período foi primordial para a realização do trabalho de campo e análises laboratoriais.

Ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras pela caracterização química das amostras via fluorescência de raios-X portátil.

À Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte e apoio a esta pesquisa.

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa (PA nº 2030/2017).

Um agradecimento, como forma de reconhecimento, é endereçado ao Prof. Alfredo S. Lopes (DSC/UFLA) pelo trabalho pioneiro de levantamento da fertilidade do solo na década de 1970, o que permitiu a exploração do Cerrado para agricultura e que serviu como importante referência para este trabalho.

À Profa. Dra. Regina Maria Quintão Lana pela orientação concedida durante o curso para realização deste trabalho.

Aos membros da banca prof. Dr. Hamilton Seron Pereira, prof. Dr. Enio Tarso Souza Costa, prof. Dr. Guilherme Lopes e profa. Dra. Angélica Araújo Queiroz por aceitarem o convite de avaliar essa tese.

Ao Prof. David C. Weindorf, Texas Tech University, por sua colaboração na caracterização de solos tropicais via fluorescência de raios-X portátil, pela minuciosa revisão e submissão do manuscrito referente ao capítulo 4 desta tese.

À equipe do Laboratório de Solos, LABAS, Angélica Borges pela amizade, auxílio e boas conversas. Ao Manuel, Marinho, Gilda e Jéssica, pela ajuda e orientação.

Ao Prof. Dr. Jair Rocha Prado pela sua relevante contribuição na realização e revisão das análises estatísticas.

Aos professores Dr. Gilberto Corrêa, Dr. Hamilton Seron e Dra. Denise Santana por todos ensinamentos transmitidos ao longo do curso e, também, aos demais professores do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFU.

Ao Prof. Dr. Hildeu Ferreira da Assunção por todas oportunidades concedidas, pelos ensinamentos, amizade e confiança. Devo muito do que conquistei a você. Minha gratidão!

Aos agricultores que aceitaram participar desta pesquisa e que gentilmente abriram as portas de suas propriedades para a nossa equipe.

Aos alunos de graduação João Vitor, Danilo, Athos Gabriel, André, Bruno Ozzy, Vinícius, Diogo e Pamela. O auxílio de vocês foi fundamental para a realização deste trabalho. Obrigada pelo grande apoio durante o trabalho de campo.

À Profa. Adriane de Andrade Silva que também colaborou com a primeira etapa de amostragem de solo deste trabalho. Muito obrigada!

Aos colegas de pós-graduação Camila Carvalho, Thiago Prudente, Raphael Passaglia, Mara Lúcia, Gabriela (Gabi), Camila Borges e Atalita, com quem pude compartilhar muitos momentos de trabalho, estudo, troca de conhecimentos e boas conversas.

Aos meus pais, Eleno Duarte de Lima (*in memoriam*) e Delvina de Melo Pereira Lima meus afetuosos agradecimentos. Devo tudo o que sou e minhas conquistas a vocês que sempre incentivaram meus estudos, pois acreditavam no poder transformador da educação. Obrigada por todo amor, carinho e dedicação!

Ao Bruno, meu namorado, meus sinceros agradecimentos pelas sugestões, orientações e ensinamentos, que foram essenciais para a concretização deste trabalho. Agradeço, também, por compreender meu “stress”, minha ausência e as minhas dificuldades. Obrigada pelo companheirismo, amor e pelos momentos felizes que compartilhamos nesses últimos anos. Amo você!

Às minhas irmãs Polyana e Danyla, que, mesmo à distância, se fazem presentes. Agradeço imensamente pelo apoio, conselhos, amor e amizade. Às minhas queridas e amadas sobrinhas Helena, Letícia e Heloísa: vocês trazem alegria para nossas vidas. Não poderia deixar de incluir o Alessandro R. Assis, meu cunhado favorito. Vocês são meu porto seguro!

Aos amigos de Monte Carmelo Andressa, Renata, Ricardo Mirela, Luana Pena, Daniela, Nayra e Everson que integram a minha família Carmelitana. Agradeço pela amizade, companhia e pelo convívio divertido e prazeroso.

Às minhas amigas Camila Carvalho, Sandra, Mariza Assunção e Marisa Sousa pela amizade, carinho e por estarem sempre me apoiando e torcendo por mim.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	i
GENERAL ABSTRACT	ii
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Geral	4
2.2 Específicos	4
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Agricultura no Cerrado	5
3.2 Fertilidade e manejo dos solos na região do Cerrado	8
3.2.1 Calagem e Gessagem	9
3.2.2 Adubação potássica	10
3.2.3 Adubação fosfatada	11
3.2.4 Micronutrientes	14
3.2.5 Matéria Orgânica	15
3.3 Avanços na avaliação da fertilidade do solo	17
3.4 Referências	19
CAPÍTULO II	32
Diagnóstico da fertilidade do solo em áreas agrícolas na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba	32
RESUMO	32
ABSTRACT	33
4.1 INTRODUÇÃO	34
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.4 CONCLUSÕES	69
4.5 REFERÊNCIAS	70
CAPÍTULO III	78
Fertilidade do solo e sua relação com assistência técnica e nível tecnológico de propriedades rurais no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba	78
RESUMO	78
ABSTRACT	79
5.1 INTRODUÇÃO	80
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	81
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.4 CONCLUSÕES	98
5.5 REFERÊNCIAS	98
CAPÍTULO IV	105
Elemental Analysis of Cerrado Agricultural Soils via Portable X-ray Fluorescence Spectrometry	105
ABSTRACT	105
6.1 INTRODUCTION	105
6.2 MATERIALS AND METHODS	107
6.3 RESULTS AND DISCUSSION	111
6.4 CONCLUSIONS	122
6.5 REFERENCES	122

RESUMO GERAL

LIMA, Tatiane Melo. **Diagnóstico da fertilidade do solo e do nível tecnológico de propriedades rurais no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. 2019. 134f. Tese (Doutorado) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

A mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP) é uma importante região agrícola no Estado de Minas Gerais, totalmente localizada no bioma Cerrado, onde concentra a maior parte da agricultura brasileira. Esses solos são altamente lixiviados e pobres. Assim, o manejo da fertilidade do solo é fundamental para a exploração agropecuária na região. Este trabalho teve como objetivo avaliar a fertilidade do solo de áreas agrícolas de 126 propriedades na região do TMAP sob diferentes usos do solo e comparar com o cerrado nativo. Além disso, foi pretendido avaliar o nível tecnológico e o acesso à assistência técnica das propriedades rurais, bem como, sua relação com a adoção de práticas de manejo e fertilidade do solo. Em cada propriedade foram retiradas amostras de solo na camada superficial (0-20 cm), que foram utilizadas para determinar os seguintes atributos: pH; Al, Ca e Mg trocáveis; K, P, B, Fe, Cu, Mn e Zn disponíveis; matéria orgânica; e capacidade de troca de cátions. Esses atributos do solo foram determinados por métodos laboratoriais convencionais e, também, por um espectrômetro de fluorescência de raio-X portátil (pXRF). Os resultados do pXRF foram correlacionados aos métodos convencionais e utilizados para a obtenção de modelos de predição para estimar as propriedades do solo. Além disso, foram determinados via pXRF potenciais poluentes ambientais. Com base nas tecnologias disponíveis e adotadas pelos agricultores, um Índice de Desenvolvimento Tecnológico (IDT) foi calculado e, a partir disso, determinou-se o nível tecnológico das propriedades rurais (alto, médio, baixo e muito baixo). Os resultados mostraram que a acidez do solo e o Al^{3+} dos solos agrícolas foram neutralizados devido à prática da calagem. Entretanto, teores satisfatórios de Ca e Mg não foram observados. Aumentar o teor de matéria orgânica do solo ainda é um desafio. Como consequência, a capacidade de troca de cátions permanece baixa ou média. Teores satisfatórios dos micronutrientes Fe, Cu e, principalmente, Zn e Mn foram observados. Por outro lado, uma deficiência generalizada de B foi detectada, exceto nas áreas de café. A adoção de melhores práticas de manejo foi fortemente relacionada ao nível tecnológico dos agricultores (agricultor patronal ou familiar). A maioria das propriedades rurais do TMAP apresentaram baixo e médio nível tecnológico. Em geral, à medida que o nível tecnológico diminuiu, a adoção de práticas de manejo adequadas e o acesso à assistência técnica também diminuíram. Como consequência, as melhores condições de fertilidade do solo foram observadas em propriedades de alto nível tecnológico. A tecnologia pXRF demonstrou ser uma ferramenta útil e rápida para a caracterização química de solos agrícolas do Cerrado. O conteúdo elementar total obtido via pXRF corroborou a composição mineral e geoquímica dos solos do Cerrado. Baseado exclusivamente em dados do pXRF, o teor de argila foi predito com sucesso. Além disso, as formas disponíveis de P, Ca, Mn, Cu e matéria orgânica do solo foram preditas com sucesso a partir dos resultados de pXRF.

Palavras-chave: solos do Cerrado, extensão rural, agricultura, solo e segurança alimentar, sensores proximais

GENERAL ABSTRACT

LIMA, Tatiane Melo. **Assessment of soil fertility and farm-level technology adoption in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion, Minas Gerais State, Brazil.** 2019. 134f. Thesis (Doctorate) – Agricultural Science Institute, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion (TMAP) is an important agricultural area in Minas Gerais State, Brazil, totally located in Cerrado biome. Currently, the majority of Brazilian agriculture is concentrated on Cerrado soils. These soils are highly weathered, leached and poor. Thus, the soil fertility management is crucial for exploration of the Cerrado. This work aimed to evaluate the soil fertility properties of 126 agricultural areas in TMAP region under different land uses and compare to native cerrado. Also, we assessed the farm level technology and the technical assistance for farmers to establish relationships with adoption of the best management practices and soil fertility properties. In each farm, topsoil samples (0-20 cm) were used to determine the following properties: pH; exchangeable Al, Ca, Mg and K; available P, B, Fe, Cu, Mn and Zn; organic matter; and cation exchange capacity. These soil properties were determined by conventional laboratory methods. Additionally, the same soil samples were characterized using a portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). The pXRF results were correlated to conventional methods and used to obtain prediction models to estimate soil properties. Also, potential environmental pollutants were assessed via pXRF. Based on technologies available and adopted by farmers a technological development index (TDI) was calculated and the farm-level technology (high, medium, low and very low) was determined. In general, the soil acidity and Al³⁺ presence in agricultural soils were ameliorated due to liming practices. However, satisfactory contents of Ca and Mg were not observed. Increasing the soil organic matter is still a challenge. As a consequence, the cation exchange capacity remains low or medium. Satisfactory contents of micronutrients Fe, Cu, and mainly Zn and Mn were observed. Conversely, a generalized deficiency of B was detected, except in coffee areas. The adoption of best management practices was strong related to the economical level of farmers (farmer-employer or smallholders). Most of the TMAP farmers were classified at a medium and low technology level. In general, as the technological level decreases the adoption of best management practices and technical assistance for farmers reduce. As a consequence, the best soil fertility conditions were observed in high level farmers. The pXRF technology demonstrated to be a useful tool for fast chemical characterization of Cerrado agricultural soils. The total elemental contents obtained via pXRF corroborated the known mineral composition and geochemistry of Cerrado soils. Based exclusively on pXRF data the clay content was successfully predicted. Also, the available forms of P, Ca, Mn and Cu (and to some extent soil organic matter) were successfully predicted from pXRF results.

Keywords: Cerrado soils, agricultural extension, agriculture, soil and food security, proximal sensors

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil ocupa uma posição de destaque na produção mundial de alimentos, fibras, madeiras e combustíveis, resultado das condições edafoclimáticas favoráveis à produção agropecuária e dos investimentos em pesquisas e tecnologias (MIELITZ NETO *et al.*, 2010), mesmo em quantidades aquém do desejado. A ocupação agrícola do Bioma Cerrado pode ser considerada um dos maiores avanços da agricultura brasileira (LOPES; GUILHERME, 2016). A adoção de práticas adequadas de manejo foi capaz de superar as limitações químicas dos solos da região do Cerrado, possibilitando o desenvolvimento da agropecuária em uma área considerada imprópria para a agricultura no passado (LOPES *et al.*, 2012). Assim, após 40 anos de ocupação agrícola, o Cerrado está consolidado como um grande *player* do agronegócio mundial (LOPES; GUILHERME, 2016; RESENDE *et al.*, 2016; SANO *et al.*, 2019).

O Cerrado possui uma área de aproximadamente 200 milhões de hectares (ha), ocupando 23% do território brasileiro (BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2013) e estima-se que 50% da sua área foi convertida em áreas agrícolas (LAPOLA *et al.*, 2014). Os solos do Cerrado são bastante intemperizados, com a ocorrência da classe dos Latossolos em aproximadamente metade da área (LOPES *et al.*, 2012). Esses solos, em condição natural, são altamente lixiviados, possuem elevada acidez e saturação por alumínio, baixa capacidade de retenção de cátions e alta capacidade de fixação de fósforo (LOPES; GUILHERME, 2016). Devido a esses atributos, o desenvolvimento da agricultura no Cerrado só foi possível graças à adoção de práticas como a calagem, gessagem, fosfatagem, potassagem, aplicação de micronutrientes e manejo da matéria orgânica (LOPES; GUILHERME, 2016).

Após quatro décadas de manejo e exploração agrícola, o Cerrado foi transformado em uma região estratégica para produção de alimentos, com grande importância para a segurança alimentar mundial (LOPES; GUILHERME, 2016; ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012). Atualmente, o Brasil tem grande participação na produção agropecuária mundial, sendo responsável por 36% da produção de café, 32% de grãos de soja, 21% do açúcar de cana-de-açúcar e 16 % da carne bovina (COMPANHIA NACIONAL DE

ABASTECIMENTO - CONAB, 2018; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2018; UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2018). Além disso, essa região é responsável pela maior parte da produção agropecuária no Brasil, somando 58% da produção de grãos, 58% do rebanho bovino, 53% da produção de café e 32% da produção de cana-de-açúcar (CONAB, 2018; IBGE, 2018).

O desempenho produtivo do agronegócio brasileiro está fundamentado na construção e manutenção da fertilidade do solo, o que implica, necessariamente, em aplicações contínuas de corretivos e fertilizantes (SOUSA; LOBATO, 2003; LOPES; GUILHERME, 2016; RESENDE *et al.*, 2016). A falta do manejo adequado da adubação em áreas agrícolas do Cerrado pode provocar a degradação dos solos e expressivos declínios na produtividade e, conseqüentemente, gerar diversos impactos ambientais e socioeconômicos (SOUZA; LOBATO, 2003; LAPOLA *et al.*, 2014).

Diante disso, as projeções para a agricultura brasileira preveem a intensificação da exploração agrícola na região nas próximas décadas, em resposta à crescente demanda por alimentos e combustíveis (BARRETO *et al.*, 2013; WITHERS *et al.*, 2018). Com isso, o consumo de fertilizantes inorgânicos também deve aumentar, o que pode ser notado no pior cenário, quando é estimado que o consumo de fósforo (P) pode aumentar até 110% nos próximos 30 anos (WITHERS *et al.*, 2018).

A agricultura brasileira é altamente dependente do uso de fertilizantes, visto que o país ocupa o quarto lugar no ranking mundial de consumo de NPK, sendo que, aproximadamente, 76 % dos fertilizantes consumidos no país são importados (IFA, 2016; ANDA; 2018). A dependência do mercado internacional coloca o país numa condição de desvantagem em relação aos custos de produção e competitividade do setor agropecuário (SAAD; PAULA, 2008; ROY *et al.*, 2017; WITHERS *et al.*, 2018).

Nesse contexto, as práticas de manejo da fertilidade do solo precisam de ajustes técnicos para maximizar o aproveitamento das aplicações de corretivos e fertilizantes e, assim, aumentar a eficiência produtiva e econômica da agricultura brasileira. Como exemplo, áreas agrícolas com fertilidade do solo construída, com elevado teor de nutrientes em função do efeito residual das adubações, podem ser gerenciadas para receber aplicações na forma e momentos mais convenientes ao sistema de produção e ao agricultor (RESENDE *et al.*, 2016; ROY *et al.*, 2017; WITHERS *et al.*, 2018). Nesse cenário, um diagnóstico sobre os atributos

químicos e físicos dos solos agrícolas pode orientar o planejamento de estratégias futuras que visam ajustar os manejos de maneira eficiente e sustentável.

Após a consolidação do uso e ocupação agrícola do Cerrado, são relevantes os estudos que visam um diagnóstico da fertilidade do solo de importantes regiões agrícolas do país como o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba (TMAP), selecionadas para este estudo. Além disso, são escassas as informações sobre a difusão de tecnologias e acesso às informações tecnológicas geradas pelos centros de pesquisa e universidades por parte dos agricultores (MARCHESAN; SENSEMAN, 2010; LANDINI, 2015). Essas questões motivaram a idealização e desenvolvimento desta pesquisa, que se justifica com o intuito de oferecer um estudo sobre a atual situação da fertilidade dos solos agrícolas do TMAP e identificar as principais potencialidades e limitações do manejo da fertilidade dos solos dessa região. Tais informações poderão apontar e fundamentar futuras ações estratégicas, visando o manejo sustentável dos solos do Cerrado.

Este trabalho foi estruturado em quatro capítulos. No primeiro capítulo será apresentada uma revisão de literatura sobre o desenvolvimento da agricultura no Cerrado, no qual também serão abordados aspectos relacionados à fertilidade do solo e avanços na determinação dos atributos químicos e físicos do mesmo. No capítulo 2, será apresentado o levantamento da fertilidade do solo em 126 propriedades agropecuárias na região do TMAP, visto que a fertilidade do solo dessa região, após algumas décadas de seu uso para diversos fins agrícolas, continua sendo comparada à condição de Cerrado nativo. Assim, as principais mudanças decorrentes do uso agrícola serão apresentadas e discutidas. No Capítulo 3, serão apresentados os resultados do levantamento do nível tecnológico das propriedades rurais no TMAP, estabelecendo-se relações com a fertilidade do solo. Por fim, no Capítulo 4, apresentar-se-á o diagnóstico da fertilidade do solo, que fora realizado a partir da utilização de um dos mais recentes avanços na instrumentação para análise da mesma, a fluorescência de raios-X portátil (pXRF). É importante ressaltar que a análise via pXRF permite a obtenção da composição elementar completa do solo *in-situ* ou *ex-situ* em menos de um minuto e sem usar qualquer reagente químico. Esta análise tem sido utilizada com sucesso para estimativa de atributos indicadores da fertilidade do solo (WEINDORF *et al.*, 2014), podendo ser uma ótima ferramenta para o avanço da agricultura brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Realizar um diagnóstico geral da fertilidade do solo da região agrícola do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba e estabelecer relações com o nível tecnológico empregado nas suas propriedades rurais.

2.2 Específicos

- Registrar o *status* da fertilidade do solo após, aproximadamente, 40 anos de consolidação da agricultura na região do TMAP;
- Avaliar atributos químicos indicadores da fertilidade do solo em áreas sob diferentes usos, comparando-os com a condição de cerrado nativo;
- Apontar as principais potencialidades e limitações da fertilidade do solo na região do TMAP;
- Avaliar o nível tecnológico empregado nas propriedades rurais no TMAP e o acesso dos produtores rurais à assistência técnica e extensão rural;
- Estabelecer relações entre os níveis tecnológicos e a fertilidade do solo;
- Realizar o diagnóstico da fertilidade do solo no TMAP utilizando pXRF;
- Estimar atributos do solo com base na composição elementar reportada pelo pXRF.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Agricultura no Cerrado

Atualmente a produção brasileira se configura como a base da segurança alimentar global, sendo que o Cerrado tem relevante participação na produção de alimentos do país (WITHERS *et al.*, 2018). A incorporação dessa região às áreas de produção ocorreu graças ao fenômeno da transformação da base tecnológica da agricultura (LOPES; GUILHERME, 2016), que foi consequência de uma política mundial de promoção do progresso técnico e mecanização das fronteiras agrícolas de países subdesenvolvidos. Esse incentivo visou, principalmente, a modernização da agricultura possibilitando o desenvolvimento econômico e produtivo do setor primário (GASQUES; VILLA, 1990; BALSAN, 2006; MIELITZ NETO *et al.*, 2010).

A partir da década de 1960 a modernização agrícola do Cerrado ocorreu por meio da implantação de pacotes tecnológicos da chamada “revolução verde”, desenvolvidos pela indústria, centros de pesquisa nacionais e internacionais, apoiados por políticas públicas de crédito rural e extensão rural do governo federal brasileiro (MIELITZ NETO *et al.*, 2010). A introdução de novas tecnologias no campo contou com a estruturação dos centros de pesquisa e extensão rural no Brasil, tendo sido implantadas diversas unidades de pesquisa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) (DELGADO, 1985; GONÇALVES NETO, 1997; GRAZIANO DA SILVA, 1998; MAZZALI, 2000).

Essas empresas atuaram em parceria e foram responsáveis pela difusão de técnicas de manejo agrícola capazes de aumentar o desempenho produtivo das culturas na região do Cerrado (SANTOS, 2010). Em concomitância, houve também o estímulo à estruturação de uma cadeia produtiva integrada através do estabelecimento dos complexos agroindustriais (CAI's) (CASTILLO, 2007; FREDERICO, 2013).

As ações destas instituições, orientadas pelas políticas públicas desenvolvimentistas, concentraram esforços nas propriedades rurais capazes de consolidar o agronegócio exportador, de modo que o crédito rural concedido fomentava a compra de insumos, equipamentos e máquinas para intensificar a produção e diversificar a pauta de exportações (MIELITZ NETO *et al.*, 2010). Foram implantados, assim, três principais programas

agrícolas de fomento à ocupação produtiva do cerrado: o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (Polocentro); Programa de Cooperação Nipo-brasileira para o desenvolvimento dos Cerrados (Prodecer), ambos inseridos pelo governo federal. E, ainda, o Programa de Assentamento Dirigido do Alto Paranaíba (Padap), implementado pelo governo de Minas Gerais (GUIMARÃES, 1990; GOMES, 2015). Tais programas visavam a incorporação produtiva de áreas estratégicas ao novo modelo de agricultura no Cerrado (SILVA, 2000).

A região do TMAP foi um importante polo agrícola para o país no período de tecnificação da agricultura e foi enquadrada nos programas supracitados em função de três características fundamentais: (i) sua inserção na área central do Cerrado; (ii) sua infraestrutura, pois já existia na região uma malha ferroviária que interligava a região central do país ao Estado de São Paulo; e (iii) elevado potencial para produção agrícola (GUIMARÃES, 1990; SILVA, 2000; GOMES, 2015). Assim, todas os programas mencionados fomentaram o desenvolvimento dessa região e, após 40 anos de difusão de tecnologias, houve a consolidação do agronegócio voltado à produção de commodities, que hoje assume papel de destaque na produção agropecuária do país (GOMES, 2015).

Entretanto, é importante mencionar que a modernização da agricultura não beneficiou todos agricultores dessa região, uma vez que ela ocorreu de maneira seletiva e excludente, de modo que agricultores menos ligados ao segmento agroexportador não tiveram acesso às políticas agrícolas e ficaram às margens do progresso técnico (GRAZIANO DA SILVA, 1990; BALSAN, 2006; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2000). Ainda hoje, esse fato tem reflexos importantes na agricultura brasileira e demandam mudanças nas políticas relativas à infraestrutura, técnicas de produção, crédito, extensão rural e comercialização (RADA, 2013).

Contudo, a modernização aumentou o volume de alimentos produzidos na região do Cerrado e resultou em efeitos positivos para a agricultura e economia brasileira. Tal fato pode ser observado na Figura 1, que apresenta a evolução da produção de grãos na região do Cerrado através do crescimento da área plantada, produção e produtividade. Atualmente, o Cerrado é responsável por 60% da produção de grãos do país e, também, detém 60% da área plantada (CONAB, 2018).



Fonte: Conab, 2018.

Figura 1. Evolução da área plantada, produção e produtividade de grãos na região do Cerrado entre 1976 a 2016.

O aumento da produção na região do Cerrado não ocorreu somente pelo aumento da área plantada, mas, também, em função do expressivo aumento da produtividade (RESENDE *et al.*, 2016). Isso, de certa forma, foi alcançado pela construção da fertilidade do solo, do desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas da região, a mecanização e ao pacote tecnológico para manejo das culturas (AGRICULTURE, ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT, AMSTERDAM, *et al.*, 2008; RESENDE *et al.*, 2016).

O Cerrado brasileiro, que foi considerado impróprio para agricultura até o início da década de 60, hoje assume lugar de destaque na produção de alimentos e contribui com a segurança alimentar mundial (WITHERS *et al.*, 2018). Norman Borlaug, Prêmio Nobel da Paz, considerado o "pai da Revolução Verde", disse uma vez que "ninguém pensava que estes solos iriam ser algum dia produtivos" e, após este feito, considerou a maior conquista da ciência agrícola mundial no século XX (LOPES *et al.*, 2012). Alcançar esta situação só foi possível por meio da adoção de técnicas que promoveram o aumento da fertilidade do solo, como calagem, gessagem, fosfatagem, postagem e aplicação de micronutrientes. Será

abordado em seguida o efeito de cada uma dessas técnicas sobre os solos da região do cerrado (LOPES; GUILHERME, 2016).

3.2 Fertilidade e manejo dos solos na região do Cerrado

O Cerrado ocupa aproximadamente 23% do território brasileiro, estando localizado, predominantemente, em zona de domínio tropical úmido Aw de acordo com a classificação climática de Köppen. É caracterizado por apresentar duas estações bem definidas, sendo uma com período seco pronunciado e outra chuvosa com precipitação abundante e temperatura média do mês mais frio maior que 18°C (SILVA *et al.*, 2008). Sob essas condições climáticas, ocorre intensa ação do intemperismo, resultando, assim, no fato que na região do Cerrado há o predomínio de solos muito intemperizados (TOLEDO *et al.*, 2000; LOPES; GUILHERME, 2016).

Tais solos altamente intemperizados são constituídos, predominantemente, por argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e oxi-hidróxidos de Fe (hematita e goethita) e hidróxidos de Al (gibbsita) (EBERHARDT *et al.*, 2008). Esses constituintes determinam as características eletroquímicas do solo, onde a caulinita, por exemplo, possui pouca ou nenhuma carga negativa permanente, por ser um mineral com pouca ou nenhuma substituição isomórfica (McBRIDE, 1994; FONTES, 2001; BRADY; WEIL, 2013). Assim, as cargas superficiais desse mineral são variáveis e dependentes de pH, de modo que a adsorção ou dessorção de íons de hidrogênio dos grupos funcionais desses minerais ocorrem pela variação do pH do solo e geram cargas positivas ou negativas (FONTES, 2001; BRADY; WEIL, 2013).

Os argilominerais dos solos do cerrado apresentam elevado ponto de carga zero (PCZ), uma vez que os óxidos de Fe e Al possuem PCZ entre 7,5 e 9,0 (SPARKS, 2002) e, por essa razão, em solos agrícolas e sob vegetação nativa (pH < 6,5) esses argilominerais geram cargas positivas, que por sua vez afetam a capacidade de retenção de cátions e aumentam a capacidade de adsorção de fósforo, resultando em baixa disponibilidade de nutrientes para a nutrição das plantas (MEURER *et al.*, 2014).

Em condição natural, a maioria dos solos da região do Cerrado são naturalmente ácidos e apresentam graves limitações ao desenvolvimento das plantas, por apresentarem baixa disponibilidade de nutrientes catiônicos, baixo teor de matéria orgânica (MOS), alta saturação por alumínio (m) e alta capacidade de fixação de fósforo (LOPES; GUILHERME,

2016; RESENDE *et al.*, 2016). Sendo assim, o uso agrícola desses solos depende de manejos que visam a construção de sua fertilidade, como a calagem, gessagem, adubações com P, K, e micronutrientes (RESENDE *et al.*, 2016).

As recomendações de manejo dos solos do Cerrado foram desenvolvidas a partir do trabalho pioneiro de caracterização da fertilidade natural desses solos, que, por sua vez, resultou em um diagnóstico que forneceu a base conceitual para elaboração dos manuais de interpretação e recomendação do uso de corretivos e fertilizantes. (LOPES, 1970; LOPES, 1975; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V., 1999; SOUSA; LOBATO, 2004). Atualmente, as práticas de manejo estão bem difundidas e consolidadas na região do Cerrado e, quando aplicadas adequadamente, promovem o aumento da produtividade e fertilidade do solo (RESENDE *et al.*, 2016). A seguir serão apresentados os principais manejos empregados na construção da fertilidade do solo.

3.2.1 Calagem e Gessagem

Com base nas recomendações de manejo dos solos do Cerrado, a calagem é configurada como uma prática primária para a construção da fertilidade do solo, pois tem a capacidade de neutralizar os componentes da acidez (H^+ + Al) e aumentar a capacidade de troca de cátions (CTC) no mesmo. Além disso, fornece Ca e Mg, aumenta a disponibilidade de P e Mo, reduz a fixação de P, evita as perdas de cátions por lixiviação e afeta disponibilidade de Mn, Zn, Cu e Fe (FAGERIA; BALIGAR, 2008).

Os calcários são os insumos mais utilizados para esta finalidade, já que, quando aplicados no solo, liberam OH^- para a solução e, por consequência, aumentam o pH e reduzem a acidez provocada pelo Al^{3+} trocável. O Al^{3+} é neutralizado pela reação com parte das hidroxilas, passando para a forma insolúvel $Al(OH)_3$ (SADE *et al.*, 2016). Entretanto, a calagem apresenta baixa eficiência de correção da acidez subsuperficial, pois a movimentação do calcário no perfil do solo é limitada e varia de acordo com o tipo e estrutura do solo, características do sistema de produção, condições climáticas e manejo de fertilizantes (ERNANI *et al.*, 2004; CAIRES *et al.*, 2005).

A acidez subsuperficial é corrigida através da aplicação de gesso ($CaSO_4^{2-}$), que é responsável por neutralizar o Al^{3+} trocável das camadas subsuperficiais do solo pela formação do par iônico $AlSO_4^+$ (FAGERIA; BALIGAR, 2008). Além disso, os íons de

sulfato também formam par iônico com Ca, Mg e K e deslocam esses nutrientes para as camadas subsuperficiais do solo (CAIRES *et al.*, 2004; NEIS *et al.*, 2010), reduzindo a saturação por Al e aumentando os teores de Ca e S no perfil do solo. Porém, apresenta como desvantagem a lixiviação de Mg^{2+} (PAULETTI *et al.*, 2014) e lixiviação do K^+ (CRUSCIOL *et al.*, 2014).

O efeito do gesso sobre os atributos químicos do solo ocasiona uma melhor distribuição relativa do sistema radicular em profundidade e aumenta a absorção de nutrientes. Algumas pesquisas demonstram que a aplicação de gesso promove incrementos na produtividade de gramíneas, dentre elas cana-de-açúcar, milho e trigo; e pode reduzir perdas de produtividade da cultura da soja em safra com deficiência hídrica (CAIRES *et al.*, 2001; CRUSCIOL *et al.*, 2014; PAULETTI *et al.*, 2014).

Ressalta-se que aplicações elevadas de gesso agrícola elevam significativamente os teores de Ca^{2+} disponíveis no solo (CAIRES *et al.*, 2004), podendo alterar as relações entre Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e induzir a inibição competitiva, prejudicando a disponibilidade desses nutrientes e o desenvolvimento da cultura (ANDREOTTI *et al.*, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2001; RAIJ, 2008; BARROS *et al.*, 2010).

É importante salientar que os solos do Cerrado passam por um contínuo processo de acidificação, que ocorre pela deposição de ácidos da atmosfera, remoção das bases, decomposição da matéria orgânica do solo e, em solos agrícolas, pela aplicação de adubos fosfatados, nitrogenados e sulfatados. Nessas condições, a aplicação de calcário e gesso são práticas que devem ser realizadas frequentemente para fornecer cálcio e magnésio e manter o pH do solo na faixa adequada.

3.2.2 Adubação potássica

Em solos tropicais, a reserva de K, de modo geral, não é suficiente para suprir as necessidades das culturas, visto que a mineralogia dos solos do Cerrado confere baixa capacidade de retenção de cátions, o que resulta, nesse ambiente, na perda acentuada de K por lixiviação (CURI *et al.*, 2005; LOPES; GUILHERME, 2016). O suprimento de K depende do manejo da adubação potássica e das práticas culturais que favorecem a retenção desse nutriente.

Em áreas agrícolas do Cerrado, o fornecimento de K para as culturas é realizado, principalmente, via fertilização (ROSOLEM *et al.*, 2012). Entretanto, a disponibilidade de K no solo é influenciada pela capacidade de retenção de cátions, teor de MOS e sistema de manejo empregado (ROSOLEM *et al.*, 2006; ERNANI *et al.*, 2007; ROSOLEM *et al.*, 2010). Ressalta-se que os solos do Cerrado apresentam, naturalmente, baixa CTC e, portanto, elevada capacidade de perdas de cátions por lixiviação. Assim, devem ser empregados manejos capazes de aumentar o teor de MOS para elevar a CTC do solo e, aumentar a disponibilidade de K por reduzir sua lixiviação (ROSOLEM *et al.*, 2006; ERNANI *et al.*, 2007; ROSOLEM *et al.*, 2010).

O uso de plantas de cobertura com alta capacidade de produção de biomassa contribui com o aumento da MOS. Além disso, o cultivo de plantas com alta capacidade de extração de K favorecem a retenção e ciclagem desse nutriente, pois aumentam a CTC do solo, reduzindo as perdas por lixiviação e, também evitam processos erosivos que removem a camada superficial do solo rica em nutrientes. A utilização de plantas de cobertura com elevada capacidade de recuperação de K é uma estratégia interessante para aumentar a eficiência do fertilizante potássico, pois, o K fornecido pela adubação permanece a maior parte do tempo no tecido vegetal estando menos sujeito a perdas no solo (BENITES *et al.*, 2010; ROSOLEM *et al.*, 2012).

Recomenda-se, também, o parcelamento da adubação potássica, principalmente em solos de textura média e arenosa, uma vez que a aplicação de K de uma única vez no sulco de plantio favorece sua lixiviação (LANA *et al.*, 2004; OTTO *et al.*, 2010). Além disso, no início do ciclo da cultura, o sistema radicular é pouco desenvolvido e tem menor capacidade de extração de K. Nesse estágio, a aplicação de doses elevadas de fertilizante potássico no sulco de semeadura pode ocasionar problemas no crescimento das plântulas (BENITES *et al.*, 2010).

3.2.3 Adubação fosfatada

Em regiões tropicais o P é o nutriente que mais limita a produção. Isso ocorre por três razões principais: (i) baixo teor natural de P no solo; (ii) a maior parte dos compostos contendo P fósforo presentes no solo são indisponíveis para as plantas, pois se encontram em formas altamente insolúveis; (iii) quando as fontes solúveis de P são adicionadas aos solos

elas são fixadas e convertidas a compostos químicos muito insolúveis e não disponíveis (SOUZA *et al.*, 2006; LOPES; GUILHERME, 2016; RESENDE *et al.*, 2016).

Nesse contexto, em regiões tropicais a obtenção de alta produtividade está condicionada à aplicação contínua de fertilizantes fosfatados (GHOSH *et al.*, 2011; JOHNSTON *et al.*, 2014). De acordo com Souza e Lobato (2003), quando não se adiciona P nesses solos as produções das culturas da soja, milho, trigo e feijão são baixas ou nulas. Resende *et al.* (2006) verificaram um incremento médio de 53% na produção de grãos de milho com o uso de fontes solúveis de P aplicadas em sulco de plantio, quando comparado ao tratamento que não recebeu adubação fosfatada.

São utilizadas duas principais estratégias de aplicação dos fertilizantes fosfatados: adubação fosfatada corretiva e de manutenção. A primeira tem por objetivo elevar o teor de P até a faixa adequada, quando a segunda estratégia consiste na aplicação de fertilizantes fosfatados em solos que já possuem teor de P adequado ou alto; neste caso o P é adicionado para suprir a demanda da cultura e garantir o potencial produtivo das culturas (SOUSA *et al.*, 2016).

De maneira geral, há uma baixa eficiência da aplicação de fertilizantes fosfatados nos solos da região do Cerrado em função da elevada fixação de P pelos colóides do solo. Tal fato compromete as respostas das culturas à essa adubação (NOVAIS; SMYTH, 1999). Assim, para compensar as perdas pela fixação de P e, também, para a elevação gradual dos teores de P do solo, são aplicadas doses acima da necessidade da cultura (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012). Atualmente, o Brasil é o quarto maior importador desse nutriente e estima-se que, nos próximos anos, o consumo de fertilizantes fosfatados aumentará em função da expansão da produção de alimentos para atender à demanda mundial (SOLTANGHEISI *et al.*, 2018).

Na adubação fosfatada de manutenção são utilizados, principalmente, fertilizantes com alta solubilidade, obtidos a partir do tratamento ácido de rochas fosfáticas (NOVAIS, 1999). Entretanto, a aplicação de fertilizantes fosfatados deve considerar o tipo de solo, fonte de P, época e local de aplicação, espécie a ser cultivada, sistema de preparo e clima (SOUZA; LOBATO, 2003). Nesse contexto, Resende *et al.* (2006) verificaram que o parcelamento da dose total de P e a aplicação em sulco de plantio de fontes solúveis proporcionam maior

absorção de P por plantas de milho, pois, o parcelamento pode prevenir o processo de fixação pela redução do tempo de permanência dos fosfatos em contato com o solo.

Nesse contexto, algumas estratégias de manejo devem ser adotadas para reduzir a fixação de P e maximizar a eficiência dos fertilizantes fosfatados. Dentre elas, destacam-se: a correção da acidez do solo (SOUZA *et al.*, 2006); a adoção de sistemas de manejos que possam promover incremento dos teores de MOS (GHOSH *et al.*, 2011; ABDALA *et al.*, 2012; GROppo *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2016); e uso de plantas de cobertura, em rotação, com elevada capacidade de extração de P (SOLTANGHEISI *et al.*, 2018).

