



YASMMIN TADEU COSTA

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MINERALÓGICOS DE
LATOSSOLOS AFETADOS PELO AQUECIMENTO**

**LAVRAS – MG
2018**

YASMMIN TADEU COSTA

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MINERALÓGICOS DE LATOSSOLOS
AFETADOS PELO AQUECIMENTO**

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

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro

Orientador

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira

Co-Orientador

LAVRAS – MG

2018

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

Costa, Yasmmin Tadeu.

Atributos químicos, físicos e mineralógicos de Latossolos
afetados pelo aquecimento / Yasmmin Tadeu Costa. - 2018.

72 p. : il.

Orientador(a): Bruno Teixeira Ribeiro.

Coorientador(a): Geraldo César de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Agregação do solo. 2. Matéria Orgânica. 3. Queimadas. I.
Ribeiro, Bruno Teixeira. II. de Oliveira, Geraldo César. III. Título.

YASMMIN TADEU COSTA

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MINERALÓGICOS DE LATOSSOLOS
AFETADOS PELO AQUECIMENTO**

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

APROVADA em 23 de fevereiro de 2018

Dr. Bruno Teixeira Ribeiro
Dr. Bruno Montoani Silva
Dr. José Eduardo Corá

UFLA
UFLA
UNESP

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro
Orientador

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro (DCS/UFLA) pela paciência, confiança e por ser constante inspiração de pesquisador dedicado, eficiente e correto. Muito obrigada por todos os ensinamentos.

Ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realizar o curso e por disponibilizar os recursos necessários para a conclusão deste trabalho. Também aos professores do departamento, por todo conteúdo transmitido, disposição em contribuir e amizade.

Agradeço à CAPES pela concessão de bolsa de doutorado. Ao CNPq e à FAPEMIG.

Ao Prof. Dr. Bruno Montoani Silva (DCS/UFLA), pelas contribuições com este trabalho como membro da banca e pelos conselhos, atenção, respeito e amizade sempre constantes.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Corá (UNESP) pela participação como membro da banca e pela grande disponibilidade em contribuir e ajudar com análises deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alberto Vasconcelos In da Júnior (UFRGS) pela valiosa contribuição na caracterização mineralógica dos solos por difratometria de raios-X.

Ao Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira (DCS/UFLA) pelos conhecimentos transmitidos e colaboração.

Aos técnicos do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Doroteo (Teo), pela enorme atenção, ajuda e disponibilidade em todos os momentos necessários e principalmente pela amizade. Ao técnico Roberto pela constante colaboração. À Geila e Alexandre por todas as colaborações e grande disponibilidade em ajudar. Ao José Roberto (Pezão) pela amizade e ajuda. À Dirce, por sempre estar disposta a se desdobrar e nos escutar a todo o tempo.

Em especial, agradeço à técnica e amiga Betânia. Muito obrigada por todos os momentos durante o mestrado, por sua presença essencial em todas situações de necessidade ou não, pelas inúmeras caronas, conversas, auxílios e grande amizade.

Ao Maxmiller Alvarenga, por colaborar e fazer parte deste trabalho.

À Renata, presença fundamental durante esses dois anos. Obrigada por ser a maior companheira de pesquisa e vida. Agradeço a amizade incondicional, aos finais de semana e noites de companhia e trabalho dentro e fora do laboratório. A todos os momentos juntas, muito obrigada!

Ao Diego, por seu meu maior apoio, porto seguro, companhia e distração durante esses seis anos. Obrigada por sempre estar disposto a ajudar, a me escutar, acalmar, motivar e inspirar. Agradeço a sua grande contribuição nesta pesquisa, por fazer parte dos momentos de reflexão, dúvidas e análises. Serei eternamente grata por todos os momentos.

Aos meus amigos de curso, laboratório e vida: Mariana, Sara, Rimena, Aline, Cristiane, João Paulo, Zélio, Joana, Francielle, Monna Lysa, Samara, Marina, Ferreira, Fernanda, Giovanna, Maria Jéssica, Josimar e Juliana (*In memoriam*). Obrigada pelos conselhos, bons momentos e lembranças.

À minha mãe, Dorislene, por me cuidar, escutar e confiar. Obrigada por me motivar e estar sempre presente, mesmo de longe. Ao meu pai, Tadeu, por acreditar em mim e nunca hesitar em me incentivar. À minha irmã, Panmela, por ser uma grande e eterna amiga, um exemplo e inspiração que contribuiu para ser quem sou hoje. Ao meu cunhado, Fernando, por ser parte desta família, sendo também exemplo e inspiração. À Zezé, por me amar, cuidar e fazer parte da família. Muito obrigada pelo amor incondicional e por serem a base de tudo.

Aos meus avós, Dorcília e Romeu, a todos meus tios e tias, primos e amigos de Uberlândia, por estarem constantemente presentes, me apoiando e torcendo por mim.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os efeitos do aquecimento sobre solos característicos de clima temperado já foram amplamente estudados. Entretanto, pouco se sabe sobre como a ocorrência de queimadas podem afetar as propriedades de solos tropicais. Portanto, objetivou-se com este trabalho avaliar atributos físicos, químicos e mineralógicos de seis Latossolos após aquecimento em diferentes temperaturas em condições laboratoriais. Amostras superficiais (0 – 5 cm) de agregados (19 – 12 mm e 8 – 4 mm), peneiradas (< 2mm) e fração argila de seis Latossolos foram aquecidas em forno mufla durante 30 minutos nas seguintes temperaturas (° C): 100, 200, 300, 400, 500 e 600. Após cada tratamento térmico determinou-se o teor de matéria orgânica, pH, carga líquida superficial, complexo sortivo, disponibilidade de nutrientes e mineralogia. Avaliou-se, também, a alteração da cor do solo com uso de um sensor portátil, a estabilidade dos agregados pelo método do peneiramento úmido e realizados testes de repelência à água e resistência tênsil. Os Latossolos estudados apresentaram comportamento semelhante quanto à alteração dos seus atributos químicos, físicos e mineralógicos quando submetidos ao aquecimento. A relação entre temperatura e alteração dos atributos químicos não é diretamente proporcional e dependente das alterações da matéria orgânica e mineralogia do solo. Em geral, os Latossolos submetidos a uma temperatura de 300° C apresentaram um aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes e redução em 50% do conteúdo de matéria orgânica; temperaturas mais elevadas (acima de 300° C) levaram a uma diminuição da disponibilidade de nutrientes e perda total do conteúdo de matéria orgânica. O aquecimento também alterou a eletroquímica das partículas, tornando-as com a carga líquida mais próxima de zero. A alteração da cor do solo reflete e ilustra bem as modificações químicas e mineralógicas observadas. A repelência à água e resistência tênsil dos Latossolos foram significativamente influenciadas pelo aquecimento. Acompanhando a perda de matéria orgânica, a repelência a água e resistência tênsil foram reduzidas. Entretanto, um aumento da resistência à desagregação em água dos agregados de tamanho 4 a 8 mm foi observada. A interpretação da avaliação da estrutura do solo deve ser fortemente considerada. Os agregados secos dos Latossolos afetados pelo aquecimento tornaram-se mais susceptíveis à ruptura se comprimidos, entretanto, tornaram-se mais resistentes ao destacamento em água.

Palavras-chave: Agregação do solo. Matéria orgânica do solo. Queimadas. Solos tropicais.

ABSTRACT

The heating effects on chemical and mineralogical properties of soils from temperate climate, young and organic-rich are well known, however, scarce information can be found for highly weathered-leached soils of tropical regions. In this context, it is important to highlight the significant occurrence of natural or induced fire in Brazil. We aimed to evaluate the burning effects on chemical, physical and mineralogical properties of six contrasting Oxisols under laboratory conditions. Surface samples (0-5 cm), sieved (<2 mm), aggregates size (12-19 mm and 4-8 mm) and clay fraction were used. Using a muffle furnace the soil samples were submitted to the following temperatures (°C) during 30 minutes: 100, 200, 300, 400, 500 and 600. After each thermal treatment the soil samples were analyzed for: soil organic matter, net surface charge, soil reaction, nutrients availability and qualitative mineralogical alteration. It was also evaluated the soil color change using a portable sensor, the soil aggregate stability by the wet sieving method, water repellency and tensile strength tests. The studied Oxisols had the same behavior regarding the effects of heating on chemical and mineralogical properties. The relationship between exposed temperature and changing of soil properties is not directly proportional; it depends on soil organic matter and mineralogical transformations. In general, temperatures up to 300° C promoted increase of nutrients availability and reduced 50% of soil organic matter; highest temperatures (above 300° C) led to decrease of nutrients availability and total organic matter depletion. After heating the net charges of soils were closed to zero. Changes in soil color reflect the observed chemical and mineralogical alterations. The water repellency and tensile strength of the Oxisols were significantly influenced by the heating. As the organic matter reduced the water repellency and tensile strength reduced. However, the aggregates 4-8 mm increased the resistance to disruption in water. The interpretation of soil structure assessment should be strongly considered. The dry aggregates of the Oxisols affected by the heating became more susceptible to disruption due to compression, however, became more resistant to detachment in water.

Keywords: Soil aggregation. Soil organic matter. Fire. Tropical soils.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Aquecimento do solo.....	12
2.2 Efeito do aquecimento nos atributos químicos do solo.....	13
2.3 Agregação em Latossolos.....	14
2.4 Efeito do aquecimento sobre a estabilidade dos agregados	15
2.5 Resistência tênsil como indicativo de qualidade estrutural.....	18
2.6 Efeito da temperatura na repelência à água do solo	18
2.7 Avaliação da repelência à água pelo teste de tempo de penetração da gota	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Coleta e preparo das amostras de solo	21
3.2 Tratamento térmico dos solos	23
3.3 Caracterização das amostras de solo	24
3.3.1 Caracterização física.....	24
3.3.2 Caracterização química.....	24
3.3.3 Caracterização mineralógica.....	25
3.3.4 Cor do solo	26
3.4 Teste de repelência à água.....	26
3.5 Estabilidade de agregados em água.....	27
3.6 Resistência tênsil dos agregados	28
3.7 Caracterização inicial dos solos	30
3.8 Tratamento estatístico dos dados.....	31
4. RESULTADOS	32
4.1 Alterações nos atributos avaliados dos solos com o aquecimento	32
4.2 Matéria orgânica do solo (MOS).....	33
4.3 pH, Δ pH e PCZ	35
4.4 Macronutrientes.....	36
4.5 Micronutrientes	38
4.6 Mineralogia da fração argila	39
4.7 Cor do solo	44
4.8 Repelência à água.....	45

4.9	Agregação do solo.....	46
4.10	Resistência tênsil dos agregados	48
5	DISCUSSÃO	49
5.1	Atributos químicos, MOS e mineralogia alterados pelo aquecimento.....	49
5.2	Atributos físicos alterados pelo aquecimento.....	53
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

Em condições naturais, a superfície do solo está sujeita à variação da temperatura com a ocorrência de queimadas, as quais podem ser naturais ou por ações antrópicas. A eliminação da vegetação pelo fogo tem sido utilizada como manejo de baixo custo objetivando tanto a limpeza de pastagens e terrenos, como a construção da fertilidade por meio da incorporação de cinzas (VICENTE; FANTINI, 2014). Apesar de decretos que limitam a utilização do fogo na vegetação como define o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651/12 (BRASIL, 2012) ou até mesmo a sua proibição em canaviais (SÃO PAULO, 2007) por exemplo, o Brasil é uma das regiões mais afetadas por queimadas no mundo (BOWMAN et al. 2009; SILVA et al. 2016). Em 2017, houve um número recorde de ocorrência de queimadas, com um aumento de 134% em relação à média desde 1998 (INPE, 2018). Ainda, estima-se um aumento da ocorrência de queimadas para as próximas décadas, devido às previsões de aumento da temperatura máxima diária em 2° C até 2100 (SILVA et al., 2016). Tem-se, ainda, algumas ocorrências de queimadas em áreas de plantio direto devido ao acúmulo de palhada na superfície do solo.