Como mencionado, a eficiência da adubação fosfatada é potencializada pela da correção da acidez do solo. Isso ocorre porque o calcário aumenta a concentração de hidroxilas na solução no mesmo e estas, por sua vez, se ligam aos íons de Fe e Al e evitam a formação de precipitados entre esses elementos com o P (SOUZA *et al.*, 2006). Tal fato resulta no aumento da disponibilidade de P na solução do solo (McBRIDE, 1994; NOVAIS; SMYTH, 1999; SOUZA *et al.*, 2006).

A disponibilidade de P em solos tropicais também é muito influenciada pelos sistemas de manejos (GROppo *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2016). Em trabalho recente, verificou-se que a aplicação de elevadas taxas de cama de frango reduziu a energia de ligação entre o P e os coloides do solo, assim como a sua capacidade máxima adsorção (ABDALA *et al.*, 2012). Além disso, a aplicação de elevadas doses de cama de frango eleva o grau de saturação de P do solo e, portanto, há um aumento da taxa de liberação desse nutriente (GROSH *et al.*, 2011). Tais fatos são atribuídos ao incremento do teor de carbono no solo (ABDALA *et al.*, 2012) e a produção de ácidos orgânicos que se complexam a superfície de adsorção de P no mesmo (SIDDIQUE; ROBINSON, 2003).

Roy *et al.* (2017) avaliaram o efeito da adubação fosfatada a longo prazo em áreas de produção de soja na região do Cerrado no estado do Mato Grosso. Os autores verificaram que os agricultores seguem um protocolo de manejo da adubação fosfatada, com aplicações anuais de elevadas doses de P com vistas no máximo potencial produtivo. Tal manejo, realizado durante várias safras consecutivas, elevou o grau de saturação de P do solo. Entretanto, essa prática aumenta os custos de produção e a demanda por fertilizantes fosfatados no país, o que é configurado como um dreno significativo de recursos, exigindo estratégias de aproveitamento desse nutriente pelas plantas (WITHERS *et al.*, 2018).

Assim, o grande desafio da agricultura brasileira com relação ao manejo da adubação fosfatada é aumentar o índice de aproveitamento do fosfato aplicado via adubação. Nesse cenário, Soltangheisi *et al.* (2018) ressaltaram que são necessárias pesquisas que possibilitem o aproveitamento do estoque de P presente no solo, principalmente, as formas moderadamente lábeis e não lábeis, o que pode reduzir significativamente o uso de fertilizantes nas áreas de produção agrícola do Brasil.

3.2.4 Micronutrientes

A baixa disponibilidade de micronutrientes em solos do cerrado ocorre de maneira generalizada em função do elevado grau de intemperismo (MARQUES *et al.*, 2004, PEGORARO *et al.*, 2006). A disponibilidade de Fe, Cu, Mn e Zn também é afetada pelo uso da calagem, visto que o calcário reage na solução do solo liberando hidroxilas que reagem com os micronutrientes catiônicos, formando precipitados indisponíveis às plantas (VITTI; TREVISAN, 2000; RAIJ, 2001).

Diversos trabalhos reportam a redução da produtividade das culturas em função da deficiência de micronutrientes em solos do Cerrado (OLIVEIRA *et al.*, 2003; RESENDE, 2004; VEDRAME *et al.*, 2007; CARMO *et al.*, 2012; KURTZ; ERNANI, 2012). Entre os micronutrientes, a deficiência de B e Zn ocorre de forma mais generalizada (MALAVOLTA *et al.*, 1991). Sendo assim, a aplicação de micronutrientes via solo, foliar ou semente são práticas indispensáveis para aumentar o potencial produtivo das culturas (LOPES; GUILHERME, 2016).

O teor de B em solos do cerrado ocorre, predominantemente, abaixo do nível crítico estabelecido para atender a demanda das culturas ($< 0,6 \text{ mg dm}^{-3}$), sobretudo em solos arenosos e pobres em matéria orgânica (OLIVEIRA *et al.*, 1996; MATTIELLO *et al.*, 2009). A disponibilidade desse nutriente é influenciada pelos seguintes fatores: (i) pH do solo, (ii) textura, (iii) umidade e, (iv) matéria orgânica do solo. Em solos com pH entre 5 e 9, textura arenosa sob elevada precipitação ou irrigação, com baixo teor de matéria orgânica no mesmo, o B pode ser facilmente lixiviado no perfil do solo. A molécula H_3BO_3^0 é a espécie predominante na solução do solo, em pH entre 5 e 9 (GONDIM, 2009). Nessa forma o B apresenta elevada mobilidade no solo e podendo ser lixiviado (BOLOGNA; 2003). Considerando a grande limitação desse elemento nos solos do Cerrado recomenda-se a sua a

aplicação de fertilizantes contendo B via solo e a adoção de manejos que aumentam o teor de MOS (BOLOGNA; VITTI, 2006; MATTIELLO *et al.*, 2009).

A ocorrência de deficiência de Zn é generalizada em solos de Cerrado em condição natural (LOPES; GUILHERME, 2016). Entretanto, adubações consecutivas são capazes de elevar os teores desse nutriente à níveis satisfatórios em poucas safras. Segundo Resende (2004), áreas que estão sob adequado manejo da adubação os teores de Zn foram elevados para patamares acima do limite crítico. O cobre possui comportamento semelhante ao Zn em relação ao efeito residual das adubações. Sobre isso, Galvão (2004) afirma que a aplicação de Cu no solo, seguindo a dose recomendada, supre a necessidade da maioria das culturas por 4 ou 5 anos. Além disso, vale destacar que a utilização de fungicidas a base de Cu e Zn para controle de doenças das culturas, também, contribui de maneira expressiva com o fornecimento desses nutrientes (RESENDE, 2004).

A disponibilidade de Fe em solos do cerrado é suficiente para suprir a demanda das plantas cultivadas, pois são solos ricos em óxidos de ferro e, assim, apresentam elevado teor de Fe disponível. Entretanto, sua disponibilidade é afetada em solos com pH elevado (RESENDE, 2004). O manganês é um dos micronutriente que também tem sua disponibilidade afetada pelo pH do solo, quando, em pH muito baixo, sua disponibilidade aumenta e pode causar toxicidade às plantas. Já em condições de pH mais alcalino (pH > 6,0) sua disponibilidade é reduzida e pode limitar a produtividade das culturas por deficiência (RESENDE, 2004). As adubações não possuem efeito residual como Zn e Cu, por isso em cultivos de soja com elevado potencial produtivo recomenda-se a aplicação de Mn foliar (DEUNER *et al.*, 2015).

A matéria orgânica também serve como um importante compartimento de Fe, Cu, Mn, Zn e B no solo, já que exerce um controle considerável sobre a disponibilidade desses micronutrientes pela formação de complexos orgânicos que atuam como quelatos, protegendo esses nutrientes das reações de precipitação e aumentando o fluxo difusivo para a superfície das raízes (PEGORARO *et al.*, 2006).

3.2.5 Matéria Orgânica

Os solos do Cerrado apresentam, naturalmente, baixo teor de MOS (LOPES; GUILHERME, 2016), em função dos fatores climáticos, edáficos, mineralógicos e de uso

agrícola dos solos (OLIVEIRA *et al.*, 2015; SÁ *et al.*, 2015). Esses fatores favorecem a rápida decomposição da MOS, sendo difícil promover incrementos significativos de carbono nos solos da região do Cerrado, onde as taxas de decomposição da palhada podem ser até 10 vezes superiores às taxas de regiões de clima temperado (COSTA *et al.*, 2014).

A incorporação de MOS representa o maior entrave para a construção da fertilidade do solo no Cerrado (PACHECO *et al.*, 2008). Ainda assim, qualquer incremento no teor de matéria orgânica do solo tem a capacidade de aumentar a disponibilidade de macro e micronutrientes, reduzir a disponibilidade de Al^{3+} , reduzir a adsorção de P e, ainda, melhorar as características físicas e biológicas do solo (MIELNICZUK *et al.*, 2003; SÁ *et al.*, 2010). Sendo assim, na região do cerrado, práticas de manejo que promovam o incremento do teor de matéria orgânica no solo devem ser priorizadas.

Alguns sistemas de manejo têm apresentado resultados satisfatórios na incorporação de MOS em áreas de Cerrado, dos quais dentre eles destacam-se: Rotação de culturas (ZOTARELLI *et al.*, 2012), Integração lavoura pecuária com uso de forrageiras tropicais, principalmente as braquiárias (*Urochloa* sp.) (CRUSCIOL *et al.*, 2010; LOSS *et al.*, 2011), uso de resíduos animais e vegetais (GHOSH *et al.*, 2011; ABDALA *et al.*, 2012), Sistema plantio direto (MORAES *et al.*, 2016), manutenção de culturas de cobertura (SILVA *et al.*, 2006; SOLTANGHEISI *et al.*, 2018).

A massiva implantação do Sistema Plantio Direto (SPD) na região do Cerrado tem provocado diversos benefícios para a qualidade e fertilidade dos solos, impactando diretamente a produção agrícola e a conservação dos recursos naturais (LOSS *et al.*, 2011). Tais técnicas têm contribuído com a incorporação de MOS, (LOSS *et al.*, 2011), aumento da eficiência dos fertilizantes (SÁ *et al.*, 2010), aumento da disponibilidade de fósforo (BEZZERA *et al.*, 2015).

Áreas cultivadas com pastagens e hortaliças também apresentaram efeitos positivos sobre o teor de MOS. Tal fato é justificado pelo elevado aporte de material orgânico depositado sobre o solo nesses sistemas (SATO *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2015). Ainda, no caso das pastagens, o sistema radicular das gramíneas se distribui pelas camadas do solo e, quando decompostas, incorporam grande quantidade de carbono nas camadas superficiais (CRUSCIOL *et al.*, 2010; LOSS *et al.*, 2011; SALTON *et al.*, 2011; SATO *et al.*, 2015).

Atualmente, o desafio da agricultura brasileira é aumentar o teor de MOS em áreas agrícolas, pois, comprovadamente, esse atributo pode contribuir com a fertilidade do solo, eficiência de fertilizantes e aumento da produtividade das culturas. Necessariamente, o incremento de matéria orgânica em solos da região do Cerrado depende da implantação dos sistemas supracitados (SÁ *et al.*, 2010; RESENDE *et al.*, 2016).

3.3 Avanços na avaliação da fertilidade do solo

Na agricultura moderna, a análise química do solo é a principal ferramenta de diagnóstico do estado nutricional do mesmo para a definição da necessidade de corretivos e fertilizante (ABREU *et al.*, 2007; MATULA, 2009). Esse diagnóstico engloba processos de amostragem, métodos de análise, diagnóstico dos resultados e recomendação de corretivos e fertilizantes. Através desses procedimentos é possível determinar a quantidade de nutrientes que se encontram no solo em forma disponível para as plantas, além de detectar a presença de fatores que limitam a produtividade (acidez, salinidade, presença de elementos em concentrações tóxicas) (LOPES; CARVALHO, 1991; RAIJ *et al.*, 2001; CANTARUTTI *et al.*, 2007).

As técnicas de determinação dos atributos químicos do solo configuram-se em um tema constantemente revisto e reavaliado na ciência do solo. Isso ocorre, principalmente, porque os métodos convencionais utilizam grande quantidade de reagentes, geram resíduos químicos com alto potencial poluidor e, muitas vezes, os procedimentos analíticos são demorados e caros (RIBEIRO *et al.*, 2017). Contudo, a consagração e a aplicabilidade de novos métodos dependem do desenvolvimento de pesquisas que determinem a correlação entre os métodos alternativos e o padrão (ALVAREZ V., 1996; NOVAIS *et al.*, 2007).

Nessa perspectiva, busca-se por métodos que tenham as seguintes características: i) extração simultânea de vários nutrientes do solo, chamados de métodos multielementares; ii) aplicabilidade em todos os tipos de solo, com alta correlação entre o valor determinado e absorvido pela planta; iii) precisão e reprodutibilidade; vi) simplicidade; v) baixo custo; e vi) rápida determinação (MATULA, 2009).

Dentre as técnicas utilizadas para determinação dos atributos do solo, a espectrometria de fluorescência de Raios-X tem sido avaliada como um método alternativo em diversos estudos na ciência do solo (RIBEIRO *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2014). Tal

método engloba algumas vantagens e características citadas anteriormente, pois se configura como uma ferramenta de análise não destrutiva, rápida, multielementar e de baixo custo (BASTOS *et al.*, 2012; SHARMA *et al.*, 2014). Ainda, nos últimos anos foram desenvolvidos equipamentos de Raios-X mais precisos e portáteis, o que têm permitido a utilização da tecnologia em campo (*in situ*) (ZHU *et al.*, 2011; SHARMA *et al.*, 2014).

Essa técnica consiste na utilização de fótons de Raios-X de alta energia para excitar os átomos dos elementos presentes nas amostras de solo. Quando os Raios-X atingem a superfície dos elementos, os elétrons do interior do átomo são deslocados para a camada exterior e, em seguida, os elétrons retornam em cascata para sua posição inicial, preenchendo as camadas internas que ficaram vazias. Quando isso acontece, gera uma radiação X secundária, denominada fluorescência e, com base nela, os elementos são identificados e quantificados, uma vez que, cada elemento possui comprimento específico de onda. A intensidade da energia liberada é proporcional à concentração do elemento na amostra (SHARMA *et al.*, 2014; WEINDORF *et al.*, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2017). Assim, a presença e a quantificação dos elementos presentes em uma amostra são relacionadas com a posição e a intensidade do pico em função da energia aplicada (SÖDERSTRÖM *et al.*, 2016; WEINDORF *et al.*, 2014)

A técnica permite a determinação simultânea ou sequencial da concentração de todos os elementos enquadrados entre o sódio (Na) e o urânio (U), sem a necessidade da destruição da amostra, sem nenhum pré-tratamento químico e podendo atingir limites de detecção da ordem de 1 a 20 ppm (WASTOWSKI *et al.*, 2010).

Por esses motivos, a espectrometria de fluorescência de Raios-X destaca-se como um método potencial para determinação da composição química de amostras de solo, rocha e material vegetal e, por isso, diversos pesquisadores têm utilizado a técnica em estudos pedológicos, agrônômicos e ambientais (ZHU *et al.*, 2011; SHARMA *et al.*, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2017; GUERRA e al., 2018).

Terra *et al.* (2014) avaliaram a aplicabilidade de um equipamento portátil de Fluorescência de Raios-X para quantificar simultaneamente os nutrientes do solo. Esse estudo verificou que há potencialidade da aplicação da técnica de fluorescência de Raios-X aliada à quimiometria para determinar, de maneira simultânea e rápida, teores de Si, K, Ca, Mn e Fe, em solo *in natura*. Guerra *et al.* (2018) avaliaram o estado nutricional de plantas

de cana-de-açúcar com o equipamento pXRF, através do qual determinou *in situ* os nutrientes K, Ca e S e Si de folhas frescas.

Pirangueli *et al.* (2015) também verificaram a aplicabilidade da técnica em estudos ambientais, na qual a espectroscopia de Raios-X por reflexão total (TXRF) foi utilizada para avaliação de contaminação do solo por elementos-traço em áreas agrícolas e nativas do Cerrado. Os autores obtiveram correlação linear positiva entre os teores dos elementos determinados pelo método padrão (FAAS/GFAAS) e TXRF, sendo que os coeficientes de correlação de Pearson foram moderados a forte para os seguintes elementos: Pb (0,7); Cr (0,7); Mn (0,7); Ni (0,5); Cu (0,6); Zn (0,5); e As (0,5).

As pesquisas que avaliam o potencial de uso de equipamentos portáteis de Raios-X (pXRF) para determinação dos atributos químicos e físicos em áreas agrícolas no Brasil são escassas. De acordo com Ribeiro *et al.* (2017), são necessários estudos que avaliem a aplicabilidade da tecnologia considerando os efeitos de diferentes condições tropicais do solo nos resultados de pXRF, tais como umidade, distribuição granulométrica, estrutura, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica.

3.4 Referências

ABDALA, D. B.; GHOSH, A. K.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 231, p. 291–295, 2012.

ABREU, C. A. *et al.* Micronutrientes In: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.) Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 596-635, 2007.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision**. ESA Working Paper N 12-03. **Agricultural Economics Division**, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012, revision**. Rome: FAO, 2012.

ALVAREZ V. V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (ed.). **Recomendação para o uso de**

corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação, Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

ALVAREZ V., V. H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa:UFV/SBCS, 1996. p. 615-646.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA - **Estatísticas indicadores**: Principais Indicadores do Sector de Fertilizantes, [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>. Acesso: 27 jan. 2019.

ANDREOTTI, M. *et al.* Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 145-150, 2001.

BALSAN, R. Impactos decorrentes da modernização da agricultura brasileira. **Campo-território**: Revista de Geografia Agrária, Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 123-151, 2006.

BARRETTO, A. G. O. P.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: An analysis of the 1975–2006 period. **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, p. 1804–1815, 2013.

BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Irriga**, Botucatu, v.15, p. 361-372, 2010.

BASTOS, R. O.; MELQUIADES, F. L.; BIASI, E. V. Correction for the effect of soil moisture on in situ XRF analysis using low-energy background. X-Ray. **Journal of spectroscopy**, New York, v. 41, p. 304-307, 2012.

BASTOS, S. Q. A.; GOMES, J. E. Dinâmica da agricultura no Estado de Minas Gerais: análise estrutural diferencial para o período 1994-2008. **Ruris**: revista do centro de estudos rurais, Campinas, v. 5, n. 2, p. 45-76, 2011.

BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**: Nutrientes. 1. ed., Piracicaba: IPNI Brasil, v. 2. p. 133-204, 2010.

BEZERRA, R. P. M.; LOSS A, PEREIRA, M. G.; PERIN A. Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado Goiano. **Semina**: Ciência Agrárias. v. 36, p.1287-306, 2015. DOI:10.5433/1679-0359.2015v36n3p1287

BOLOGNA, I. R. **Adubação Boratada em Pomar de Laranja Pêra Rio Afetado pela Clorose Variegada dos Citros**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Esalq/USP, Piracicaba. 2003.

BOLOGNA, I. R.; VITTI, G. C. Produção e qualidade de frutos de laranjeira 'Pêra' em função de fontes e doses de boro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 328-330, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452006000200040>.

BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D. P.; SOUSA, G. F. SILVA, M. A.; SOUZA, C. H. E. **Sistemas de cultivo de soja e milho na região do Alto Paranaíba - MG e resultados de avaliações na safra 2014/15**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 47 p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p.

BRASIL - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Mapeamento do uso e cobertura do Cerrado**: Projeto Terra Class Cerrado. 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80049/Cerrado/publicacoes/Livro%20EMBRAPA-WEB-1-TerraClass%20Cerrado.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2018.

BROCH, D. L.; PAVINATO, P. S.; POSSENTTI, J. C.; MARTIN, T. N.; QUIQUI, E. M. D. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 42, n. 3, p. 791-796, 2011.

CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; AND BARTH, G. Surface application of lime for crop production under no-tillage system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 791–798, 2005.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da Fertilidade do Solo e Recomendação de Fertilizantes. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 769-872, 2007.

CARMO, D. L.; NANNETTI, D. C.; LACERDA, T. M.; NANNETTI, A. N.; SANTO, D. J. E. Micronutrientes em solo e folha de cafeeiro sob sistema agroflorestal no sul de minas gerais, **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 76-83, 2012.

- CASTILLO, R. Agronegócio e Logística em Áreas de Cerrado: expressão da agricultura científica globalizada. **Revista da Anpege**, São Gonçalo, v. 3, p. 33-43, 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- CORDELL D, WHITE S. Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. **Sustainability**, Basel, v. 3, p. 2027-2049, 2011
- COSTA, N. C.; Andreotti, M.; Buzetti, S.; Lopes, K. S. M.; Santos, F. G.; Pariz, C. M. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1223-233, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400019>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; MCCRAY, J. M.; ROSSETTO, R. Efeito da aplicação superficial de silicato de cálcio-magnésio e de gesso na fertilidade do solo e produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1843-1854. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000600019>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; BORGHI, E.; MATEUS, G. P. Benefits of integrating crops and tropical pastures as systems of production. **Better Crops**, Peachtree Corners, v. 94, n. 2, p. 14-16, 2010.
- CURI, N; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFÓS, p. 71-92, 2005.
- DELGADO, G. C. **Capital financeiro e agricultura no Brasil: 1965-1985**. São Paulo: Ícone; Campinas, UNICAMP, 1985.
- DEUNER, C.; MENEGHELLO, G. E.; BORGES, C. T.; GRIEP, L.; ALMEIDA, A. S.; DEUNER, S. Rendimento e qualidade de sementes de soja produzidas sob diferentes manejos nutricionais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 38, n. 3, p. 357-365, 2015.
- ERNANI, P. R. *et al.* Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 393-402, 2007.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. In: SPARKS, D. (ed.). **Advances in Agronomy** 99. Cambridge: Academic Press, p. 345–399, 2008. DOI:10.1016/s0065-2113(08)00407-0

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Response of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, p. 1279-1289, 1997.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 627-646, 2001.

FREDERICO, S. Agricultura científica globalizada e fronteira agrícola moderna no Brasil. **Revista Confins**, Paris, v. 17, p. 1-17, 2013.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Perfil de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FJP, 2000.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 8, p.185-226.

GASQUES, J. G.; VILLA VERDE, C. M. **Crescimento da agricultura brasileira e política agrícola nos anos oitenta**. São Paulo: Ipea, 1990.

GHOSH, A. K.; BARBOSA, J.; DASILVA, I. R. An environmental threshold of soil test P and degree of P saturation of Brazilian Oxisols. **Clean: Soil Air Water**, Weinheim, v. 39, p. 421-427. 2011.

GOMES, M. T. S. Dinâmica econômica e cidades médias: uma análise sobre a cidade de Uberaba na região do Triângulo Mineiro. **Geosp: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 516-534, 2016.

GONDIM, A. R. O. **Absorção e mobilidade do boro em plantas de tomate e de beterraba**. 2009. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Jaboticabal, 2009.

GRAZIANO DA SILVA, J. **O novo rural brasileiro**. Campinas, UNICAMP, Instituto de Economia, 1999. (Coleção Pesquisas, 1)

GRAZIANO DA SILVA, J. O progresso técnico na agricultura. **Cadernos de Difusão de Tecnologias**, Brasília, v. 7, n. 1/3, p. 13 - 46, 1990.

GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E.D., PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVAO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeoscience**, Katlenberg-Lindau, v. 12, p. 4765-4780, 2015.

GUERRA, M. B. B. *et al.* In situ Determination of K, Ca, S and Si in Fresh Sugar Cane Leaves by Handheld Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 29, n. 5, p. 1086-1093, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20170229>.

GUIMARÃES, E. N. **Infra-estrutura pública e movimento de capitais: a inserção do Triângulo Mineiro na divisão inter-regional do trabalho.** 1990. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1990.

GONDIM, A. R. O. **Absorção e mobilidade do boro em plantas de tomate e de beterraba.** 2009. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Jaboticabal, 2009

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA.** Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br Acesso em: 18 dez. 2018.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION - IFA. **Historical production, trade and consumption of N, P₂O₅ and K₂O,** 2016. Disponível em: <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>. Acesso em: 18 dez. 2018.

JANEGITZ, M. C.; SOUZA, E. A.; ROSOLEM, C. A. Brachiaria as a Cover Crop to Improve Phosphorus Use Efficiency in a No-till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-9, 2016.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; FIXEN, P. E.; CURTIN, D., Phosphorus: its efficient use in agriculture. In: SPARKS, D. (ed.). *Advances in Agronomy* 123. Cambridge: Academic Press, p. 177–228, 2014.

KURTZ, C.; ERNANI, P. R. Produtividade de cebola influenciada pela aplicação de micronutrientes **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 133-142, 2010.

LANA, R. M. Q.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; KORNDORFER, G. H.; MACIEL JUNIOR, V. A. Parcelamento da adubação potássica na cana-planta. **Revista STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 23, p. 28-31, 2004.

LANDINI, F. P. Problemas enfrentados por extensionistas rurais brasileiros e sua relação com suas concepções de extensão rural. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 2, p. 371-377, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140598>.

LAPOLA, D. M. LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. C. G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, London, v. 4, n. 1, p. 27-35, 2014.

LOPES, A. S.; CARVALHO, J. G. Técnicas de levantamento e diagnose da fertilidade do solo. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. (coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: EMBRAPA-SEA, 1991. 329 p. (EMBRAPA-SEA. Documentos, 3).

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. In: SPARKS, D. (ed.). **Advances in Agronomy** 137. Cambridge: Academic Press, p. 1-72, 2016.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, Switzerland, n. 32, p. 29-57, 2012.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 742-747, 1977.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001000 022

SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D.; STEINKE, E. T.; MÜLLER, A. G. Clima do Bioma Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (eds.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. 1. ed. Brasília: Agricultura Tropical, 2008. p. 56.

MALAVOLTA, E. É essencial a ação dos micronutrientes. **Informativo Coopercitrus**, n. 55, p. 34-36, 1991.

MALAVOLTA, E.; BOARETTO, A. E.; PAULINO, V. T. Micronutrientes: uma visão geral. In: FERREIRA, M. E.; Cruz, M. C. P. (ed.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. p. 1-34.

MARCHESAN, E.; SENSEMAN, S. A. Brazilian university technology transfer to rural areas Transferência de tecnologia de universidades brasileiras na área rural. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 2243-2248, 2010.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, DARRELL G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 119, p. 179-195, 2004. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00260-X

MATTIELLO, E. M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; BEHLING, M. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1281-1290, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000500021>.

MATULA, J. A relationship between multi-nutrient soil tests (Mehlich 3, ammonium acetate, and water extraction) and bioavailability of nutrients from soils for barley. **Plant Soil Environment**, Praga, v. 55, n. 4, p. 173-180, 2009.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: University Press, 1994. 406p.

MEURER, E. J. **Fundamentos da química do solo**. 4ª. Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012, 280 p.

MIELITZ NETO, C. G. A.; MELO, L. M.; MAIA, C. M. **Políticas públicas e desenvolvimento rural no Brasil**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010. 82 p.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V. V. H. **Tópicos em ciência do solo**. (ed.), Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3. p. 209-248, 2003.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 351-362, 2016.

NEIS, L.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PINTO, F. A. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.

NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**, Viçosa: Editora UFV, 1999.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n.1/2, p. 71-93, 2015

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 47- 57, 1996.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa de vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

OLIVEIRA, I. P.; ARAÚJO, R. S.; DUTRA, L. G. Nutrição mineral e fixação biológica de nitrogênio. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 169-221, 1996.

OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Potassium fertilizer management for sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1137–1145, 2010.

PACHECO, L. P.; PIRES, F. R.; MONTEIRO, F. P.; PROCOPIO, S. O.; ASSIS, R. L.; CARMO, M. L.; PETTER, F. A. Desempenho de plantas de cobertura em sobressemeadura na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 815-823, 2008.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200014>.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F., MENDONÇA, E. S., ALVAREZ, V. V. H.; NUNES, F. N.; GEBRIM, F. O. Fluxo difusivo de micronutrientes catiônicos afetado pelo tipo, dose e época de incorporação de adubos verdes ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 997-1006, 2006.

PIERANGELI, M. P. P.; GUILHERME, L. R. G.; CARVALHO, G. S., CARVALHO, C. A., SILVA, C. A.; PIERANGELI, L. M. P. Elementos-traço em áreas de vegetação nativa e agricultura intensiva do estado de Mato Grosso determinados por fluorescência de raios-x por reflexão total. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1048-1057, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140373>.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, Guildford, v. 38, p. 146–155, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002>.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B.VAN. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2008. 233 p.

RAY, D. K.; MUELLER, N. D.; WEST, P. C.; FOLEY, J. A.; MEYBECK, A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. **Plos One**, San Francisco, 2013.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JR., A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionalidades e manejo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba: POTAFOS, v. 156, p. 1-19, 2016.

RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. H.; GUILHERME, L. R. G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical soil science. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, p. 245–254, 2017.

ROBERTS, T. L. Improving nutrient use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 32, p. 177-182, 2008.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 542, p. 1050–1061, 2016.

ROSOLEM, C. A. *et al.* Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 16, p. 1934-1943, 2010.

ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. T. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1507-1515, 2012.

ROSOLEM, C. A.; SANTOS, F. P.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 41, p. 1033-1040, 2006.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 249, p. 206–214, 2017.

SÁ, J. C. M.; SEGUY, L.; SÁ, M. F. M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas Práticas para manejo eficiente de fertilizantes: culturas**. 1. ed. Piracicaba: IPNI, 2010, v. 1, p. 383-420.

SÁ, J. C. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; HARTMAN, D. C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 26, p. 531-543, 2015.

SAAB, A. A.; PAULA, R. A. O Mercado de Fertilizantes no Brasil: diagnóstico e propostas de políticas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 5 – 24, 2008.

SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S.; SURAVAJHALA P.; KISHOR, P. B. K. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biomaterials**, Oxford, v. 29, p. 187–210, 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26796895>. Acesso em: 18 dez. 2018.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1349-1356, 2011. DOI: 10.1590/ S0100-204X2011001000031.

SANO, E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M. BUSTAMANTE, M. M.C.; BEZZERA, A. S. ; COUTO JR., A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for Conservation. **Journal of Environmental Management**, London, v. 232, p. 818-828, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

SANTOS, M. **Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal**. 19 ed. Rio de Janeiro: Record, 2010.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; LEÃO, T. P.; RAMOS, M. L. G.; KATO, E. Matéria orgânica e infiltração da água em solo sob consórcio milho e forrageiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 189-193, 2012

SHARMA, A.; WEINDORF, D. C.; MAN, T.; ALDABAA, A. A. A.; CHAKRABORTY, S. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). **Geoderma**, Amsterdam, v. 232, p.141-147, 2014.

SIDDIQUE, M. T., ROBINSON, J.S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 1114–1121. 2003.

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M. E. C.; TRIVELIN, P. C. O. Absorção de nitrogênio nativo do solo pelo milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 723-732, 2006.

SILVA, L. L. O papel do estado no processo de ocupação das áreas de cerrado entre as décadas de 60 e 80. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 24-36, 2000.

SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão

no sistema semeadura direta. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1011-1020, 2006.

SÖDERSTRÖM, M.; ERIKSSON, J.; ISENDAHL, C.; SCHAAN, D. P.; STENBORG, P.; REBELLATO, L.; PIKKI, K. Sensor mapping of Amazonian Dark Earths in deforested croplands. **Geoderma**, Amsterdam, v. 281, p. 58-68, 2016.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO M. J. A., GASPERINI, A. M, SARTOR, L. R, PAVINATO P.S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 179, p. 20-28. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.006>.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Piracicaba: Potafos, 2003. 16 p. (Informações Agronômicas, 102)

SOUZA, J. L.; GUIMARÃES, G. P.; FAVARATO, L. F. Desenvolvimento de hortaliças e atributos do solo com adubação verde e compostos orgânicos sob níveis de N. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 019-026, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620150000100004>.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n. 6, p. 975-983, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000600007>.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 2002. 352 p.

TERRA, J.; SANCHES, R. O.; BUENO, M. I. M. S.; MELQUIADES, F. L. Análise Multielementar de solos: uma proposta envolvendo equipamento portátil de fluorescência de raios X. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2014.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Of de Textos, 2000. cap. 8, p. 139-166.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA, 2018. **Foreign Agricultural Service** Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/regions/brazil>. Acesso em: 18 dez. 2018.

- VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007.
- VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. Piracicaba: POTAFOS, **Informações Agronômicas**, v. 90, p. 1-16. 2000.
- WASTOWSKI, A. D.; ROSA, G. M.; CHERUBIN, M. Q.; RIGON, J. P. G. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010.
- WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, B. Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. In: SPARKS, D. (ed.). **Advances in Agronomy**, Cambridge: Academic Press, v. 128, p. 1-45, 2014.
- WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, LUIZ R. G.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JR., A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, p. 1- 13, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-20887-z
- ZHU, Y.; WEINDORF, D. C.; ZHANG, W. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167-168, p. 167-177, 2011.
- ZOTARELLI, L.; ZATORREA, N. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. S.; JANTALIA, C. P.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, B. J. R.; Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 132, p. 185-195, 2012.

CAPÍTULO II

Diagnóstico da fertilidade do solo em áreas agrícolas na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

RESUMO

A segurança do solo e alimentar depende, primordialmente, de solos com qualidade. Atualmente, a agricultura brasileira é mundialmente conhecida e reconhecida por sua capacidade de produção de alimentos, fibras, florestas e combustíveis. A região do Cerrado (200 milhões de hectares) é responsável pela maior parte da produção agrícola no Brasil. Esta região é naturalmente caracterizada pela ocorrência de solos altamente lixiviados. Assim, o manejo da fertilidade do solo é muito importante para a exploração sustentável dos solos do Cerrado. Este trabalho teve como objetivo avaliar as condições de fertilidade do solo de uma área agrícola representativa da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP), Minas Gerais. A área selecionada está totalmente localizada no bioma Cerrado. Foram selecionadas 126 fazendas representativas com diferentes tipos de uso do solo: cereais, café, florestas plantadas, cana-de-açúcar, pastagem, horticultura e cerrado nativo. Em cada propriedade, duas amostras compostas de solo foram retiradas para determinar os seguintes atributos indicadores da fertilidade do solo: pH; Al, Ca, Mg e K trocáveis; P, B, Fe, Cu, Mn e Zn disponíveis; matéria orgânica; e capacidade de troca de cátions. Em geral, os diferentes tipos de uso do solo melhoraram a fertilidade do solo comparados à condição de cerrado nativo, exceto nas áreas de florestas plantadas. O pH aumentou e o Al^{3+} foi neutralizado devido à aplicação de calcário. Contudo, teores satisfatórios de Ca e Mg, principalmente, não foram atingidos. A capacidade de troca de cátions ainda é considerada baixa a média, uma vez que a matéria orgânica do solo não sofreu alteração significativa. Os teores disponíveis de P, S, Fe, Mn, Zn e Cu aumentaram, sendo considerados muito bons para a produção agrícola. Por outro lado, foi detectada uma deficiência generalizada de B, exceto nas áreas de café. Este levantamento da fertilidade do solo realizado na mesorregião do TMAP destacou as principais potencialidades e limitações das áreas agrícolas, contribuindo para práticas de manejo, principalmente aquelas relacionadas à prática da calagem, gessagem e ao manejo e sequestro de carbono no solo. Aumentar os teores de matéria orgânica do solo é ainda um desafio para agricultura brasileira.

Palavras-chave: segurança do solo, segurança alimentar, produção de alimentos, solos saudáveis, qualidade do solo

ABSTRACT

Soil health is crucial for improved soil and food security. Currently, the Brazilian agriculture is well known and recognized worldwide for its capacity for food, fiber, forest and fuel production. The Cerrado region (200 million ha) is responsible for the majority of agricultural production in Brazil. This region is naturally characterized by the occurrence of highly weathered-leached soils. Thus, the soil fertility management is very important for suitable exploration of Cerrado soils. This work aimed to evaluate the soil fertility conditions of a representative agricultural area in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion (TMAP), Minas Gerais State, Brazil. The selected area is totally located in the Cerrado biome. We selected 126 representative farms with different land uses: cereals, coffee, planted forests, sugarcane, pasture, horticulture and native Cerrado. On each farm, two composite soil samples were sampled in order to determine the following soil fertility properties: pH; exchangeable Al, Ca, Mg and K; available P, B, Fe, Cu, Mn and Zn; organic matter; and cation exchange capacity. In general, the land uses improved the soil fertility properties compared to native Cerrado, except in planted forests areas. The pH increased and Al³⁺ was neutralized due to liming application. However, satisfactory contents of Ca and Mg (mainly) were not reached. The cation exchange capacity is still considered low to median, since the soil organic matter was not significantly changed. The available P, S, Fe, Mn, Zn and Cu contents increased, being considered very good for crop production. On the other hand, a generalized deficiency of B was detected, except in coffee areas. This soil fertility survey performed in the TMAP mesoregion highlighted the main potentialities and limitations of agricultural areas, contributing for further management practices mainly related to liming and gypsum application, and soil carbon sequestration. Improving the soil organic matter is still a challenge.

Keywords: soil security, food security, food production, health soils, soil quality

4.1 INTRODUÇÃO

A região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP) é uma importante mesorregião do estado de Minas Gerais, Brasil, inserida no Bioma Cerrado com uma área de aproximadamente 91 mil km². A região do TMAP corresponde a 27% da área do Cerrado de Minas Gerais (IBGE, 2018) e é a região agropecuária mais dinâmica e desenvolvida do estado, adotando as tecnologias mais modernas, o que leva à obtenção de altas produtividades e grande diversificação de produtos agropecuários (BASTOS; GOMES, 2011; BORGHI *et al.*, 2016; LANDAU *et al.*, 2018).

O TMAP foi pioneiro no desenvolvimento do agronegócio no Cerrado em função de três características principais: condições edafoclimáticas, localização estratégica e infraestrutura de transporte (GUIMARÃES, 1990; CHELOTTI; ROSOLEN, 2014; BITTENCOURT; LIMA, 2014). Após 40 anos de ocupação, estima-se que 75% da vegetação natural do TMAP foi convertida em áreas agropecuárias e florestais (SANO *et al.*, 2010). Atualmente, a região concentra a produção agropecuária do estado de Minas Gerais e, participa com 52% do valor das exportações de produtos agropecuários do estado (GARLIPP, 2017; IBGE, 2018).

A exploração agropecuária no TMAP se desenvolveu, principalmente, em Latossolos, com relevo plano a suave ondulado que favorece a mecanização agrícola (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012). Esses solos são altamente intemperizados e caracterizados por apresentar baixa fertilidade natural, além de possuírem elevada acidez e saturação por alumínio, baixo teor de matéria orgânica do solo (MOS), baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de nutrientes (LOPES; GUILHERME, 2016). Assim, exploração e produção agrícola na região do TMAP depende, necessariamente, do uso contínuo de corretivos e fertilizantes (RESENDE *et al.*, 2016; LOPES; GUILHERME, 2016).

Nos últimos 40 anos, inúmeros trabalhos de pesquisa, principalmente na área de Fertilidade do Solo, foram realizados visando propor várias estratégias e tecnologias para a exploração sustentável do Cerrado. Nos dias atuais, muito tem-se discutido se todo o investimento em pesquisa e proposições de tecnologias realmente chegam ao produtor para obtenção de altas produtividades sem comprometer a qualidade e sustentabilidade dos recursos naturais. É importante salientar que, atualmente, a agricultura está deixando de ter

um viés apenas em produtividade tendo, também, a preocupação com a qualidade nutricional dos alimentos produzidos. Assim, um diagnóstico geral do *status* da fertilidade do solo de importantes regiões agropecuárias do país, como o TMAP, faz-se necessário e irá contribuir para o avanço da agricultura brasileira. Tal diagnóstico apontará, após anos de exploração, as principais melhorias nos atributos do solo, potencialidades e limitações que ainda existam.

O presente trabalho fora conduzido com o objetivo de realizar um levantamento geral da fertilidade do solo em áreas do TMAP sob diferentes usos. Especificamente, teve-se como objetivos: comparar a condição geral e atual do TMAP com a condição de cerrado nativo levantada por Lopes (1975, 1976), comparar os atributos indicadores de fertilidade do solo em áreas sob diferentes usos no TMAP, além de comparar os principais métodos de extração e interpretação de P-disponível em solos.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição da área de estudo e amostragem do solo

A área selecionada para este estudo está localizada no estado de Minas Gerais, mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP), Bioma Cerrado (Figura 1), abrangendo quatro bacias hidrográficas: Bacia do Rio Araguari (21.500 km²), Bacia do Alto Paranaíba (22.200 km²), Bacia do Baixo Paranaíba (26.900 km²) e Bacia do Baixo Rio Grande (18.700 km²).

Na Bacia do Rio Araguari, o clima varia entre Cwb e Cwa de acordo com a classificação climática de Köppen. Nas demais bacias o clima é predominantemente Aw. Baseado no mapa de solos de Minas Gerais (FEAM, 2010) e em observações de campo, os solos de ocorrência nas áreas de estudo e nos pontos de amostragem (Figura 1) pertencem, principalmente, à classe dos Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos, ambos distróficos (EMBRAPA, 2018). Considerando os pontos de amostragem, a altitude média foi de 836m, variando de 552 a 1.110m. A declividade média foi de 5%, variando de 1 a 13%. A altitude foi tomada com uso de GPS e a declividade com uso de clinômetro.

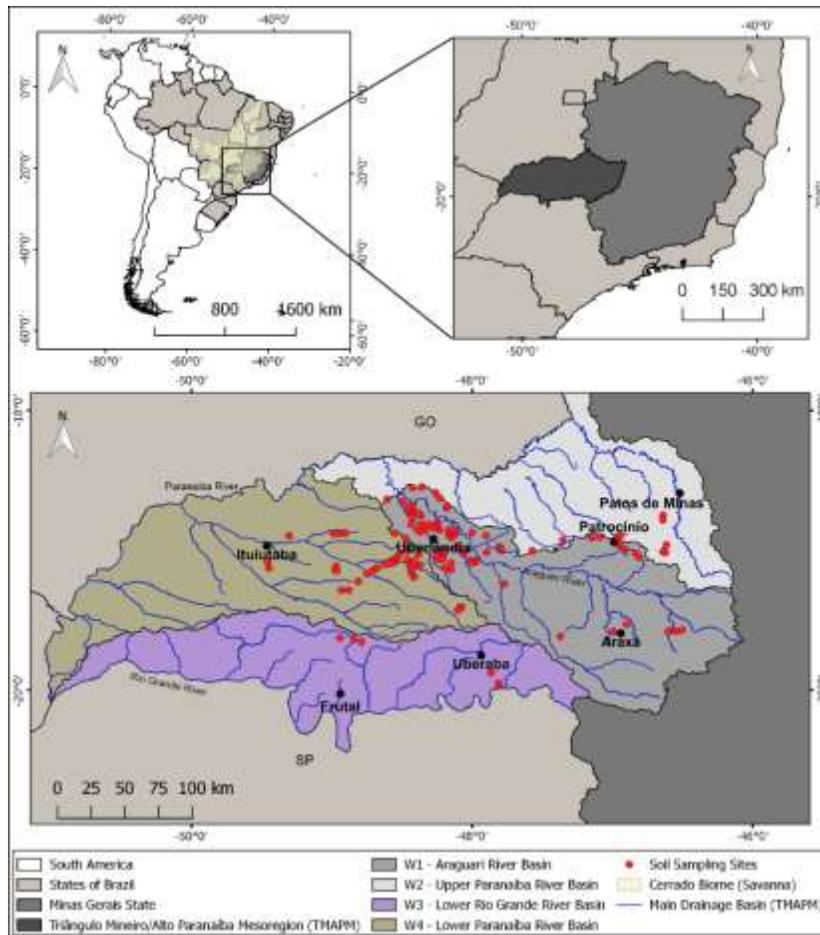


Figura 1. Localização da área de estudo (Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - TMAP) e detalhe dos pontos de amostragem.

Imagens de satélite do Google Earth foram utilizadas para definição prévia e direcionamento dos pontos de amostragem em áreas sob diferentes usos. Foram definidos 126 pontos de amostragem (Figura 1), nos quais, cada um desses pontos representa uma propriedade agrícola, na qual a principal exploração (uso do solo) foi selecionada para amostragem do mesmo.

A distribuição percentual do uso do solo na área de estudo ficou da seguinte forma: 37% cereais (milho, soja, sorgo, feijão e girassol); 8% cafeeiro; 7% florestas plantadas (eucalipto, pinus e seringueira); 5% cana-de-açúcar; 25% pastagem plantada; 12% horticultura; 4% cerrado nativo. Outro critério utilizado para definição dos pontos de amostragem no TMAP foi a coincidência/proximidade com as áreas de cerrado nativo, amostradas no levantamento histórico da fertilidade do solo, realizado há 40 anos (LOPES,

1975; LOPES; GUILHERME, 2016). O objetivo, neste caso, fora amostrar áreas sob diferentes usos há décadas tendo o mais próximo possível uma referência histórica da condição de cerrado nativo.

As coletas de solo foram realizadas no período de agosto de 2016 a janeiro de 2017, abrangendo 16 municípios: Uberlândia, Araguari, Araxá, Ibiá, Patrocínio, Iraí de Minas, Tupaciguara, Monte Alegre, Ituiutaba, Prata, Comendador Gomes, Nova Ponte, Indianópolis, Serra do Salitre, Patos de Minas e Perdizes.

Em cada área de amostragem (Figura 1), foram coletadas duas amostras compostas da camada 0-20cm, totalizando 252 amostras de solo na área de estudo. Cada amostra composta (distanciadas em aproximadamente 200m) foi formada pela mistura de 10 amostras simples. Tais amostras simples foram retiradas num raio de 50m em relação ao ponto central (georreferenciado) (Figura 2).



Figura 2. Esquema de coleta das amostras compostas por ponto de amostragem na região do TMAP.

As amostragens obedeceram aos procedimentos recomendados para cada uso e ocupação do solo, conforme descrição a seguir: Em áreas de café e florestas plantadas, a amostragem foi realizada na projeção da copa das plantas; em áreas de culturas anuais e cana-de-açúcar foram retiradas três amostras simples na linha de plantio e nove na

entrelinha; em áreas de Cerrado nativo, pastagem, horticultura, as amostras simples foram retiradas aleatoriamente (CANTARUTTI *et al.*, 2007).

Na Figura 3, é apresentado um detalhe do procedimento de amostragem em uma área de milho no município de Araguari, MG, utilizando-se um trado tipo holandês. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório, secadas ao ar e passadas em peneira de abertura 2mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). Nesse material de solo, foram determinados os principais atributos químicos e físicos necessários para avaliação da fertilidade do solo, conforme descrição a seguir.



Figura 3. Detalhe da amostragem do solo em uma área de cultivo de milho no município de Araguari, MG. Retiradas de amostras simples ($n = 10$) e mistura em balde para formação de uma amostra composta. Fotos: Tatiane Melo de Lima (2017).

4.2.2 Determinação dos atributos químicos e físicos

Foram determinados os seguintes atributos do solo: acidez ativa (pH em água); acidez potencial ($H + Al$); Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} trocáveis; P, $S-SO_4^{2-}$, Zn, Cu, Fe, B e Mn disponíveis; capacidade de troca de cátions efetiva e potencial; teores de areia, silte e argila; matéria orgânica do solo; e fósforo remanescente (P-rem). No laboratório, cada amostra composta ($n = 252$) foi analisada em duplicata, totalizando-se, assim, um banco de dados com 504 observações. Os procedimentos analíticos adotados seguiram o Manual de Métodos de Análise de Solo no Brasil (TEIXEIRA *et al.*, 2017), com modificações e/ou citações dos métodos originais conforme descrição abaixo.

O pH em água foi determinado a partir do preparo de uma suspensão do solo: água na relação 1:2,5 (v/v), a qual foi agitada (agitador orbital) por 15 minutos e deixada em repouso por 1 hora até o momento da leitura de pH. A acidez potencial ($H+Al$) foi

determinada pela análise do pH em solução-tampão SMP. Para isso, 10 cm³ de TFSA foram acondicionados em potes plásticos com capacidade para 50 mL e adicionados 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e 5 mL da solução-tampão SMP. Essa suspensão foi agitada por 15 minutos a 220 rpm em agitador orbital. Após o período de agitação, a suspensão foi deixada em repouso por uma hora e, em seguida, procedeu-se à leitura do pH de equilíbrio.

Quanto aos cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺), estes foram extraídos em solução KCl 1,0 mol L⁻¹ na relação solo:solução extratora de 1:10 (v/v). Utilizando-se erlenmeyer com capacidade para 250 mL, a suspensão do solo foi agitada durante 15 min (agitador orbital) e deixada em repouso *overnight* (16 h).

No sobrenadante filtrado, Ca²⁺ e Mg²⁺, foram quantificados por espectrometria de absorção atômica com atomizador tipo chama e Al³⁺ por titulação com solução de NaOH a 0,025 mol L⁻¹. Utilizando o mesmo procedimento de extração, o K⁺ trocável, P, Cu, Zn, Mn e Fe disponíveis foram extraídos com uso da solução Mehlich-1. O K⁺ foi quantificado em fotômetro do tipo chama e o P pelo método colorimétrico em solução ácida de molibdato de amônio.

Os micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe) foram determinados por espectrometria de absorção atômica com atomizador tipo chama. O P disponível também foi quantificado pelo método da resina mista (P-resina). O Boro disponível foi determinado pelo método da água quente, utilizando solução BaCl₂ 1,25 g L⁻¹, na relação solo:solução 1:2, com aquecimento em micro-ondas por 4 min na potência máxima para extração (RAIJ *et al.*, 2001). No extrato obtido, a quantificação da concentração de B foi realizada pelo método colorimétrico em Azometina-H, procedendo-se a leitura em espectrofotômetro de absorção molecular a 420 nm (RAIJ *et al.*, 2001). O S-SO₄²⁻ foi determinado pelo método turbidimétrico (VITTI; SUZUKI, 1978).

A partir da determinação de Ca, Mg, K, Al e (H + Al) foi calculada a soma de bases (SB) e a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) e potencial (T). A capacidade de troca catiônica efetiva foi determinada pela soma de SB + Al e a CTC potencial pela soma de SB e acidez potencial (H + Al). A saturação por alumínio (m) foi obtida pela relação entre Al³⁺ e t, e a saturação por bases (V) pela relação entre SB e T.

O teor de matéria orgânica do solo (MOS) foi determinado pelo método colorimétrico (NELSON; SOMMERS, 1996), após a digestão do solo com solução ácida (H₂SO₄

concentrado) de dicromato de potássio ($0,167 \text{ mol L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). A textura do solo foi determinada pelo método do hidrômetro (GEE; BAUDER, 1986).

O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado como sendo a concentração de fósforo na solução de equilíbrio após agitação durante 1 h da TFSA em solução CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ contendo 60 mg L^{-1} de P (relação 1:10), conforme a metodologia descrita por Alvarez *et al.* (2000). O P na solução de equilíbrio foi determinado pelo método colorimétrico em solução ácida de molibdato de amônio. O P-rem, assim como a textura do solo, foram utilizados para interpretação dos teores de P disponível e S-SO_4^{-2} .

4.2.3 Análise estatística

Com os dados obtidos, realizou-se a análise estatística descritiva (mínimo, máximo, média, mediana e desvio-padrão), teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e de assimetria (Skewness). Posteriormente, realizaram-se as distribuições de frequência para cada atributo do solo analisado. Os intervalos e amplitude das classes nas distribuições de frequência, para cada atributo, foram estabelecidas como sendo os intervalos comumente empregados na interpretação da fertilidade do solo. Para fins de comparação, para cada atributo analisado, foram considerados os níveis críticos no solo. Para cada atributo, os diferentes usos do solo foram comparados por meio de gráficos tipo box-plot. Correlações de Pearson foram também realizadas entre todos os atributos de solo analisados. As análises estatísticas e construção de gráficos foram realizadas com auxílio dos programas SPSS, R-studio e Sigma Plot.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Descrição geral dos solos amostrados

Na Tabela 1, é apresentada a estatística descritiva (mínimo, máximo, média, mediana, desvio-padrão e testes de normalidade e de assimetria), bem como o nível crítico (NC) proposto por Alvarez *et al.* (1999). Não foi observada distribuição normal dos dados para nenhum dos atributos analisados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Os teores considerados como níveis críticos no solo para cada um dos atributos são também apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos dos solos amostrados na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

Atributo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	NC ¹	DP ²	Skewness	Kolmogoro v-Smirnov
pH solo	3,8	7,6	5,6	5,7	5,5-6,0	0,7	0,1	0,1 ^{n.s}
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,0	1,9	0,1	0,0	1,0	0,3	3,1	0,3 ^{n.s}
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,7	11,8	3,0	2,7	5,0	1,6	1,4	0,1 ^{n.s}
P-M1 (mg dm ⁻³)	0,7	299,2	29,1	12,0	*	41,8	2,9	0,2 ^{n.s}
P-resina (mg dm ⁻³)	0,0	419,2	49,2	29,8	-	64,0	3,1	0,2 ^{n.s}
P-rem (mg dm ⁻³)	1,0	13,85	7,8	8,0	-	3,6	- 0,2	0,0 ^{n.s}
S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)	4,0	243,0	19,3	12,0	*	28,6	5,1	0,3 ^{n.s}
K ⁺ (mg dm ⁻³)	8,0	942,5	99,5	69,3	70,0	112,7	4,0	0,2 ^{n.s}
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,1	6,8	2,3	2,1	2,4	1,5	0,7	0,1 ^{n.s}
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,0	3,4	0,7	0,6	0,9	0,5	2,1	0,1 ^{n.s}
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,1	10,2	3,2	2,9	3,6	2,0	0,8	0,1 ^{n.s}
t (cmol _c dm ⁻³)	0,5	10,2	3,3	3,0	4,6	1,9	1,0	0,1 ^{n.s}
T (cmol _c dm ⁻³)	1,6	16,5	6,2	6,1	8,6	2,6	0,7	0,1 ^{n.s}
V (%)	1,0	89,8	48,8	51,0	60,0	19,5	-0,4	0,1 ^{n.s}
m (%)	0,0	94,0	9,2	0,0	50,0	19,4	2,7	0,3 ^{n.s}
MOS (g kg ⁻¹)	7,5	47	21	21	40,0	8	0,5	0,1 ^{n.s}
B (mg dm ⁻³)	0,1	1,8	0,3	0,2	0,6	0,2	3,6	0,2 ^{n.s}
Cu (mg dm ⁻³)	0,4	25,6	3,6	2,0	1,2	4,1	2,9	0,2 ^{n.s}
Fe (mg dm ⁻³)	3,0	429,8	50,3	43,9	30,0	43,4	5,6	0,2 ^{n.s}
Mn (mg dm ⁻³)	3,1	224,3	32,6	19,2	8,0	32,8	2,2	0,2 ^{n.s}
Zn (mg dm ⁻³)	0,0	25,7	4,6	3,2	1,5	4,5	1,8	0,2 ^{n.s}
Argila (g kg ⁻¹)	150	750	411	350	---	202	0,17	0,2 ^{n.s}

¹NC: nível crítico considerado no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999); ² DP: desvio-padrão da média; * interpretação do NC depende do teor de argila e/ou P-rem.

Considerando-se os valores médios e a mediana, o pH do solo encontra-se dentro da faixa considerada ideal para o desenvolvimento das culturas (5,5-6,5). Os macronutrientes K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ estiveram bem próximos dos níveis críticos e a capacidade de troca de cátions (efetiva e potencial) e saturação por bases apresentaram-se aquém dos níveis críticos, assim como a matéria orgânica e acidez potencial (H + Al). Quanto ao conteúdo de MOS, foi aproximadamente metade daquele considerado como nível crítico (40 g kg⁻¹). Todos os micronutrientes, exceto B, apresentaram valores médios e mediana superiores ao nível crítico.

Na região do estudo, aproximadamente, 50% das áreas apresentaram teores de P, K, S, Cu, Mn e Zn acima do nível crítico para o desenvolvimento das culturas, conforme critérios de interpretação de análises de solos para o Estado de Minas Gerais (ALVAREZ *et al.*, 1999). Os valores de pH, Al³⁺ trocável e saturação por alumínio foram significativamente alterados em relação à condição de Cerrado nativo (LOPES; GUILHERME, 2016).

Considerando todas as amostras analisadas, 58% apresentaram teor de Al^{3+} igual a zero e/ou não detectado pelo método titulométrico. Com relação à textura do solo, na região de estudo não foram amostrados solos de textura arenosa (teor de argila $< 150 \text{ g kg}^{-1}$). A mediana para o teor de argila foi 350 g kg^{-1} , sendo encontrado valor máximo de 750 g kg^{-1} .

4.3.2 Textura do solo

A textura do solo foi um atributo determinante no estabelecimento dos diferentes tipos de uso do solo no TMAP. Os solos com textura média ($150 \text{ a } 350 \text{ g kg}^{-1}$) são predominantes (50%), resultado da influência de rochas psamíticas (arenito) como material de origem (FERREIRA *et al.*, 1994; ROLIM NETO *et al.*, 2009); 25% das áreas apresentam textura argilosa ($350 \text{ a } 600 \text{ g kg}^{-1}$) e 25% são muito argilosas ($> 600 \text{ g kg}^{-1}$). Do total de 126 pontos amostrais, cinco foram em áreas de cerrado nativo, sendo três em solos de textura média e dois em solos de textura muito argilosa (Figura 4).

As áreas onde foram estabelecidos os cultivos de cana-de-açúcar e florestas plantadas estão, predominantemente, localizadas em solos de textura média (Figura 4). Pastagens, culturas anuais e horticultura ocorrem em solos de textura média, argilosa e muito argilosa. As lavouras de café estão, exclusivamente, em solos argilosos e muito argilosos.

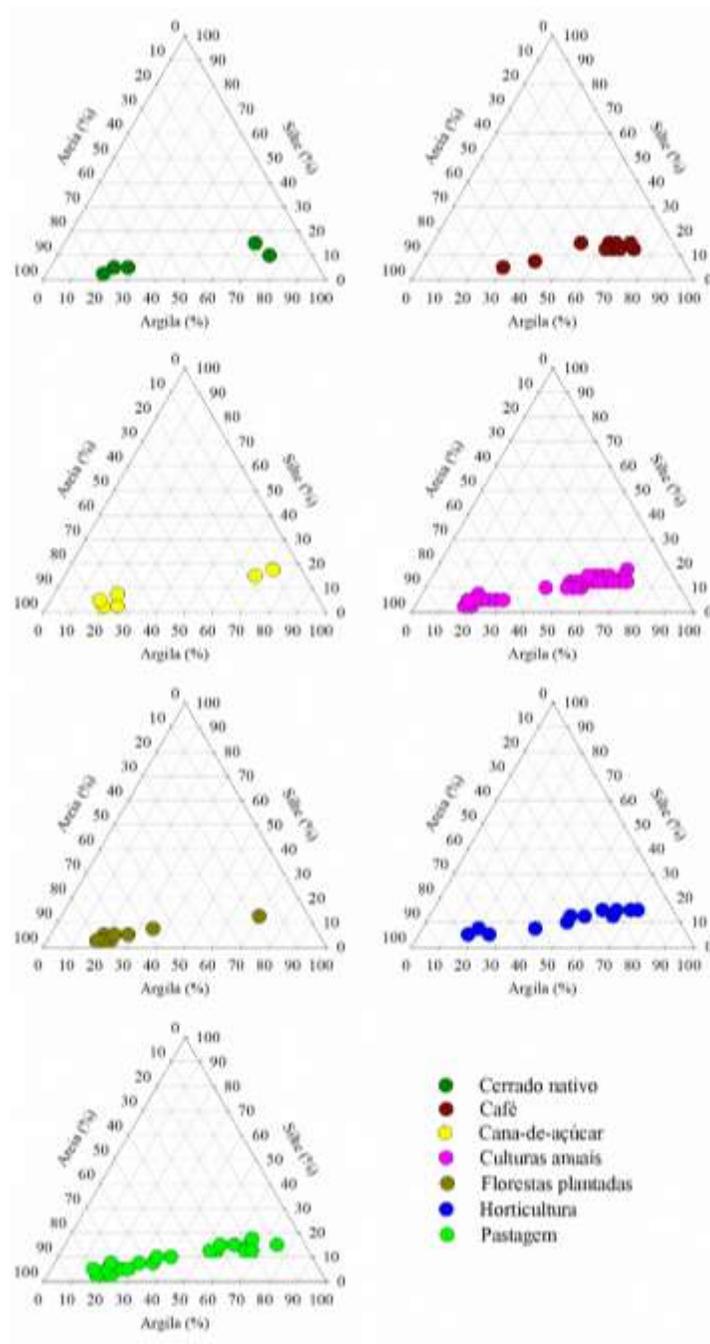


Figura 4. Textura do solo das áreas amostradas no TMAP para cada tipo de uso.

4.3.3 Acidez do solo

Na Figura 5 são apresentadas as distribuições de frequência para os componentes da acidez do solo. O pH em água (acidez ativa) médio foi 5,6 (mediana = 5,7), variando de 3,8 a 7,6 (Figura 5a). A maior parte das amostras tiveram o pH baixo (4,5 a 5,5) e médio (5,5 a 6,5). Foi verificado que 44% das amostras estão na faixa adequada de pH (5,5 a 6,5); 11% das áreas o pH esteve acima de 6,5 e 45% abaixo de 5,5. Valores de pH acima de 6,5 podem estar relacionados a problemas de excesso de calagem, o que pode levar, principalmente, à indisponibilidade de alguns micronutrientes (Fe, Cu, Zn e Mn) (VITTI; TREVISAN, 2000; RAIJ, 2001).

Em apenas 4% das amostras foram encontrados valores de pH superiores a 7,0. Comparando os valores de pH obtidos neste trabalho com solos de cerrado sob vegetação nativa antes da ocupação agrícola, verifica-se que valores superiores a 6,2 não foram observados, sendo encontrados valores na faixa entre 4,3 a 6,2 (mediana = 5,0) (LOPES, 1975; LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012; LOPES; GUILHERME, 2016). Observa-se ainda, na Figura 5b e 5^a, que o percentual de áreas com teor de Al^{3+} acima de $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ coincide com as áreas com valores de pH abaixo de 5,5.

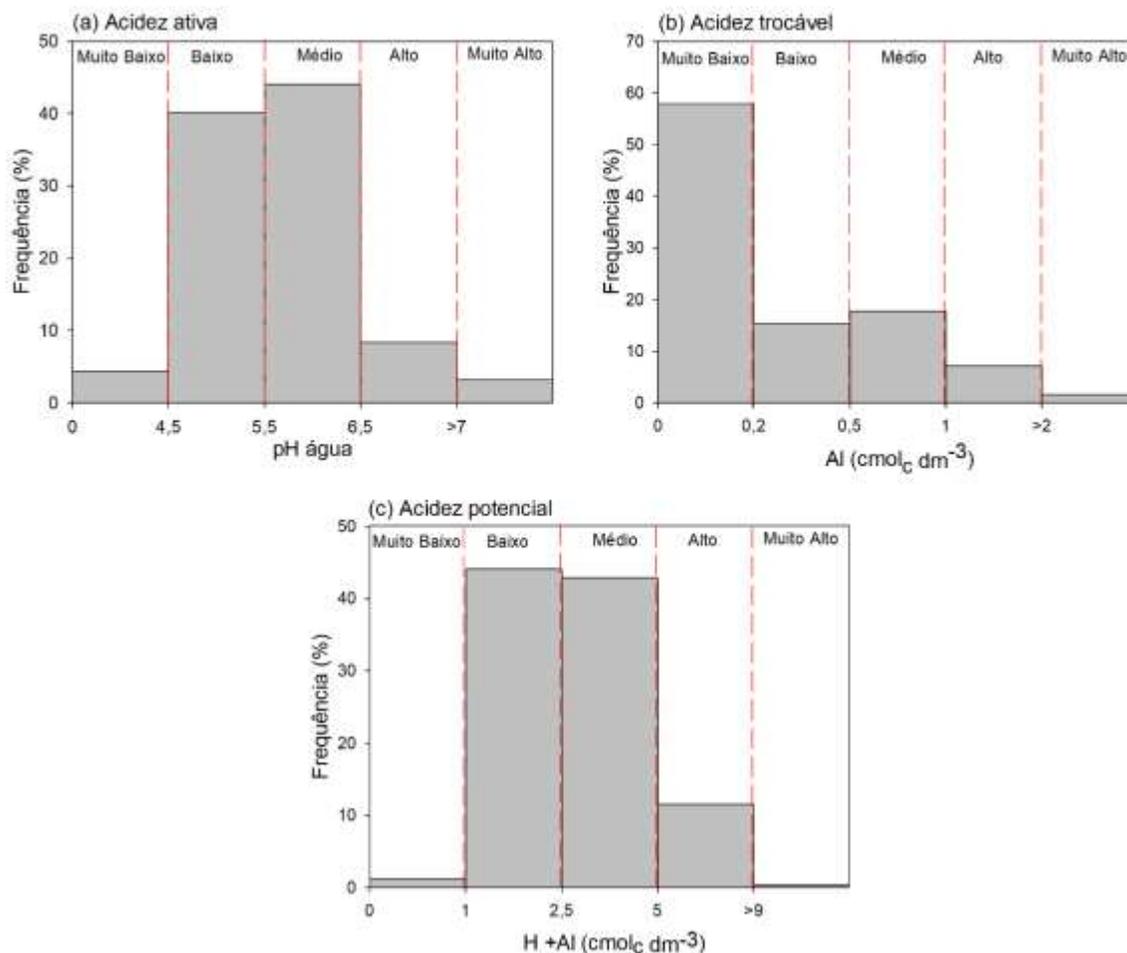


Figura 5. Distribuição de frequência para os componentes da acidez dos solos (ativa, trocável e potencial) da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Comportamento semelhante ao pH em água foi observado para acidez potencial (H+Al) (Figura 5c). A maior parte das amostras apresentaram acidez potencial classificada como baixa e média. Foi verificado ainda que 45% das áreas apresentam acidez potencial baixa (< 2,5 cmol_c dm⁻³); 43% entre 2,5 e 5,0 cmol_c dm⁻³ e apenas 12% acidez potencial alta. É importante ressaltar que a acidez potencial representa a capacidade tampão do solo, estando correlacionada ao conteúdo de matéria orgânica do solo e à mineralogia da fração argila (BRADY; WEIL, 2013).

Como resultado do necessário aumento do pH via calagem para o uso agropecuário no TMAP, na maior parte das amostras, a acidez trocável (Figura 5b) foi considerada muito baixa ($< 0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), em razão da neutralização do Al^{3+} (SADE *et al.*, 2016). Em 73% das amostras, o Al^{3+} trocável foi menor que $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e, em 58%, o Al^{3+} não foi detectado pelo método titulométrico. Solos de cerrado sob vegetação nativa apresentam majoritariamente acidez trocável entre $0,25$ e $0,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (LOPES; GUILHERME, 2016). Apesar dos valores nesse intervalo ainda serem considerados baixos a médios, a baixa capacidade de troca de cátions efetiva de solos de cerrado nativo faz com que esse teor de alumínio no complexo de troca seja considerado.

Reitera-se que solos nativos do Cerrado são naturalmente ácidos em função da intensa lixiviação de bases (LOPES; GUILHERME; RAMOS, 2012; LOPES; GUILHERME, 2016). Assim, alterações no pH em áreas agrícolas ocorrem, principalmente, devido à prática da calagem, adubação (principalmente fertilizantes nitrogenados), decomposição da matéria orgânica do solo e ao consumo e lixiviação de bases no solo (BRADY; WEIL, 2013). Como consequência, a redução do pH leva a um aumento exponencial do Al^{3+} trocável, o qual, ao sofrer hidrólise, contribui para a acidez no solo (SÁ *et al.*, 2006; BRADY; WEIL, 2013; SADE *et al.*, 2016). Desta forma, o uso do calcário e gesso (CaSO_4) tornaram-se imprescindíveis para exploração agrícola dos solos do Cerrado (Lopes; Guilherme, 2016). Além do fornecimento direto de Ca, Mg, correção do pH e neutralização do Al via calagem, o uso do calcário é importante como condicionador de vários atributos químicos e físicos do solo (FAGERIA; BALIGAR, 2008; SADE *et al.*, 2016).

Na região de estudo no TMAP, apenas nas florestas plantadas verificaram-se valores de pH, Al^{3+} e saturação por alumínio semelhantes à condição de solo sob vegetação nativa do Cerrado (Figura 6). Em todos os outros tipos de usos do solo, até mesmo nas pastagens, foi possível observar aumentos no pH do solo (Figura 6a), redução da acidez trocável (Figura 6b) e saturação por alumínio (Figura 6d). A acidez potencial não variou significativamente entre os tipos de uso do solo (Figura 6c).

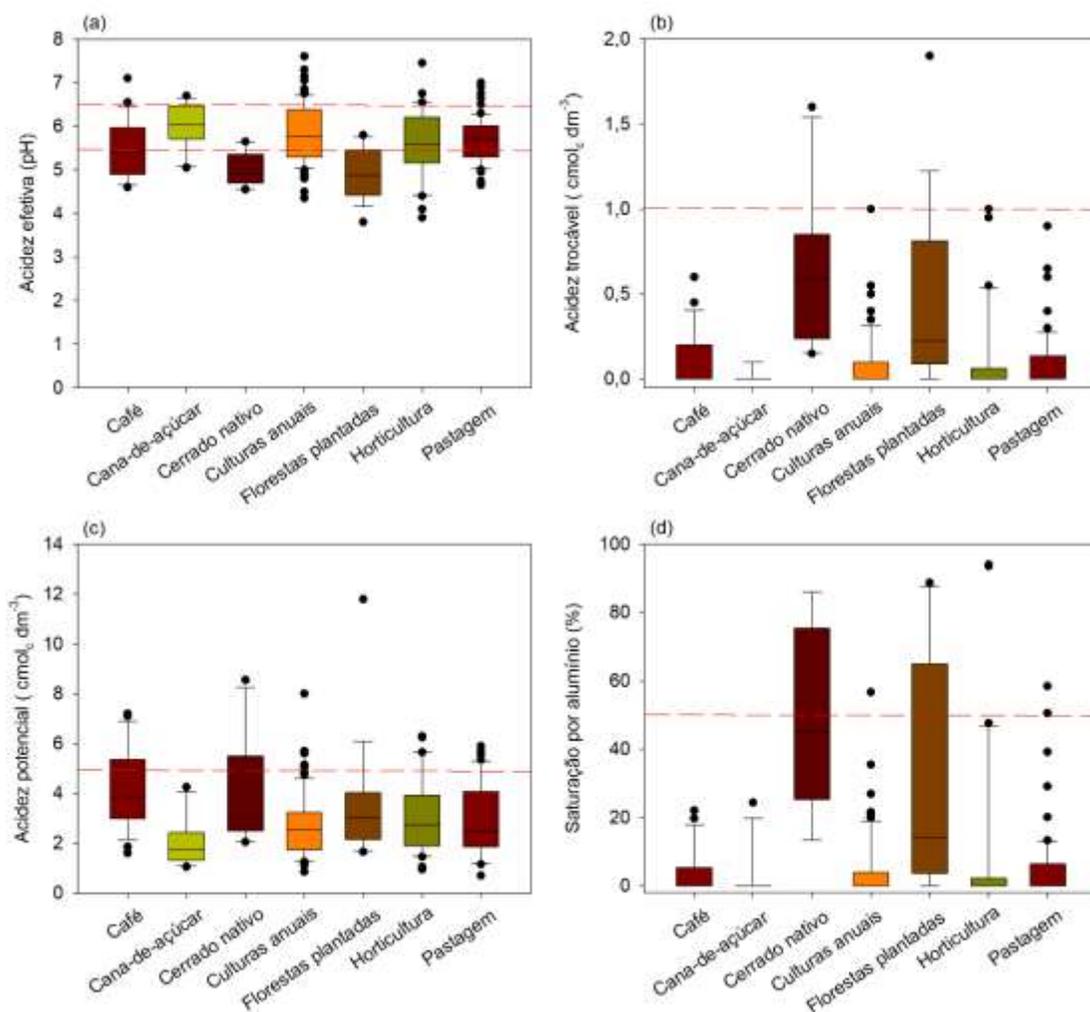


Figura 6. Efeito do uso do solo na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba nos componentes da acidez do solo. A linha tracejada vermelha indica o nível crítico do nutriente no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999).

4.3.4 Matéria orgânica do solo

Quase todas as amostras (98%) apresentaram teores médios e baixos de matéria orgânica (Figura 7). Dessas, 51% apresentaram teores médios e 47% baixos. Esses resultados apontam que os tipos de usos do solo adotados na região de estudo ainda não foram capazes de elevar os teores de MOS a níveis satisfatórios. Em solos de cerrado sob vegetação nativa os teores de MOS variaram de 7 a 60 g kg⁻¹, com mediana igual a 22 g kg⁻¹ (LOPES; GUILHERME, 2016). Incrementos nos teores de MOS não foram atingidos, mesmo em áreas sob manejos considerados conservacionistas. Além disso, teores acima do nível crítico (40 g

kg⁻¹) foram encontrados em apenas 2% das amostras, em áreas sob cultivo de hortaliças. Nessas áreas, a adubação orgânica é utilizada com muita frequência e o grande aporte de resíduos vegetais e animais pode justificar os teores mais elevados de MOS. A região de estudo (TMAP) está localizada em uma área onde as condições edafoclimáticas favorecem grandemente a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica, dificultando o seu acúmulo no solo (BUSTAMANTE, *et al.*, 2006; CARVALHO *et al.*, 2010). Daí a dificuldade para a formação de palhada no sistema de plantio direto (BUSTAMANTE, *et al.*, 2006; GUARESHI *et al.*, 2012).

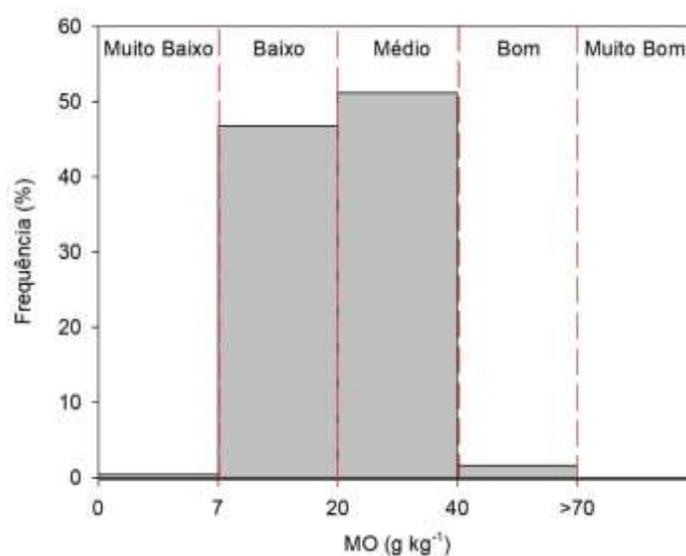


Figura 7. Distribuição de frequência para matéria orgânica dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

A construção da fertilidade do solo na região do Cerrado necessita, indubitavelmente, do incremento de MOS com uso do sistema plantio direto (RESENDE *et al.*, 2016), Integração Lavoura Pecuária (SALTON *et al.*, 2011) e plantas de cobertura (GMACH *et al.*, 2018; SOLTANGHEISI *et al.*, 2018). Dentre os vários efeitos benéficos do aumento da matéria orgânica, em solos tropicais altamente intemperizados, tem-se a elevação da capacidade de troca de cátions, que pode contribuir com até 90% da capacidade de troca de cátions (CANELLAS *et al.*, 2003; ALVAREZ-PUEBLA *et al.*, 2005; BRONICK; LAL, 2005; BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Na Figura 8, são apresentados os teores de MOS em função do tipo de uso do solo no TMAP. Em todos os tipos de uso do solo, os teores médios de MOS foram significativamente inferiores ao nível crítico (Figura 8a). Dentre todos, as áreas sob café apresentaram teor de MOS 24% superior ao cerrado nativo (Figura 8b). Por outro lado, nas áreas sob floresta plantada foi observada uma redução (17%) da MOS. As áreas sob hortaliças e pastagens foram as que apresentaram maior amplitude do teor de MOS em relação ao Cerrado nativo.