Com a ocorrência de queimadas, vários atributos físicos, químicos, mineralógicos e biológicos do solo podem ser alterados (CERTINI, 2005; NEARY et al. 1999; GONZÁLEZ-PÉREZ, et al. 2004; ZAVALA, et al. 2010). A magnitude dessas alterações deve-se à intensidade da queimada (MATAIX-SOLERA et al., 2011; THOMAZ; ANTONELI; DOERR, 2014) e do tipo de solo (ALCANIZ et al., 2018). As alterações mais comuns identificadas após queimadas de alta intensidade são: perda de matéria orgânica do solo (MOS), incremento de cinzas e volatilização de nutrientes (principalmente Nitrogênio); alterações na qualidade e quantidade da comunidade microbiana; e deterioração estrutural do solo, afetando diretamente a estabilidade de seus agregados (CERDÁ; MATAIX-SOLERA, 2009; MATAIX-SOLERA et al., 2011).

A repelência à água é uma das principais propriedades do solo afetadas pelo aquecimento (SOTO; BENITO; DIAZ-FIERROS, 1991). Superfícies hidrofóbicas resultam em grande resistência ao umedecimento e, conseqüentemente, diminuem a capacidade de infiltração de água (DOERR; THOMAZ, 2000). As conseqüências ambientais de solos hidrofóbicos são imediatas, afetando processos hidrológicos e geomorfológicos (DEBANO, 1991). Solos submetidos ao aquecimento entre 175 e 200°C podem ter um aumento da repelência à água, enquanto temperaturas acima de 200 – 300°C são capazes de eliminar a hidrofobicidade do solo (DEBANO, 1981; GARCÍA-CORONA et al., 2004; ZAVALA et al., 2010).

A estruturação física do solo também sofre alterações com o aquecimento, principalmente devido a combustão da MOS e alterações mineralógicas dos solos (MATAIX-SOLERA et al., 2011). A estabilidade mecânica dos agregados é um indicativo da condição estrutural do solo, a qual tem influência em vários atributos e processos que ocorrem no solo, como, porosidade do solo, infiltração de água, selamento superficial, crescimento de raízes, erodibilidade do solo e proteção da matéria orgânica (GREGORICH; KACHANOSKI; VORONEY, 1989; RAINE e SO, 1993; FULLER; GOH; OSCARSON, 1995; FELLER; BEAR, 1997; DAS et al., 2014; THOMAZ; ANTONELI; DOERR, 2014).

A avaliação da resistência tênsil de agregados pode contribuir para entendimento dos efeitos do aquecimento do solo na sua qualidade estrutural, indicando a força necessária para a ruptura do agregado (DEXTER; KROESBERGEN, 1985). Esse atributo ainda não foi amplamente estudado em solos afetados por queimadas ou em condições de laboratório. Por outro lado, a condição estrutural de solos afetados pelo aquecimento tem sido frequentemente avaliada pela análise de estabilidade de agregados em água (peneiramento úmido) (ARCENEGUI et al., 2008; GARCÍA-CORONA et al., 2004; JORDÁN et al., 2011; MARCOS; TÁRREGA; LUIS, 2007; MATAIX-SOLERA; DOERR, 2004; ZAVALA et al., 2010).

Os efeitos das queimadas em solos têm sido investigados em condições laboratoriais com o aquecimento de amostras em forno mufla (ARAYA; MEDING; BERHE, 2016; BADÍA, et al. 2017; GALANG; MARKEWITZ; MORRIZ, 2010; THOMAZ, 2017; THOMAZ; FACHIN, 2014). Nessas condições, diferentes combinações temperatura *versus* tempo de exposição podem ser simuladas, tendo a temperatura alcançada mais importância que o tempo de exposição (THOMAZ, 2017). Neary et al. (1999) classificaram a intensidade da queimada com base na temperatura máxima alcançada como: baixa intensidade (150 – 250°C); média intensidade (350 – 450°C); alta intensidade (550 – 650°C). Essas temperaturas já foram testadas em diferentes tempos de duração: 3 – 5 min (THOMAZ; FACHIN, 2014); 3 – 15 min (THOMAZ, 2017); 20 min (MATAIX-SOLERA, et al. 2008); 30 min (GARCÍA-CORONA, et al. 2004); 360 – 1.440 min (KANG; SAJJAPONGSE, 1980). Além do total controle da temperatura alcançada e do tempo de exposição, a realização de ensaios em condições laboratoriais permite evitar a influência de fatores externos encontrados em condições de campo (THOMAZ, 2017).

Os efeitos das queimadas sobre os atributos químicos e físicos são bastante conhecidos em solos de clima temperado (ALCANIZ et al. 2018; ARE et al., 2009; MATAIX-SOLERA, et al. 2011; THOMAZ, 2017), entretanto, poucos trabalhos foram realizados para solos tropicais

(e.g., Latossolos). Objetivou-se com esse trabalho avaliar as alterações nos atributos químicos e mineralógicos, na hidrofobicidade e condição de agregação de seis Latossolos submetidos ao aquecimento em forno mufla em diferentes temperaturas. Partiu-se da hipótese de que, os atributos eletroquímicos e a disponibilidade de nutrientes serão afetados com o aquecimento devido às alterações na mineralogia e redução da matéria orgânica do solo, de forma diferente do que reportado na literatura para solos de clima temperado, diante do alto teor de óxidos e argilominerais 1:1, geralmente predominante em Latossolos, além de que os efeitos encontrados sobre os atributos químicos e mineralógicos irão afetar a condição estrutural de Latossolos.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Aquecimento do solo

Fogo é o resultado visual dos processos químicos e físicos que ocorrem durante a combustão, o qual, para sua ocorrência, necessita de energia química (combustível de biomassa), energia termal (recurso de ignição) e oxigênio (O₂) (NEARY et al., 1999). Queimadas são geralmente divididas em cinco fases: pré-ignição, combustão de chama, combustão de fumaça, combustão incandescente e extinção (DEBANO; NEARY; FFLLIOTT, 1998). É durante a pré-ignição que ocorre o aquecimento e decomposição termal do material combustível, liberando gases (CO₂, CO, H₂O, elementos, etc.) e material particulado (PYNE; ANDREWS; LAVEN, 1996). As fases de fumaça e chama são as mais visíveis, as quais as reações exotérmicas realizadas produzem temperaturas que alcançam níveis de 300 a 1400°C (DEBANO; NEARY; FFLLIOTT, 1998). A fase de fumaça de queimadas no solo pode alcançar temperaturas entre 300 e 600°C e, apesar de resultar em queimada com condução termal lenta (<3 cm h⁻¹) e afetar uma área menor, pode gerar mais efeitos em profundidade (NEARY et al., 1999). A combustão incandescente consiste na lenta oxidação do carvão residual não consumido completamente nas fases anteriores. Esse tipo de combustão pode ocorrer por longos períodos de duração, levando a temperaturas em solos minerais e orgânicos a um nível de 400 a 760°C (NEARY et al., 1999).

Durante a ocorrência de queimadas florestais, já foram registradas em estudos temperaturas entre 200 e 300°C na superfície do solo (RUNDEL, 1983). Queimadas sobre materiais combustíveis como palhada, com cobertura >400 mg ha⁻¹, a temperatura em superfície pode chegar a 500-700°C, com picos de ~1500°C (DUNN; DEBANO, 1977). Vegetações arbustivas, tendem a resultar em queimadas de menores temperaturas, porém com alcance maior

(DEBANO et al., 1998). Já queimadas sobre áreas de gramíneas, com cobertura $< 1\text{mg há}^{-1}$, geralmente tem um alcance de temperatura $< 250^{\circ}\text{C}$, entretanto, altos picos de temperatura durante a queimada já foram identificados (RAISON, 1979).

Os solos são fracos condutores de calor (DEBANO, 2000), por este motivo, durante queimadas, há um grande gradiente de temperaturas em profundidade do solo (UBÉDA; OUTEIRO, 2009). Portanto, as alterações causadas diretamente pelo fogo nos solos são identificadas nos centímetros mais superficiais da camada mineral dos solos ou na camada orgânica (FERNÁNDEZ; VEGA; FONTURBEL, 2013; VERGAS et al., 2014). Por exemplo, Thomaz (2017b), em experimento sobre área onde se implementa o sistema roça de toco, identificou que as temperaturas registradas durante a queimada alcançaram 355 a 660°C na camada mais superficial, enquanto na camada imediatamente abaixo (2 cm) as temperaturas registradas alcançaram no máximo 150°C . Ainda, neste mesmo trabalho, notou-se que o tempo de duração das temperaturas mais altas ($> 500^{\circ}\text{C}$) permaneceram durante a queimada por no máximo 255 s, já temperaturas mais baixas ($< 200^{\circ}\text{C}$), permaneceram no solo até 1050 min.

A condução de calor pelo solo sofre influência da umidade do solo e temperatura do fogo (BADÍA et al., 2017). Em condição de solo seco, a o aquecimento do solo tende a ser lento, enquanto condições de alta umidade contribuem para um aquecimento rápido, isso se deve principalmente processo de alteração de fase da água, pois a água se movimenta rapidamente pelos poros do solo quando em vapor, e libera a mesma quantidade de calor quando ocorre sua condensação, aumento a temperatura do solo (NEARY et al., 1999). O nível e duração do aquecimento no solo determinará a intensidade com que os componentes químicos, físicos e biológicos sejam afetados, sendo altamente variável dependendo da combinação de tais fatores somados as características dos solos.

2.2 Efeito do aquecimento nos atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo podem sofrer alterações significativas com o aquecimento (PEREIRA et al., 2014). Geralmente, o carbono total do solo é perdido em aquecimento de alta intensidade (CERTINI, 2005), enquanto queimadas de baixa a média intensidade pode levar ao incremento de carbono carbonizado no solo, frente ao processo de mineralização acelerado pelo calor (SCHARENBRUCH et al., 2012). Ainda, é comum o aquecimento do solo resultar na elevação do pH devido à perda de grupos $-\text{OH}$, a completa oxidação da matéria orgânica e a liberação de cátions básicos (CERTINI, 2005).

A partir da combustão da matéria orgânica do solo e incorporação de cinzas, espera-se que a disponibilidade nutrientes, como Fósforo (P⁻), Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Sódio (Na⁺) e Potássio (K⁺) aumente (ALCANIZ et al., 2016; AROCENA; OPIO, 2003). Entretanto, alguns trabalhos têm notado alteração efêmera sobre a disponibilidade dos nutrientes com o aquecimento do solo. Geralmente, os efeitos das queimadas nos solos são positivos a curto prazo, por este motivo Alcaniz et al. (2018) alerta para a necessidade de tais avaliações serem feitas a longo prazo.

Em revisão realizada sobre os impactos de queimadas aplicadas em cultivo roça de toco na dinâmica da vegetação secundária, entre os trabalhos levantados que abordam os efeitos nos atributos químicos e fertilidade do solo, Mukul e Herbohn (2016) identificaram que em sua maioria encontraram efeitos negativos sobre a disponibilidade de nutrientes como potássio (K), fósforo (P), teor de matéria orgânica e sobre atributos físicos e hidrológicos (BORGGAARD; GAFUR; PETERSEN, 2003; OSMAN et al., 2013; LESTRELIN et al., 2012), apesar de que resultados positivos ou insignificantes para ambos também foram identificados em literatura (ex. GIARDINA; SANFORD JÚNIOR; DOCKERSMITH, 2000; NEEGAARRD; MAGID; MERTZ, 2008). Já em revisão feita por Ribeiro Filho, Adams e Murrieta (2013) sobre os efeitos da agricultura itinerante sobre solos tropicais, identificou-se que grande maioria dos trabalhos levantados concluíram que o sistema roça de toco é sustentável por não afetar de forma significativa a qualidade do solo, principalmente em sistemas onde o pousio é adotado por períodos maiores.

2.3 Agregação em Latossolos

O processo de floculação entre os coloides do solo ocorre com a precipitação das partículas discretas, os quais formarão agregados menores e menos estáveis, classificados como microagregados (<250 micrômetros), que são envolvidos por agregados maiores, sendo estes os macroagregados (>250 micrômetros) que definem a estrutura do solo (MATAIX-SOLERA et al., 2011). Assim, a formação de tais agregados depende dos fatores que promovem a aproximação das partículas discretas e dos agregados menores, e dos fatores que mantêm as partículas unidas contra as forças que tendem a separá-las, como a floculação das argilas, cátions adsorvidos e presentes na solução do solo; pressão exercida pelas raízes e os organismos do solo (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

Os componentes orgânicos e inorgânicos do solo influenciam a formação e estabilidade dos agregados (MATAIX-SOLERA et al., 2011), como o teor de argila e a mineralogia do solo

por proporcionarem forças de atração e coesão entre as partículas, a presença de microorganismos por meio de mucilagens excretadas a partir da decomposição da matéria orgânica (RIBEIRO, 2009), além de forças de absorção que ligam partículas (HARRIS et al., 1964; INSAM; DOMSCH, 1988). Por consequência da ação dos micro-organismos e o teor de matéria orgânica é considerado fator fundamental na cimentação dos agregados do solo.

Em solos tropicais, levando em consideração principalmente os Latossolos, existe predominância de minerais como caulinita, e óxidos como gibbsita, goethita e hematita. Esses óxidos de Fe e Al apresentam alta reatividade com a matéria orgânica, formando complexos organo-minerais muito estáveis (PINHEIRO-DICK; SCHWERTMANN, 1996). Entretanto, o tipo de óxido influencia o grau da estabilidade dos agregados a partir dos diferentes graus de cristalinidade, os quais geram efeito sobre a área superficial específica e a concentração das terminações –OH disponíveis para estabelecer interações com a matéria orgânica (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996).

A caulinita presente de forma representativa em Latossolos, devido ao ajuste face a face entre as lâminas tetraédricas, resultado de seu estado de cristalinidade, apresenta menor tendência ao desenvolvimento de microestrutura. Portanto, geralmente tende a resultar em solos mais adensados, com macroestrutura em blocos e conseqüentemente menor permeabilidade e menor estabilidade dos agregados. Já Latossolos gibbsíticos tendem a apresentar macroestrutura do tipo granular, com menor densidade do solo, maior permeabilidade e maior estabilidade dos agregados (FERREIRA; BERNARDES; CURI, 1999).

Em relação aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade, Barral, Arias e Guerif (1998), Duiker et al. (2003) e Inda Júnior et al. (2007) identificaram papel importante destes com a formação e estabilização dos agregados do solo. Ainda, a goethita apresenta menor tamanho de cristal e maior área superficial específica quando comparada com a hematita, portanto apresenta maior concentração de terminações –OH e contribui com maior efetividade para a estabilidade dos agregados (SCHWERTMANN; KAMPF, 1985; INDA JÚNIOR; KAMPF, 2005; CORNELL; SCHWERTMANN, 1973).

2.4 Efeito do aquecimento sobre a estabilidade dos agregados

O efeito de elevadas temperaturas sobre a estabilidade dos agregados do solo está usualmente relacionado com a degradação da matéria orgânica devido a sua combustão, o que dependerá da intensidade da queimada. Entretanto, muitas temperaturas não alcançam severidade elevada, além de que a matéria orgânica não é o único agente cimentante das

partículas do solo (MATAIX-SOLERA et al., 2011). Por outro lado, alguns níveis de temperatura podem ser suficientes para provocar uma fusão termal das partículas, levando a recristalização de minerais presentes na fração argila (GIOVANNINI; LUCCHESI, 1997). Em diferentes níveis de temperatura diversos são os efeitos causados sobre os fatores que influenciam a formação e estabilização dos agregados do solo, os quais serão pontuados a seguir:

Diversos fatores influenciam o efeito da temperatura sobre a atividade microbiana do solo. Alguns autores (WOLF; SKIPPER, 1994; CHOROMANSKA; DELUCA, 2002) identificaram um maior impacto negativo sobre os micro-organismos do solo em situações de maior umidade, entendendo que a água é mais efetiva na condução do calor do que o ar e que os micro-organismos são mais sensíveis ao aquecimento úmido. De forma geral, o principal efeito do aquecimento sobre a atividade microbiana é a sua redução, podendo, em alguns casos, levar a esterilização completa da camada superficial do solo (MATAIX-SOLERA, 2011). Entretanto, a redução da atividade microbiana de fato será resultado na umidade do solo, da profundidade de solo analisada, da intensidade da queimada atuante e do tempo de ação da temperatura sobre o solo, os quais geram efeitos diversos.

Em relação às transformações da matéria orgânica do solo com o aquecimento, tem-se que alguns grupos funcionais que contêm macromoléculas húmicas são lábeis ao calor. Assim, parte dos ácidos húmicos podem ser alterados para humina, enquanto parte dos ácidos fúlvicos podem se transformar em ácidos húmicos (GONZÁLES-PÉREZ et al., 2004). De modo geral, em queimadas de alta intensidade, o húmus formado pela ação do aquecimento leva ao aumento na estabilidade de degradação química e biológica do solo (MATAIX-SOLERA, 2011).

A relação da matéria orgânica do solo com a estabilidade dos agregados é esperada, já que este é o fator de maior importância para a estabilização dos agregados (MARTÍ et al., 2001). Em estudo realizado por Soto, Benito e Diaz-Fierros (1991), identificou-se que, em solos os quais a matéria orgânica se comporta como o principal agente cimentante entre as partículas, temperaturas até 170°C favoreceram a estabilidade dos agregados, enquanto temperatura acima de 200°C levaram a degradação desta estabilidade estrutural.

A mineralogia dos solos pode sofrer alterações em temperaturas baixas, levando a mudanças na forma de agregação entre as partículas do solo. Mataix-Solera (2011), em sua revisão sobre os principais efeitos do aquecimento na agregação do solo analisa um apanhado de trabalhos que obtiveram alterações mineralógicas pelo efeito do calor: A gibbsita pode ser completamente destruída à 200°C (SCHOEN; ROBERTSON, 1970), enquanto a goethita se altera para a hematita em temperatura próxima a 300°C (CORNELL; SCHWETMANN, 1996).

Richardson (1972), citado por Mataix-Solera (2011) observou a decomposição da caulinita entre 500 e 700°C. Giovannini e Lucchesi (1997) identificaram que a alteração de minerais silicatados compostos por alumínio e ferro em áreas queimadas resultaram em uma maior cimentação entre as partículas e, conseqüentemente, a uma maior estabilização dos agregados, quando comparados com situações não atingidas por queimadas.

Sun, Zhang e Qian (2016), avaliando o efeito da temperatura sobre os argilominerais do solo concluiu que a partir da temperatura de 300°C, características como cor, porosidade e rachaduras superficiais são afetadas de forma significativa. Entretanto, é no intervalo de 300 a 500°C que foram observadas importantes alterações na estrutura dos minerais avaliados, além disso, os autores consideram como um intervalo crítico capaz de gerar danos a argila devido aos danos termiais.

Alguns autores (SERTSU; SANCHEZ, 1978; ULERY; GRAHAM, 1993; KETTERINGS; BIGHAM; LAPERCHE, 2000), em situações onde o solo foi submetido a elevadas temperaturas, tanto em condição de campo como laboratório, observaram um aumento significativo no conteúdo de areia e redução dos conteúdos de silte e argila. Este fenômeno é resultado de uma fusão térmica das partículas de argila, formando agregados estáveis a forças dispersivas (ULERY; GRAHAM, 1993). Entretanto, este efeito é limitado a alguns tipos de solo submetidos a temperaturas elevadas (MATAIX-SOLERA, 2011).

Zavala et al. (2010), analisando solos sobre floresta de eucalipto na Espanha, México e Austrália submetidos a tratamentos térmicos em duas condições de umidade contrastante (úmido e seco), identificaram que o aquecimento do solo reduziu a estabilidade de seus agregados, principalmente acima de 200°C.

Thomaz (2017a), avaliando uma área onde se utiliza a queima para propósitos agrícolas no município de Prudentópolis (PR), identificou que temperaturas de aproximadamente 673°C alcançadas durante as queimadas no campo levaram a fortes efeitos sobre a estabilidade estrutural do solo. Assim, resultou em uma maior estabilidade dos agregados maiores (2 a 4 mm), alterando as classes dos agregados.

Jordan et al. (2014) observaram relação entre a estabilidade dos agregados e a repelência à água de solos após 6 anos de análise pós-queima. E Mataix-Solera & Doerr (2004) observaram que estabilidade dos agregados aumentou em amostras que apresentaram maior repelência à água.

Mataix-Solera et al. (2011) realizaram uma revisão e levantamento bibliográfico (abrangendo pesquisas de 1983 até 2011) de estudos que avaliaram o efeito do aquecimento, tanto aquele por queimadas naturais como realizado em condições laboratoriais, sobre a

estabilidade dos agregados do solo. Por esta fonte e demais pesquisas realizadas até o período de 2016, constata-se que não há pesquisas sobre o efeito do aquecimento na estabilidade de agregados em Latossolos.

2.5 Resistência tênsil como indicativo de qualidade estrutural

A resistência tênsil indica a força necessária para romper o ponto de fraqueza do agregado (DEXTER, 1988). Tal parâmetro é sensível a estrutura do solo, pois é regulada pelas falhas e “*microcracks*” do solo (WATTS; DAXTER, 1998). Altos valores de resistência tênsil contribuem para a manutenção da estrutura do solo, permitindo a realização de manejos frente a sua tração estável, entretanto, pode limitar o crescimento de raízes por sua dureza (DAS et al., 2014). De acordo com Blanco-Canqui et al. (2005), existem poucos dados em literatura sobre correlações entre a resistência tênsil e componentes orgânicos e inorgânicos. Ainda, a forma do agregado está diretamente ligada com a sua resistência tênsil uma vez que o método consisti na aplicação de força por unidade de área. Por fim, ainda não foram realizados trabalhos que avaliem o efeito do aquecimento sobre a resistência tênsil dos agregados do solo.

2.6 Efeito da temperatura na repelência à água do solo

Vários autores têm se preocupado com a maior intensidade da repelência à água dos solos após a submissão destes à elevadas temperaturas, como em situações de queimadas, sugerindo que o fogo é um agente capaz de induzir essa propriedade (DEBANO; KRAMMES, 1966; DEBANO, 2000; DOERR et al., 2005; JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010). Doerr et al. (2000) afirma que a forma e a intensidade que as elevadas temperaturas irão afetar a repelência à água dos solos dependerá de fatores como a temperatura da combustão, o tempo de permanência do fogo ou calor, a quantidade e qualidade da biomassa atuando como material combustível, a umidade prévia do solo e o tipo de solo afetado.