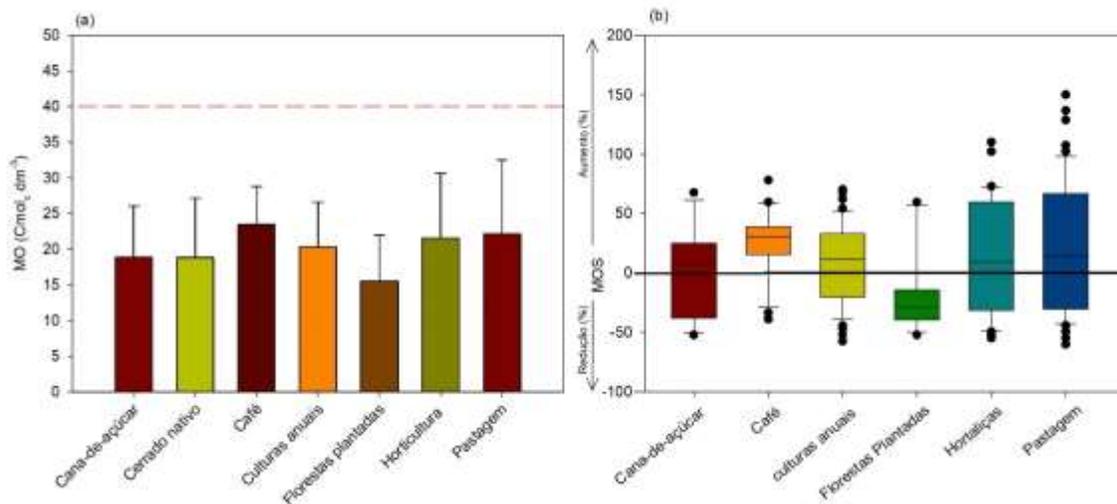


Figura 8. Efeito do uso do solo na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba nos teores de matéria orgânica do solo. A linha tracejada vermelha indica o nível crítico do nutriente no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999).

As variações no conteúdo de MOS nas áreas do TMAP são devidas ao tipo de uso e, também, às condições naturais dos solos. Pode-se aferir que as lavouras de café podem ter tido maiores teores de MOS e maior percentual em relação ao Cerrado nativo por dois motivos: i) as lavouras foram implantadas, predominantemente, em solos mais argilosos, o que favorece maior retenção e proteção da matéria orgânica (NUNES *et al.*, 2010; BERNARDES *et al.*, 2012; SCHMIDT *et al.*, 2012); ii) no manejo empregado nas áreas de café, nas quais o solo é mantido com cobertura vegetal, não há revolvimento do solo e o manejo de corretivos e fertilizantes é realizado de forma contínua safra após safra, o que garante a grande produção de biomassa e o sequestro de carbono no solo (ALCÂNTARA *et al.*, 2009). Além disso, muitos agricultores aplicam os resíduos do beneficiamento do café

(casca do café/pergaminho) sobre o solo (na saia do café) como adubo orgânico (EFFGEN *et al.*, 2008). Já as áreas com florestas plantadas sendo, majoritariamente, de textura média (Figura 4), apresentam naturalmente menor teor de MOS, maior suscetibilidade de perda de carbono e, conseqüentemente, menor acúmulo de carbono ao longo dos anos (LAL, 2007).

4.3.5 Fósforo disponível

Na Figura 9, são apresentados os teores de P disponível extraído em solução Mehlich-1, divididos quanto aos critérios de interpretação (P-rem e textura). Considerando todas as áreas amostradas, o valor da mediana para P disponível foi 13,3 mg dm⁻³, com variação de 0,7 a 299 mg dm⁻³ (Tabela 1). Esse resultado demonstra que o manejo da adubação fosfatada, a longo prazo, promoveu incrementos no teor de P disponível nos solos agrícolas do TMAP, visto que em áreas nativas antes da ocupação agrícola apresentavam teor de P disponível variando de 0,1 a 16,5 mg dm⁻³ (LOPES; GUILHERME, 2016). A contínua aplicação de fertilizantes fosfatados, em quantidade maior que a remoção anual das culturas, tem gerado um saldo positivo no teor de P do solo e, ao longo dos anos, tem elevado os teores de P disponível, mesmo em solos com elevada capacidade de fixação de P (GROSH *et al.*, 2011; ABDALA *et al.*, 2012; BARROW; DEBNATH, 2014; ROY *et al.*, 2017). Além disso, a sorção de P em solos do Cerrado diminui com a saturação dos sítios de adsorção (ROY *et al.*, 2017).

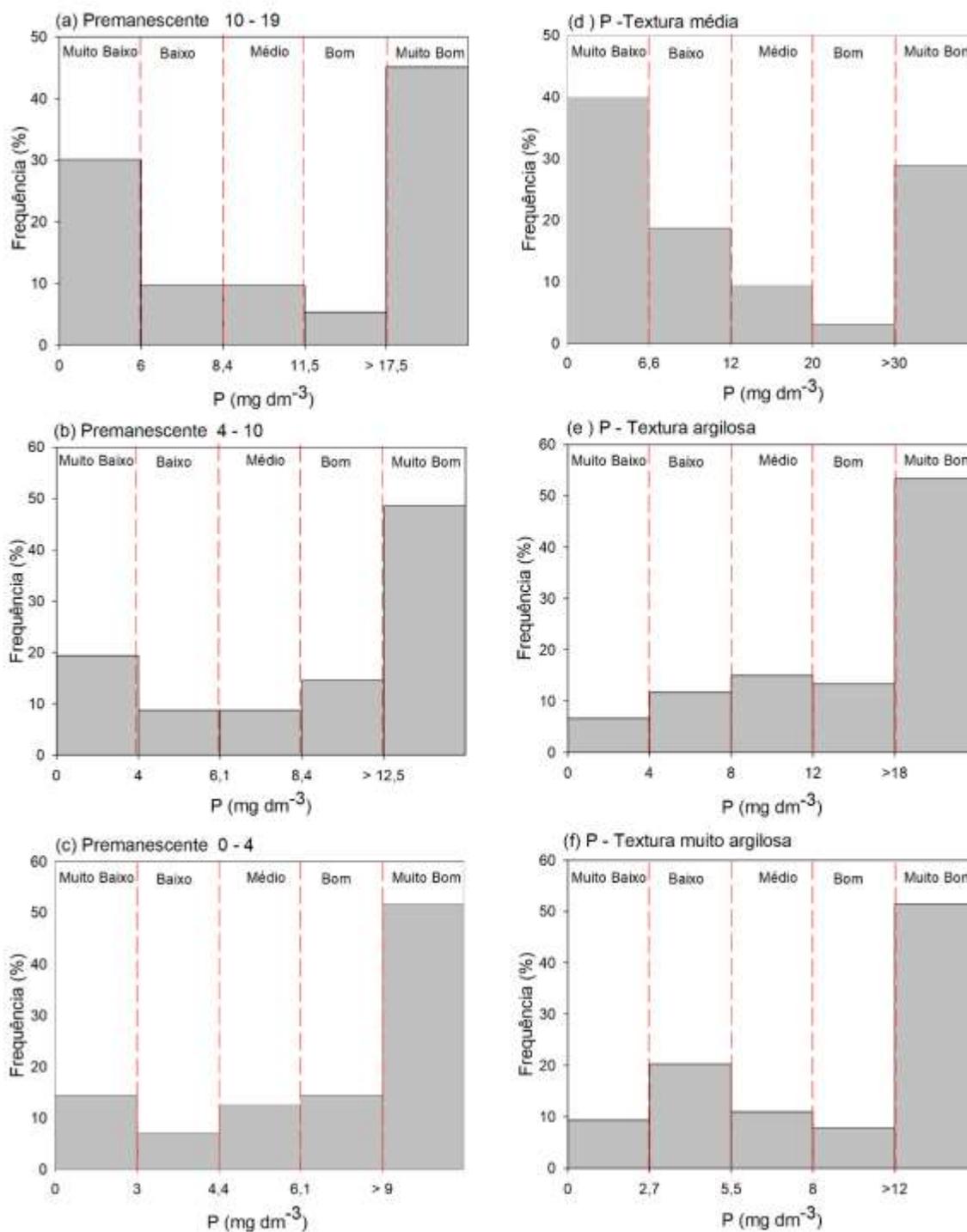


Figura 9. Distribuição de frequência para o teor de P disponível dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em função dos critérios de interpretação (P-rem e textura). Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Nas Figuras 9a, 9b e 9c têm-se as distribuições de frequência do P disponível (P-M1) agrupadas de acordo com o P-rem como critério de interpretação. Foram considerados os seguintes intervalos de P-rem: 0 a 4 mg dm⁻³ (Figura 9a); 4 a 10 mg dm⁻³ (Figura 9b); e 10 a 19 mg dm⁻³ (Figura 9c). Esses intervalos foram assim definidos considerando que 22% das amostras da região de estudo apresentaram P-rem entre 0 a 4 mg dm⁻³; 41% entre 4 e 10 mg dm⁻³ e 37% de 10 a 19 mg dm⁻³.

Nas Figuras 9d, 9e e 9f são apresentadas a distribuição de frequência de P disponível (P-M1) considerando a textura do solo como critério de interpretação. Nas áreas de textura média, apenas 32 % das amostras apresentaram teor de P disponível acima do nível crítico. Já as áreas de textura argilosa e muito argilosa apresentaram 67% e 59% das amostras com teor de P disponível acima do nível crítico, respectivamente.

As distribuições de frequência para P-disponível, levando-se em consideração os critérios P-rem ou argila, foram semelhantes, exceto para os solos de textura média (Figura 9). Nesses solos, quando foi utilizado o critério textura, mais amostras foram interpretadas como tendo P-disponível muito baixo e menos amostras com P-disponível muito bom. Dentre as amostras com textura média, 68% foram enquadradas nas faixas de baixa disponibilidade de P, porém quando as mesmas amostras foram analisadas pelo critério do P-rem resultou na queda da porcentagem para 56%. Isso pode ser explicado pelo fato de que a utilização da textura como medida do poder tampão do solo pode não ser sensível a fatores qualitativos da fração argila (ROGERI *et al.*, 2017).

Utilizando-se o P-rem como critério de interpretação e considerando todos os seus intervalos, aproximadamente 60% das amostras apresentaram P-disponível acima do nível crítico. Destas, 12% apresentaram teores bons de P no solo e 48% muito bons. Ressalta-se, portanto, que 40% das áreas agrícolas ainda possuem níveis limitantes de P para o desenvolvimento das plantas cultivadas no TMAP (Figura 10a). Quando se utilizou o atributo textura do solo como critério para interpretação da disponibilidade de P, apenas 47% das amostras apresentaram teor de P disponível acima do nível crítico. Dessas amostras, 8% das áreas apresentaram teores bons de P e 39% muito bons (Figura 10b).

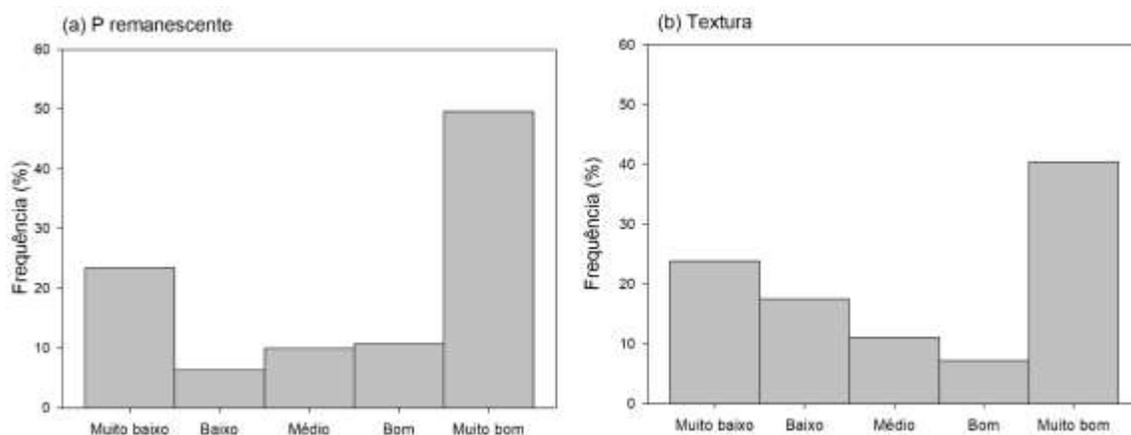


Figura 10. Distribuição percentual de áreas com teor P disponível por classe de interpretação em função do P remanescente e textura na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

4.3.5.1 Correlação entre os extratores de P

Na Figura 11, são apresentadas correlações entre o P disponível extraído em solução Mehlich-1 e por resina mista. Para os solos de textura média, foi obtida uma boa correlação entre P-Mehlich 1 e P-resina ($r = 0,88$ e $R^2 = 0,78$). Essa correlação diminui com o aumento do teor de argila do solo. Em solos de textura argilosa, observa-se um distanciamento dos pontos da reta 1:1 com valores de r e R^2 iguais a 0,82 e 0,68, respectivamente. Nos solos de textura muito argilosa, o coeficiente de correlação cai para 0,75 e R^2 para 0,56. Nos solos de textura argilosa e muito argilosa os valores de P extraídos pela resina mista foram superiores aos extraídos em solução Mehlich-1. Nos solos argilosos e muito argilosos (com maior poder tampão), a solução extratora Mehlich-1 (inicialmente com $\text{pH} \sim 1,2$) pode ter sido desgastada (aumento do seu pH) resultando em menor capacidade de extração, corroborando com Bortolon *et al.* (2009) e Freitas *et al.* (2013).

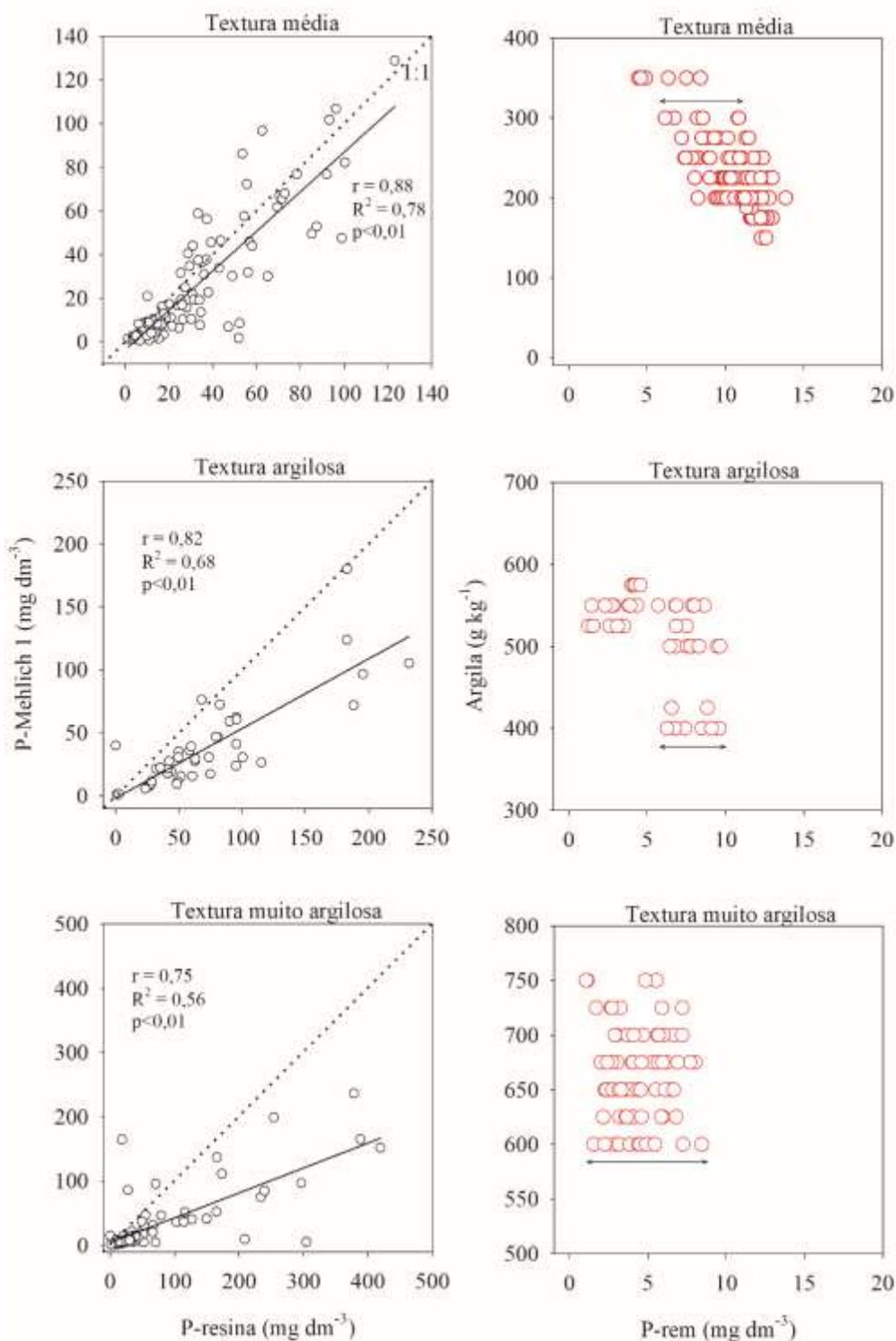


Figura 11. Correlação entre as formas de P disponíveis (P-Mehlich e P-resina) e relação P-rem e conteúdo de argila em cada classe textural dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Em amostras de Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo tratados com superfosfato triplo, a quantidade de P extraída pela resina mista foi significativamente superior ao P extraído em solução Mehlich-1 (FREITAS *et al.*, 2013). Nesse trabalho, mesmo nas amostras dos Latossolos não adubados com P (controle), a resina mista apresentou maior capacidade de extração que a solução Mehlich-1. Trabalhando com vasos em casa de vegetação para o cultivo de gramíneas forrageiras, Corrêa & Haag (1993) também encontraram maior eficiência da resina trocadora de ânions na recuperação (extração) do P adicionado via adubação comparada à solução Mehlich-1. Além do desgaste da solução extratora Mehlich-1, em solos com maior poder tampão, a solução no momento da extração ainda pode permanecer ligeiramente ácida, favorecendo o desenvolvimento de cargas positivas nas partículas do solo e, conseqüentemente, a adsorção das formas solúveis de P presentes na própria amostra, resultando em uma menor quantidade extraída.

É observado também na Figura 11 que, em todas as classes texturais, para um mesmo teor de argila, diferentes valores de P-rem são obtidos. Isso confirma ser o P-rem mais eficiente como indicador da área superficial específica a reatividade das partículas do solo no tocante à sorção de ânions, como o fosfato.

Pinto *et al.* (2013) afirmaram que o uso do teor de argila como critério de interpretação e recomendação da adubação fosfatada em solos tropicais, como tem sido realizado tradicionalmente, pode não refletir os verdadeiros sítios envolvidos nos processos de adsorção de fosfatos e disponibilidade de P. A adsorção/disponibilidade de P no solo não é controlada apenas pelo teor de argila do solo (DONAGEMMA *et al.*, 2008), mas, também, pelos minerais silicatados presentes (EBERHARDT *et al.*, 2008), teor de MO e de óxidos, bem como pela associação desses atributos (DONAGEMMA *et al.*, 2008) e, também, pelo manejo intensivo da adubação fosfatada, mineral e orgânica ao longo dos anos (GROSH *et al.*, 2011; ABDALA *et al.*, 2012; ROY *et al.*, 2017). Donagemma *et al.* (2008) ressalta que o uso do P-rem é mais sensível para avaliação da disponibilidade de P em solos tropicais, refletindo melhor a superfície das partículas do solo para reações de sorção e dessorção (BARROW; DEBNATH, 2014; ROWE *et al.*, 2016; ROGERI *et al.*, 2017).

4.3.6 Enxofre

Nas amostras que apresentaram P-rem entre 0 e 4 mg L⁻¹, a disponibilidade de S foi considerada exclusivamente (100%) muito boa, com valores acima de 5,4 mg dm⁻³ em todas as amostras (Figura 12a). Para amostras com valores de P-rem maiores, a faixa de disponibilidade de S muito boa diminuiu. Na faixa de P-rem entre 4 e 10 mg L⁻¹, 83% das amostras apresentaram S na faixa muito bom, 10% na faixa bom e 2% médio (Figura 12b). Nas amostras de P-rem entre 10 e 19 mg L⁻¹, a porcentagem de amostras com disponibilidade muito boa de S caiu para 39%; 30% das amostras apresentaram boa disponibilidade de S; 21% média e 10% baixa (Figura 12c).

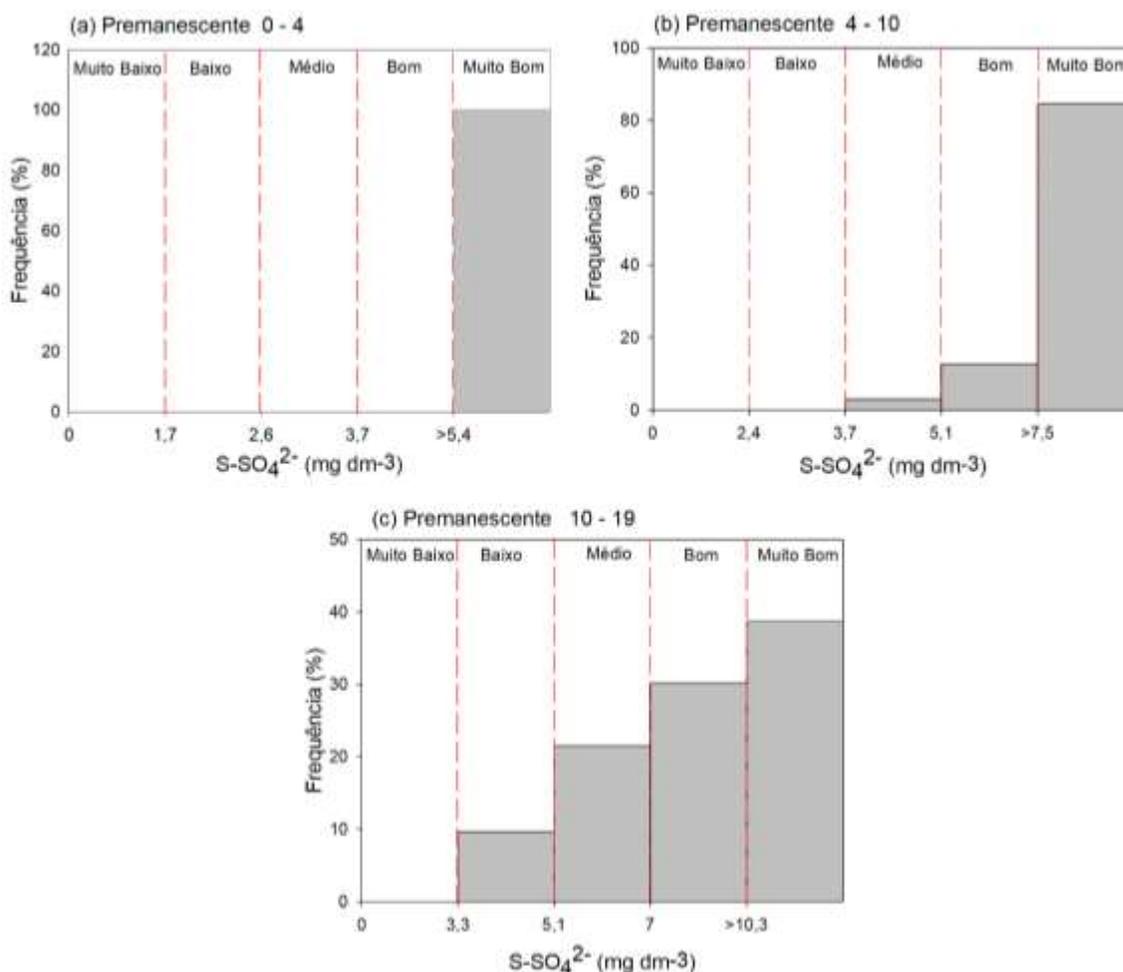


Figura 12. Distribuição de frequência para S-SO₄²⁻ disponível dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em função dos critérios de interpretação (P-rem e textura). Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Verificou-se, ainda, que quase a totalidade das amostras (98%) enquadradas nas classes de maior adsorção de P (P-rem 0 a 4 e 4 a 10 mg dm⁻³) apresentaram teor de S-SO₄²⁻ acima do nível crítico. Por outro lado, 30% das amostras enquadradas na classe de P-rem 10 a 19 mg dm⁻³ apresentaram teor de enxofre abaixo do nível crítico, ou seja, a classe com menor capacidade de adsorção de P apresentou maior número de amostras com teor de enxofre em nível insatisfatório. Isso é atribuído ao manejo de corretivos e fertilizantes das áreas com menor valor de P-rem, pois, são as mais argilosas e estão localizadas, majoritariamente, em áreas sob cultivo de café, culturas anuais e horticultura (Figura 4), nas quais o sulfato é aplicado frequentemente, via gessagem ou fertilizantes.

De maneira geral, 87% das áreas apresentaram índices satisfatórios de S-SO₄²⁻, o que pode ser atribuído à gessagem e, também, à aplicação de fertilizantes para o fornecimento de outros nutrientes que contêm enxofre na sua formulação, como, por exemplo, sulfato de amônio (24% de S), superfosfato simples (12% de S), sulfato de magnésio (13% de S) (BROCH *et al.*, 2011).

4.3.7 Complexo de troca

Os teores de Ca e Mg ainda não foram elevados a níveis satisfatórios na maioria das áreas do TMAP. Foi possível verificar que 57% das áreas apresentaram teores de Ca abaixo do nível crítico (Figura 13a) e 79% das áreas apresentaram níveis insatisfatórios de Mg (Figura 13b). Com base nesses resultados, constata-se que esses nutrientes podem estar limitando o desenvolvimento das plantas cultivadas na região do TMAP, indicando o uso de calcário ainda aquém do necessário e/ou inadequado.

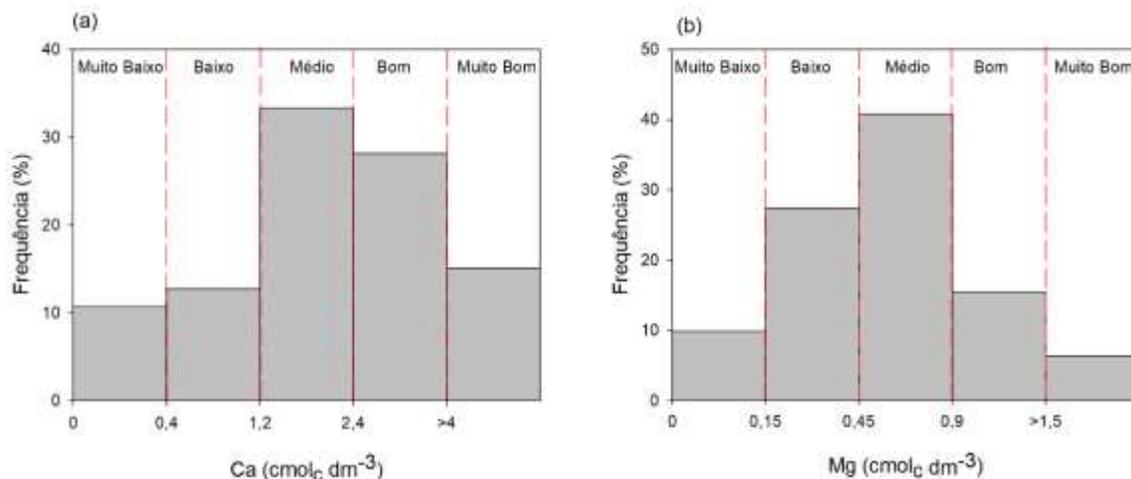


Figura 13. Distribuição de frequência do teor de Ca e Mg trocáveis dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

A construção da fertilidade do solo e a obtenção de alta produtividade na região do Cerrado depende da aplicação continuada de corretivos e fertilizantes (BENITES *et al.*, 2010). Esses solos, antes da ocupação agrícola, apresentavam teores de Ca variando de 0,04 a 6,8 cmol_c dm⁻³, com mediana igual a 0,25 cmol_c dm⁻³. Os teores de Mg do solo variavam de 0 a 2,2 cmol_c dm⁻³, com mediana igual a 0,25 cmol_c dm⁻³ (LOPES; GUILHERME, 2016). Comparando os resultados dos teores de Ca e Mg obtidos nesta pesquisa, percebe-se que a mediana para Ca foi elevada para 2,1 cmol_c dm⁻³, e a mediana para Mg passou de 0,25 para 0,6 cmol_c dm⁻³ (Tabela 1), indicando um incremento desses nutrientes nos solos sob manejo agrícola.

Com relação ao teor de K⁺ trocável no solo, foi possível aferir que 24% das amostras apresentaram teores muito baixos e baixos (< 40 mg dm⁻³), 28% teores médios e 48% teores acima do nível crítico, variando de 71 a 942 mg dm⁻³ (Figura 14a). Teores elevados de K⁺ no solo podem comprometer a relação de equilíbrio entre as bases e, conseqüentemente, a disponibilidade de Ca e Mg para as culturas (OLIVEIRA *et al.*, 2001; BARROS *et al.*, 2010). Os teores de K⁺ dos solos sob manejo agrícola no TMAP foram substancialmente elevados, apresentando teores de K⁺ variando de 8 a 942 mg dm⁻³, com média igual a 99 mg dm⁻³ e mediana igual a 69 mg dm⁻³ (Tabela 1). Lopes & Guilherme (2016) reportam que antes da ocupação agrícola os solos sob vegetação nativa apresentavam os teores de K⁺ variando de 8 a 238 mg dm⁻³, com mediana igual a 31 mg dm⁻³.

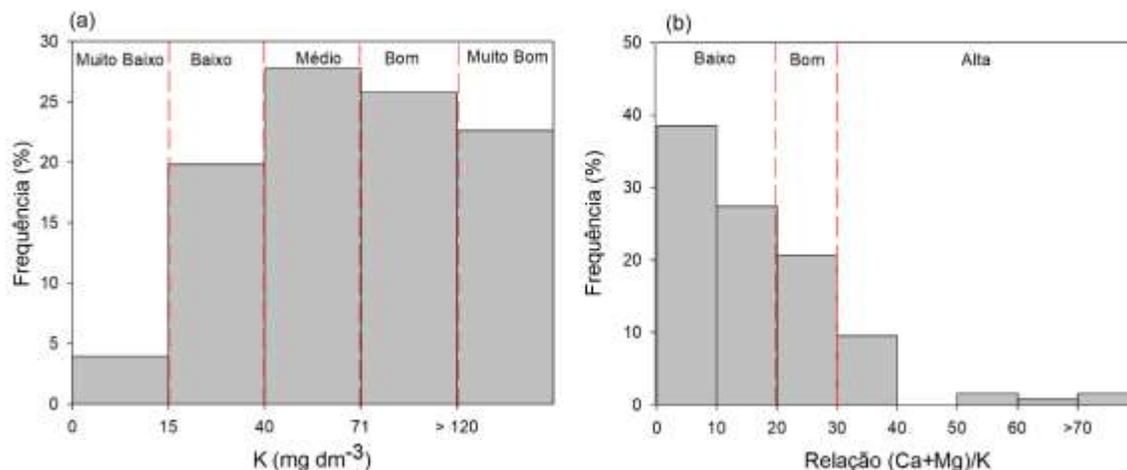


Figura 14. Distribuição de frequência para K trocável e relação (Ca+Mg)/K dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Na Figura 14b, observa-se a relação (Ca+Mg)/K das amostras da região do TMAP. Verifica-se que apenas 20% apresentaram relação (Ca+Mg)/K na faixa adequada (20 – 30), 66% apresentaram baixa relação (< 20) e 14% possuem alta relação (> 30). Ressalta-se, ainda, que a adubação potássica e a calagem devem ser realizadas observando o equilíbrio entre as bases nos sítios de troca (OLIVEIRA *et al.*, 2001; BARROS *et al.*, 2010).

O desequilíbrio entre as bases (Ca, Mg e K) no solo pode provocar interações que interferem na dinâmica desses nutrientes no mesmo, na absorção, translocação e redistribuição do elemento na planta, o que induz a uma condição de desordem nutricional, seja por deficiência ou toxidez (PRADO, 2008). Como exemplo, foram identificadas áreas com alto teor de K disponível apresentando baixa relação (Ca+Mg)/K e alta saturação de potássio na CTC. Essa relação induz a uma interação competitiva, de modo que o K e Ca inibem a absorção de Mg, provocando sua deficiência nas plantas (OLIVEIRA *et al.*, 2001; SILVA; TREVIZAM, 2015).

A maioria dos solos amostrados na região do TMAP apresentaram baixa CTC efetiva e potencial (Figura 15). Foi verificado que apenas 23% das amostras apresentaram CTC efetiva acima do nível crítico (4,6 cmol_c dm⁻³) e somente 16% apresentaram CTC potencial acima de 8,6 cmol_c dm⁻³, nível considerado bom. A composição mineralógica dos solos do

Cerrado, essencialmente caulinitica-oxídica, é um fator limitante à CTC, sendo essa muito dependente das cargas variáveis e da MOS.

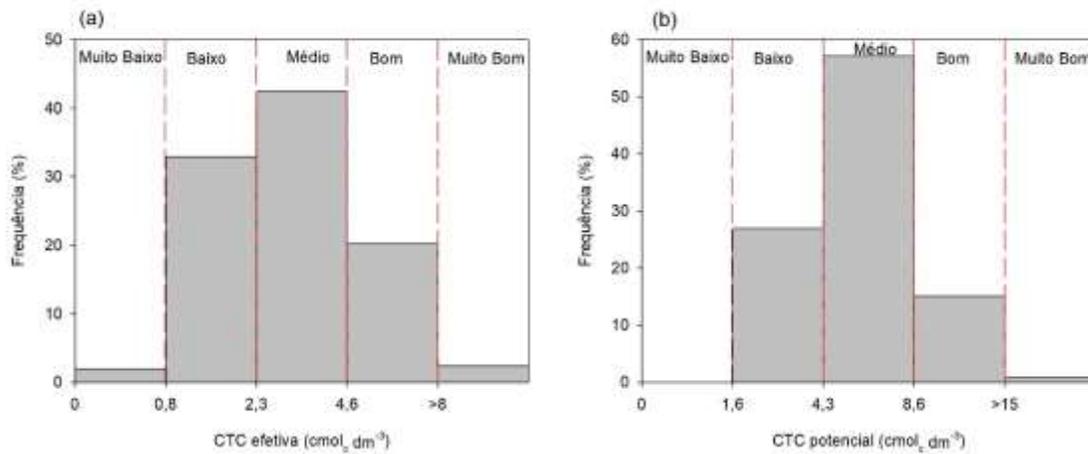


Figura 15. Distribuição de frequência para CTC efetiva e potencial dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Solos com baixa CTC possuem menor capacidade de retenção de cátions (Ca, Mg e K) nos sítios de troca, assim, os nutrientes adicionados por meio da calagem, gessagem e adubações apresentam maior suscetibilidade de lixiviação. Na Figura 16 são apresentados os histogramas de frequência da soma de bases (SB) (Figura 16a) e da saturação por base (V) (Figura 16b), nos quais é possível verificar que apenas 36% e 33% das áreas avaliadas apresentaram valores de SB e V acima do nível crítico, respectivamente.

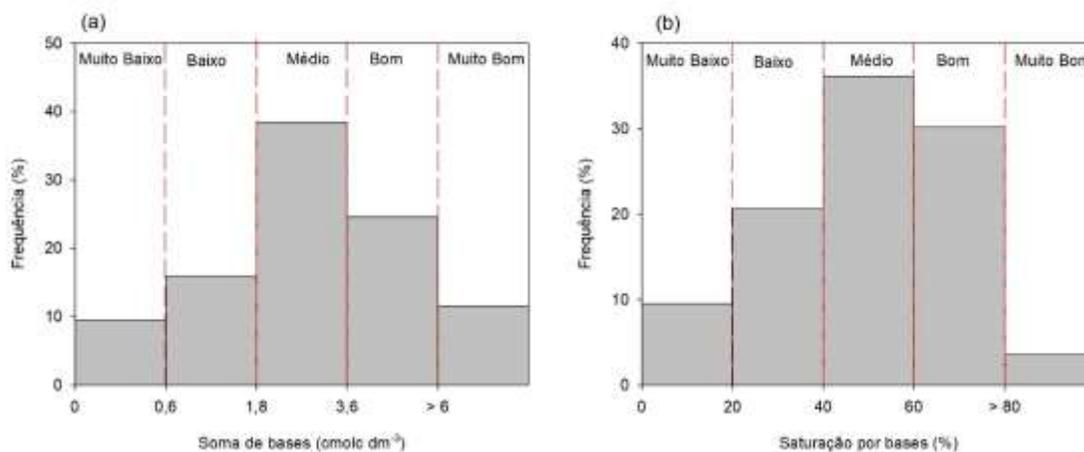


Figura 16. Distribuição de frequência para soma de bases e saturação por bases dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Na Figura 17, são apresentados os teores médios dos macronutrientes (P, Ca, Mg, S e K) em função do tipo de uso do solo. Nas Figuras 17a e 17b, é possível observar os teores de P disponível extraído em solução Mehlich-1 (P-M1) e por resina mista, respectivamente. A disponibilidade de P avaliada pelo P-M1, indicou que os diferentes tipos de uso do solo apresentaram teores de P disponíveis próximos ao nível crítico, exceto nas áreas de café, onde a maior parte das amostras apresentaram P-M1 superiores aos valores críticos. Tomando-se o P-resina como atributo indicador da disponibilidade de P, as áreas de café, culturas anuais e horticultura apresentaram valores superiores aos considerados críticos. É necessário ressaltar que a interpretação da disponibilidade de P entre os diferentes tipos de uso do solo está também sob a influência da variação dos atributos do mesmo, principalmente textura e matéria orgânica.