A indução à repelência à água ocorre pela presença de compostos orgânicos hidrofóbicos presentes no solo (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA 2010), estando muitas vezes ligada com ácidos húmicos (DOERR; SHAKESBY; WALSH, 1998). O conceito de repelência à água no solo ainda não é bem definido, entendendo que não há superfície que exerce repelência sobre um líquido (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010).

Segundo Tschapek (1984), todas as partículas minerais do solo apresentam característica hidrofílica por meio de suas superfícies cobertas por grupos de hidroxilas polares,

exceto os silícios não hidroxílicos. A afinidade ou repelência entre as moléculas de água e as partículas sólidas são advindas das forças de atração (adesão) e pela atração das moléculas de água entre si (coesão). A água, por sua característica dipolar e por suas fortes ligações entre esses diferentes dipolos por pontes de hidrogênio geram uma grande atração e tensão superficial. Assim, a água se adere a grande parte das superfícies naturais formadas por cargas negativas ou positivas os quais atraem as cargas opostas presentes na molécula de água (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010).

A tensão superficial da água ($72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ a 20°C) então, se refere a força de atração exercida pelas moléculas na superfície da água em relação à forças de atração da água com outras superfícies ou fases. Porém, a tensão superficial da água sofre influência da temperatura, reduzindo ao passo que se aumenta o calor, e da presença de sais em solução, aumentando as forças de coesão.

Quando a força de coesão é maior que a força de adesão, em relação ao contato da água com o solo, a água tende a tomar uma forma esférica. Assim, superfícies com tensão superficial maior que a da água são consideradas hidrofílicas, como ocorre com a grande parte dos solos minerais, de acordo com Tschapek (1984). Entretanto, algumas substâncias orgânicas, como os polímeros orgânicos, apresentam tensão superficial menores do que a da água, sendo, portanto, hidrofóbicos (ZISMAN, 1964).

Esses elementos hidrofóbicos podem recobrir quase completamente as partículas minerais do solo (DOERR et al., 2000; JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010), dando ao solo a característica hidrofóbica. Em situações de queimada, as quais o solo é submetido à elevadas temperaturas, as partículas orgânicas são reduzidas e até mesmo eliminadas por completo por meio da combustão, ao passo que outros níveis de temperatura podem condensar compostos orgânicos volatizados sobre uma superfície mais fria (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010).

A repelência à água tende a ser maior em condições de maior umidade no solo, podendo contribuir para o aumento no fluxo do escoamento superficial (LETEY; OSBORN; VALORAS, 1975 apud DEBANO, 2000). Neste sentido, a repelência à água tende a aumentar o volume de escoamento superficial e processos erosivos, além de reduzir a capacidade de retenção de água do solo (DEKKER; RITSEMA, 1994).

O fogo pode induzir a repelência à água em solos que não apresentavam hidrofobia em condição natural. DeBano (1991) sugeriu que o aquecimento em solos não repelentes, mas que apresentam conteúdo de matéria orgânica a partir de 2-3% sempre induziria à situação hidrofóbica.

Jordan et al. (2014) encontraram estabilização ou pequena redução em relação à repelência à água em análises realizadas em solos pós-queima. Mataix-Solera e Doerr (2004) em análise realizada em solo calcário argiloso submetidos localizados em área queimadas, identificaram que a característica hidrofóbica em solos sob floresta de eucalipto não se restringe somente à solos ácidos, já que solos alcalinos apresentaram repelência à água após o aquecimento pela queimada.

Mataix-Solera et al. (2013) analisando amostras afetadas por queimadas naturais e Mataix-Solera et al. (2008) em estudos com amostras aquecidas em laboratório encontraram o mesmo padrão em relação à repelência à água, indicando que alguns tipos de solos apresentam baixa suscetibilidade ao desenvolvimento da repelência à água, apesar de que na condição de campo o índice de repelência à água foi maior em relação ao encontrado em análises laboratoriais. As características dos solos capazes de controlar esse comportamento são: conteúdo de matéria orgânica, teor de argila e mineralogia. O conteúdo de caulinita foi o principal responsável pelo desenvolvimento da repelência à água (MATAIXSOLERA et al., 2013).

Zavala et al. (2010), em situação já citada anteriormente, constataram que só houve redução na repelência à água após o aquecimento de 250-300°C, desaparecendo completamente após 400-450°C.

Zihms et al. (2013) não encontraram alterações no processo de infiltração da água em amostras de areia silicatadas submetidas a tratamentos térmicos, sugerindo que esta propriedade não foi afetada pela elevação da temperatura, entendendo que essas alterações são possíveis de ser identificadas quando à testes com duração da exposição dos solos ao aquecimento.

2.7 Avaliação da repelência à água pelo teste de tempo de penetração da gota

O teste de tempo de penetração da gota de água no solo (Water Drop Penetration Time, WDPT) basicamente consiste em colocar uma gota sobre a superfície do solo e cronometrar o tempo que leva até a sua infiltração completa. Assim, o resultado obtido se dá no tempo que a hidrofobicidade do solo persiste (WESSEL, 1988; DOERR; SHAKESBY; WALSH, 1998). Neste sentido, tem-se que a repelência da água está diretamente ligada às características hidrológicas do solo, pois o tempo de infiltração das gotas da chuva vão definir a ocorrência e intensidade do escoamento superficial (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010).

Os solos são classificados como muito repelentes a pouco repelentes por meio de classificações definidas por diferentes autores, em que levam em consideração o tempo

necessário para a infiltração da gota no solo. Doerr et al. (1998) definem as seguintes classes: hidrofílico (WDPT ≤ 5 s), pouco repelente à água (WDPT: 5 – 60 s); fortemente repelente à água (WDPT: 60 – 600 s); severamente repelente à água (WDPT: 600 – 3600 s) e extremamente repelente à água (>18000 s). Esta classificação será utilizada neste trabalho. ;Ainda, autores como Adams, Strain e Adams (1969), Bisdorn, Dekker e Shoute (1993) e Dekker e Ritsema (1994) também definem outras classificações, sendo a classificação de Bisdorn, Dekker e Shoute (1993) semelhante à de Doerr (1998) e os demais com definições de poucas classes e menores valores de repelência.

Dekker et al. (2009) afirmam que o método de WDPT, para alcançar resultados mais realistas da condição de hidrofobicidade do solo, deve-se utilizar amostras secas, por este motivo recomendam amostras com umidade de campo, sem a manipulação ou controle da umidade posterior a coleta, para realizar o teste de repelência à água do solo.

Vogelmann et al. (2015) em estudo comparando as metodologias de determinação de repelência à água do solo, identificaram que o método de WDPT e o método que utiliza o microinfiltrômetro de tensão são eficientes para tal análise, apesar de que o fato da utilização de WDPT utilizar amostra deformada por mascarar a real repelência à água ao expor agregados com característica hidrofílica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

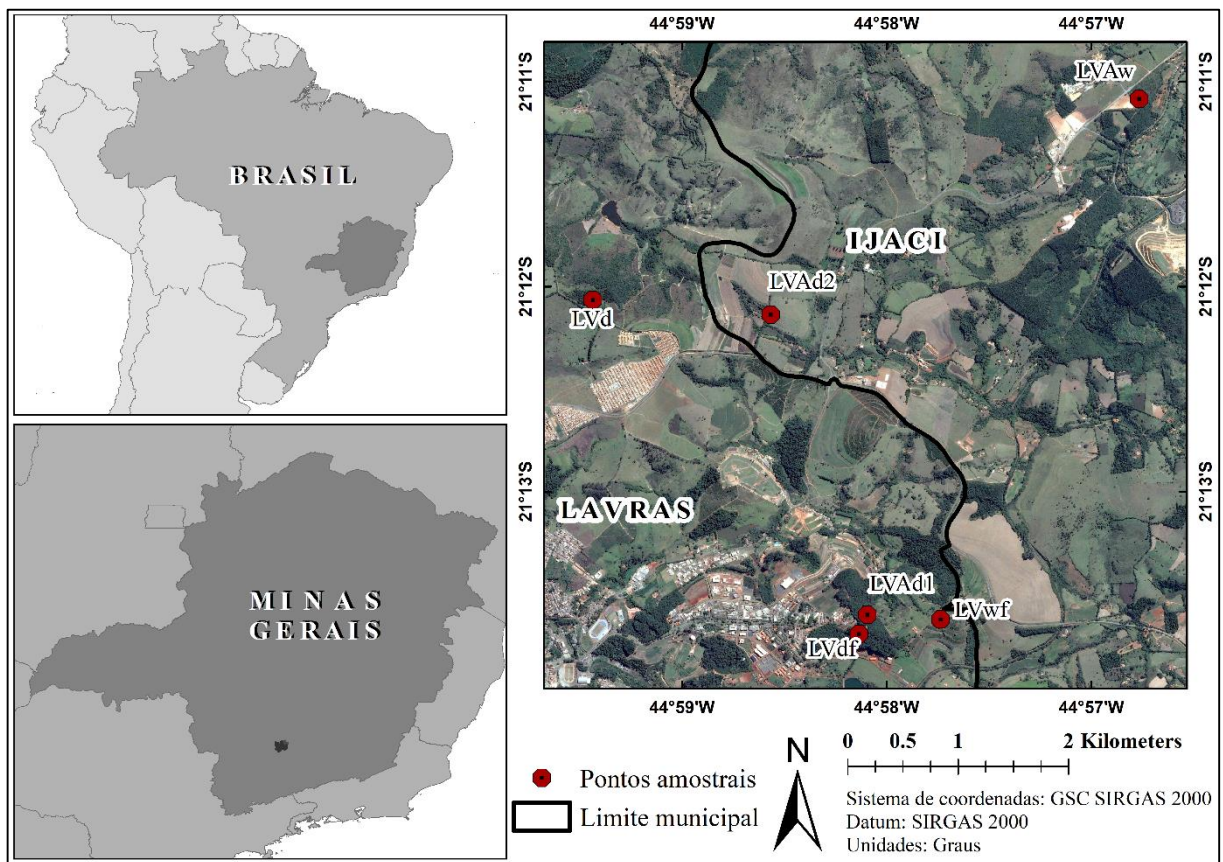
3.1 Coleta e preparo das amostras de solo

Os solos foram coletados nos municípios de Lavras e Ijaci, Minas Gerais, Brasil (FIGURA 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cwa (subtropical úmido) (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007), com precipitação média anual de 1.529 mm e temperatura média nos meses mais frios de 17°C e 23°C nos meses mais quentes (LIMA JÚNIOR et al., 2012). A altitude média da região de influência dos pontos amostrados é de 943 m.

Foram selecionados seis Latossolos classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS et al., 2013) como: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd1 e LVAd2); Latossolo Vermelho Amarelo ácrico (LVAw); Latossolo Vermelho Acriférrico (LVwf); Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) e Latossolo Vermelho Distrófico (LVd). Os solos se diferenciam, principalmente, quanto à textura, matéria orgânica, pH, material de origem e grau de intemperismo. Em relação ao material de origem, os solos

LVAd1 e LVAd2 foram originados de gnaiss; os solos LVwf e LVdf originaram-se de gabro; já o solo LVAw originou-se de calcário e, o LVd, originado a partir de uma associação entre gabro e gnaiss melanocrático. LVAw está sob vegetação de Cerrado *Stricto Sensu* denso. LVwf e LVdf sob floresta semidecidual estacional. LVAd1 sob cultivo perene (café). LVAd2 e LVd sob pastagem natural.

Figura 1 - Localização dos Latossolos na região dos municípios de Lavras e Ijaci, MG, Brasil, selecionados para o estudo.



Fonte: Do autor (2018).

Em cada ponto mostrado na Figura 1, em um raio de 50 m, retiraram-se, aleatoriamente, quatro amostras compostas da camada 0-5 cm (repetições de campo). Cada amostra composta foi formada por quatro amostras simples. Após a coleta, as amostras foram secadas ao ar e passadas em peneira de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) e agregados de tamanho 12 a 19 mm e 4 a 8 mm. As quatro amostras compostas foram misturadas e divididas em três partes (“*quarteamento*”). Cada uma dessas três partes funcionou como uma repetição de laboratório. Não foi objetivo deste trabalho estudar a variabilidade espacial inerente de cada solo, e sim a obtenção de uma amostra representativa da classe de solo considerada em uma

área de 0,785 ha (raio de 50 m). A amostragem foi realizada na camada 0 – 5 cm por ser a que mais sofre alteração da temperatura durante queimadas (THOMAZ; ANTONELI; DOERR, 2014).

Além da fração menor que 2 mm (TFSA), foi obtida a fração argila de cada solo. Para isso, 50 g de TFSA foram adicionados em béquer com capacidade para 250 mL contendo 190 mL de água destilada e 10 mL de solução NaOH 0,1 mol L⁻¹. Para dispersão do solo, foi utilizado um equipamento de ultrassom do tipo haste (QSonica®). A haste do equipamento (19 mm de diâmetro) foi inserida a 2 cm de profundidade na suspensão, procedendo-se a sonificação por 5 min a uma potência de 80W, calculada com base em técnicas calorimétricas sumarizadas por Sá et al. (2000). Após a completa dispersão, a fração areia foi retida em peneira de 0,053 mm de abertura e, ao mesmo tempo, transferida a suspensão silte + argila para provetas com capacidade para 1.000 mL. A fração argila foi sequencialmente extraída por sifonamento após sedimentação da fração silte utilizando-se a Lei de Stokes para cálculo do tempo de sedimentação.

3.2 Tratamento térmico dos solos

O aquecimento dos solos foi realizado em condições laboratoriais utilizando-se Forno Mufla Lavoisier com controle de temperatura digital HW1000 Coel. As amostras de TFSA e argila foram acondicionadas em cápsulas de porcelana (11 cm de diâmetro e 7 cm de altura) e submetidas durante 30 minutos às seguintes temperaturas (° C): 100, 200, 300, 400, 500 e 600. As temperaturas escolhidas estão na faixa comumente empregada para estudos dos efeitos de queimadas em condições laboratoriais (ALCANIZ et al, 2018; MATAIX-SOLERA, et al, 2011). As amostras de solo que não sofreram aquecimento (amostras-controle), foram consideradas como sendo equivalente à temperatura de 20° C - temperatura média histórica anual da região estudada (LIMA JÚNIOR et al., 2012). O tempo de exposição (30 minutos) às diferentes temperaturas tem sido comumente empregado em outros trabalhos (GIOVANNINI, 1994). Após cada aquecimento, o forno mufla foi desligado e as amostras imediatamente retiradas e deixadas em condições laboratoriais para resfriamento ao ar.

Para verificação da precisão do forno mufla quanto ao alcance e estabilização nas diferentes temperaturas, foi inserido no interior da mufla um termopar tipo K, hermeticamente selado, modelo HSTC-TT-K-24S-36SMPW-CC (Omega™). A taxa de aumento da temperatura no forno mufla foi de 3° C min⁻¹.

3.3 Caracterização das amostras de solo

3.3.1 Caracterização física

A caracterização física envolveu a determinação da textura do solo pelo método da pipeta (Day, 1965). Para dispersão do solo, 10 g de TFSA foram acondicionados em béquer com capacidade para 250 mL contendo 190 mL de água destilada e 10 mL de solução NaOH $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. Foi utilizado um equipamento de ultrassom do tipo haste (QSonica®). A haste do equipamento (19 mm de diâmetro) foi inserida a 2 cm de profundidade na suspensão, procedendo-se a sonificação por 5 min a uma potência de 80W, calculada com base em técnicas calorimétricas sumarizadas por Sá et al. (2000). Após a completa dispersão, a fração areia foi retida em peneira de 0,053 mm de abertura e, ao mesmo tempo, transferida a suspensão silte + argila para provetas com capacidade para 500 mL. Baseado na Lei de Stokes, uma alíquota de 10 mL contendo somente a fração argila foi coletada a uma profundidade de 5 cm a partir do limite superior da suspensão no interior da proveta. O teor de silte foi determinado por diferença entre a massa inicial de solo utilizada (10 g de TFSA corrigidos para seco em estufa) e a massa de areia + argila.

3.3.2 Caracterização química

Na TFSA, determinaram-se as concentrações de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 e MnO após digestão em ácido sulfúrico (Vettori, 1969; Embrapa, 2011). Após digestão, a concentração de SiO_2 foi determinada por gravimetria; Al_2O_3 e Fe_2O_3 por titulometria; TiO_2 e P_2O_5 por colorimetria; e MnO por leitura direta no extrato obtido utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica com módulo chama.

O pH foi determinado em água e em solução KCl 1 mol L^{-1} na relação solo:solução de 1:2,5. Para isso, 6 g de solo foram adicionados em tubos de centrífuga (Falcon®) com capacidade para 50 mL acrescidos de 15 mL de água ultra-pura ou solução KCl 1 mol L^{-1} . As amostras foram agitadas por 15 minutos em agitador horizontal (120 rpm) e, logo após, deixadas em repouso por 30 minutos para leitura do pH utilizando-se um pHmetro Metler Toledo. Baseado nos valores de pH em água e em solução KCl, foram determinados o ΔpH (EQUAÇÃO 1) e estimado o ponto de carga zero (PCZ) (EQUAÇÃO 2).

$$\Delta\text{pH} = \text{pH em KCl} - \text{pH em água} \quad (1)$$

$$\text{PCZ} = 2\text{pH em KCl} - \text{pH em água} \quad (2)$$

A matéria orgânica do solo (MOS) foi determinada pelo método colorimétrico após digestão com solução $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ em meio ácido (H_2SO_4) (REID; COPELAND, 1966). Os cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}) foram extraídos em solução KCl 1 mol L^{-1} (relação solo:solução 1:10). Para isso, 10 g de solo foram adicionados em erlenmeyers com capacidade para 250 mL acrescidos de 100 mL da solução extratora. As amostras foram agitadas por 15 minutos e deixadas em repouso durante a noite (16 horas). No extrato obtido e filtrado, Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica com módulo chama. Al^{3+} foi determinado por titulação com solução NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. P, Cu, Fe, Mn e Zn foram extraídos em solução Mehlich-1. P foi quantificado pelo método colorimétrico em solução ácida de molibdato de amônio. Cu, Fe, Mn e Zn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica com módulo chama. O S-SO_4^{2-} foi extraído em solução de fosfato de cálcio, em ácido acético segundo Hoefft, Walsh e Keeney (1973). B foi pelo método da água quente (AGEU et al., 1994; WOLF, 1971). $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ foi estimado pelo pH SMP (QUAGGIO; RAIJ, 2001).

Na fração argila, foram determinadas as concentrações de Fe extraído em solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fe_d) (MEHRA, JACKSON, 1960) e em solução de oxalato de amônio (Fe_{ox}) (SCHWETMANN, 1973; JACKSON et al., 1986).

3.3.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada na fração argila pelo método do pó (JACKSON, 1979) utilizando-se um difratômetro de raios-X D2 Phaser Bruker®, equipado com detector rápido linear (LYNXEYETM) e software de análise (DIFFRAC.SUITE™). As análises foram realizadas nas seguintes condições operacionais: tensão de 30 kVA; corrente de 10 mA; faixa de varredura de 4 a $50^\circ 2\theta$; fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54\text{\AA}$) e filtro de Ni. Também na fração argila, realizou-se a caracterização por espectrometria de infravermelho (MID-IR) utilizando-se o equipamento Varian 600-IR Series. Espectros do MID-IR foram obtidos em uma faixa espectral de $4400 - 400 \text{ cm}^{-1}$ com resolução de 4 cm^{-1} .

3.3.4 Cor do solo

A cor do solo foi realizada utilizando-se um sensor portátil (Nix Color Sensor™) (STIGLITZ et al., 2016). Na TFSA, determinou-se a cor do solo obtendo-se os parâmetros L, a e b do sistema CIELAB (CIE Publication 15-2, 1986) (CANCELO-GONZÁLEZ et al., 2014). O parâmetro L mede a intensidade do brilho; o parâmetro a mede a associação das cores vermelho e verde; e o parâmetro b a associação entre as cores amarelo e azul. A cor do solo foi determinada por essa refletir as alterações na composição química e mineralógica do solo.

3.4 Teste de repelência à água

Para avaliar a repelência à água dos Latossolos foi utilizado o método *water drop penetration time* (WDPT) definido por Doerr (1998). O procedimento consiste no gotejamento de água destilada na superfície do solo, mensurando o tempo necessário para que a gota se infiltre totalmente. Assim, obteve-se como variável o tempo (segundos) (WESSEL, 1988). A análise foi realizada na superfície de agregados de 12 a 19 mm de diâmetro secos ao ar. Após o tratamento térmico e, previamente ao ensaio WDPT, os agregados foram colocados em bandejas plásticas e mantidos em laboratório com ambiente fechado e atmosfera controlada (20° C e umidade relativa de aproximadamente 50%) evitando influência das variações de tempo externas, com o objetivo de reduzir os efeitos potenciais das variações climáticas sobre a hidrofobicidade dos agregados de acordo com Doerr et al. (2005). A temperatura foi monitorada com uso de termômetro em ambiente de laboratório equipado com ar condicionado. A umidade relativa foi aferida com uso de um termo-higrômetro digital com sensor externo.

Para cada repetição de laboratório foram considerados 10 agregados. Portanto, para cada tratamento, o resultado de repelência à água é uma média de 30 agregados. Em cada agregado foi medido o tempo de infiltração de cinco gotas, aleatoriamente colocadas na superfície dos agregados. Para formação das gotas foram utilizadas agulhas hipodérmicas obtendo-se o diâmetro de 0,43 cm e volume igual a 0,05 mL, assumindo que a gota possui um formato totalmente esférico. As gotas foram colocadas a uma distância de 15 mm da superfície do agregado, objetivando-se descartar os efeitos da energia cinética proveniente de um possível impacto (JORDÁN; GONZÁLEZ; ZAVALA, 2010). Em todo o ensaio, 1.260 agregados foram avaliados e medida a infiltração de 6.300 gotas. Os dados obtidos foram classificados em relação ao nível de hidrofobicidade seguindo as classes definidas por Doerr et al. (1998), as quais consideram o tempo para infiltração da gota, a saber: hidrofílico (< 5s); ligeiramente

repelente à água (5 – 60 s); fortemente repelente à água (60 – 600 s); severamente repelente à água (600 – 900 s); extremamente repelente à água (> 3.600 s).