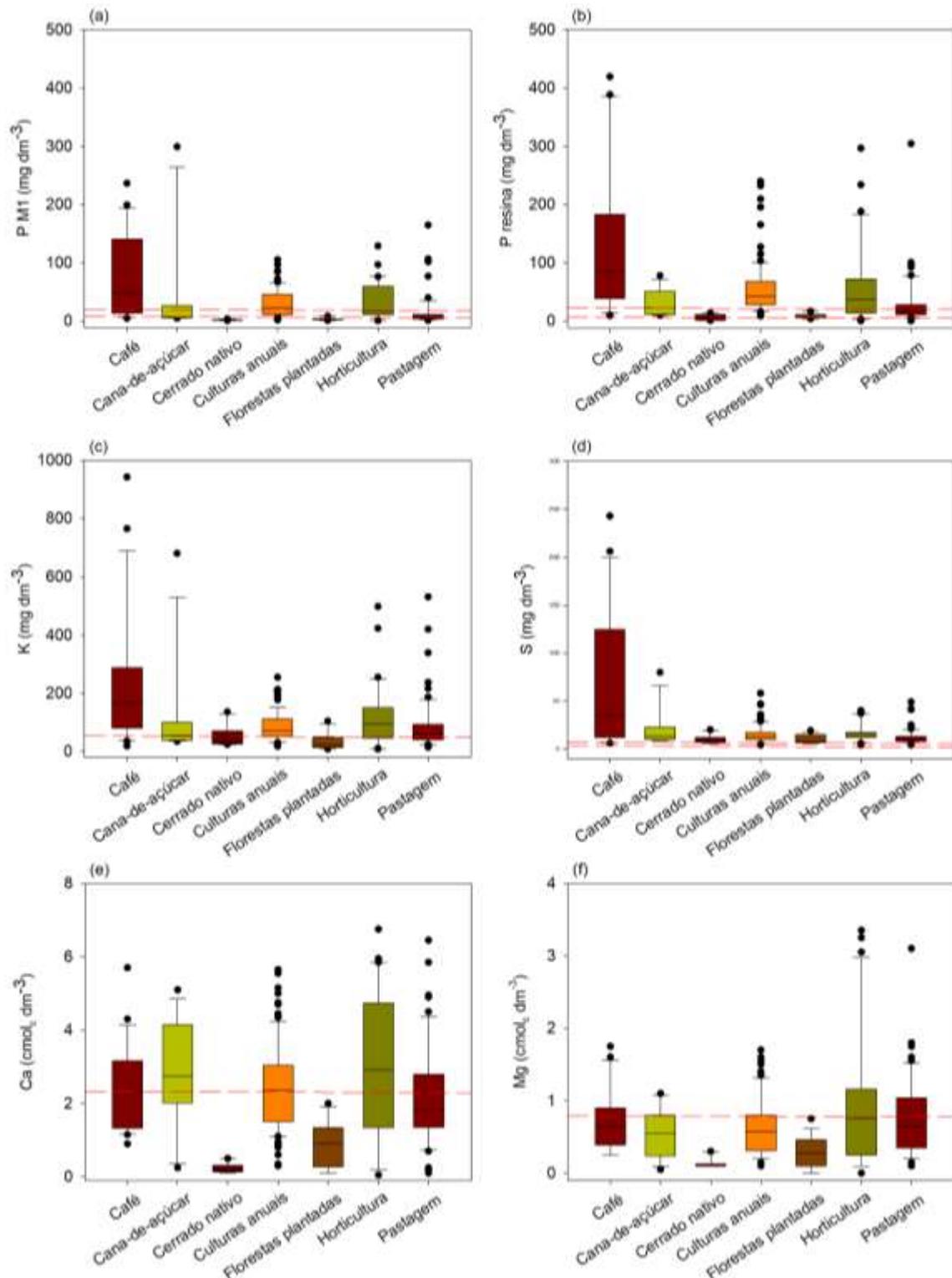


Figura 17. Efeito do uso do solo na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba nos teores de fósforo disponível (P-Mehlich e P-resina), Ca, Mg e K trocáveis e S-SO₄²⁻. Figuras 17a e 17b: a linha tracejada vermelha inferior corresponde ao nível crítico (NC) do teor de P de solos argilosos e a linha superior corresponde ao NC de solos de textura média (ALVAREZ

et al., 1999). Figuras 17c, 17e, 17f: a linha tracejada vermelha indica o NC dos nutrientes no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999); Figura 17d: a faixa indicada pela linha tracejada corresponde ao NC para o teor de enxofre no solo com base no valor de P remanescente.

Nota-se, também, que ambos extratores indicaram o mesmo efeito dos tipos de uso do solo sobre a disponibilidade de P no solo, entretanto, a resina mista apresentou maior capacidade de extração de P. Tal resultado também pode ser observado na Tabela 1. Esse comportamento também foi encontrado e explicado por Schlindwein & Gianello (2008), Simões Neto *et al.* (2009) e Freitas *et al.* (2013) que atribuíram-no à influência do teor de argila sobre a capacidade de extração de P do método Mehlich-1.

Na Figura 17c, é apresentado o teor de K trocável do solo em função do tipo de uso deste, quando verificou-se que esse nutriente está abaixo do nível crítico nas áreas de cerrado nativo e florestas plantadas. As áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, café e horticultura apresentaram teores mais elevados de K disponível no solo, o que pode ser explicado pelo manejo de fertilizantes e também pela aplicação de resíduos com elevado teor de K nas referidas áreas como vinhaça e torta de filtro nas áreas de cana-de-açúcar (PESSOA *et al.*, 2010; PRADO *et al.*, 2013; BETTANI *et al.*, 2019), resíduos do beneficiamento do café nas lavouras (EFFGEN *et al.*, 2008) e estercos nas áreas de horticultura (SILVA 2008; PITTA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2014).

O teor de S disponível está acima do nível crítico nas áreas de café, cana-de-açúcar, culturas anuais e horticultura, com destaque para as áreas sob cultivo de café que apresentaram os teores mais elevados desse nutriente no solo, variando de 6 a 243 mg dm⁻³ (Figura 17d). Esse resultado, possivelmente, está relacionado ao uso do gesso nas lavouras cafeeiras para o fornecimento de Ca e Mg em profundidade, promovendo o aprofundamento radicular e corrigindo a toxidez por alumínio (RAMOS *et al.*, 2013).

Os teores de Ca e Mg por tipo de uso do solo podem ser observados na Figura 17e e 17f, respectivamente, quando foi possível verificar que o teor de Ca trocável no solo está em nível adequado nas áreas de cana-de-açúcar, café, culturas anuais e horticultura. Os teores de Mg no solo ainda não foram elevados a níveis satisfatórios nos sistemas agrícolas avaliados neste estudo, com exceção para algumas áreas de horticultura. Isso pode ser devido ao uso de calcário com baixa porcentagem de MgO.

Na Figura 18 é apresentado o efeito do uso do solo nos valores de CTC efetiva, CTC potencial, soma de bases e saturação por bases. É possível observar que os valores da CTC efetiva e potencial estão abaixo do limite crítico em todos os sistemas agrícolas (Figura 13a 13b). Tal resultado é consequência do baixo teor de MOS e da mineralogia dos solos dessa região (LOPES; GUILHERME, 2016). Em áreas sob cultivo de hortaliças foram encontrados valores de CTC acima do nível crítico, uma vez que, nessas áreas, o tradicional uso da adubação orgânica contribui para o aumento da matéria orgânica no solo e, conseqüentemente, da capacidade de troca de cátions (SILVA *et al.*, 2014; GMACH *et al.*, 2018).

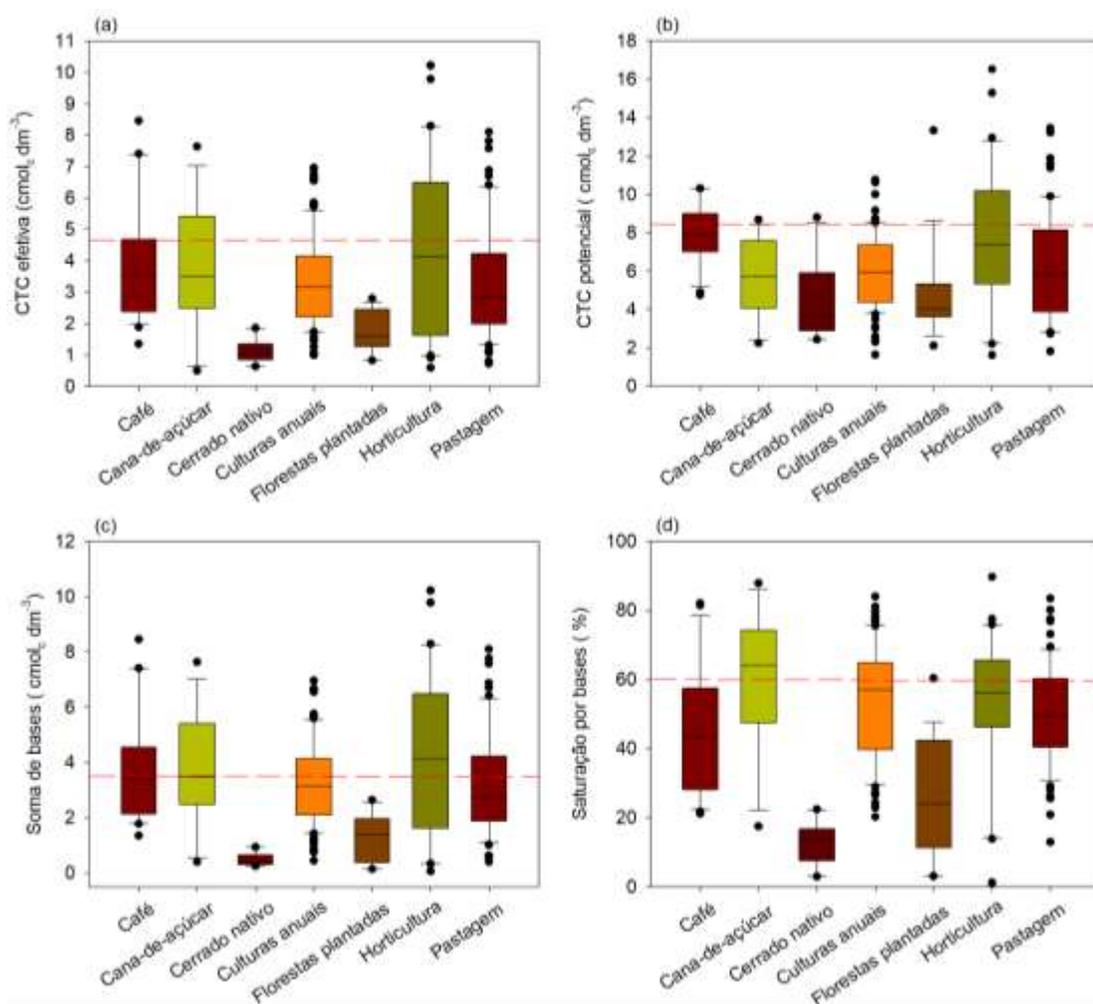


Figura 18. Efeito do uso do solo na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba na capacidade de troca de cátions, soma de bases e saturação por bases. A linha tracejada vermelha indica o nível crítico dos atributos no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Na Figura 18c, observa-se que amostras com soma de bases acima do nível crítico ($>3,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foram encontradas em áreas cultivadas com café, cana-de-açúcar, horticultura e em poucas amostras sob cultivo de culturas anuais e pastagem. Em solos com baixa CTC, a soma de bases acima do nível crítico é consequência da contínua aplicação de corretivos e fertilizantes, ocorrendo a reposição dos cátions absorvidos pelas plantas e lixiviados (RESENDE *et al.*, 2016).

De maneira geral, as áreas amostradas apresentaram saturação por base menor que 60%, com exceção das áreas sob cultivo de cana-de-açúcar (Figura 18d). As áreas cultivadas com café apresentaram baixa saturação por bases na camada de solo amostrada (0 – 20 cm), o que pode ser explicado devido ao fato de as áreas sob café estarem localizadas em solos mais argilosos (Figura 3), o que contribui para maior CTC potencial, resultando em menor porcentagem de bases no complexo de troca. Outra explicação plausível pode ser uso do gesso nas lavouras cafeeiras (RAMOS *et al.*, 2013), o que pode contribuir para o deslocamento de bases das camadas superiores para as inferiores (RAMPIM *et al.*, 2011; SERAFIM *et al.*, 2012; RAMOS *et al.*, 2013; BASSO *et al.*, 2015). Os maiores teores de S-SO_4^{2-} nas áreas de café (Figura 17d) ajudam a explicar a aplicação periódica de gesso.

4.3.8 Micronutrientes

Na região do presente estudo (TMAP), os teores de Fe, Mn, Zn e Cu (Figura 19) estiveram acima do nível crítico em 80, 82, 70 e 72% das amostras, respectivamente, corroborando com os resultados e proposições para o adequado manejo da fertilidade do solo na região do Cerrado (LOPES; GUILHERME, 2016).

A maior parte das amostras apresentaram teores muito bons desses micronutrientes, especialmente Mn e Zn. Alguns elementos, como o Zn, têm sido, atualmente, fortemente considerados na nova fase da agricultura, denominada funcional, cuja estratégia é a biofortificação de alimentos com nutrientes necessários para a saúde humana e animal. Teores adequados de nutrientes no solo são um dos primeiros passos para a obtenção de alimentos biofortificados (CAKMAK, 2008; CAKMAK, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Já para o B, 97% das áreas apresentaram teores abaixo do nível crítico ($< 0,6 \text{ mg dm}^{-3}$). Diante disso, deve-se atentar para esta carência de B no solo devendo, pois, ser incluído no manejo da fertilidade. O B possui baixo efeito residual, mesmo com adubações frequentes

e utilização de doses elevadas (RESENDE *et al.*, 2016). Assim, adubações de manutenção desse nutriente devem ser realizadas de forma continuada no decorrer das safras. O B é um elemento pouco móvel na planta e as adubações de prevenção ou correção devem ser realizadas, preferencialmente, via solo (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

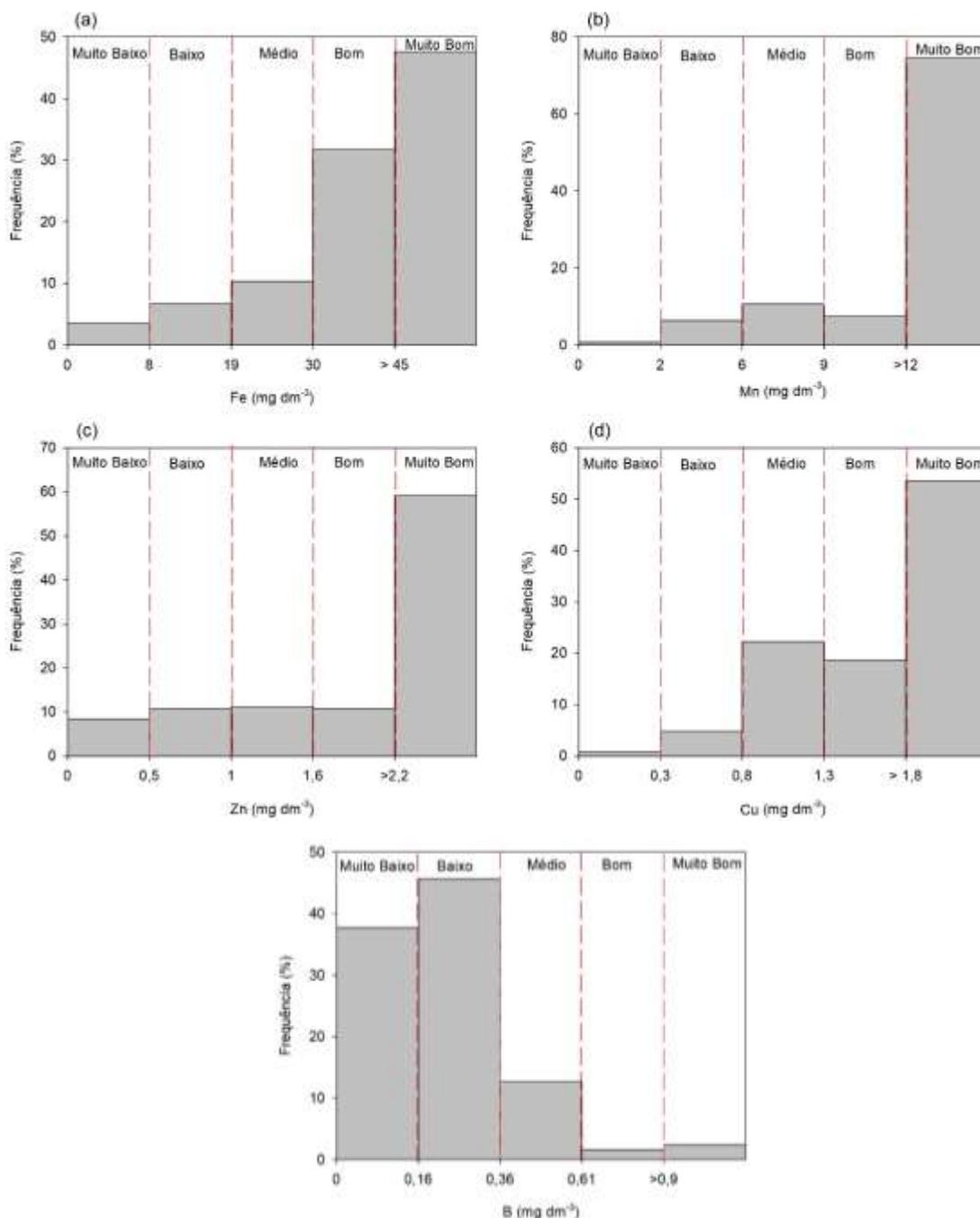


Figura 19. Distribuição de frequência para Fe, Mn, Zn, Cu (Mehlich – 1) e B disponíveis dos solos da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Nível crítico considerado: limite superior do intervalo médio (ALVAREZ *et al.*, 1999).

Os teores de Fe disponível foram menores nas áreas sob uso agrícola quando comparadas ao cerrado (Figura 20a). A menor disponibilidade de Fe em áreas agrícolas pode estar relacionada com a elevação do pH do solo com a calagem (RAIJ, 2011). Para o Cu, as áreas sob cultivo de café e horticultura apresentaram maiores valores (Figura 20b). Nas áreas de horticultura observou-se ainda uma maior variação dos teores de Cu no solo, o que pode ser atribuído ao uso de fungicidas para o controle preventivo de doenças, os quais possuem Cu e Zn na sua composição (MACKIE *et al.*, 2012). É sabido que aplicações frequentes aumentam os teores de Cu e Zn no solo (NAGAJYOTI *et al.*, 2010). A mesma tendência foi observada para o Zn (Figura 20d), onde os maiores teores foram encontrados nas áreas sob café e horticultura. Diferenças significativas entre os usos do solo não foram observadas para Mn (Figura 20c).

Entre os micronutrientes avaliados (Fe, Mn, Zn, Cu e B), constatou-se que o B é o micronutriente mais limitante à produção agrícola na região do TMAP, pois aparece em nível satisfatório apenas em áreas de cafeicultura (Figura 20e). A ocorrência de teores razoáveis de B nas áreas sob café deve-se à importância desse micronutriente e a preocupação dada a ele na cultura do cafeeiro (POLTRONIERI *et al.*, 2016). É importante salientar que o cafeeiro é uma das espécies mais sensíveis e responsivas ao B, cuja deficiência resulta em redução do sistema radicular e parte aérea, aborto de flores, má formação dos frutos, deformidades nos elementos de vasos e, conseqüentemente, redução do potencial produtivo (ROSOLEM; LEITE, 2007; GONTIJO *et al.*, 2008).

Comparando-se os resultados desta pesquisa com aqueles reportados por Lopes & Guilherme (2016), pode verificar que houve um aumento do teor de micronutrientes no solo após 40 anos de manejo agrícola. As áreas de Cerrado antes da ocupação agrícola possuíam teores de Fe variando de 37 a 74 mg dm⁻³, com mediana igual a 32 mg dm⁻³. Os teores de Cu e Zn variavam entre 0 e 9,7 mg dm⁻³, com mediana igual a 0,6 mg dm⁻³. Os teores de Mn variavam entre 0,6 e 92 mg dm⁻³, com mediana igual a 7,6 mg dm⁻³. Ressalta-se que a mediana de Cu, Zn e Mn estavam abaixo do nível crítico antes da ocupação agrícola do

Cerrado, onde hoje esses nutrientes não são limitantes para produção agrícola na área de estudo.

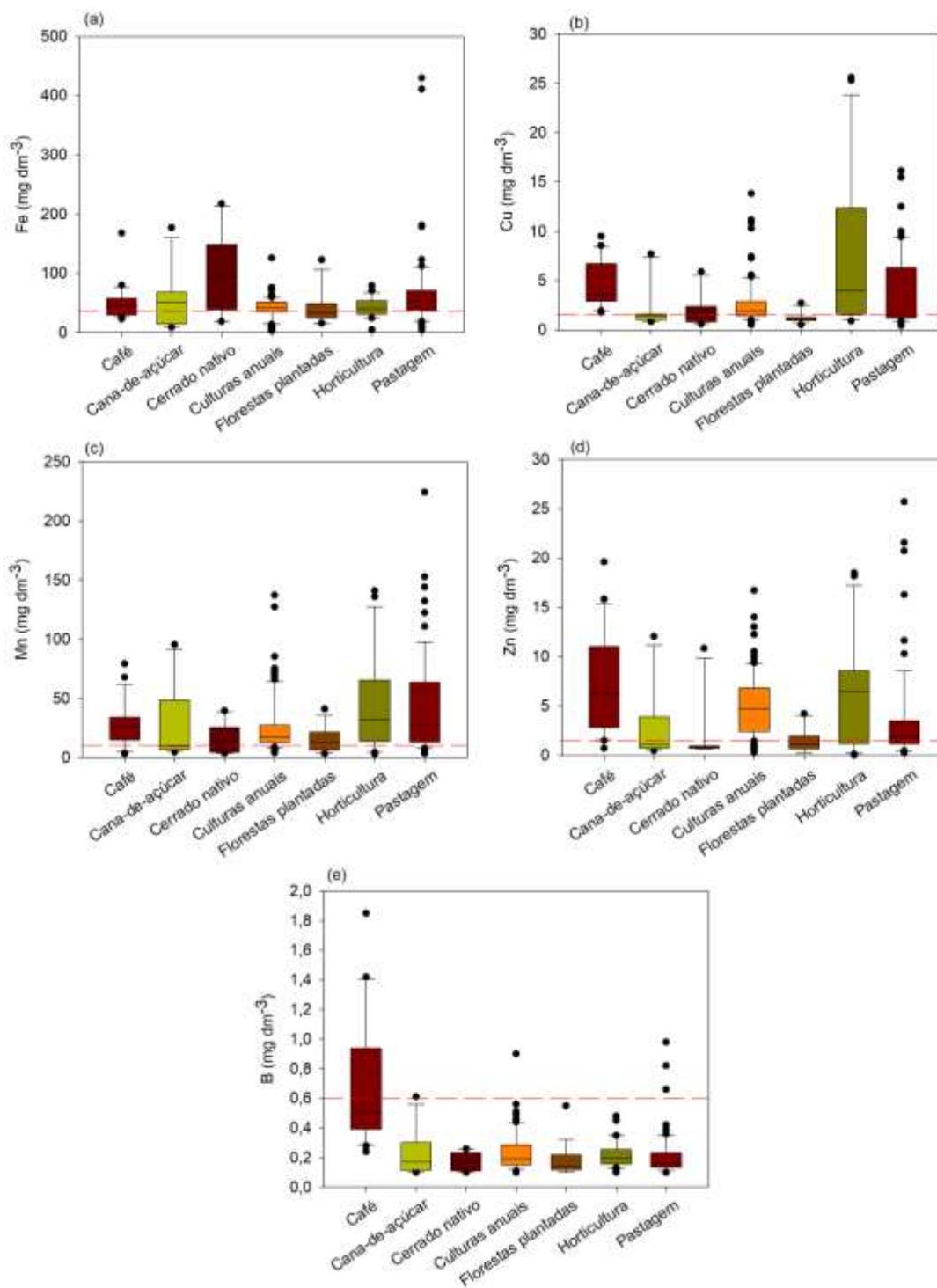


Figura 20. Efeito do uso do solo na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba nos teores de Fe, Mn, Zn, Cu e B disponíveis. A linha tracejada vermelha indica o nível crítico dos nutrientes no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999).

4.4 CONCLUSÕES

O levantamento da fertilidade do solo em áreas sob diferentes usos na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP) permitiu as seguintes conclusões:

- Metade das áreas amostradas apresentaram valores de pH do solo adequados. Entretanto, solos ácidos e com valores de pH superiores a 6,5 também foram encontrados;
- Comparativamente à condição de cerrado nativo, o aumento do pH nas áreas sob uso agrícola reduziu substancialmente o Al^{3+} trocável e a saturação por alumínio. O aumento do pH deve-se ao uso da calagem, entretanto, teores adequados de Ca^{2+} e, principalmente, Mg^{2+} não foram atingidos;
- Metade das amostras apresentaram teor de K^+ acima do nível crítico. Em geral, áreas sob cafeicultura, cana-de-açúcar e horticultura possuem adequada disponibilidade de K^+ . Já as áreas sob cultivo de café apresentaram altos teores de potássio;
- O teor de P do solo foi elevado a níveis satisfatórios em 60% das áreas amostradas. Não há limitação quanto a disponibilidade de P na maioria das áreas sob cultivo de café, culturas anuais e horticultura;
- Quase todas as amostras apresentaram teor de enxofre acima do nível crítico. Altos teores de $S-SO_4^{2-}$ foram identificados em áreas de cafeicultura;
- Alterações (acréscimos e/ou decréscimos) significativas no teor de matéria orgânica do solo não foram observadas. De maneira geral, a capacidade de troca de cátions efetiva e potencial é considerada baixa a média;
- Solos argilosos e muito argilosos apresentaram P disponível extraído em resina mista superior ao extraído em solução Mehlich-1. Em solos de textura média, P-resina e P-Mehlich-1 foram semelhantes;
- Solos com mesmo teor de argila apresentaram diferentes valores de P-rem;
- Na região estudada não há limitações quanto aos teores disponíveis dos micronutrientes Fe, Mn, Zn e Cu. A maior parte das amostras apresentaram teores bons e muito bons,

especialmente para Mn e Zn. Uma deficiência generalizada, exceto nas áreas de café, foi observada para B.

4.5 REFERÊNCIAS

- ABDALA, D.B., GHOSH, A.K., SILVA, I.R., NOVAIS, R.F., VENEGAS, V.H.A. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 231, p. 291-295. 2012.
- ALCÂNTARA, E. N.; NÓBREGA, J. C. A.; FERREIRA, M. M. Métodos de controle de plantas daninhas no cafeeiro afetam os atributos químicos do solo. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 749-757, 2009.
- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.
- ALVAREZ-PUEBLA, R. A.; GOULET, P. J. G.; GARRIDO, J. J. Characterization of the porous structure of different humic fractions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 256, p. 129-135, 2005. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.12.062.
- BARROS, A.C.; FOLEGATTI, M.V.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Irriga**, Botucatu, v.15, p. 361-372, 2010.
- BARROW, N. J.; DEBNATH, A. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of northern India. **Plant Soil**, New York, v. 378, p. 383–395, 2014.
- BASSO, C. J.; SOMAVILLA, L.; SILVA, F. R.; SANTI, A. L. Intervenção mecânica e gesso agrícola para mitigar o gradiente vertical de cátions sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Brasília, v. 45, n. 4, p. 456-463, 2015.
- BASTOS, S. Q. A.; GOMES, J. E. Dinâmica da agricultura no Estado de Minas Gerais: análise estrutural diferencial para o período 1994-2008. **Ruris**: revista do centro de estudos rurais, Campinas, v. 5, n. 2, p. 45-76, 2011.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7-18.

- BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Nutrientes**. Piracicaba: IPNI Brasil, v. 2, p. 133-204, 2010.
- BETTANI, S. R.; RAGAZZO, G. O.; SANTOS, N. L.; KIECKBUSCH, T. G.; SILVA, M. A. Sugarcane vinasse and microalgal biomass in the production of pectin particles as an alternative soil fertilizer, **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 203, p. 322-330, 2019.
- BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D.; P.; SOUSA, G. F. SILVA, M. A.; SOUZA, C. H. E. **Sistemas de cultivo de soja e milho na região do Alto Paranaíba - MG e resultados de avaliações na safra 2014/15**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 47 p.
- BORTOLON, L.; SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Métodos de extração de fósforo e potássio no solo sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2400-2407, 2009.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. **Soil structure and management: a review**. Geoderma, Amsterdam, v. 124, p. 3-22, 2005.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; ROSCOE, R. Soil carbono and SEQUESTRATION potential in the Cerrado Region of Brazil. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C. E. P. (ed) **Carbon sequestration in soils of Latin America**, New York, Haworth, 2006. p. 285-304.
- CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? **Plant Soil**, New York, v. 302, p. 1-17. 2008.
- CAKMAK I, PFEIFFER W. H., MCCLAFFERTY B Biofortification of durum wheat with zinc and iron. **Cereal Chemistry Journal**, Minnesota, v. 87, p.10-20. 2010.
- CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AAMARAL-SOBRINHO; N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 1999. p. 69-90.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da Fertilidade do Solo e Recomendação de Fertilizantes. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa:Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-872.

CARRILHO, E. N. V. M.; LABUTO, G.; KAMOGAWA, M. Y. Destination of vinasse, a residue from alcohol industry: Resource recovery and prevention of pollution PRASAD, M.N.V.; SHIH, K. (ed.), **Environmental materials and waste resource recovery and pollution prevention**. Oxford: Academic Press, p. 21-43, 2016.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 277-289, 2010.

CHELOTTI, M. C.; ROSOLEN, V. Dinâmica da agropecuária e uso da terra na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG). **Campo-Território: revista de geografia agrária**, Uberlândia. p. 1-19, 2014

CORRÊA, L. A.; HAAG, H. P. Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras em Latossolo Vermelho Amarelo, Álico. I. Ensaio em casa de vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 1, p. 99-110, 1993.

DONAGEMMA GK, RUIZ HA, ALVAREZ VH, KER JC, FONTES MPF. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1785-1791, 2008.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagem de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1009-1016, 2008.

EFFGEN, T. A. M.; PASSOS, R. R.; LIMA, J. S. S.; BORGES, E. N.; DARDENGO, M. C. J. D.; REIS, E. F. Atributos químicos do solo e produtividade de lavouras de cafeeiro conilon submetidas a diferentes tratamentos culturais no sul do Estado do Espírito Santo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 7-18, 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Mapa de solos de Minas Gerais: legenda expandida**. 2010.

FREITAS, I. F.; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, S. V. Fósforo extraído com resinas trocadoras de íons e mehlich-1 de Latossolos submetidos a fontes e doses de fósforo e tempos de contato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 667-677, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000300013>.

FURTINI NETO, A.E.; VALE, F.R.; RESENDE, A.V.; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A.A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GARLIPP, A. A. Panorama do Comércio Exterior dos municípios da Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, 2000 a 2016. In: CORRÊA, V. P. (Org.). **Dinâmica Socioeconômica da Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. Uberlândia: CEPES/IEUFU, v. 5, 2017, 48 p.

- GEE, G.W.; J.W. BAUDER. Particle-size analysis. In: A. KLUTE (ed.) **Methods of soil analysis**: part 1. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, Madison, 1986. p. 383–411.
- GHOSH, A. K.; BARBOSA, J., DASILVA, I. R., An environmental threshold of soil test P and degree of P saturation of Brazilian Oxisols. **Clean: Soil Air Water**, Weinheim, v. 39, p. 421-427, 2011.
- GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, J. C. A.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRA NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, 14, 2018. DOI: <http://doi:10.1016/j.geodrs.2018.e00178>.
- GONTIJO, R. A. N.; GUIMARÃES, R. J.; CARVALHO, J. G. Crescimento e teor foliar de nutrientes em cafeeiro decorrente da omissão isolada e simultânea de Ca, B, Cu e Zn. **Coffee Science**, Lavras, v. 3, p. 124-132, 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática** – SIDRA. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br. Acesso em: 18 dez. 2018.
- LAL, R. World soils and global issues. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 1-4, 2007.
- LANDAU, E. C.; MOURA, L.; GUIMARAES, D. P.; HIRSCH, A. **Dinâmica Espaço-Temporal da Produção de Milho, Soja e Café no Estado de Minas Gerais entre 1990 e 2016**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 79 p.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. In: SPARKS, D. (ed.). **Advances in Agronomy** 137. Cambridge: Academic Press, p. 1-72, 2016.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the brazilian Cerrado. **Electronic International Fertilizer Correspondent**, Switzerland, n. 32, p. 29-57, 2012.
- LOPES, A. S. **A survey of the fertility status of surface soils under “Cerrado” vegetation in Brazil**. 1975. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciência do Solo, Universidade da Carolina do Norte – EUA, Raleigh, 1975.
- MACKIE, K. A.; MUELLER, T.; KANDELER, E. Remediation of copper in vineyards: a mini review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 167, p. 16-26, 2012.
- NAGAJYOTI, P. C.; LEE, K. D.; SREEKANTH, S. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 8, p. 199-216, 2010.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMMER, M.E., eds. **Methods of soil analysis: Chemical methods**. Part 3. Soil Science Society of America, Madison, 1996. p. 961-1010.

NUNES, L. A. P. L.; DIAS, L. E.; JUCKSCH, I.; BARROS, N. F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 71-78, 2010.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa de vegetação. **Scientia Agricola, Piracicaba**, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

OLIVEIRA, I. P.; ARAÚJO, R. S.; DUTRA, L. G. Nutrição mineral e fixação biológica de nitrogênio. In: ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, p. 169-221, 1996.

OLIVEIRA, V. C.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, K. C.; ANDRADE, F. R.; PEREIRA, J.; GUILHERME, L. R. G. Agronomic biofortification of carrot with selenium. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n. 2, p. 138-147, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018422031217>.

PINTO, F. A.; SOUZA, E. D.; PAULINO, H. B.; CURTI, N.; CARNEIRO, M. A. C. P-sorption and desorption in Savanna Brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer management. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 6, p. 521-530, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542013000600005>.

PITTA, C. S. R.; ADAMI, P. F.; PELISSARI, A.; ASSAMANN, T. S.; FRANCHIN, M. F.; CASSOL, L. C.; SARTOR, L. R. Year-round poultry litter decomposition and N, P, K and Ca release. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1043-1053, 2012.

POLTRONIERI, Y.; MARTINEZ, H. E. P.; CLEMENTE, J.M.; FERREIRA, A. O. Fornecimento de boro, cobre e zinco ao cafeeiro via inserção de comprimidos no ramo ortotrópico. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 521 – 529, 2016.

PRADO, R. D. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, London, v. 2013, p. 1-8, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/581984>.

PRADO, R. M. **Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Editora Unesp. 2008. 407 p.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

- RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1018-1026, 2013.
- RAMPIM, L.; Lana, M. C.; Frandoloso, J. F.; Fontaniva, S. Atributos químicos do solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011.
- RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JR., A.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionalidades e manejo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba: POTAFOS, v. 156, p. 1-19, 2016.
- ROGERI, D. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; AMORIM, M. B. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 12, p. 1203-1214, 2017.
- ROLIM NETO, F. C., SCHAEFER, C. E.G.R, FERNANDES FILHO, E. I., CORRÊA, M. M., COSTA, L. M., PARAHYBA, R. B. V., GUERRA, S. M. S.; HECK, R. Topolitossequências de solos do Alto Paranaíba: atributos físicos, químicos e mineralógicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1795-1809, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600028>
- ROSOLEM, C. A.; LEITE, V. M. Coffee leaf and stem anatomy under boron deficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 477-483, 2007.
- ROWE, H.; WITHERS, P. J. A.; BAAS, P.; CHAN, N. I.; DOODY, D.; HOLIMAN, J.; JACOBS, B.; LI, H.; MACDONALD, G. K.; MCDOWELL, R.; SHARPLEY, A.; SHEN, J.; TAHERI, W.; WALLENSTEIN, M.; WEINTRAUB, M. N. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrientmanagement strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 104, p. 393–412, 2016.
- ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 249, p. 206-214, 2017.
- RSTUDIO TEAM. **RStudio**: Integrated development environment for R. 2016. Disponível em: www.rstudio.com. Acesso: 9 Mar. 2018.
- SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S.; SURAVAJHALA P.; KISHOR, P. B. K. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to

acid soils. **Biometals**, Oxford, v. 29, p. 187-210, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9910-z>.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000031>.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 166, p. 113-124, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 2037-2049, 2008.

SCHMIDT, C. A. P.; MIGLIORANZA, E.; GARCIA, A. O.; FERREIRA, E. B. Caracterização dos cafês produzidos em solos basálticos e arenosos do Paraná. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Ponta Grossa, v. 06, n. 1, p. 688-701, 2012. DOI: 10.3895/S1981-36862012000100008

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íon sem Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SILVA, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 597-624.

SILVA, M. L.; TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição de plantas. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 149, p.10-17, 2015.

SILVA, V. B.; SILVA, A.P.; DIAS, B. O.; ARAUJO, J. L.; SANTOS, D.; FRANCO, R.P. Decomposição e liberação de N, P e K de esterco bovino e de cama de frango isolados ou misturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1537-1546, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500019>.

SIMÕES NETO, D.E.; OLIVEIRA, A.C.; ROCHA, A.T.; FREIRE, F.J.; FREIRE, M.B.G.S.; NASCIMENTO, C.W.A. Níveis críticos de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, p. 802-810, 2011.

SYSTAT SOFTWARE Inc – SSI. Sigmaplot for Windows, version 10, 2006. Disponível em: <https://sySTATsoftware.com/downloads/download-sigmaplot>. Acesso em: 18 ago. 2018.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VITTI, G. C.; SUZUKI, J. A. **A determinação do enxofre: sulfato pelo método turbidimétrico**. Jaboticabal: Universidade Estadual de São Paulo, 1978. 13p.

VITTI, G. C.; TREVISAN, W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. Piracicaba: POTAFOS, **Informações Agronômicas**, v.90, p.1-16. 2000.

CAPÍTULO III

Fertilidade do solo e sua relação com assistência técnica e nível tecnológico de propriedades rurais no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba

RESUMO

Boas práticas de manejo do solo são importantes para alcançar altas produtividades e sustentabilidade. Nesse contexto, o nível tecnológico da propriedade e o acesso à assistência técnica são dois fatores importantes que influenciam a produção agrícola e a qualidade ambiental. Este trabalho foi realizado com o objetivo de estabelecer relações entre o nível tecnológico de propriedades rurais e a fertilidade do solo de uma área agrícola representativa da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais. Foram selecionadas 126 fazendas e calculado o índice de desenvolvimento tecnológico (IDT). Com base nos valores de IDT, o nível tecnológico da propriedade foi classificado como: alto, médio, baixo e muito baixo. Em cada propriedade foram coletadas amostras de solo compostas (0-20 cm) para determinação dos atributos indicadores de fertilidade do mesmo. Altos níveis tecnológicos foram associados a agricultores patronais e baixos níveis tecnológicos aos agricultores familiares. À medida que o nível tecnológico diminuiu, a adoção de boas práticas de manejo do solo também diminuiu em consequência de uma assistência técnica deficiente e escassez de financiamento agrícola. As análises de solo ainda não são realizadas por muitos agricultores, principalmente pelos pequenos. Os atributos químicos do solo relacionados à fertilidade foram influenciadas pelo nível tecnológico das propriedades. Principalmente para P e K, o teor no solo diminuiu significativamente do alto ao baixo nível tecnológico. Concluiu-se que a agricultura brasileira será significativamente melhorada com a existência de programas mais eficazes para difusão tecnológica e assistência agrícola.

Palavras-chave: extensão rural, melhores práticas de manejo, produção de alimentos, agricultor familiar, agronegócio brasileiro

ABSTRACT

The best soil management practices are important to reach high productivity and sustainability. In this context, farm-level technology and technical assistance are two important factors influencing crop production and environmental quality. This work was carried out aiming to establish relationships between farm-level technology and soil fertility properties of a representative agricultural area in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion, Minas Gerais State, Brazil. We selected 126 farms and calculated their technological development index (TDI). Based on TDI values the farm-level technology was determined as follows: high, medium, low and very low. In each farm, composite soil samples (0-20 cm layer) were used in order to determine soil fertility properties. High technological levels were associated to farmer-employers and low technological levels to smallholders. As the technological level decreases the use of best management practices decreases as a consequence of a poor technical assistance and scarce agricultural funding. The soil analyses are still not performed by many farmers, mainly smallholders. The soil fertility properties were influenced by the technological level of the farms. The contents significantly decreased from high to low technological level, mainly for P and K. After this work, we claimed that the Brazilian agriculture will be significantly improved by an effective program for technological diffusion and agricultural assistance.

Keywords: agricultural extension, best management practices, food production, smallholders, Brazilian agribusiness

5.1 INTRODUÇÃO

A extensão rural é um dos pilares do desenvolvimento rural sustentável, sendo responsável pela capacitação dos agricultores para o desenvolvimento de boas práticas agronômicas e, também, pela disseminação de novas tecnologias (OMAR *et al.*, 2011). O sucesso da agropecuária na região central do Brasil é, também, fruto das ações conjuntas de centros de pesquisa e instituições de assistência técnica e extensão rural (ATER), que disseminaram as práticas propostas para a construção da fertilidade dos solos na região do Cerrado (MIELITIZ NETO *et al.*, 2010; MARCHESAN; SENSEMAN, 2010).

O serviço de ATER, público ou privado, tem papel chave na capacitação e orientação dos agricultores que desenvolvem as atividades agropecuárias nas propriedades rurais brasileiras. O acesso à assistência técnica e as políticas públicas de crédito rural são determinantes no processo de adoção de novas tecnologias que possam tornar o sistema produtivo mais eficiente (SOUZA FILHO *et al.*, 2011). Nesse caso, a falta de ATER e crédito rural pode reduzir a taxa de adoção de inovações tecnológicas e acarretar no uso inadequado das práticas agrícolas que, por sua vez, pode comprometer a sustentabilidade produtiva, ambiental e econômica dos sistemas agrícolas do Cerrado (GUANZIROLI, 2007; ARAÚJO; VIEIRA FILHO, 2018).

O censo agropecuário de 2017 apresentou resultados preocupantes sobre o acesso ao serviço de ATER e às práticas de manejo do solo, quando trouxe como estimativa que, no Brasil, apenas 14% dos estabelecimentos agropecuários fazem calagem e 16% aplicam fertilizantes. Além disso, apenas 20% das propriedades rurais possuem acesso à orientação técnica, um dos principais meios de acesso à informação e novas tecnologias. No estado de Minas Gerais essa realidade é um pouco melhor, mas ainda muito aquém do ideal, uma vez que o uso de fertilizantes aumenta para 26%, a aplicação de corretivos da acidez do solo para 28% e para 26% o acesso ao serviço de orientação técnica dos estabelecimentos rurais (IBGE, 2018).

De acordo com Thompson Jr. & Formby (2003), o nível tecnológico da propriedade rural determina a utilização de insumos e, conseqüentemente, as práticas de manejo relacionadas à propriedade. Freitas (2013) afirma que o aumento da renda dos produtores rurais é dependente da implantação de práticas técnico-gerenciais que possibilitem uma

melhor eficiência da atividade produtiva. Tais práticas resultam na redução dos custos de produção, aumento de produtividade e na preservação dos recursos naturais. Portanto, as modificações tecnológicas, possíveis a partir da adoção de inovações, podem tornar o processo produtivo mais eficiente.

Acredita-se que o acesso à assistência técnica e extensão rural influencia o nível tecnológico das propriedades rurais da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (TMAP), o que, por sua vez, afeta a adoção de práticas de manejo e a fertilidade do solo das propriedades rurais. Nesse contexto, diversos questionamentos foram levantados, sendo eles: i) o nível tecnológico dos agricultores influencia as práticas de manejo do solo e, conseqüentemente, sua fertilidade?; ii) agricultores de baixo nível tecnológico tem menos acesso às orientações técnicas?; iii) as instituições de ATER estão atendendo as demandas dos agricultores?; iv) de que forma os agricultores estão recebendo orientações técnicas?; v) quais práticas de manejo do solo estão sendo recomendadas e aplicadas?

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho verificar a influência do nível tecnológico das propriedades rurais sobre a adoção de práticas de manejo agrícola e da fertilidade do solo em propriedades rurais do TMAP. Além disso, buscou-se analisar a influência do acesso ao serviço de ATER sobre o nível tecnológico dessas propriedades.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os atributos indicadores da fertilidade do solo, caracterizados nas amostras coletadas no TMAP (vide Capítulo II), foram relacionados ao nível tecnológico das respectivas propriedades rurais, conforme descrição a seguir.

5.2.1 Determinação do índice de desenvolvimento tecnológico (IDT) e classificação das propriedades rurais por nível tecnológico (NT)

A coleta de dados para avaliação do nível tecnológico (NT) das propriedades rurais foi realizada por meio de um formulário, que foi aplicado nas áreas visitadas para coleta de amostra de solo. Foram coletados os seguintes dados: (i) localização geográfica; (ii) sistema de produção; (iii) fator tecnológico, que envolve, principalmente, o acesso a máquinas e equipamentos para o desenvolvimento das atividades agropecuárias e (iv) práticas de manejo

do solo. Essas informações foram utilizadas para determinar o Índice de Desenvolvimento Tecnológico (IDT) e classificar as propriedades por NT. O nível tecnológico das propriedades rurais foi obtido a partir de 109 formulários. As demais propriedades (n=17) estavam em áreas sob vegetação nativa e florestas plantadas, as quais não possuíam sede no local da amostragem para coleta de dados.

Foi utilizado o mesmo formulário em todas as propriedades, independente da atividade agropecuária praticada. Para isso, foram estabelecidos indicadores comuns às atividades agropecuárias desenvolvidas na área de estudo e que consideravam a diversidade das propriedades rurais da região do TMAP. Na Tabela 1 estão relacionados todos os indicadores utilizados no cálculo do IDT das propriedades rurais da região do TMAP.

Tabela 1. Indicadores utilizados no cálculo do Índice de Desenvolvimento Tecnológico (IDT) das propriedades rurais do TMAP.

N (i)	Indicador tecnológico	Possui tecnologia	Não Possui tecnologia
1	Energia elétrica	1	0
2	Disponibilidade de água para o desenvolvimento das atividades agropecuárias	1	0
3	Trator	1	0
4	Acesso a máquinas através de empréstimo por cooperativa ou associação	0,5	0
5	Colhedora	1	0
6	Semeadora	1	0
7	Pulverizador	1	0
8	Distribuidor de calcário e fertilizantes	1	0
9	Grade aradora	1	0
10	Arado	1	0
11	Subsolador	1	0
12	Sistema de irrigação	2	0
13	Estrutura para realizar fertirrigação	2	0
14	Principais equipamentos para o desenvolvimento das atividades agropecuárias	1	0
15	Estrutura de armazenamento da produção	2	0
16	Estrutura de beneficiamento da produção	2	0
17	Uso de agrotóxico para o controle de pragas e doenças de plantas	0,5	0
18	Uso de sementes certificadas e melhoradas por empresas multinacionais	0,5	0
19	Uso de sementes transgênicas	0,5	0
20	Veículos ou frota para transporte da produção agropecuária	2	0
Soma (W)		23	*

O IDT foi calculado conforme a metodologia proposta por Khan *et al.* (2009) e Barbosa & Souza (2013). Para cada indicador tecnológico foi atribuída uma nota, estabelecida considerando o grau de organização da propriedade e o grau de acessibilidade à tecnologia. Assim, aos indicadores que estão relacionados a um maior grau de organização da propriedade atribuíram-se dois pontos; aos indicadores intermediários um ponto; aos indicadores que representam tecnologias que exigem menor grau de organização e que são de fácil acesso foi atribuído meio ponto (Tabela 1). Cada propriedade recebeu uma nota para cada indicador tecnológico. Quando a propriedade adotava e/ou possuía a tecnologia, atribuiu-se a nota máxima do respectivo indicador e, quando a tecnologia era ausente, atribuiu-se a nota zero.

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, foi determinado o IDT de cada propriedade. O cálculo foi realizado conforme metodologia proposta por Barbosa & Souza (2013), de acordo com a equação 1:

$$IDT_j = \sum_{i=1}^{20} \frac{a_i}{W} \quad (1)$$

Onde: IDT_j é o índice de desenvolvimento tecnológico de uma dada propriedade (j); i é o indicador tecnológico, i = [1 a 20]; a_i = representa a pontuação dada ao indicador i; e W é o somatório da pontuação máxima de todos os indicadores (W = 23).

Os valores do IDT variaram de zero a um, sendo que quanto mais próximo do valor unitário maior o nível tecnológico e quanto mais próximo de zero menor o nível tecnológico. Com base nos valores de IDT obtidos, realizou-se a classificação das propriedades por nível tecnológico, conforme metodologia sugerida por Miranda (2001):

- 0,75 < IDT ≤ 1: propriedade nível **I** (nível tecnológico **alto**);
- 0,50 < IDT ≤ 0,75: propriedade nível **II** (nível tecnológico **médio**);
- 0,25 < IDT ≤ 0,50: propriedade nível **III** (nível tecnológico **baixo**);
- IDT < 0,25: propriedade nível **IV** (nível tecnológico **muito baixo**).

Através do formulário, também foram levantados dados sobre o acesso e a origem do serviço de ATER; acesso ao crédito rural e categoria do agricultor que gerencia a propriedade. Essa categorização foi realizada em conformidade com a Lei 11. 326/2006

(BRASIL. Lei N° 11.326, 2011). Além disso, através do formulário, também foram observadas as práticas de manejo do solo empregadas na propriedade, conforme apresentado no Apêndice 1. Esses fatores foram correlacionados ao nível tecnológico das propriedades rurais.

5.2.2 Análises estatísticas

A análise exploratória dos dados constou de testes estatísticos descritivos e de frequências relativas. A influência do nível tecnológico sobre as práticas de manejo do solo e atributos químicos do solo foi avaliada pelo Teste Exato de Fisher, considerando-se um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Esse teste, não paramétrico, foi empregado para avaliar a diferença entre grupos com maior e pior desempenho. Também, foi aplicada a análise de agrupamento hierárquico considerando os atributos químicos da fertilidade do solo. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Rstudio (RStudio Team, 2016) e SigmaPlot (Systat Software Inc.).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades rurais do TMAP apresentaram diferentes níveis tecnológicos, desde alto nível até propriedades com baixo uso de tecnologia. Na Tabela 2, são apresentados os valores de IDT (média, mediana, mínimo, máximo e desvio-padrão,) agrupados de acordo com o nível tecnológico e uso do solo.

Tabela 2. Estatística descritiva do Índice de Desenvolvimento Tecnológico (IDT) das propriedades rurais do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em função do nível tecnológico e tipo de uso do solo.

Nível tecnológico	IDT				
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
I - Alto	0,88	0,93	0,76	0,98	0,08
II - Médio	0,57	0,54	0,54	0,74	0,06
III - Baixo	0,39	0,39	0,26	0,50	0,08
IV - Muito baixo	0,19	0,22	0,09	0,24	0,06
Uso do solo					
Café	0,63	0,63	0,24	0,98	0,22
Cana-de-açúcar	0,81	0,93	0,33	0,93	0,23
Culturas anuais	0,57	0,54	0,09	0,98	0,14
Horticultura	0,43	0,43	0,24	0,98	0,21
Pastagem	0,35	0,33	0,11	0,61	0,13

O IDT médio das propriedades rurais decresceu da forma: cana-de-açúcar >> café > culturas anuais > horticultura > pastagens. A distribuição percentual das propriedades rurais por nível tecnológico é apresentada na Figura 1, onde nota-se que apenas 14% apresentaram alto nível tecnológico, enquanto que 38, 36 e 12% foram classificadas com médio, baixo e muito baixo nível tecnológico.

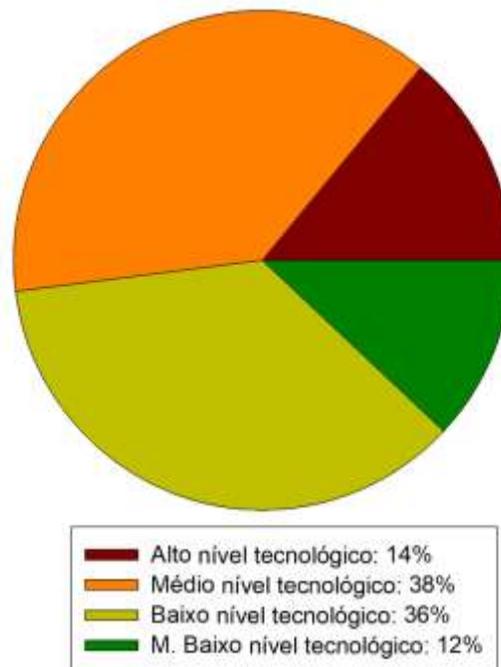


Figura 1. Distribuição percentual das propriedades rurais da região do TMAP por nível tecnológico.

Dentre as propriedades visitadas, 38% pertenciam a agricultores familiares e 62% eram gerenciadas por agricultores patronais. Na Figura 2, observa-se a distribuição percentual das propriedades por categoria do agricultor (familiar ou patronal) para cada nível tecnológico. Apenas 2% dos agricultores familiares apresentaram nível tecnológico alto. Já 75% dos agricultores patronais possuem propriedades com níveis tecnológicos alto e médio. A maioria das propriedades de agricultores familiares (64%) apresentam baixo nível tecnológico. Os agricultores patronais predominam, principalmente no alto e médio nível tecnológico. Nos níveis tecnológicos baixo e muito baixo predominam os agricultores familiares.

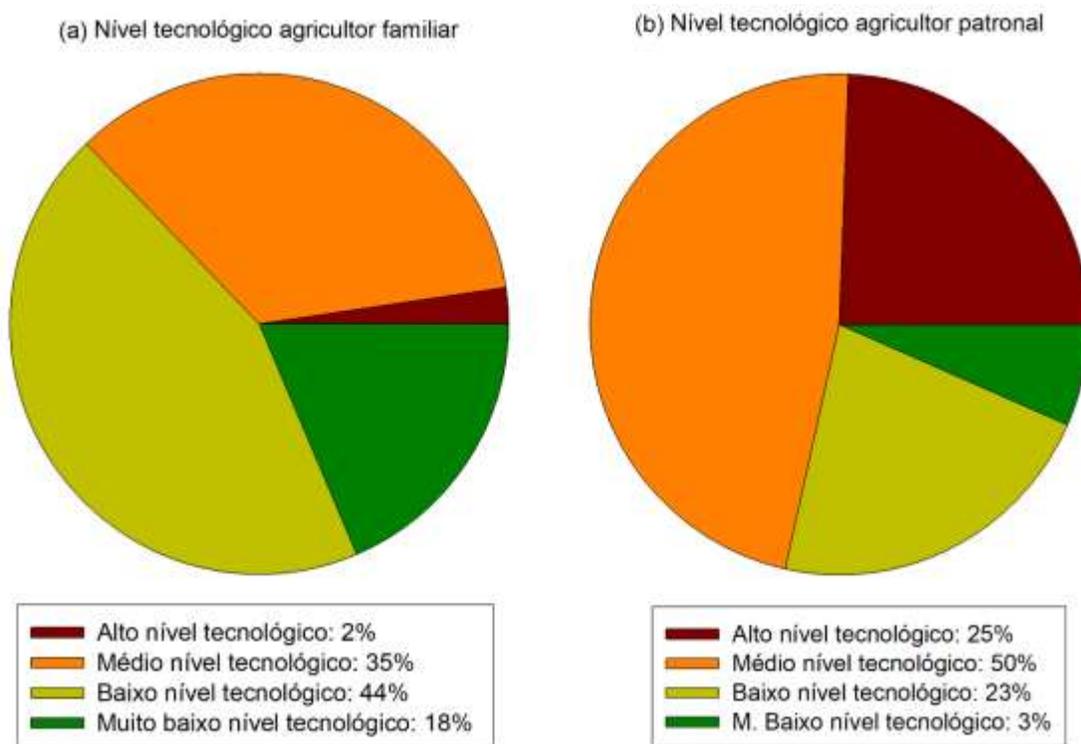


Figura 2. Percentual do nível tecnológico por categoria do agricultor (familiar e patronal) na região do TMAP.

Constata-se, portanto, que agricultores patronais possuem maior nível tecnológico que agricultores familiares no TMAP. Esse fato pode ser atribuído à falta de acesso ao serviço de ATER e crédito agrícola para investimentos (DOMIT *et al.*, 2008; ARAÚJO; VIEIRA FILHO, 2018). A falta de assistência técnica é apontada como um fator importante que tende a contribuir para reduzir os níveis de adoção tecnológica entre os agricultores familiares (GUANZIROLI, 2007). Dentre as propriedades gerenciadas por agricultores patronais, 90% possuem assistência técnica (Figura 3); por outro lado, 65% dos agricultores familiares alegaram ter acesso ao serviço de ATER. Desses, somente 50% acessam as políticas de crédito agrícola para investir em infraestrutura e insumos agropecuários.

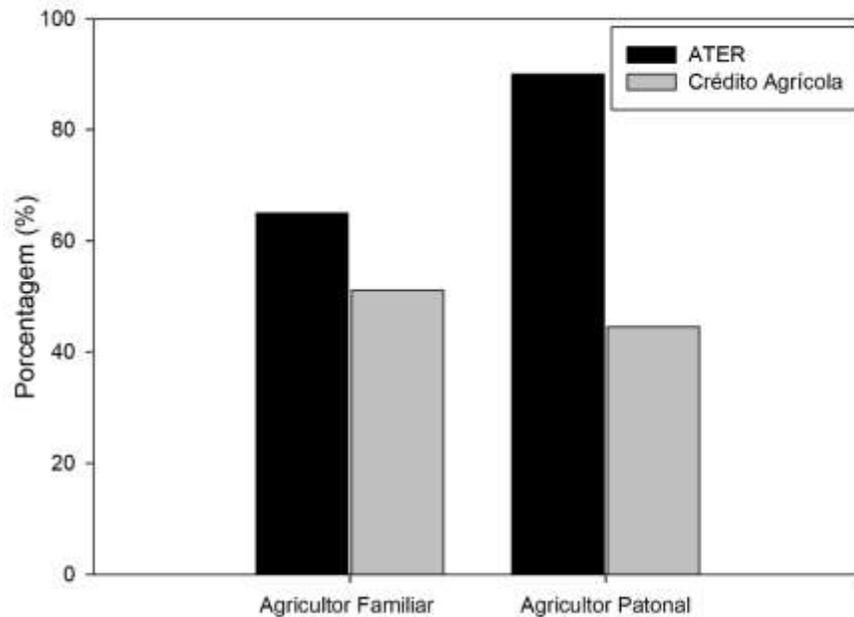


Figura 3. Distribuição percentual de agricultores familiares e patronais que possuem acesso ao serviço de ATER e à política de crédito rural.

É importante ressaltar ainda que, 44% das propriedades de agricultores patronais não acessam linhas de financiamento de crédito agrícola, uma vez que são menos dependentes das políticas públicas de crédito. De acordo com Souza *et al.* (2011), muitos agricultores patronais alegam não precisar de financiamentos e conduzem as atividades agropecuárias com recursos próprios, já que, na maioria dos casos, são suficientemente capitalizados para o desenvolvimento e manutenção da atividade da propriedade rural. Já os agricultores familiares possuem menor capital para investir na propriedade e, por isso, os sistemas produtivos de agricultores familiares podem ser mais prejudicados pela falta do crédito rural no que diz respeito à adoção de tecnologias (SILVA *et al.*, 1999; LANDINI 2015; ARAÚJO; VIEIRA FILHO, 2018).

Na Figura 4, é apresentado o percentual de agricultores que possuem acesso à assistência técnica dentro de cada nível tecnológico. É possível verificar que 94%, 96% e 78% das propriedades com alto, médio e baixo nível tecnológico recebem assistência técnica, respectivamente. Por outro lado, apenas 30% das propriedades enquadradas no nível tecnológico muito baixo recebem assistência técnica.

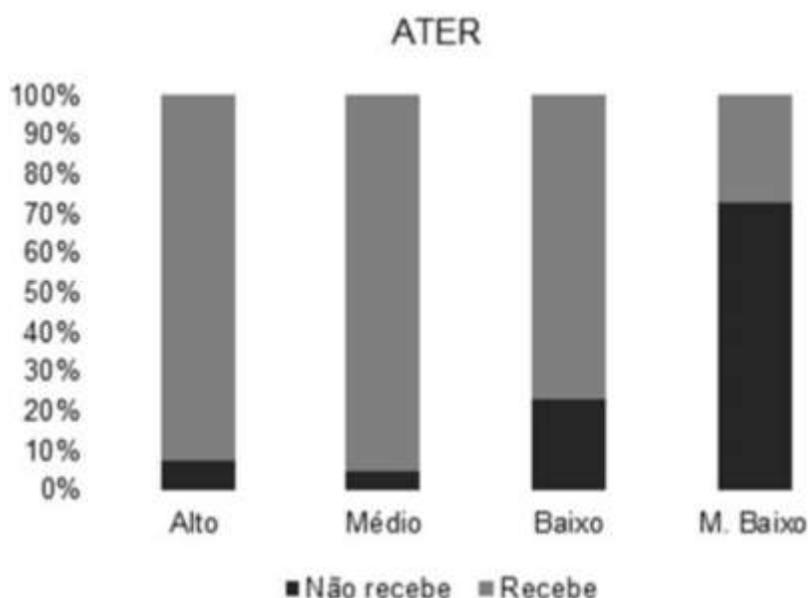


Figura 4. Distribuição percentual do acesso ao serviço de ATER para cada nível tecnológico das propriedades rurais do TMAP.

Na Figura 5, é apresentada a origem da assistência técnica oferecida às propriedades rurais do TMAP para cada nível tecnológico. Foi verificado que o serviço de ATER na região do TMAP é prestado, principalmente, pelos seguintes agentes e/ou instituições: (i) consultores particulares; (ii) cooperativas; (iii) instituições públicas representadas pela Emater-MG, universidades e centros de pesquisas, como Epamig e Embrapa; e (iv) profissionais de revenda de produtos agropecuários.

Foi verificado ainda, na Figura 5^a, que, em propriedades de alto nível tecnológico, o serviço de ATER é prestado, majoritariamente, por consultores particulares contratados pelo agricultor. À medida que o nível tecnológico diminui ocorre uma maior participação dos profissionais das vendas de produtos agropecuários. No nível tecnológico muito baixo, o acesso à assistência técnica ocorre exclusivamente por profissionais de vendas. Ressalta-se, também, a pequena participação da Emater na cobertura da assistência técnica na região do TMAP.

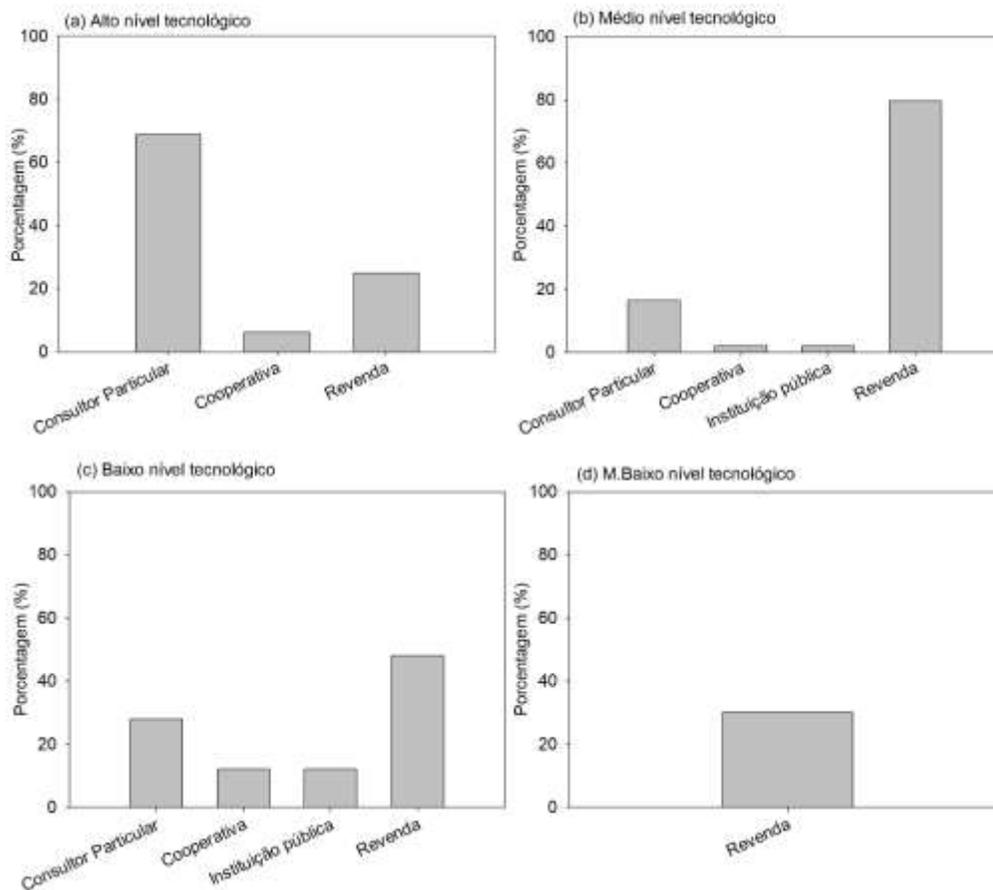


Figura 5. Origem do serviço de assistência técnica e extensão rural por nível tecnológico das propriedades rurais da região do TMAP.

Após a extinção da Embrater, em 1989, a oferta de ATER por instituições públicas como a Emater reduziu drasticamente em função das suas restrições financeiras e de recursos humanos (BARROS, 2010; MIELITIZ NETO *et al.*, 2010). Nesse contexto, os agricultores familiares foram os mais prejudicados, devido ao fato de os médios e grandes agricultores possuírem melhores condições de acesso a outras fontes de assistência (CASTRO; PEREIRA, 2017). Diante disso, as empresas de revenda de produtos agropecuários assumiram um papel ativo no oferecimento de assistência técnica após a restrição de recursos da Emater.

Atualmente, muitos agricultores dependem exclusivamente de ATER oferecida pelas revendas. Entretanto, cabe salientar, que a orientação técnica repassada por essas empresas ocorre mediante a venda de produtos e os profissionais dessas empresas são treinados para

ensinar os agricultores a utilizarem os produtos comercializados por eles. Não há, nesse caso, um trabalho de orientação sistêmico e abrangente no que diz respeito ao manejo agrícola de toda a propriedade rural (CASTRO *et al.*, 2010).

O nível tecnológico teve relação com as práticas de manejo do solo, como apresentado na Figura 6. Nota-se que as propriedades de médio nível tecnológico apresentaram maior percentual de adoção das práticas de manejo do solo, tais como, realização de análise de solo, aplicação de calcário, gesso, fósforo, potássio e micronutrientes. Dentre as práticas de manejo da fertilidade do solo a calagem é a mais adotada.

Foi possível verificar também, na Figura 6, que, à medida que o nível tecnológico diminuiu, houve uma redução percentual da adoção das práticas de manejo da fertilidade do solo. Além disso, observou-se que aproximadamente 30% dos agricultores de alto nível tecnológico não seguem recomendação de calagem e adubação. Esses agricultores afirmam seguir um protocolo próprio de aplicação de corretivos e fertilizantes, o que pode ser visto como um desmerecimento dos trabalhos e investimentos em pesquisa.

Esse panorama também foi observado em produtores de soja altamente tecnificados no estado do Mato Grosso (ROY *et al.*, 2017), o que também parece ocorrer entre os agricultores de baixo nível tecnológico. No TMAP, aproximadamente 45% dos agricultores de nível tecnológico baixo a muito baixo não seguem recomendação de adubações (Figura 6) e, também, não fazem aplicação de fertilizantes em suas propriedades. Aproximadamente 45% dos agricultores com baixa tecnificação não fazem análise de solo e não seguem recomendação de calagem, mas 70% afirmaram que aplicam calcário eventualmente.

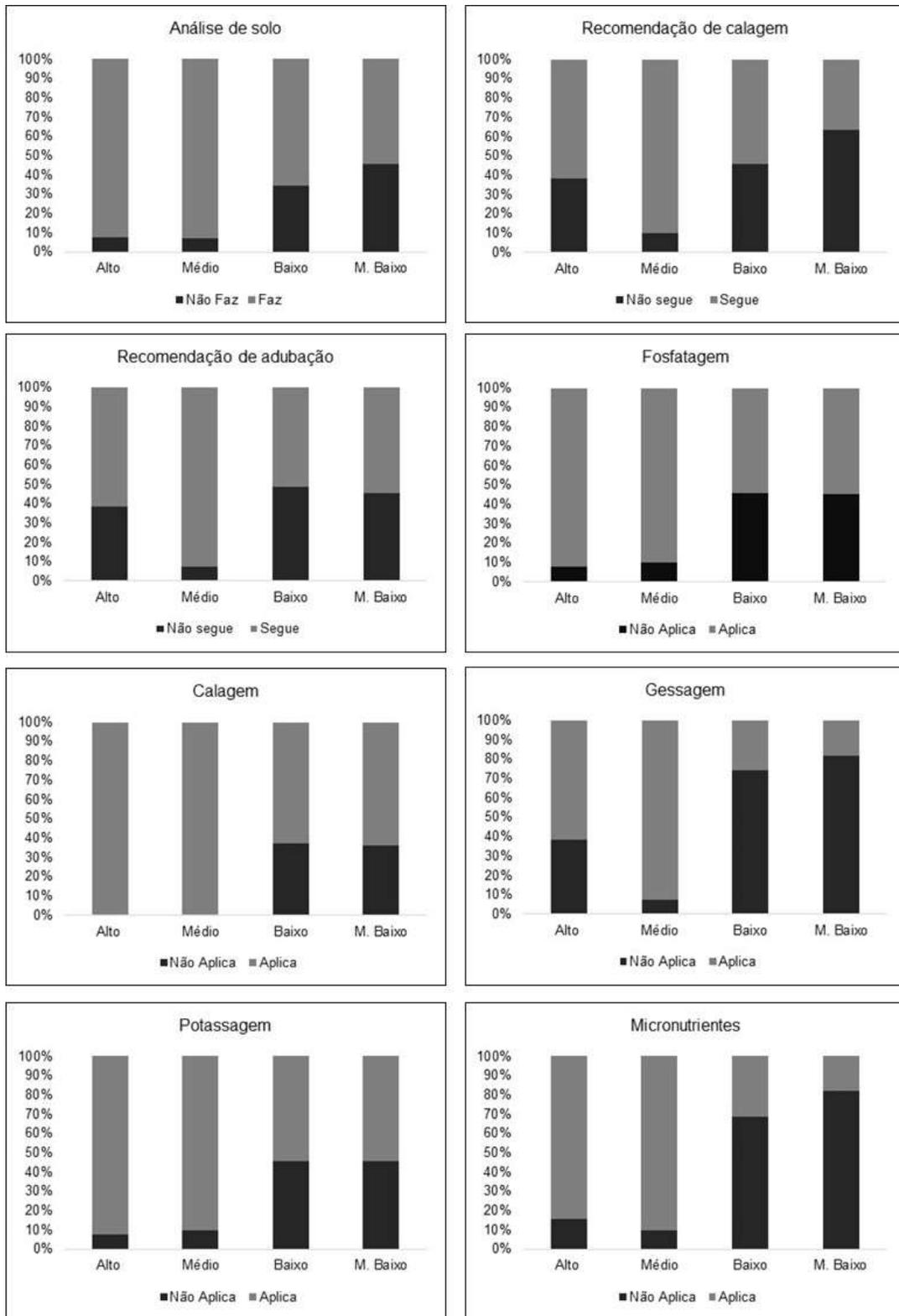


Figura 6. Percentual da adoção das práticas de manejo do solo por nível tecnológico, na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

O nível tecnológico teve relação com as práticas de manejo relacionadas à MOS. Na Figura 7, pode-se observar os percentuais de adoção das principais práticas de manejo da MOS do solo por nível tecnológico. A manutenção da cobertura vegetal do solo foi a prática mais adotada, entretanto, o pior resultado foi verificado em propriedades de alto nível tecnológico.

Com relação adubação orgânica as propriedades rurais de baixo e muito baixo nível tecnológico têm maior percentual de adoção. O revolvimento do solo ainda é uma prática bastante utilizada no manejo agrícola das propriedades rurais do TMAP, principalmente em propriedades de médio nível tecnológico. Neste caso, os agricultores informaram que o revolvimento é realizado para incorporação de calcário e para descompactação do solo. Quanto ao plantio de plantas de cobertura, ainda é uma técnica pouco utilizada, porém, propriedades de alto nível tecnológico têm maior percentual de adoção.

Na Figura 7 também pode ser observada a distribuição das áreas por sistema de manejo do solo. Percebe-se que 43% das áreas são manejadas obedecendo os princípios do Sistema Plantio Direto (SPD), 46% declararam adotar o Sistema de cultivo mínimo e 11 % utilizam sistema de cultivo convencional. Apesar do elevado índice de adoção do sistema conservacionista (SPD) em áreas de culturas anuais, muitos agricultores alegaram ter dificuldades para manejar o SPD e, eventualmente, fazem o revolvimento do solo para descompactação e incorporação de corretivos.

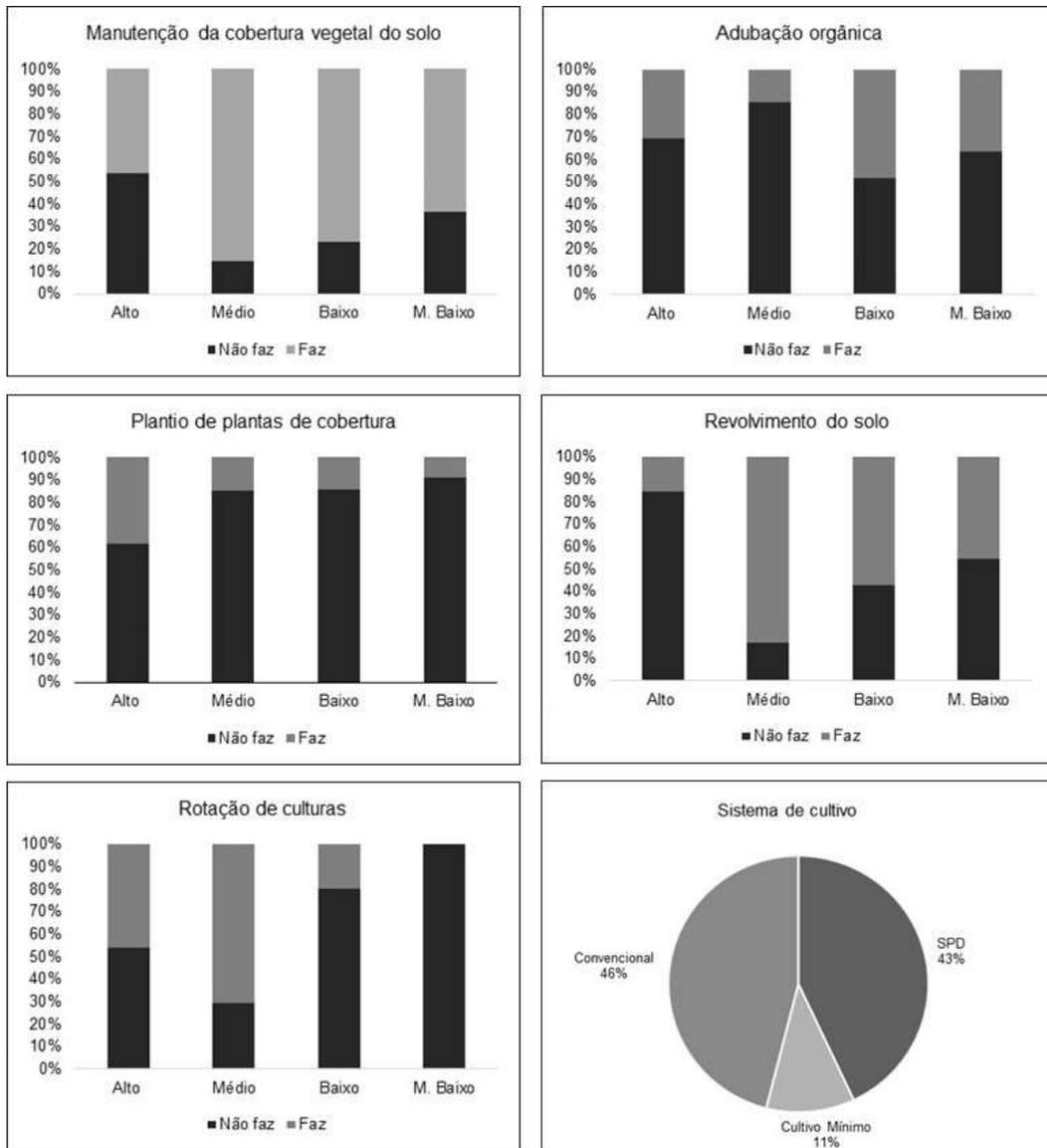


Figura 7. Práticas de relacionadas ao manejo da matéria orgânica do solo por nível tecnológico.