3.5 Estabilidade de agregados em água

A estabilidade de agregados em água foi realizada pelo tradicional método do peneiramento úmido (YODER, 1936; KEMPER; CHEPIL, 1965), com modificações. Para cada repetição de laboratório, foram pesados 25 g de agregados secos ao ar de tamanho 4 a 8 mm. Em uma bandeja contendo areia molhada e coberta por papel filtro procedeu-se o pré-umedecimento lento dos agregados por capilaridade com água destilada durante 16 horas. Após esse período, os agregados foram totalmente transferidos para uma peneira de 2 mm. Essa peneira foi colocada sobre um conjunto de peneiras sobrepostas de abertura (mm): 1,0; 0,5; 0,25; e 0,105. O conjunto de peneiras foi imerso em um recipiente contendo água e agitado verticalmente utilizando-se o aparelho de Yoder. As amostras foram agitadas por 15 minutos com amplitude (deslocamento) igual a 4 cm e 30 oscilações por minuto.

Após o período de agitação, os agregados retidos em cada peneira foram recolhidos e secados em estufa a 105° C por 48 horas. Assim, obteve-se a massa de agregados das seguintes classes de tamanho: 8,0 a 2,0 mm; 2 a 1,0 mm; 1,0 a 0,5 mm; 0,5 a 0,25 mm; 0,25 a 0,105 mm; e < 0,105 mm. Essa última foi obtida pela diferença entre a massa total de agregados e a massa de agregados presente em cada uma das peneiras utilizadas. Com base nessa distribuição dos agregados, foram calculados o diâmetro médio geométrico (DMG) (EQUAÇÃO 3) (MAZURACK, 1950) e o índice de estabilidade dos agregados (IEA) (EQUAÇÃO 4) (THOMAZ, 2017).

$$\text{DMG}=10^X \quad (3)$$

$$X = \sum n \cdot \log d$$

Em que: DMG é o diâmetro médio geométrico (mm); n é a porcentagem (decimal) de agregados em cada classe de tamanho considerada; d é o diâmetro médio da classe de tamanho considerada (mm).

$$\text{IEA} = \left(\frac{M_1 - M_2 - M_3}{M_0 - M_3} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Em que: IEA é a porcentagem de agregados estáveis (%); M_1 é a massa de agregados maiores que 0,25 mm (g); M_2 é a massa de agregados menores que 0,25 mm (g); M_3 é a massa-equivalente areia no solo (g); M_0 é a massa inicial de agregados (g).

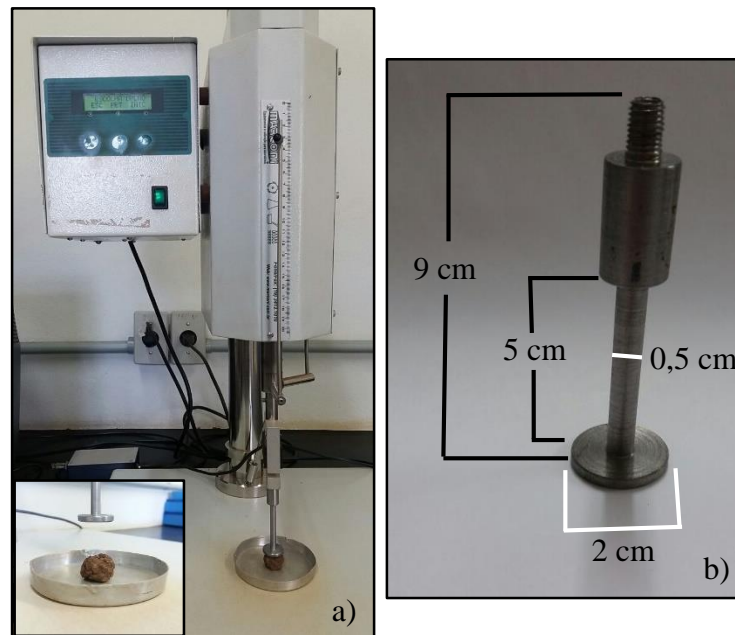
Como afirma Castro Filho et al. (2002) e Hillel (1998), o DMG indica a frequência com que as classes de agregados maiores ocorreram, enquanto o IEA indica a agregação do solo expressa em valores de 0 – 100%, sendo os dois parâmetros amplamente encontrados na literatura. Além disso, os dados foram avaliados de acordo com a distribuição dos agregados por classe de tamanho, considerando a porcentagem de agregados retidos em cada peneira após a realização do teste do peneiramento úmido.

3.6 Resistência tênsil dos agregados

A resistência tênsil (RT) foi realizada em agregados com 12 a 19 mm de diâmetro, como proposto por Imhoff, Silva e Dexter (2002), e padronizados em relação ao seu formato por meio da suavização de suas arestas com a utilização de uma lixa, procurando reduzir a variabilidade quanto ao efeito geometria, como comprovado por Seben Júnior et al. (2013). Tentou-se atingir um formato o quanto mais próximo do esférico.

Para cada repetição de laboratório, foram utilizados 10 agregados secos ao ar. Cada agregado utilizado foi pesado e medido o seu diâmetro com um paquímetro digital. Para realização do ensaio de RT foi utilizado um penetrômetro de bancada da marca Marconi® dotado de uma haste de 9 cm de comprimento e 0,5 cm de diâmetro, conectada a uma ponta circular plana com 2 cm de diâmetro (FIGURA 2).

Figura 2 – Detalhe do penetrômetro de bancada dotado de uma célula de carga e sistema computadorizado (a). (b) Haste utilizada para o teste de resistência à penetração (RT).



Fonte: Do autor (2018).

Cada agregado foi colocado na sua posição mais estável (FIGURA 2a) e submetido ao contato com a base plana da haste, a qual se deslocou a uma velocidade constante de $0,3 \text{ mm s}^{-1}$. Por meio de uma célula de carga (capacidade máxima 20 kgf) e sistema computadorizado, foram registrados os valores da força (kgf) até o momento da ruptura do agregado. Após a ruptura dos agregados os mesmos foram secados em estufa a 105° C por 24 horas para determinação da umidade.

Para cada agregado, a RT foi calculada de acordo com Dexter e Kroesbergen (1985) (EQUAÇÃO 5).

$$RT = 0,576 \cdot \frac{P}{D^2} \quad (5)$$

Sendo: RT é a resistência têsnil (kPa); 0,576 é a constante de proporcionalidade que representa a relação entre o estresse compressivo e o stressse têsnil resultante no interior do agregado; P é a força necessária para a ruptura do agregado (N); D é o diâmetro médio efetivo do agregado (m).

O diâmetro médio efetivo foi calculado de acordo com Watts e Dexter (1998) (EQUAÇÃO 6):

$$D = D_m \cdot \left[\left(\frac{M_i}{M_m} \right)^{1/3} \right] \quad (6)$$

Sendo: D é o diâmetro médio efetivo (mm); D_m é o diâmetro médio dos agregados (mm); M_i é a massa individual de cada agregado (g); M_m é a massa média dos agregados de cada população (cada conjunto de 10 agregados) (g).

Após a obtenção do diâmetro médio (D) e Resistência tensil para cada agregado, foi atribuído o valor de resistência tensil médio para cada temperatura de aquecimento nos seis solos.

3.7 Caracterização inicial dos solos

Na Tabela 1, são apresentados os atributos químicos e físicos dos solos selecionados para o estudo.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos dos Latossolos selecionados para o estudo.

Atributos	Solo					
	LVAd1	LVAd2	LVAw	LVwf	LVdf	LVd
pH em água	6,70 ± (0,01)	5,90 ± (0,02)	6,70 ± (0,05)	4,80 ± (0,04)	4,40 ± (0,02)	6,10 ± (0,03)
pH em KCl	5,60 ± (0,10)	5,10 ± (0,02)	6,00 ± (0,03)	3,90 ± (0,02)	3,90 ± (0,00)	5,10 ± (0,02)
ΔpH	-1,0 ± (0,1)	-0,8 ± (0,1)	-1,00 ± (0,1)	-1,0 ± (0,1)	-0,5 ± (0,0)	-1,0 ± (0,1)
PCZ	4,60 ± (0,07)	4,20 ± (0,05)	7,40 ± (0,06)	3,10 ± (0,02)	3,40 ± (0,02)	4,10 ± (0,04)
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4,04 ± (0,30)	(2,50 ± 0,08)	2,69 ± (0,30)	5,76 ± (0,10)	11,7 ± (0,3)	3,70 ± (0,06)
t (cmol _c dm ⁻³)	4,40 ± (0,30)	2,30 ± (0,06)	5,40 ± (0,04)	2,20 ± (0,04)	2,20 ± (0,03)	4,60 ± (0,03)
T (cmol _c dm ⁻³)	8,80 ± (0,58)	4,30 ± (0,49)	8,80 ± (0,32)	4,20 ± (0,01)	6,70 ± (0,13)	8,20 ± (0,03)
V (%)	49,2 ± (0,1)	44,2 ± (1,9)	59,1 ± (0,6)	30,1 ± (1,6)	3,40 ± (0,22)	38,6 ± (1,8)
m (%)	2,30 ± (0,14)	4,40 ± (0,16)	1,80 ± (0,01)	40,9 ± (0,8)	81,6 ± (1,3)	1,90 ± (0,01)
MOS (g kg ⁻¹)	33,1 ± (0,1)	29,2 ± (0,5)	33,4 ± (0,3)	37,1 ± (1,1)	43,6 ± (1,1)	38,0 ± (2,6)
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	181,0 ± (4,4)	32,2 ± (1,5)	51,1 ± (1,6)	42,0 ± (0,1)	46,2 ± (0,6)	99,0 ± (7,4)
P (mg kg ⁻¹)	11,0 ± (0,6)	0,60 ± (0,04)	1,00 ± (0,01)	3,2 ± (0,2)	1,80 ± (0,04)	1,10 ± (0,12)
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	3,0 ± (0,2)	1,90 ± (0,06)	5,00 ± (0,03)	0,90 ± (0,02)	0,20 ± (0,01)	3,60 ± (0,01)
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,8 ± (0,1)	0,20 ± (0,01)	0,20 ± (0,01)	0,20 ± (0,02)	0,10 ± (0,01)	1,2 ± (1,7)
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,10 ± (0,01)	0,10 ± (0,01)	0,10 ± (0,01)	0,90 ± (0,01)	1,80 ± (0,01)	0,10 ± (0,01)
Zn (mg kg ⁻¹)	3,7 ± (0,2)	0,40 ± (0,04)	1,51 ± (0,20)	0,81 ± (0,20)	0,30 ± (0,01)	0,51 ± (0,20)
Fe (mg kg ⁻¹)	85,0 ± (8,2)	93,0 ± (1,3)	32,7 ± (2,5)	140,0 ± (8,3)	134,0 ± (6,5)	38,7 ± (3,2)
Mn (mg kg ⁻¹)	15,0 ± (4,7)	8,13 ± (0,20)	13,0 ± (1,3)	58,6 ± (5,9)	4,0 ± (0,7)	14,5 ± (2,6)
Cu (mg kg ⁻¹)	1,60 ± (0,03)	0,20 ± (0,03)	0,20 ± (0,02)	3,30 ± (0,14)	1,80 ± (0,03)	0,10 ± (0,01)
B (mg kg ⁻¹)	0,10 ± (0,01)	0,10 ± (0,01)	0,10 ± (0,03)	0,10 ± (0,02)	0,10 ± (0,01)	0,10 ± (0,03)
S (mg kg ⁻¹)	17,0 ± (0,15)	3,84 ± (0,80)	7,68 ± (3,30)	5,30 ± (0,34)	10,9 ± (0,2)	4,12 ± (0,30)
Argila (g kg ⁻¹)	589,0 ± (7,7)	483,0 ± (7,3)	803,0 ± (6,3)	423 ± (11)	777,0 ± (6,3)	604,0 ± (9,8)
Silte (g kg ⁻¹)	78,3 ± (3,4)	66,6 ± (1,9)	92,1 ± (4,7)	129 ± (10)	79,6 ± (5,9)	61,3 ± (9,3)
Areia (g kg ⁻¹)	333,0 ± (5,9)	450,0 ± (5,4)	105,0 ± (1,8)	448,0 ± (1,1)	144,0 ± (0,8)	334,0 ± (0,7)
Fe _{ox.} (g kg ⁻¹)	1,80 ± (0,01)	1,50 ± (0,03)	1,50 ± (0,04)	2,00 ± (0,04)	2,40 ± (0,03)	1,70 ± (0,01)
Fe _d (g kg ⁻¹)	41,0 ± (0,6)	42,9 ± (0,8)	65,1 ± (2,4)	43,0 ± (0,6)	93,7 ± (1,8)	45,3 ± (0,7)
SiO ₂ ^{1/} (g kg ⁻¹)	175,9	119,4	233,3	168,6	103,4	138,8
Al ₂ O ₃ ^{1/} (g kg ⁻¹)	203,2	191,7	279,4	154,7	237,4	216,6
Fe ₂ O ₃ ^{1/} (g kg ⁻¹)	85,9	77,2	143,1	83,3	213,1	89,1
TiO ₂ ^{1/} (g kg ⁻¹)	13,07	9,26	14,69	14,89	20,32	16,27
P ₂ O ₅ ^{1/} (g kg ⁻¹)	0,86	0,35	1,46	0,59	0,99	0,75
MnO ^{1/} (g kg ⁻¹)	0,37	0,21	0,44	1,52	0,61	0,44

^{1/} Óxidos do ataque sulfúrico (Vettori, 1969); PCZ: ponto de carga zero; t: capacidade de troca de cátions efetiva; T: capacidade de troca de cátions potencial a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MOS: matéria orgânica do solo. Valores entre parênteses indicam o desvio-padrão da média (n=3).

3.8 Tratamento estatístico dos dados

Para cada variável estudada e para cada solo, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA para cada solo. (Teste F; $p < 0,05$; $n=3$) e realizado teste de média (Scott-Knott) para verificar o efeito das diferentes temperaturas empregadas. Não foi objetivo do trabalho estabelecer regressões para prever a alteração de algum atributo em função do aumento da temperatura. Apenas para matéria orgânica do solo e, após análise prévia dos resultados obtidos, foi identificado um possível comportamento de variação e, portanto, buscou-se na biblioteca do Software Sigma Plot (versão 12.5) um modelo que pudesse descrever o comportamento observado – redução do conteúdo de matéria orgânica em função da temperatura. Foi escolhido o modelo *four parameter logistic curve*, conforme apresentado na equação 3.

$$MOS = MOS_{\min.} + \left[\frac{MOS_{\max.} - MOS_{\min.}}{1 + \left(\frac{T}{MOS_{50}} \right)^b} \right] \quad (3)$$

Sendo: MOS é a matéria orgânica do solo ($g\ kg^{-1}$); $MOS_{\max.}$ e $MOS_{\min.}$ representam a concentração máxima e mínima de matéria orgânica estimada pelo modelo, respectivamente; T é a temperatura experimentada pelo solo; MOS_{50} representa a temperatura para a redução da matéria orgânica do solo em 50%; b representa a taxa de redução (*slope*) da matéria orgânica do solo em função da temperatura.

4. RESULTADOS

4.1 Alterações nos atributos avaliados dos solos com o aquecimento

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise estatística (Teste F; $p < 0,05$) e coeficiente de variação para os atributos estudados sob efeito do aquecimento. Observa-se que todos os atributos foram significativos, exceto para o K no LVwf ($p=0,65$) e Mg no LVdf ($p=0,49$). E o efeito do aquecimento foi significativo para todos os atributos e solos, exceto DMG no LVAw e IEA no LVD.

Tabela 2 – Teste F (valor de p) e coeficiente de variação (cv) para o efeito do aquecimento em cada Latossolo estudado.

Atributos	LVAd1		LVAd2		LVAdw		LVwf		LVdf		LVd	
	p	c.v.	p	c.v.	P	c.v.	p	c.v.	p	c.v.	p	c.v.
pH (água)	<0,001	0,5	<0,001	0,4	<0,001	0,55	<0,001	0,8	<0,001	1	<0,001	1
ΔpH	<0,001	13,9	<0,001	8	<0,001	10,43	<0,001	8,3	<0,001	6,3	<0,001	12,7
PCZ estimado	<0,001	1,9	<0,001	0,6	<0,001	1,04	<0,001	2,1	<0,001	1,1	<0,001	1,4
P (mg kg ⁻¹)	0,004	16,7	<0,001	11,5	0,001	23,46	<0,001	13,5	<0,001	12,9	0,001	22,3
K (mg kg ⁻¹)	<0,001	9	<0,001	6,4	<0,001	3,43	0,65	9,6	<0,001	5,2	<0,001	8,3
Mg (cmolc dm ⁻³)	<0,001	7,4	<0,001	6,2	<0,001	13,62	0,001	9,9	0,49	5,3	<0,001	9,1
S (mg kg ⁻¹)	<0,001	13,7	<0,001	9,8	0,001	17,55	<0,001	14,3	<0,001	14,9	<0,001	13,1
Ca (cmolc dm ⁻³)	<0,001	11,6	<0,001	4	0,002	14,29	<0,001	6,6	0,004	12,3	0,001	10,7
B (mg kg ⁻¹)	<0,001	16,5	<0,001	21,5	0,02	18,34	0,001	20,8	<0,001	23,6	0,007	29,5
Fe (mg kg ⁻¹)	<0,001	12	<0,001	11,1	<0,001	16,95	<0,001	9,6	<0,001	7,4	<0,001	15,8
Cu (mg kg ⁻¹)	<0,001	6,8	<0,001	19,4	<0,001	5,89	<0,001	9,5	<0,001	10,3	<0,001	11,4
Mn (mg kg ⁻¹)	<0,001	11,1	<0,001	6	0,004	22,08	<0,001	11,6	<0,001	13,4	<0,001	9,7
Zn (mg kg ⁻¹)	<0,001	5	<0,001	10,2	<0,001	11,92	<0,001	17,6	<0,001	13,4	<0,001	11,2
t (cmolc dm ⁻³)	<0,001	8,1	<0,001	3,3	<0,001	1,92	<0,001	7,6	<0,001	1,7	<0,001	3,6
t (cmolc dm ⁻³)	<0,001	1	<0,001	11	0,001	12,62	<0,001	18,2	<0,001	21,4	0,003	14,4
Al (cmolc dm ⁻³)	0,009	52,8	<0,001	6,7	0,01	73,88	<0,001	20,8	<0,001	24,8	0,002	60,8
H + Al (cmolc dm ⁻³)	<0,001	8,9	<0,001	9,8	<0,001	10,34	<0,001	3,7	<0,001	4,4	<0,001	3,1
V (%)	<0,001	1,9	<0,001	4,4	<0,001	3,26	0,01	6,6	<0,001	7,5	<0,001	5
m (%)	0,01	53,1	<0,001	11,7	0,02	61,24	<0,001	14,6	<0,001	5,8	<0,001	25,5
Fe _{ox.} /Fe _d	0,39	10,8	<0,001	5,4	<0,001	9,5	<0,001	2,9	<0,001	3,9	0,001	4,3
WDPT	<0,001	22,5	<0,001	15,4	<0,001	19,2	<0,001	19,4	<0,001	40	<0,001	17,2
DMG	<0,001	0,8	<0,001	0,7	0,71	0,9	<0,001	1,5	<0,001	0,4	0,004	0,7
IEA	<0,001	0,3	0,05	0,5	<0,001	0,1	0,0003	0,6	<0,001	0,3	0,23	0,5
RT	0,002	28,8	<0,001	22,2	0,01	9,2	0,0002	10,8	<0,001	32,8	<0,001	22

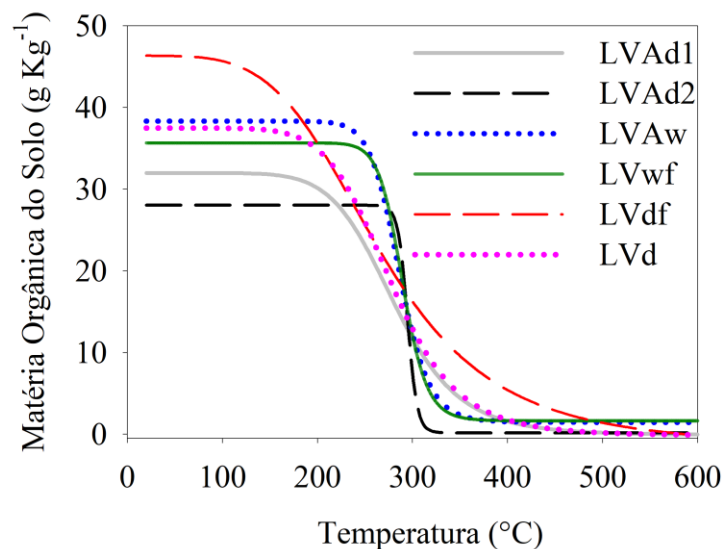
WDPT – Tempo para penetração da gota de água (s); DMG – Diâmetro médio geométrico (mm); IEA – índice de estabilidade dos agregados (%); RT – Resistência tensil dos agregados (KPa).

4.2 Matéria orgânica do solo (MOS)

Na Tabela 3, são apresentados os valores de p (Teste F) e R² para o modelo *four parameter logistic curve* (EQUAÇÃO 3) ajustado aos resultados da concentração de MOS em função da temperatura (FIGURA 3). Para todos os solos, o modelo ajustado foi significativo (p<0,01) com altos valores de R². Os valores de MOS_{máx.} estimados pelo modelo variaram de 28 g kg⁻¹ (LVAd2) a 46 g kg⁻¹ (LVdf). Esses valores correspondem aos valores observados de 29 e 44 g kg⁻¹, respectivamente. A temperatura para diminuição da MOS em 50% variou de

266° C a 295° C. A taxa de decaimento do conteúdo de MOS (parâmetro b), em módulo, variou de 4,37 g kg⁻¹ °C⁻¹ (LVdf) a 58,56 g kg⁻¹ °C⁻¹ (LVAd2). Maiores valores do parâmetro b (em módulo) indicam diminuição mais rápida do conteúdo de MOS em função do aquecimento. A partir do modelo ajustado é possível, também, observar a temperatura na qual a MOS começa a ser significativamente diminuída (ponto de curvatura da parte superior das curvas). Como exemplo, no LVdf, a diminuição do conteúdo de MOS inicia após 100 °C. Entretanto, esse solo foi o que apresentou a menor taxa de decaimento. Já para o LVAd2 (menor conteúdo inicial de MOS), uma diminuição significativa da MOS aconteceu após 280° C, porém, apresentando a mais elevada taxa de decaimento.

Figura 3 - Variação na concentração de MOS em função da temperatura experimentada pelos Latossolos ajustada ao modelo *four parameter logistic curve*.



Fonte: Do autor (2018).

Tabela 3 - Significância (valor de p), R² e parâmetros do modelo *four parameter logistic curve* ajustado para a concentração de MOS em função da temperatura experimentada pelos Latossolos.