Pelo teste exato de Fisher, foi possível verificar que o nível tecnológico das propriedades rurais afetou significativamente os atributos químicos do solo. Esse efeito não foi observado para os componentes da acidez do solo (pH e Al^{3+} trocável), CTC e matéria orgânica. Na Figura 8, são apresentados os teores médios dos atributos químicos do solo relacionados à fertilidade deste por nível tecnológico e área de referência (cerrado).

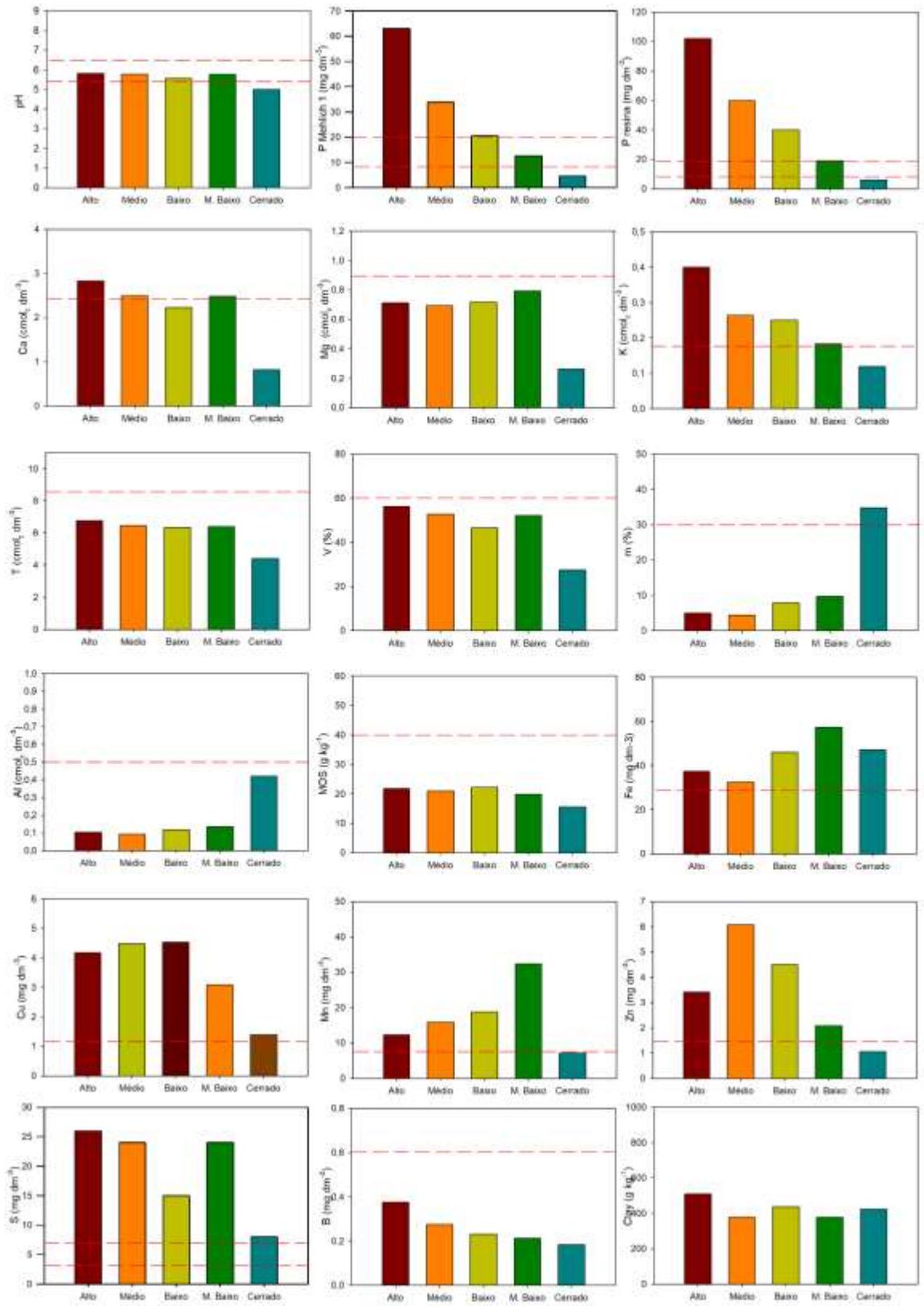


Figura 8. Valor médio de pH e teores de fósforo (P Mehlich 1 e P resina), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Cobre (Cu), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Boro (B), Matéria Orgânica (MO), capacidade de troca de cátions potencial (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e argila por nível tecnológico e área de referência (Cerrado). Nível crítico do nutriente no solo indicado pela linha tracejada vermelha, conforme estabelecido por Alvarez *et al.* (1999).

Na Figura 8, é possível verificar uma redução gradual dos teores de P, K e B à medida que o nível tecnológico diminui. Os teores médios de micronutrientes (Fe, Mn, Zn e Cu) e S estão acima do nível crítico em todos os níveis tecnológicos. Os atributos relacionados à acidez do solo, pH, Al^{3+} e saturação por alumínio estão na faixa adequada em todos os níveis tecnológicos. Os teores de Ca no solo estão acima do nível crítico somente em solos de propriedades de alto nível tecnológico e os teores de Mg, MOS, CTC e saturação por bases estão abaixo do nível crítico em todos os níveis analisados. Os teores de MOS, possivelmente, estão relacionados à baixa adoção de práticas de manejo capazes de incorporar carbono ao solo (Figura 7).

A diferença entre os grupos de níveis tecnológicos sobre os atributos químicos do solo foi obtida por meio da análise de agrupamento hierárquico, pela qual foi possível verificar que o alto nível tecnológico se diferenciou dos demais níveis (médio, baixo e muito baixo), que juntos formaram um grupo homogêneo. Na Figura 9, pode ser observado o dendrograma obtido da matriz de dados padronizados pela análise de agrupamento, objetivando avaliar a semelhança entre os níveis tecnológicos. Foi admitido um corte na distância euclidiana 72 que permitiu uma divisão clara de dois grupos. Houve a formação de um grupo isolado, composto por propriedades de alto nível tecnológico e, outro grupo, formado pelos níveis tecnológicos, médio, baixo e muito baixo, o que indica que, com o uso conjunto dos atributos químicos, foi possível ordenar os dados em dois grupos.

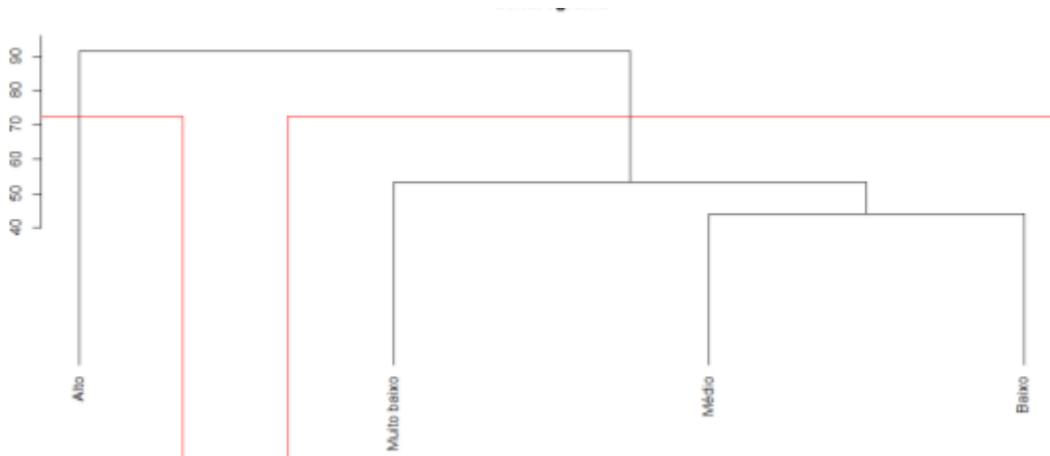


Figura 9. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo os atributos químicos do solo. Coeficiente de correlação cofenética = 0.7767165.

Essas diferenças de agrupamento resultam, portanto, das diferenças observadas dos atributos químicos do solo, possibilitando uma análise mais generalizada da fertilidade do mesmo nos diferentes níveis tecnológicos avaliados nesta pesquisa. Os atributos químicos que promoveram a ausência de similaridade do alto nível tecnológico com os demais níveis foram pH, P, Ca, Mg, K, S, B, Zn, Cu, Fe, V, CTC efetiva, m, SB, V.

Por fim, cabe salientar que as propriedades de alto nível tecnológico têm contribuído com a construção da fertilidade do solo na região do TMAP. Apesar desse grupo representar apenas 14% das propriedades amostradas, estima-se que essa porcentagem represente uma área de 630 mil ha na região.

Cabe salientar que propriedades de alto nível tecnológico pertencem, majoritariamente, a agricultores patronais e estes, por sua vez, ocupam uma área de 4,5 milhões de hectares no TMAP (IBGE, 2018). Ressalta-se também que, apesar das propriedades de médio nível tecnológico terem apresentado elevado percentual de adoção de práticas de manejo do solo, isso não resultou em maior fertilidade do solo, pois esse grupo não se diferenciou dos grupos baixo e muito baixo nível tecnológico pela análise de agrupamento hierárquico. Esse comportamento pode estar relacionado à origem e à qualidade da assistência técnica que a maioria das propriedades de médio nível tecnológico recebem.

5.4 CONCLUSÕES

A partir do levantamento do nível tecnológico das propriedades rurais da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Propriedades de alto nível tecnológico estão associadas, predominantemente, aos agricultores patronais. Quase todas as propriedades com alto nível tecnológico possuem ATER;
- Propriedades com níveis tecnológicos baixos e muito baixos estão associadas aos agricultores familiares e possuem acesso limitado à ATER e ao crédito rural;
- A adoção de recomendações técnicas e boas práticas de manejo do solo diminuem com a redução do nível tecnológico;
- Os atributos indicadores da fertilidade do solo apresentaram relação com o nível tecnológico, já que propriedades com alto nível tecnológico possuem solos com maiores teores de P, K, B, Ca e S. Em todos os níveis tecnológicos os teores de Cu, Fe, Zn e Cu estão acima dos seus respectivos níveis críticos;
- Os diferentes níveis tecnológicos não influenciaram fatores como pH do solo, teores de Ca, Mg e Al trocáveis, CTC, saturação por bases, saturação por alumínio e matéria orgânica;
- A calagem é a prática de manejo mais utilizada nas propriedades rurais. Contudo, ainda há uma parcela de agricultores de baixo nível tecnológico que não adotam o manejo de corretivos e fertilizantes. Há também dificuldades para implantação e condução do sistema de plantio direto;
- A análise de solo ainda não é praticada por muitos, principalmente por propriedades de baixo nível tecnológico;
- Acredita-se, fortemente, que uma aproximação mais efetiva da pesquisa científica e a extensão rural contribuirá, indubitavelmente, para o fortalecimento/crescimento da agricultura brasileira resultando em ganhos de produtividade.

5.5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. A. VIEIRA FILHO, J. E. R. **Análise dos impactos do Pronaf na agricultura do Brasil no período de 2007 a 2016**. Rio de Janeiro: Ipea, 2018, 52 p.

BARBOSA, W. F.; SOUSA, E. P. Nível tecnológico e seus determinantes na apicultura cearense. **Revista Política agrícola**, v. 12, n. 3, 2013.

BARROS, G. S. C. Política agrícola no Brasil: subsídios e investimentos. In: GASQUES, J. G., VIEIRA FILHO, J. E. R.; NAVARRO, Z. (org.). **A agricultura brasileira: desempenho, desafios e perspectivas**. Brasília: IPEA, 2010. p. 237-258

BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 25 jul. 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm. Acesso em: 18 dez. 2018.

CASTRO, C. N. Ambientes institucional e organizacional do CAI do biodiesel. In: CASTRO, A. M. G.; LIMA, S. M. V.; SILVA, J. F. V. (ed.). **Complexo agroindustrial do biodiesel no Brasil: competitividade das cadeias produtivas de matérias-primas**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2010.

CASTRO, C. N.; PEREIRA, C. N. **Agricultura familiar, assistência técnica e extensão rural e a política nacional de ATER**. Rio de Janeiro: Ipea, 2017. 48 p.

DOMIT, L. A.; DALBOSCO, M.; SANTOS, R. M. S.; GUIMARÃES, M. F. Technology transference in soybean culture – COPACOL experience. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 255-264, 2008.

FREITAS, G. S. Tecnologia no setor agrícola brasileiro: um olhar sob a ótica da teoria evolucionária. **Revista Eletrônica de Administração e Turismo**, Pelotas, v. 2, n. 1, 2013.

GUANZIROLI, C. E. PRONAF dez anos depois: resultados e perspectivas para o desenvolvimento rural. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 301-328, abr./jun. 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: www.sidra.ibge.gov.br. Acesso em: 18 dez. 2018.

KHAN, A. S.; MATOS, V. D.; LIMA, P. V. P. S. Desempenho da apicultura no estado do Ceará: Competitividade, nível tecnológico e fatores condicionantes. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Piracicaba, v. 47, n. 3, p. 651-675, 2009.

MARCHESAN, E.; SENSEMAN, S. A. Transferência de tecnologia de universidades brasileiras na área rural. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 2243-2248, 2010.

MIELITZ NETO, C. G. A.; MELO, L. M.; MAIA, C. M. **Políticas públicas e desenvolvimento rural no Brasil** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010, 82 p.

MIRANDA, E. A. A. **Inovações tecnológicas na viticultura do sub-médio São Francisco**. 2001. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2001.

OMAR, J. A. E.; BAKAR, A. H. A.; JAIS, H. M. D.; IBRAIK, F. M. A review study of the reorganization of agricultural extension toward sustainable agricultural development **International Journal of Engineering Science and Technology**, Bandar Lampung, v. 3, n. 5, p. 4358- 4366, 2011.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 249, p. 206–214, 2017.

SILVA, J. G. Tecnologia e campesinato. In: SILVA, J. G. **Tecnologia e agricultura familiar**. Porto Alegre: UFRS, 1999. p. 137-174.

SOUZA FILHO, H. M.; BUAINAIN, A. M. SILVEIRA, J. M.F.J.; VINHOLIS, M. M.B. condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 28, n. 1, p. 223-255, 2011.

SOUZA, P. M.; FORNAZIER, A.; PONCIANO, N. J.; NEY, M. G. Agricultura familiar versus agricultura não-familiar: uma análise das diferenças nos financiamentos concedidos no período de 1999 a 2009. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 105-124, 2011.

SYSTAT SOFTWARE Inc – SSI. **Sigmaplot for Windows**, version 10, 2006. Disponível em: <https://systatsoftware.com/downloads/download-sigmaplot/>. Acesso em: 18 ago. 2018.

THOMPSON JR.; A. A.; FORMBY, J. P. **Microeconomia da Firma: Teoria e Prática**., Rio de Janeiro, LTC. 2003. 357 p.

APÊNDICE 1

Formulário de diagnóstico do nível tecnológico e práticas de manejo das propriedades rurais do TMAP

Nº Questionário	Data: ___/___/___	Horário Inicial: ___ : ___ Horário Final: ___ : ___	Código do Ponto:
Entrevistador(a):			
Observações:			

Q.1	IDENTIFICAÇÃO	
Q1.2	Nome da propriedade:	
Q1.3	Endereço:	
Q1.4	Município:	
Q1.5	Coordenadas Geográficas:	UTM: Latitude: _____ Longitude: _____ Altitude: Posição do terreno: <input type="checkbox"/> Topo <input type="checkbox"/> terço superior(encosta) <input type="checkbox"/> terço médio(encosta) <input type="checkbox"/> terço inferior (encosta) <input type="checkbox"/> baixada
Q1.6	Vegetação da área amostrada	
Q1.7	Telefone de contato:	
Q1.8	E-mail:	
Q1.11	Qual a área explorada para fins agropecuários	

Q.2	Sistema de Produção	
Q.2.1	Categoria do agricultor:	0 - <input type="checkbox"/> Agricultor Familiar 1 - <input type="checkbox"/> Agricultor patronal
Q.2.6	Sistema de manejo do solo	0 - <input type="checkbox"/> Convencional 1 - <input type="checkbox"/> Cultivo Mínimo 2 - <input type="checkbox"/> Sistema Plantio Direto
Q.2.7	Quando realiza calagem?	0 - <input type="checkbox"/> Não realiza 1 - <input type="checkbox"/> Quando acha necessário, mas não usa análise de solo 2 - <input type="checkbox"/> Somente na formação da pastagem 3 - <input type="checkbox"/> Segue um calendário 4 - <input type="checkbox"/> Quando a análise de solo acusa necessidade de calagem Outro, especificar:

Q.2.8	Quanto tempo dura o período de estiagem, em que o uso da água deve passar por racionamento?	0 - () 6 meses contínuos 1 - () 4 meses contínuos 2 - () 3 meses contínuos 3 - () 2 meses contínuos 4 - () 1 mês 5 - () Não há falta de água na propriedade
Q.2.9	Tempo de uso agrícola do solo	0 - () 0 - 5 anos 1 - () 5 - 10 anos 2 - () 10 - 20 anos 3 - () 20 - 30 anos 4 - () 30 - 40 anos 5 - () mais de 40 anos
Q.2.10	Quanto tempo o solo está sob o manejo atual (considerar local de coleta)	0 - () 0 - 5 anos 1 - () 5 - 10 anos 2 - () 10 - 20 anos 3 - () 20 - 30 anos 4 - () 30 - 40 anos 5 - () mais de 40 anos
Q.2.23	Recebe assistência técnica agrônômica	0 () - Não 1 () - Sim
		Se sim, quem oferece?
Q.3.24	Acessa políticas públicas (Crédito agrícola)	0 () - Não 1 () - Sim
		Se sim, qual?

Q.3	NÍVEL TECNOLÓGICO	
Q.3.1	Possui energia elétrica na propriedade	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.2	Possui acesso a água para o desenvolvimento das atividades agropecuárias	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.3	Possui trator?	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.4	Se não possuir trator, tem acesso através de empréstimo por cooperativa ou associação?	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.5	Possui colhedora	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.6	Possui semeadora	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.7	Possui Pulverizador	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.8	Possui distribuidor de calcário	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.9	Possui grade	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.10	Possui arado	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.11	Possui subsolador	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.12	Possui sistema de irrigação	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.13	Possui estrutura para realizar fertirrigação	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.14	Possui os principais equipamentos para o desenvolvimento das atividade agropecuária	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.15	Possui estrutura de armazenamento da produção	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.16	Possui estrutura de beneficiamento da produção	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.17	Utiliza agrotóxico para o controle de pragas e doenças de plantas	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.18	Utiliza sementes certificadas e melhoradas por empresas multinacionais	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.19	Utiliza sementes transgênicas	0 () - Não 1 () - Sim
Q.3.20	Possui veículos ou frota para transporte da produção agropecuária	0 () - Não 1 () - Sim

Q.4	MANEJO DO SOLO		
Q.4.1	Faz análise de solo	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.2	Segue recomendação de calagem	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.3	Faz calagem (aplica calcário)	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.4	Faz gessagem (aplica gesso)	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.5	Segue recomendação de adubação	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.6	Faz aplicação de fósforo	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.7	Faz aplicação de Potássio	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.8	Faz aplicação de Micronutriente	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.9	Faz adubação de cobertura	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.10	Faz rotação de cultura	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.11	Faz adubação orgânica (aplica esterco)	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.12	Mantém solo com cobertura vegetal	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.13	Faz adubação verde	0 () – Não	1 () - Sim
Q.4.14	Faz revolvimento do solo	1 () – Não	0 () - Sim

Q.5	ESCALA E FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS AGRONÔMICAS	
Q.5.1	Área da propriedade (Hectares):	0 - () 1 a 40 ha 1 - () 41 a 160 ha 2 - () 160 a 600 ha 3 - () 600 a 1000 ha 4 - () 1000 a 2000 ha 5 - () 2000 a 5000 ha 6 - () acima de 5000 ha
Q.5.2	Com que frequência realiza análise de solo	0 - () Regularmente 1 - () Ocasionalmente 2 - () Raramente 3 - () Não faz
Q.5.3	Com que frequência realiza preparo de solo	0 - () Anualmente 1 - () A cada 2 anos 2 - () A cada 5 anos 3 - () A cada 10 anos 4 - () Não realiza Outro, especificar:
Q.5.4	Com que frequência realiza adubação	0 - () Não realiza 1 - () A cada 5 anos 2 - () A cada 2 anos 3 - () anualmente 4 - () mensalmente Outro, especificar:
Q.5.5	Com que frequência utiliza o sistema de irrigação	0 - () Regularmente 1 - () Ocasionalmente 2 - () Raramente 3 - () Não utiliza
Q.5.6	Com que frequência utiliza o sistema de fertirrigação	0 - () Regularmente 1 - () Ocasionalmente 2 - () Raramente 3 - () Não utiliza
Q.5.7	Com que frequência recebe orientações técnicas agronômicas?	0 - () Regularmente 1 - () Ocasionalmente 2 - () Raramente 3 - () Não recebe

Q.5.8	Se houver falta de água, com que frequência isso ocorre?	0 – () Regularmente 1 – () Ocasionalmente 2 – () Raramente 3 – () Não há falta de água na propriedade
-------	--	--

Q.6	INFORMAÇÕES ADICIONAIS	
Q. 6.1	Qual o método de recomendação de calagem adotado?	
Q. 6.2	Qual produtividade média da principal atividade econômica na propriedade?	

CAPÍTULO IV

Elemental Analysis of Cerrado Agricultural Soils via Portable X-ray Fluorescence Spectrometry

ABSTRACT

Conventional soil chemical analyses are time-consuming and laboratory-based. These analyses have been gradually replaced by spectroscopic-based methods. While portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) has been increasingly adopted for advanced soil analysis in temperate regions, comparatively few applications have been developed for tropical soils. Using pXRF, soil total elemental composition can be obtained in seconds, with properties inferred from the collected data. In the present study, pXRF was used to screen samples ($n = 252$) from tropical Cerrado agricultural areas under different land uses. The objective was to determine the total elemental composition of soil samples and predict soil fertility properties using simple or multiple linear regression with pXRF data as a proxy. Also, the assessment of potential environmental pollutants was verified. Air-dried and sieved soil samples ($< 2\text{mm}$) under laboratory conditions were screened using a pXRF, then compared to soil chemical characterization by conventional methods. pXRF data properly corroborated the known soil mineralogy and geochemical background of Cerrado soils. Based exclusively on pXRF data, clay content was successfully predicted. Also, soil organic matter and plant-available forms of P, Ca, Mn and Cu were reasonably predicted from pXRF results.

Keywords: spectroscopic methods, proximal sensors, soil analysis

6.1 INTRODUCTION

Cerrado is the second largest biome in Brazil covering an area of approximately 2 million km^2 . Cerrado soils are naturally characterized by a high degree of weathering-leaching and low fertility (Lopes and Guilherme, 2016). After the historical survey of soil fertility in 1970's by Lopes (1977), the Cerrado region was gradually converted to crop-livestock-forest production due to suitable application of liming and gypsum, macro and micronutrient fertilization, no-tillage adoption, and most recently crop-livestock-forest integration systems (Lopes and Guilherme, 2016). Presently, a large part of Brazilian agriculture is concentrated in the Cerrado region. As such, Brazil is now ranked as a world leader in crop production, mainly coffee, sugarcane, corn, soybean, orange juice, and beef meat (USDA, 2018).

The monitoring of soil properties is crucial for optimized management practices aiming to reach high productivity, food security, and sustainability. Conventional methods of soil chemical characterization are costly, time-consuming, and generate toxic byproducts

necessitating proper disposal. In the last two decades, proximal sensor-based methods and multivariate analyses have successfully predicting many soil properties. Yet most of the applications, development, and testing of such sensors has occurred in temperate regions. In particular, portable X-ray fluorescence (pXRF) is a powerful sensor for fast, low cost, and *in-situ* or *ex-situ* soil characterization (Weindorf *et al.*, 2014). Based on pXRF data and prediction models, the soil pH (Sharma *et al.*, 2014), texture (Zhu *et al.*, 2011), nutrients and cation exchange capacity (Weindorf *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2015) were successfully estimated. Also, pXRF has been used for investigation of soil pollution (Radu and Diamond, 2009; Weindorf *et al.*, 2012), among other applications. Hu *et al.* (2014) assessed metals (As, Pb, Cu and Zn) in agricultural soils from China and found a strong correlation between pXRF and digestion-ICP method.

To date, characterization of tropical Cerrado soils with pXRF has been limited. In investigating several soil fertility parameters of highly leached agricultural soils, the following considerations were made: i) soil pH: the pXRF cannot directly measure H^+ and OH^- concentrations, however it can quantify elements commonly associated with soil pH (e.g., Ca^{2+} and Mg^{2+}) (Sharma *et al.*, 2014). In highly weathered-leached soils (naturally acidic), changes in soil pH are promoted by liming practice, fertilization (mainly N-fertilizers), and by depletion of soil bases due to plant uptake and leaching. Furthermore, tropical soils typically feature extensive Fe/Al oxides, substances which should be easily determinable via pXRF; ii) soil texture: the mineralogy of Cerrado soils (almost 50% represented by Oxisols) is dominated mainly by quartz (SiO_2) in the sand- and silt-size fractions, and kaolinite ($Al_2Si_2O_5OH_4$), goethite ($FeOOH$), hematite (Fe_2O_3) and gibbsite ($Al(OH)_3$) in the clay fraction (Schäfer *et al.*, 2008). Thus, the total content of Si, Fe and Al obtained by pXRF may be a good proxy of texture. This may be very interesting to estimate the clay content of Oxisols with high gibbsite content. These soils have highly stable *pseudo* silt-size aggregates (Vitorino *et al.*, 2003). Frequently, soil particle analysis underestimates the clay content and overestimates the coarse fractions of gibbsite-rich Oxisols due to difficulties with soil aggregate dispersion; iii) exchangeable and available nutrients: pXRF reports total elemental content in soil. For some elements, it is believed that the total content may be equal or similar to plant-available forms. Considering the mineralogy of Cerrado Oxisols and the irrelevant occurrence of easily weatherable primary minerals, elements like

Ca, Mg, and K can be present in such soils after liming, gypsum application, or fertilization. Other adequate correlations are also expected for micronutrients (Silva *et al.*, 2018).

Given the success of pXRF-based soil characterization in temperate regions, its extensive testing and application development for tropical areas appears timely. Thus, the objectives of this study were to: 1) develop and test regression models relating pXRF data to soil fertility properties in the Brazilian Cerrado, and 2) directly assess potential pollutants (e.g., toxic metals) in the same soil environment. We hypothesize that significant relationships will exist between pXRF data and traditional laboratory analysis allowing for the successful development of predictive models for tropical environments. We further hypothesize that pollutants in the area studied will be minimal owing to substantive soil leaching.

6.2 MATERIALS AND METHODS

6.2.1 General Occurrence and Features

The studied areas are located in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba (TMAP) mesoregion, Minas Gerais State, Brazil (Fig. 1). This mesoregion is naturally characterized by a typical savanna-like vegetation locally known as Cerrado (Lopes and Guilherme, 2016). Presently, almost 50% of native Cerrado has been converted to agricultural areas. The sampling sites (Fig. 1) were located in four watersheds: W1 - Araguari River Basin (21,500 km²); W2 – Upper Paranaíba River Basin (22,200 km²); W3 - Lower Rio Grande River Basin (18,700 km²); and W4 - Lower Paranaíba River Basin (26,900 km²). Per Köppen's classification, the W1 the climate ranged from Cwb (upper basin) to Cwa (lower basin); W2, W3, and W4 were predominantly characterized by Aw climate. The mean altitude of soil sampling sites was 836 m (ranging from 552 to 1,110 m); the mean soil slope was 5% (ranging from 1 to 13%) – a flat-plateau closely related to the occurrence of Oxisols.

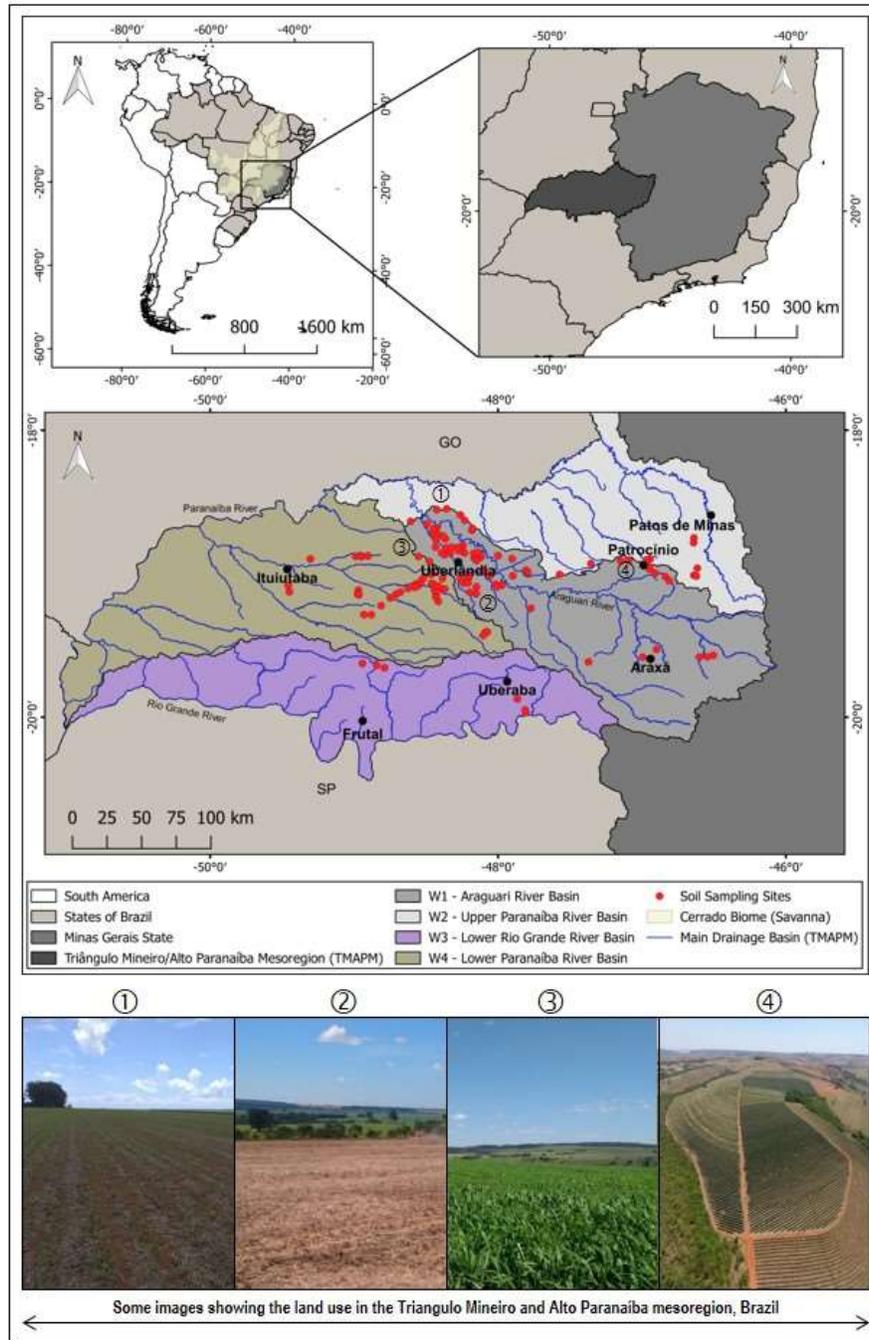


Figure 1. Location of sampling sites in agricultural areas in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba (TMAP) mesoregion, Minas Gerais State, Brazil.

Regarding the geology and geomorphology (Alkmim, 2015; Quintão *et al.*, 2017), the Upper Paranaíba River Basin (W2) is characterized by a vast plateau remnant from the South-American platform as constituted by highly-weathered detrital-lateritic sediments. Patrocínio

county (Fig. 1) is influenced by the deposition of volcanic ashes which allowed the formation of tuffit. The Araxá region is comprised of an important sedimentary deposit of phosphate (apatite) rocks. The Araguari River Basin (W1) is characterized by a dissected plateau with deep valleys and exhuming-rocks (basalt from the Serra Geral Formation; sandstones from the Botucatu and Marília Formations; and gneiss and shales from the Araxá Group). W1 is characterized by high spatial soil variability mainly controlled by the parent material and topographic relief. The Lower Rio Grande and Paranaíba River basins (W3 and W4, respectively) are characterized by sandstones interspersed with pelitic rocks (siltstones and mudstones) overlapping the basalt from the Serra Geral Formation.

Based on the Minas Gerais State soil map (FEAM, 2010) and in-field investigations, the sampling sites (Fig. 1) were located on highly weathered-leached soils. Per *Keys to US Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014) the soils were classified as Rhodic Hapludox and Anionic Acrudox.

6.2.2 Soil sampling and characterization

Each sampling site ($n = 126$) highlighted in Fig. 1 represents a farm. At each farm, the main agricultural exploration was selected. The areas were under the following land uses: 39% cereal cropping systems (corn, soybean, sorghum, bean, and sunflower); 8% coffee production; 7% forest (eucalyptus, pinus, and rubber tree); 5% sugarcane; 25% pasture for livestock production; 12% horticulture; 4% Cerrado native vegetation. These areas (except native Cerrado) have been amended via liming, gypsum and fertilizers according to technical recommendations. Two composite soil samples 200 m apart were collected at 0-20 cm layer using a stainless steel hand auger at each farm. All datasets contain 252 samples. Each composite soil sample was formed by mixture of 10 individual samples. After collection, soil samples were air-dried and disaggregated to pass through a 2 mm-sieve. After that, laboratory testing was performed in duplicate on each sample.

Soil pH was performed with a 1:2.5 (v/v) soil/water slurry, allowed to equilibrate for 1 h prior to reading. The exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Al^{3+}) were extracted with 1.0 mol L^{-1} KCl. The soil:extractant solution ratio was 1:10 (v/v). Using 250-mL Erlenmeyer flasks, soil suspensions were shaken for 15 min and left to equilibrate overnight (16 h). In the filtered supernatant, Ca^{2+} and Mg^{2+} were quantified by flame atomic absorption

spectrometry, and Al^{3+} by titration with 0.025 mol L^{-1} NaOH. Using the same extractant procedure, the available K^+ , P, Zn, Cu, Fe and Mn were extracted with Mehlich-1 solution. Potassium was quantified by flame photometer, P by colorimetry, and Zn, Cu, Fe, and Mn by flame atomic absorption spectrometry. The effective cation exchange capacity (t) was determined by the sum of exchangeable Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} and K^+ , and the potential cation exchange capacity (T) by the sum of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and $(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+})$. Soil organic carbon content was determined via colorimetry per Yeomans and Bremner (1988) after soil digestion with an acidified (concentrated H_2SO_4) dichromate ($0.167 \text{ mol L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Soil texture was determined via the hydrometer method per Gee and Bauder (1986).

6.2.3 pXRF analysis

Under laboratory conditions, the same air-dried, sieved soil samples were scanned with a Bruker (Billerica, MA, USA) (S1 Titan LE model) pXRF as established by US EPA (2007) (method 6200) and Weindorf and Chakraborty (2016). The operational conditions were: Rh X-ray tube (4 W, 15-50 KeV and 5-100 μA); silicon drift detector (SDD) with a resolution of $< 145 \text{ eV}$; *General Mode* (Dual Mining); dwell time of 60 s. For quality assurance and quality control (QA/QC) the check-sample from Bruker and certified reference materials NIST 2710a, OREAS 100a, OREAS 101a, and OREAS 101b were also scanned. Li_2CO_3 was scanned as a blank sample. Quantitative assessment of elements was considered when elemental recoveries were between 80 and 120%, and qualitative assessment for recoveries higher than 120% and below 80%.

6.2.4 Statistical analyses

The entire dataset was randomly divided into dataset A (70% of data) and dataset B (30% of data). Dataset A was used for model calibration to establish correlations and to obtain simple and multiple linear regressions. Dataset B was used to validate the obtained equations. Statistical significance was evaluated based on Pearson's coefficient (R), R^2 and root mean square error (RMSE) values. The statistical analyses were performed using Rstudio software (RStudio Team, 2016) and SigmaPlot (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA).

6.3 RESULTS AND DISCUSSION

6.3.1 Elemental recoveries

After pXRF scanning, 22 elements/oxides were reported as shown in Fig. 2. For most elements (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti, CaO, K_2O , Mn, Cu, Pb, Zn, Ni, Sr, Y and As) the recoveries were between 80 and 120% (green region) (Fig. 2). For these elements the pXRF determination in the soil samples was considered *quantitative*. For some elements (Rb, Ce, V, Cr) poor recoveries were obtained. For P_2O_5 , Zr, and Mo the recoveries were between 120 and 180%. For elements situated in the yellow and red regions on the graph (Fig. 2) the pXRF determination was merely considered *qualitative* for further interpretation and discussion of the data.

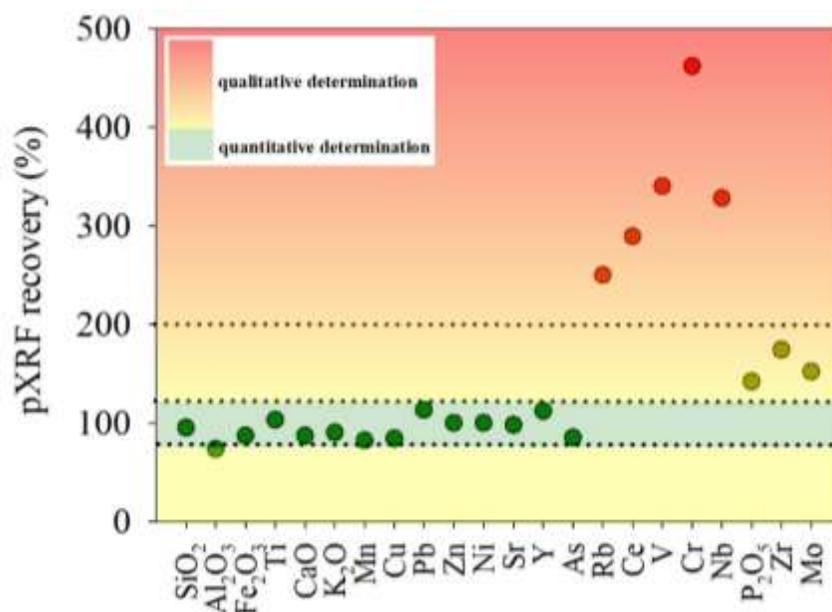


Figure 2. Recoveries (%) of screened elements. The following certified reference materials were used: pure hyaline quartz – SiO_2 ; Check-sample Bruker® - Fe_2O_3 , K_2O , Mn and Ni; NIST 2710a – Ti, CaO, P_2O_5 , Cu, Pb, Zn, Sr and As; OREAS 100a, 101a and 101b – Al_2O_3 , Ce, Zr, V, Cr, Nb, Rb, Y and Mo.

6.3.2 Descriptive statistics of soil fertility properties

The mean soil pH was 5.6 (ranging from 3.8 to 7.6). The lowest values are related to the samples from native Cerrado and the highest values (> 6.0) probably to excessive liming

(Yamada, 2005). The mean clay content was 411 g kg⁻¹ and 50% of soils are clayey. Sandy soils (clay content < 150 g kg⁻¹) were not sampled. According to Lopes and Guilherme (2016), soils under Cerrado vegetation vary largely in soil texture, and almost 90% of soil samples have the clay content ranging from 150 to 600 g kg⁻¹. The mean CEC can be considered moderate, ranging from very low (native Cerrado) to very high (agricultural areas). The native Cerrado soils (n = 518) sampled by Lopes (1977) had effective CEC ranging from 0.35 to 8.10 cmol_c kg⁻¹ and median of 1.1 cmol_c kg⁻¹. The mean effective CEC here (Table 1) is three times higher (3.3 cmol_c kg⁻¹) as a result of the agricultural practices adopted in the Cerrado region through 40 years (Lopes and Guilherme, 2016).

Table 1. Descriptive statistics of soil fertility properties of Cerrado agricultural areas: Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba (TMAP) mesoregion, Minas Gerais State, Brazil.

Propertie	Minimum	Maximum	Mean	Median	s.d.
pH	3.8	7.6	5.6	5.7	0.7
Clay (g kg ⁻¹)	150.0	750.0	410.5	350.0	202.9
Silt (g kg ⁻¹)	25.0	175.0	88.6	75.0	47.1
Sand (g kg ⁻¹)	100.0	800.0	500.9	575.0	247.6
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.1	6.8	2.3	2.1	1.5
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0	3.4	0.7	0.6	0.5
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0	2.4	0.3	0.2	0.3
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.0	1.9	0.1	0.0	0.3
t (cmol _c kg ⁻¹)	0.5	10.2	3.3	3.0	1.8
T (cmol _c kg ⁻¹)	1.6	16.5	6.2	6.2	2.6
SOM (g kg ⁻¹)	6.0	77.0	21.0	21.0	0.8
P (mg kg ⁻¹)	0.7	299.2	29.3	12.3	41.8
S-SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	4.0	243.0	19.3	12.0	28.6
Zn (mg kg ⁻¹)	0.0	25.7	4.5	2.8	4.5
Cu (mg kg ⁻¹)	0.1	25.6	3.5	2.0	4.0
Fe (mg kg ⁻¹)	0.0	429.8	51.8	43.9	45.7
Mn (mg kg ⁻¹)	0.1	224.3	31.7	18.5	32.4

Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺: exchangeable forms extracted with 1.0 mol L⁻¹ KCl; K⁺, P, Zn, Cu, Fe and Mn: plant-available forms extracted with Mehlich-1 solution; t: potential cation exchange capacity at pH 7.0; T: effective cation exchange capacity at natural soil pH.

A depletion of SOM was not observed in the Cerrado agricultural areas. The median SOM (21.0 g kg⁻¹) was very similar (22.0 g kg⁻¹) to that found by Lopes (1977). SOM is very important in tropical soils being largely responsible for the CEC in charge pH-dependent soils (Ramos *et al.*, 2018). Exchangeable Al³⁺ was very low as a consequence of its precipitation as Al(OH)₃ due to increase of soil pH by liming (Yamada, 2005) and due to Al consumption from the soil solution during gibbsite [Al(OH)₃] formation (Curi, 1983). The mean plant-available forms of Zn, Cu, Mn, and Fe were considered high as a result of soil fertilization. The mean plant-available P was considered satisfactory but large variation was observed (from 0.7 to 299.2 mg kg⁻¹). The same was observed for S-SO₄²⁻ (mean 19.3 mg kg⁻¹) ranging from 4.0 to 243.0 mg kg⁻¹. The P and S contents and their variations in the soils can be related to the main P-fertilizer used in Brazil (single superphosphate), containing 18% P₂O₅ and 8% S.

6.3.3 Descriptive statistics of pXRF data

The 22 elements/elements determined via pXRF were ranked according to their contents (major and minor/trace-elements) (Table 2). Some elements (Ce, Cr, Pb, Ni, Rb, Sr, Mo and As) were not detected in all soil samples but also were reported (Table 2). Cadmium was not detected.

Table 2. Descriptive statistics of portable X-ray fluorescence (pXRF) data of Cerrado agricultural areas: Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba (TMAP) mesoregion, Minas Gerais State, Brazil.

Element/oxide	Minimum	Maximum	Mean	Median	s.d.	<i>n</i>
Major elements						
SiO ₂ (g kg ⁻¹)	52.6	590.3	285.6	282.9	138.5	252
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	35.1	262.0	142.3	133.4	49.5	252
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	20.6	295.58	111.8	93.5	73.2	252
Ti (mg kg ⁻¹)	0.7	7.1	25.6	20.9	16.1	252
CaO (g kg ⁻¹)	0.3	52.5	2.9	2.4	3.6	252
K ₂ O (mg kg ⁻¹)	443.0	21,780.0	2,234.5	1,074.0	2,972.7	252
P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	0.0	6612.0	1101.6	1036.0	904.0	252
Minor and trace-elements						
Ce (mg kg ⁻¹)	1,022	2,223	1,380	1,255	319,8	33
Mn (mg kg ⁻¹)	85.0	2677.0	487.7	328.0	435.3	252
Zr (mg kg ⁻¹)	93.0	766.0	348.8	325.0	134.5	252
V (mg kg ⁻¹)	0.0	1140.0	250.8	142.0	284.9	252
Cr (mg kg ⁻¹)	35.0	512.0	161.0	129.0	104.2	69
Nb (mg kg ⁻¹)	11.0	263.0	45.1	38.0	34.2	252
Cu (mg kg ⁻¹)	10.0	261.0	43.7	26.0	42.8	252
Pb (mg kg ⁻¹)	21.0	90.0	40.0	36.0	15.6	90
Zn (mg kg ⁻¹)	0.0	191.0	31.0	20.0	28.7	252
Ni (mg kg ⁻¹)	11.0	95.0	25.0	20.0	16.9	105
Rb (mg kg ⁻¹)	6.0	108.0	24.8	16.0	19.5	81
Sr (mg kg ⁻¹)	7.0	157.0	22.0	14.0	22.1	164
Y (mg kg ⁻¹)	0.0	76.0	15.3	10.0	18.3	252
Mo (mg kg ⁻¹)	9.0	21.0	13.0	12.0	2.9	20
As (mg kg ⁻¹)	4.0	25.0	9.1	9.0	3.9	99

s.d: standard deviation; *n*: number of soil samples.

The results obtained via pXRF represent total elemental content in the whole soil sample (sand, silt, clay, and organic matter fractions). The main constituent of these soils was SiO₂, followed by Al₂O₃ and Fe₂O₃. These results corroborate the simple soil mineralogy of Cerrado Oxisols: sand and silt fractions dominated by quartz (SiO₂); and clay fraction dominated by kaolinite [Al₂Si₂O₅(OH)₄], gibbsite [Al(OH)₃], hematite (Fe₂O₃) and goethite (FeOOH) (Muggler *et al.*, 2007; Schaefer *et al.*, 2008). The rapid determination of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ allow for the development of easy, in-field weathering indices supporting the soil classification and soil-related studies (Stockmann *et al.*, 2016). Santana *et al.* (2018) found that pXRF satisfactorily assessed the Fe₂O₃ content in several Brazilian soil samples compared to sulfuric acid digestion.

The CaO contents ranged from 0.3 to 52.5 g kg⁻¹ (mean 2.9 g kg⁻¹) and are related mainly to liming and gypsum application since that there are not Ca-bearing minerals in these highly weathered-leached Oxisols. Evaluating the major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils, Marques *et al.* (2004a) found a mean content for CaO of 0.28 g kg⁻¹. This value is below the minimum value found for CaO (0.3 g kg⁻¹) (Table 2). The K₂O content was similar to that found by Marques *et al.* (2004a) for part of the same mesoregion (Triângulo Mineiro region).

Manganese, Zr, V, and Cr contents were between 100 and 1,000 mg kg⁻¹. Niobium, Cu, Pb, Zn, Ni, Rb, Sr, Y, Mo, and As were <100 mg kg⁻¹. These results corroborate the trace element contents found by Marques *et al.* (2004b) for Cerrado soils in the Triângulo Mineiro region. The mean content of Ce (1,380 mg kg⁻¹) was significantly higher than the background content for part of the same region (ranging from 50 to 150 mg kg⁻¹) (Marques *et al.*, 2004b). The recovery of Ce (Fig. 2) was unusually high (289%) allowing only a qualitative interpretation. The values found for Ce may be related to geological formation. Cerium was detected in only 22 sites (see supplemental data). These sites (yellow points) are located mainly near the Patrocínio and Araxá municipalities. Both regions have a peculiar geological formation. The Patrocínio region is characterized by tuffite-derived soils while the Araxá region is influenced by sedimentary phosphate rocks (apatite). Tuffite is considered an element-rich, soft mafic rock being easily altered and allowing the occurrence of highly weathered-leached Oxisols (Carmo *et al.*, 1984). Thus, the Ce occurrence may be related to residual fraction after intense weathering-leaching processes. Ce is the most abundant rare-earth element in the lithosphere and soils and it has also been geochemically associated with raw phosphate materials (Ramos *et al.*, 2016). The Araxá region is an important phosphate

reservoir in Brazil. Marques *et al.* (2004b) suggested the occurrence and stability of Ce in soils as constituent of phosphate minerals.

The mean Cr content exceeded the threshold content (75.0 mg kg⁻¹) established by the Brazilian guidelines (CONAMA Resolution 420/2009; CETESB, 2014; COPAM Normative Deliberation 166/2011). However, Cr was detected only in 27% of the studied samples. Cr content ranged from 35.0 to 512.0 mg kg⁻¹. High natural values and similar range were perviously observed for native Cerrado soils, which were co-associated with Fe-oxides contents (Marques *et al.*, 2004b). Arsenic was detected in only 39% of soil samples (n = 99). In these samples, As content ranged from 4.0 to 25.0 (mean = 9.1 mg kg⁻¹). The mean value (15 mg kg⁻¹) exceeded the threshold value established for Minas Gerais State (COPAM Normative Deliberation 166/2011) being influenced by outlier values. In the soil samples where As was detected (n = 99), 44% of samples were below the background value (7.5 mg kg⁻¹) and 50% of the As content was between the background- and threshold-values. Only 6% (n = 6) exceeded the threshold values. In the Triângulo Mineiro region, Campos *et al.* (2013) reported that the natural contents of As range from 0.87 to 3.79 mg kg⁻¹. The outlier values found here for As may be related to the influence of basalt-derived soils (Curi, 1983; Curi and Franzmeier, 1987).

6.3.4 Correlation between pXRF data and soil fertility properties

Soil fertility properties were correlated to elemental composition as determined by pXRF in all soil samples (n = 252; Table 2). SOM was well positively and negatively correlated to Fe₂O₃ and SiO₂, respectively, indicating its main interaction with the clay fraction (Figure 3). Somewhat surprisingly, soil pH was not substantially correlated to any elemental data. Conversely, Sharma *et al.* (2014) reasonably predicted soil pH based on pXRF data for soils from Alaska, Florida, Idaho, Louisiana and Texas, USA. The authors did not strongly propose the use of pXRF for soil pH prediction. They suggested the pXRF as tool for a quick investigation and decision-making in the field. In the present study, the best pXRF data correlated to soil pH was CaO (r = 0.45), suggesting the increase of soil pH by liming.

Available P had a substantive correlation (r = +0.68) with total P₂O₅ content obtained via pXRF (Fig. 3). Significant correlations were observed between exchangeable K, Ca, and Mg contents and pXRF data, but with low r values. A strong correlation was only observed for CaO and exchangeable Ca. Available Cu and Mn contents were strongly associated with their total contents obtained via pXRF. This was not observed

for Fe and Zn. The soil particle distribution (clay, silt, and sand) was well correlated to major and minor/trace elements, mainly SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃. Zhu *et al.* (2011) correlated pXRF data with clay, sand, and silt contents in soils from Louisiana and New Mexico, USA.

Despite the CEC correlation to some pXRF elemental contents, it is important to highlight that in highly weathered-leached tropical soils the CEC is very dependent on soil organic matter content (Ramos *et al.*, 2018). For temperate soils from Nebraska and California, USA, Sharma *et al.* (2015) accurately estimated the CEC based on a pure pXRF model and pXRF plus soil organic matter and clay content.

6.3.5 Predicting soil fertility properties based on pXRF data

Soil fertility properties were exclusively estimated based on pXRF data, taking into account only significant correlations with $r > 0.6$ (Fig. 3). Thus, using simple and multiple linear regressions the following soil properties were predicted: sand, clay, SOM, P, Mn and Cu. The obtained models and statistical parameters are shown in Table 3.

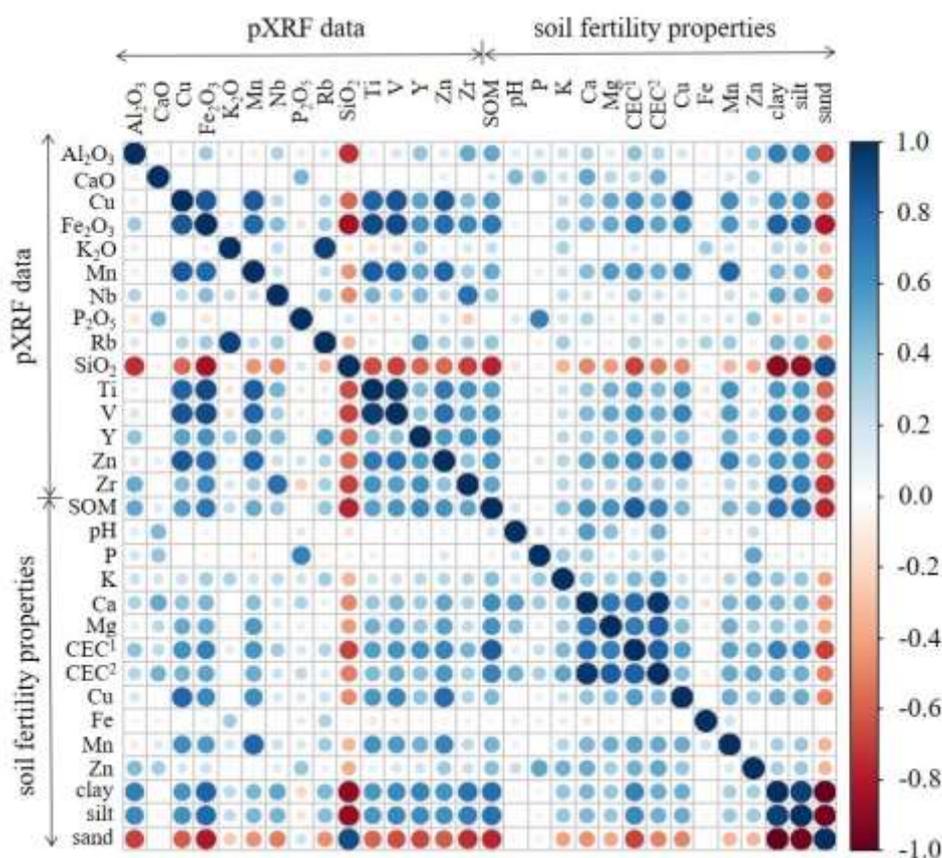


Figure 3. Color correlogram between pXRF data and soil fertility properties of Cerrado agricultural soils, Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba region (TMAP).

The sand content was well predicted based on Fe₂O₃, SiO₂, Ti, V and Zr contents obtained via pXRF ($r = 0.94$ and $R^2 = 0.87$) (Table 3). For clay content the model included Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, Y, and Zr ($r = 0.92$ and $R^2 = 0.85$). The soil mineralogy (quartz, kaolinite, gibbsite, hematite and goethite) of Oxisols (MUGGLER *et al.*, 2007; SCHÄEFER *et al.*, 2008) contributed to a very strong correlation between SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ contents and clay fraction (Fig. 3) resulting in significant regression models.

Table 3. Multiple and simple regression models obtained to predict properties of Brazilian Cerrado agricultural soils based on portable X-ray fluorescence (pXRF) data.

	Equation	p	r	R ²
Sand	Sand = 322.84 – 0.97(Fe ₂ O ₃) + 1.03(SiO ₂) + 0.01(Ti) – 0.34(V) – 0.57(Zr)	*	0.94	0.87
Clay	Clay = 192.63 + 1.16(Al ₂ O ₃) + 0.7(Fe ₂ O ₃) – 0.41(SiO ₂) + 1.15(Y) + 0.21(Zr)	*	0.92	0.85
SOM	SOM = 31.88 – 0.02(sand)	*	0.78	0.61
SOM	SOM = 7.77 + 0.03(clay)	*	0.69	0.48
P	P = -6.49 + 0.03(P ₂ O ₅ -pXRF)	*	0.71	0.51
Ca	Ca = 0.02 + 0.0008(CaO-pXRF)	*	0.78	0.88
Mn	Mn = -5.96 + 0.08(Mn-pXRF)	*	0.72	0.51
Cu	Cu = 0.31 + 0.06(Cu-pXRF) – 0.003(Mn-pXRF) + 0.06(Zn-pXRF)	*	0.83	0.69

* p<0.01

The performance of the models on the validation sub-datasets is shown in Fig. 4. The correlation between observed and predicted values showed high values of r and R^2 for both sand- and clay fractions. The RMSE obtained for clay fraction was inferior than the one obtained for sand fraction. The soil texture was also accurately predicted by pXRF in 426 soil samples from Louisiana and New Mexico, USA (ZHU *et al.*, 2011). Fe and Rb were the most important elements for soil textural prediction. The RMSE values ranged from 27 to 63 g kg⁻¹ and the R^2 ranged from 0.68 to 0.98. Zhu *et al.* (2011) also found a positive correlation between Zr and clay fraction and a negative correlation with sand fraction, corroborating our results (Fig. 3). For these highly weathered-leached Oxisols, a simple and unified pXRF clay model may be obtained based on Si, Al, and Fe oxides, as suggested by Zhu *et al.* (2011).

For SOM prediction the Fe₂O₃, SiO₂, sand, and clay contents were considered as proxies. Following multiple linear regression, a multicollinearity was detected. So, the SOM was predicted only by simple linear regression based on sand or clay content since these soil size fractions could be very well predicted by pXRF data (Figure 4a, 4b). SOM was reasonably estimated by sand and clay contents ($r = 0.69$ and RMSE = 6.4) (Figure

4c, 4d). This is related to the interaction and stabilization of organic matter in the clay fraction (NEUFELDT *et al.*, 2002). Several works have found a significant and positive correlation between soil organic matter and clay or (clay + silt) fractions (BERNOUX *et al.*, 2002; SIX *et al.*, 2002; ZINN *et al.*, 2005).

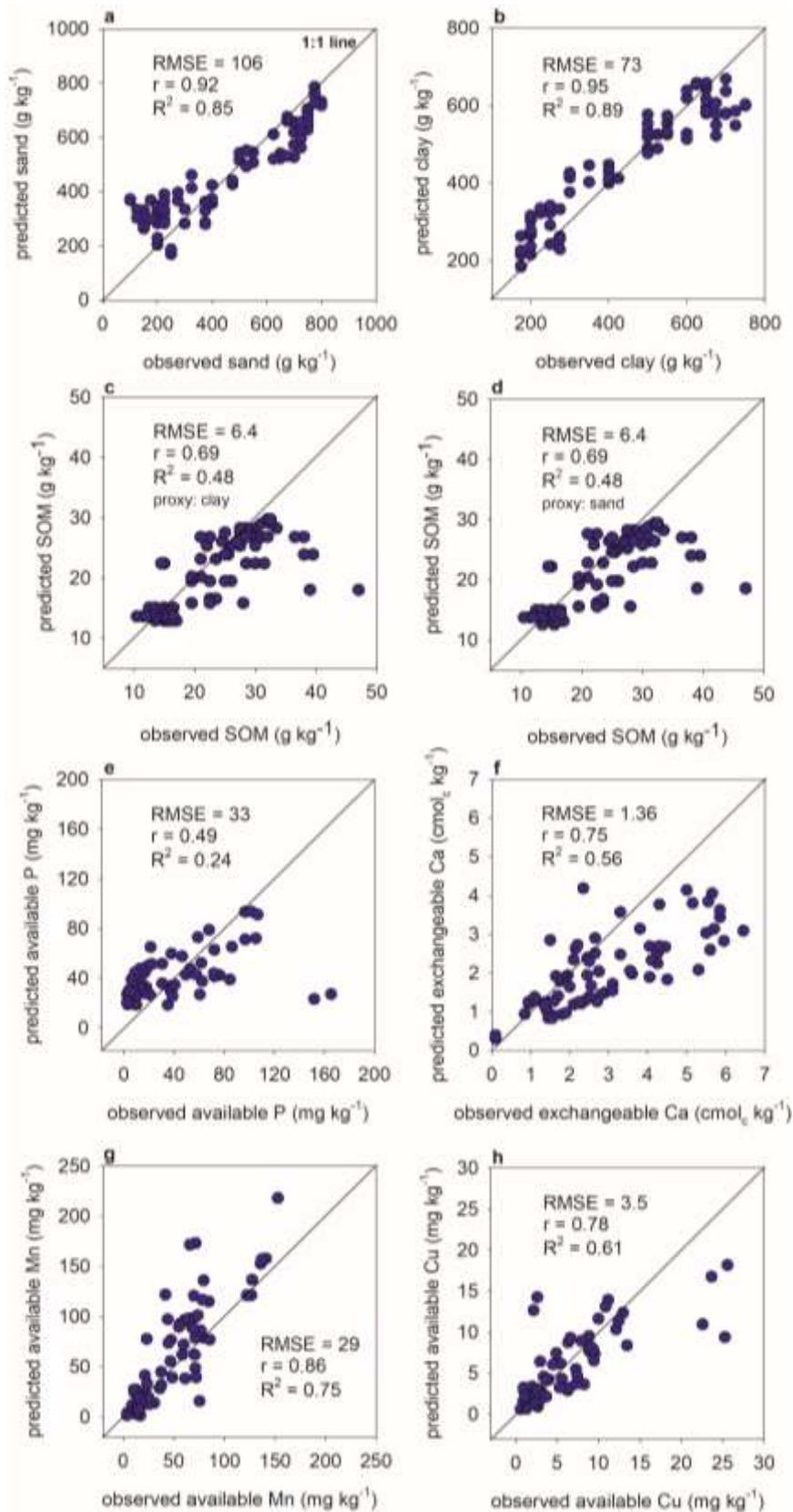


Figure 4. Validation of regression models to estimate sand, clay, SOM and plant-available forms of P, Ca, Mn and Cu based on pXRF data.

A solid prediction of SOM based only on clay and sand content was not observed probably due to the complex process of organic matter decomposition and accumulation in soils. The soil organic matter stock is controlled by many factors such as texture, mineralogy, climate, and land use (WANG *et al.*, 2013; CAI *et al.*, 2016; GONÇALVES *et al.*, 2017). The sampling sites in the four studied watersheds are under different uses, climate, and altitude, contributing to the spatial variability of SOM. For instance, in soils with clay content $>360 \text{ g kg}^{-1}$ the SOM ranged from 17 to 33 g kg^{-1} . For such soils, SOM and clay content showed $r = 0.75$ and $R^2 = 0.56$.

The worst prediction was observed for available P ($r = 0.49$ and $\text{RMSE} = 33$) (Fig. 4). The P_2O_5 content obtained via pXRF reflects the total content of P in the soil. The P_2O_5 content ranged from 0 to 6.6 g kg^{-1} . The mean value was 1.1 g kg^{-1} (Table 2). For Cerrado soils the total P_2O_5 content in general ranges from 0.11 to 0.80 g kg^{-1} (GOEDERT *et al.*, 1987; CHERUBIM *et al.*, 2016). Marques *et al.* (2004a) also found for Cerrado soils, P_2O_5 contents up to 1.0 g kg^{-1} . Values between 1.0 and 4.37 g kg^{-1} were found and related to basalt-derived soils (MARQUES *et al.*, 2004a). The mean value obtained for available P extracted with Mehlich-1 solution was 29.3 mg kg^{-1} , ranging from 0.7 to 299.2 mg kg^{-1} (Table 1). The values obtained are higher than those found for native Cerrado soils (0.1 to 16.5 mg kg^{-1}) (LOPES; GUILHERME, 2016). The increase in available P content is a consequence of phosphate fertilization in Cerrado agricultural soils. However, the available P/total P_2O_5 ratio is quite low. Moreover, the soil P can be strongly adsorbed on clay minerals, mostly on goethite in Oxisols (CURI; FRANZMEIER, 1984).

The CaO-pXRF contents ranged from 0.3 to 52.5 g kg^{-1} (mean 2.9 g kg^{-1}) (Table 2) and are related mainly to liming and gypsum application since a significant contribution of Ca-bearing minerals in weathered-leached Oxisols would not be expected. Marques *et al.* (2004a) evaluating the major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils found a mean content for CaO of 0.28 g kg^{-1} . Thus, a good correlation ($r = 0.75$ and $\text{RMSE} = 1.36$) was obtained between observed and predicted values for exchangeable Ca^{2+} (Figure 4f).

Regarding the micronutrients, a strong correlation was observed for Mn ($r = 0.86$ and $\text{RMSE} = 29 \text{ mg kg}^{-1}$) and Cu ($r = 0.78$ and $\text{RMSE} = 3.5 \text{ mg kg}^{-1}$) (Fig. 4). For the same region the background values for total Mn and Cu contents were 216 and 10 mg kg^{-1} , respectively (MARQUES *et al.*, 2004b). The Mn content obtained via pXRF (mean 488 mg kg^{-1} ; ranging from 85 to $2,677 \text{ mg kg}^{-1}$) (Table 2) was significant higher than the background value for Cerrado soils, suggesting that this increase is due to fertilization

practices adopted. The same increase was observed for Cu. The mean value was 44 mg kg⁻¹ ranging from 10 to 261 mg kg⁻¹. The successful performance of pXRF models for Mn and Cu (Table 3) was possible since there was a significant and positive correlation between total Mn and Cu contents with their available forms. In six Oxisols the available Mn extracted with Mehlich-1 solution was the main Mn form in relation to total Mn (up to 61%) (NASCIMENTO *et al.*, 2002). Also, the Mn extractability with Mehlich-1 solution was increased in soil subjected to liming applications.

6.4 CONCLUSIONS

In this work, we studied representative agricultural soils from the Cerrado region, Brazil. In this region, pXRF spectrometry was used to provide soil chemical characterization. The total elemental contents obtained via pXRF corroborated the known mineral composition and geochemistry of Cerrado soils. Based exclusively on pXRF data the clay content was successfully predicted. Also, the available forms of P, Ca, Mn and Cu (and to some extent soil organic matter) were successfully predicted from pXRF results. pXRF shows promise as a tool for tropical soil characterization. Future work should evaluate additional physicochemical parameters and the combination of pXRF with visible near infrared diffuse reflectance spectroscopy for enhanced soil characterization.

6.5 REFERENCES

ALKMIM, F. F. Geological background: a tectonic panorama of Brazil. In: Vieira, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L.J. C. (ed.) **World geomorphological landscapes: Landscapes and landforms of Brazil**. New York: Springer, 2015. p. 9–18. DOI: 10.1007/978-94-017-8023-0_2

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, 888-896, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente -CONAMA. **Resolução no 420**, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>. Accessed June 09, 2017

CAI, A.; FENG, W.; ZHANG, W.; XU, M. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land use across China. **Journal of Environmental Management, London**, v. 172, p. 2-9. 2016.

CAMPOS, M. L.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; CURTI, N.; ARAÚJO, A. S. A.; MIQUELUTTI, D. J.; LOPES, C.; SPIAZZI, F. R. Arsenate and cadmium content in soils of the Cerrado Bioma. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 37, p. 281-286, 2013.

CARMOS, D.N., CURTI, N., RESENDE, M. Characterization and genesis of Oxisols from the region of Alto Paranaíba, Minas Gerais State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 235-240, 1984.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Valores orientadores para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo**; 2014. Disponível em: <http://solo.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2013/12/VO-2014.pdf>. Acesso: 06 jun. 2017.

Cherubin, M.R., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Karlen, D.L., Pavinato, P.S., Rodrigues, M., Davies, C.A., Cerri, C.C. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, Amsterdam, 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.11.017

MINAS GERAIS. (Estado). Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM . Deliberação Normativa 166, de 29 de junho de 2011. Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH nº 2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. **Diário do Executivo de Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, 6 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em: 06 jun. 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Mapa de solos de Minas Gerais**: legenda expandida. 2010.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: Klute, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. 2. ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. p. 383–411. 1986.

GOEDERT, W.J., SOUSA, D.M.G., LOBATO, S., Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (ed.), **Solos dos cerrados**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, São Paulo: Nobel, p. 129 – 166, 1987.

GONÇALVES, D. R. P.; SÁ, J. C. M.; MISHRA, U.; CERRI, C. E. P.; FERREIRA, L. A.; FURLAN, F. J. F. Soil type and texture impacts on soil organic carbon storage in a sub-tropical agro-ecosystem. **Geoderma**, Amsterdam, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.10.021

HU, W.; HUANG, B.; WEINDORF, D. C.; CHEN, Y. Metal analysis of agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Bulletim of Environmental Contamination and Toxicology**, [s.l.] v. 92, p. 420-426, 2014.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of soils under Cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p.742-747, 1977.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. In: SPARKS, D. (ed.) **Advances in Agronomy**, Cambridge: Academic Press, v. 137, p. 1-72, 2016.

MARQUES, J. J.; SCHULZE; DARRELL G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, 2004a DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00260-X

MARQUES, J. J.; SCHULZE; DARRELL G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, 2004b. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.10.003

MUGGLER, C. C.; BUURMAN, P.; VAN DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic Oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 138, n. 1-2, p. 39-48, 2007. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.10.008

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L. Desorption, extraction and fractioning of manganese in Oxisols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 589-597, 2002.

NEUFELDT, H.; RESCK, D. V. S.; AYARZA, M. A. Texture and land-use effects on soil organic matter in Cerrado Oxisols, Central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, p. 151-164, 2002.

PELEGRINO, M. H. P.; WEINDORF, D. C.; SILVA, S. H. G., MENEZES, M. D.; POGGERE, G. C.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Synthesis of proximal sensing, terrain analysis, and parent material information for available micronutrient prediction in tropical soils. **Precision Agriculture**, Dordrecht, p. 1-21, 2018. DOI: 10.1007%2Fs11119-018-9608-z.

QUINTÃO, D. A.; CAXITO, F. A.; KARFUNKEL, J.; VIEIRA, F. R.; SEER, H. J.; MORAES, L. C.; RIBEIRO, L. C. B.; PEDROSA-SOARES, A. C. Geochemistry and sedimentary provenance of the Upper Cretaceous Uberaba Formation (Southeastern, Triângulo Mineiro, MG, Brazil). **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 47, n. 2, p. 159-182, 2017. DOI: 10.1590/2317-4889201720170032

RADU, T.; DIAMOND, D. Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.171, p. 1168-1171, 2009.

RAMOS, F. T.; DORES, E. F. G. C.; WEBER, O. L. S.; BEBER, D. C.; CAMPELO JR, J. H.; MAIA, J. C. S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soils under no-till farming in Brazil. **Journal of Science and Food Agriculture**, New York, v. 98, n. 9, p. 3595-3602, DOI: 10.1002/jsfa.8881

RAMOS, S. J.; DINALI, G. S.; CARVALHO, T. S.; CHAVES, L. C., SIQUEIRA, J. O.; GUILHERME, L. R. G. Rare-earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: content, signature, and crystalline phases. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 168, p. 177–186, 2016. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.06.00

RSTUDIO TEAM. **RStudio**: Integrated development environment for R. 2016. Disponível em: www.rstudio.com. Acesso: 9 Mar. 2018.

SANTANA, M. L. T.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Conditions affecting oxide quantification in unknown tropical soils via handheld X-ray fluorescence spectrometer. **Soil Research**, Rome, v. 56, n. 6, p. 648-655, 2018. DOI: /10.1071/SR18099

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

SHARMA, A., WEINDORF, D.C., MAN, T., ALDABAA, A., CHAKRABORTY, S. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). **Geoderma**, Amsterdam, v. 232 – 234, p. 141-147, 2014. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.05.005.

SHARMA, A.; WEINDORF, D. C.; WANG, S. S.; CHAKRABORTY, S. Characterizing soils via portable x-ray fluorescence spectrometer: 4. Cation exchange capacity (CEC). **Geoderma**, Amsterdam, v.239-240, p.130-134, 2015. DOI: doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.001.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**: 12. ed. USDA-NRCS, Washington, DC. 2014.

STOCKMANN, U.; CATTLE, S. R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, Amsterdam, v.139, p.220-231, 2016.

US EPA. 2007. **Method 6200**: Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment. US EPA. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>. Acesso: 9 Mar. 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Foreign Agricultural Service**. 2018. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/regions/brazil> Acesso em: 02 Oct. 2018.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N., MOTTA, P. E. F. Mineralogy, chemistry and stability of silt-size aggregates of soils from the Southeast region of Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 133-141, 2003.

WANG, M. Y.; SHI, X. Z.; YU, D. S.; XU, S. X.; TAN, M. Z.; SUN, W. X.; ZHAO, Y. C. Regional differences in the effect of climate and soil texture on soil organic carbon. **Pedosphere**, Nanjing, v. 23, p. 799-807, 2013.

WEINDORF, D.C., BAKR, N., ZHU, Y. Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. In: SPARKS, D. (ed.) **Advances in Agronomy**, New York: Academic Press, v. 128, p. 1-45, 2014.

WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray fluorescence Spectrometry analysis of soils. **Methods of soil analysis**, Madison, v. 1, p. 1-8, 2016. DOI: 10.2136/methods-soil.2015.0033

WEINDORF, D. C.; HERRERO, J.; CASTAÑEDA, C.; BAKR, N.; SWANHART, S. Direct soil gypsum quantification via portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.77, n.6, p.2071–2077, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2013.05.0170>.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; CHAKRABORTY, S.; BAKR, N.; HUANG, B. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for environmental quality assessment of peri-urban agriculture. **Environmental Monitoring Assessing**, New York, v.184, p.217–227, 2012.

YAMADA, T. The Cerrado of Brazil: a success story of production on acid soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 52, n. 5, p. 617-620, 2005. DOI: /10.1111/j.1747-0765.2005.tb00076.x

YEOMANS, J. C., BREMNER, J. M. A rapid and precise method of routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.19, p.1467-1476, 1988. DOI: 10.1080/00103628809368027

ZHU, Y.; WEINDORF, D. C.; ZHANG, W. Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. **Geoderma**, Amsterdam, v.167–168, p.167–177, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.010>.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relation described by a profile pedotransfer function in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, p. 168-173, 2005.