Solo	p	R ²	MOS _{máx.}	MOS _{mín.}	MOS ₅₀	b
LVAd1	< 0,01	0,99	32,00 ± (0,85)	0,0 ± (0,1)	281,0 ± (12,5)	-8,22 ± (0,57)
LVAd2	< 0,01	0,98	28,0 ± (2,1)	0,15 ± (0,50)	295,0 ± (25,4)	-58,56 ± (2,30)
LVAw	< 0,01	0,98	38,0 ± (1,7)	1,45 ± 0,15	286,0 ± (14,5)	-18,29 ± (8,30)
LVwf	< 0,01	0,96	36,00 ± (0,05)	1,65 ± (0,06)	289,0 ± (2,45)	-22,79 ± (1,50)
LVdf	< 0,01	0,97	46,0 ± (0,5)	0,00 ± (0,15)	266,0 ± (15,6)	-4,37 ± (0,60)
LVdh	< 0,01	0,99	37,00 ± (1,05)	0,00 ± (0,33)	277 ± (4)	-7,94 ± (5,30)

Valores entre parênteses indicam o desvio-padrão da média (n=3).

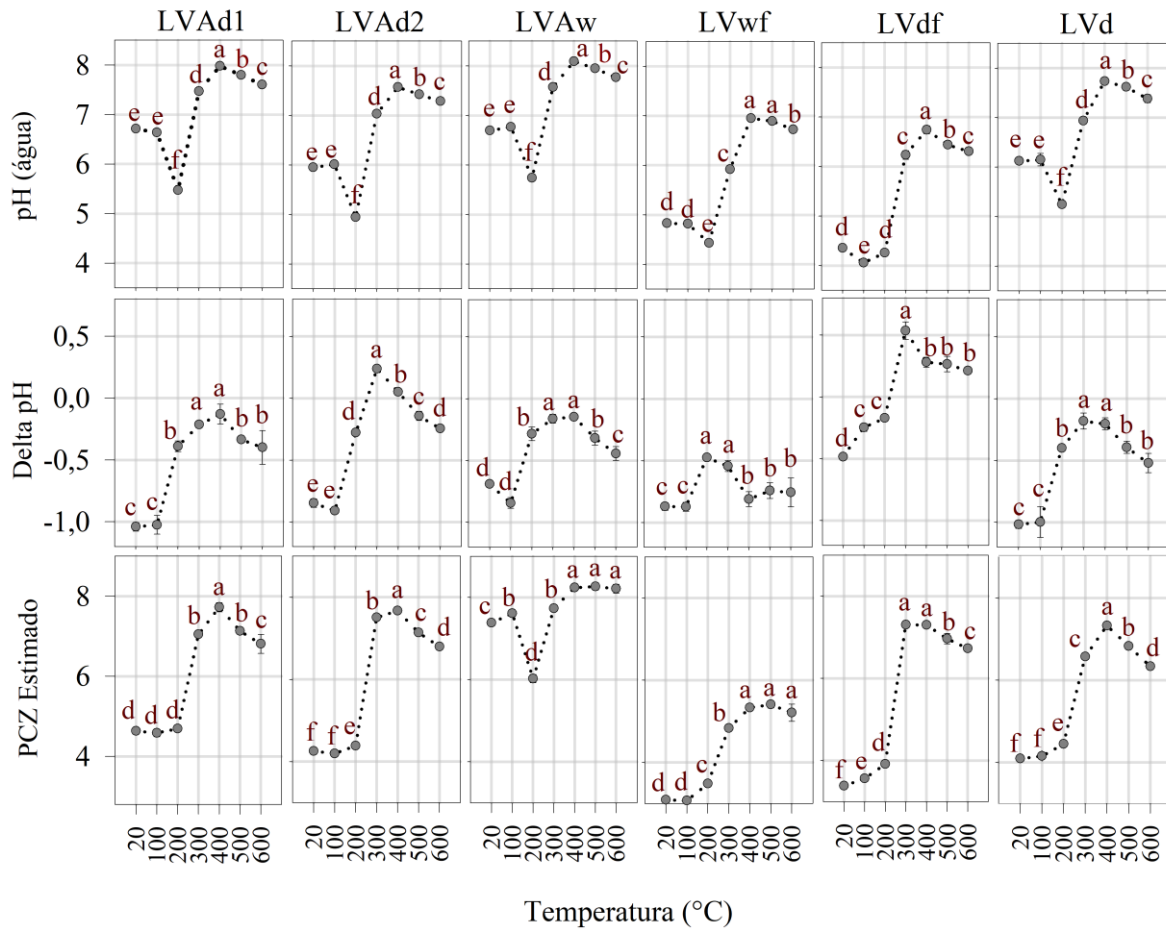
4.3 pH, ΔpH e PCZ

Em todos os solos, a variação do pH em água em função da temperatura seguiu um comportamento semelhante (FIGURA 4). Observa-se uma diminuição do pH até 200° C, seguido de um significativo aumento até 400° C. Após a temperatura de 400° C, foi observada novamente uma queda nos valores de pH. Com o aumento da temperatura de 200° C para 400° C, apenas no LVwf não foram atingidos valores de pH superiores a 7,0. Nos demais solos, atingiram-se valores próximos ou iguais a 8,0. Nessa faixa de temperatura (200°C a 400°C) a elevação do pH pode ser considerada significativa (2 a 3 unidades de pH).

Tomando-se os valores de ΔpH como uma estimativa do balanço de cargas das partículas do solo, observa-se que o aquecimento entre 300° C e 400°C tornou os solos menos eletronegativos (maiores valores de ΔpH). Após 400°C, os valores de ΔpH voltaram a diminuir. No LVAd2 na temperatura de 400° C foi obtido ΔpH = +0,25 (caráter eletropositivo). No LVdf, nessa mesma temperatura, foi atingido o valor igual a +0,50, permanecendo eletropositivamente carregado até 600°C.

Comportamento semelhante aos valores de pH e ΔpH foi observado para o PCZ (FIGURA 3). Principalmente após 200°C, os valores de PCZ dos solos foram significativamente alterados. De forma consistente, os valores máximos de PCZ são próximos aos valores máximos de pH e, também, com os valores próximos a zero para o ΔpH. Pouca ou nenhuma diferença entre pH do solo e o seu PCZ e valores próximo a zero para ΔpH são indicativos de carga líquida igual a zero em solos, o que, entre outros aspectos, favorece a floculação da fração argila e influencia na agregação.

Figura 4 - Alteração dos atributos eletroquímicos (pH água, Δ pH e PCZ estimado) em função do aquecimento dos Latossolos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

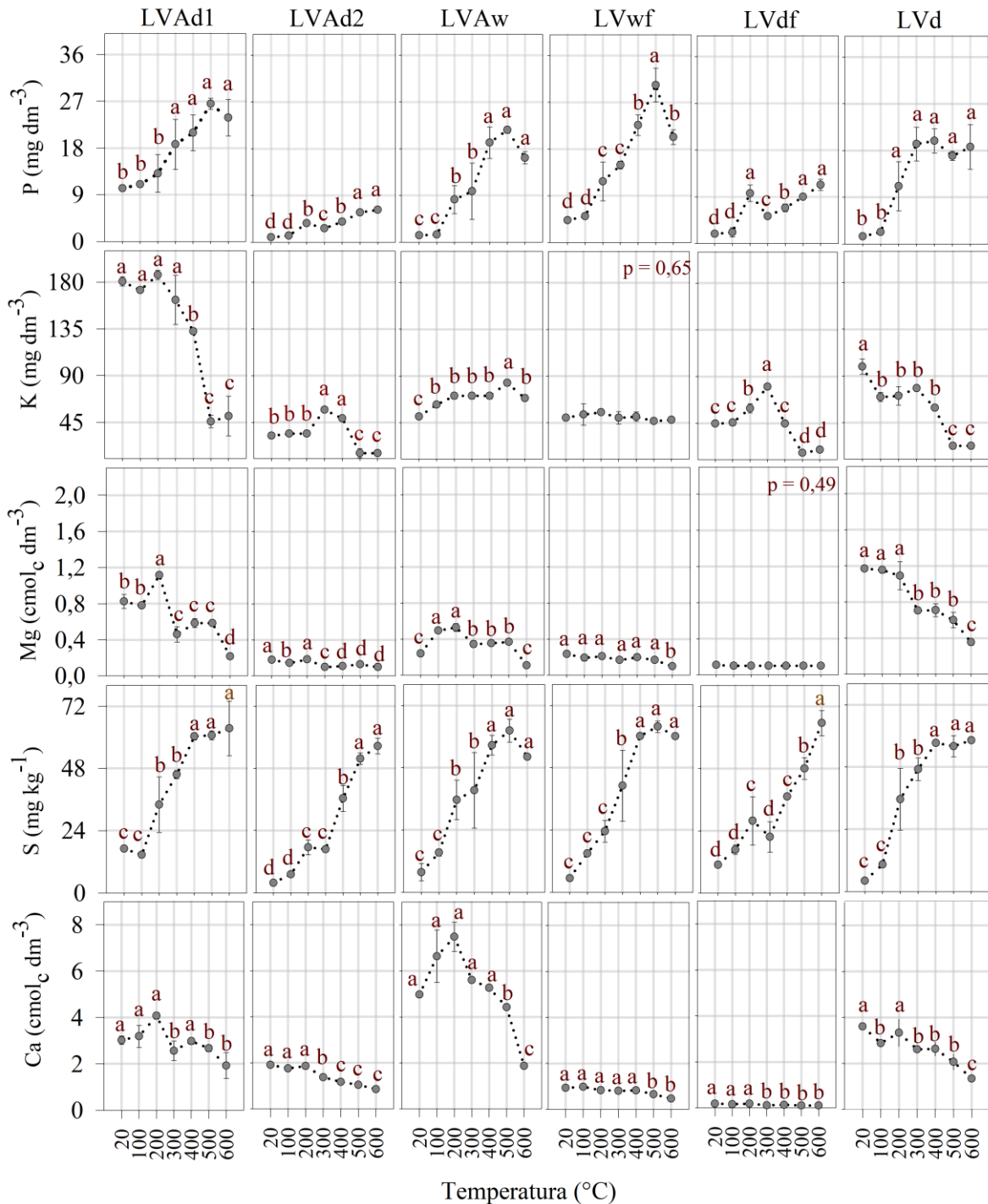


Fonte: Do autor (2018).

4.4 Macronutrientes

O teor de P-disponível aumentou significativamente com o aquecimento em todos os solos (FIGURA 5). Com exceção ao LVAd1, os teores iniciais de P (tratamento controle, 20° C) são semelhantes. Entretanto, o aumento na quantidade de P-disponível extraída em solução Mehlich-1 foi diferente. Como exemplo, para o LVwf teve-se um aumento de 26 mg dm^{-3} de P com o aquecimento a 500°C . Já para o LVAd2 o aumento foi de apenas $4,8 \text{ mg dm}^{-3}$ com o aquecimento a $500\text{-}600^\circ \text{C}$. Considerando todos os solos, o aumento médio total ($20 - 600^\circ \text{C}$) do P-disponível foi de $15,5 \text{ mg dm}^{-3}$. A temperatura de 100°C não foi suficiente para alterar o teor de P disponível nos solos. Alterações significativas ocorreram no intervalo de $200 - 500^\circ \text{C}$.

Figura 5 - Alteração na quantidade extraída dos macronutrientes (P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e S-SO₄²⁻) em função do aquecimento dos Latossolos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).



Fonte: Do autor (2018).

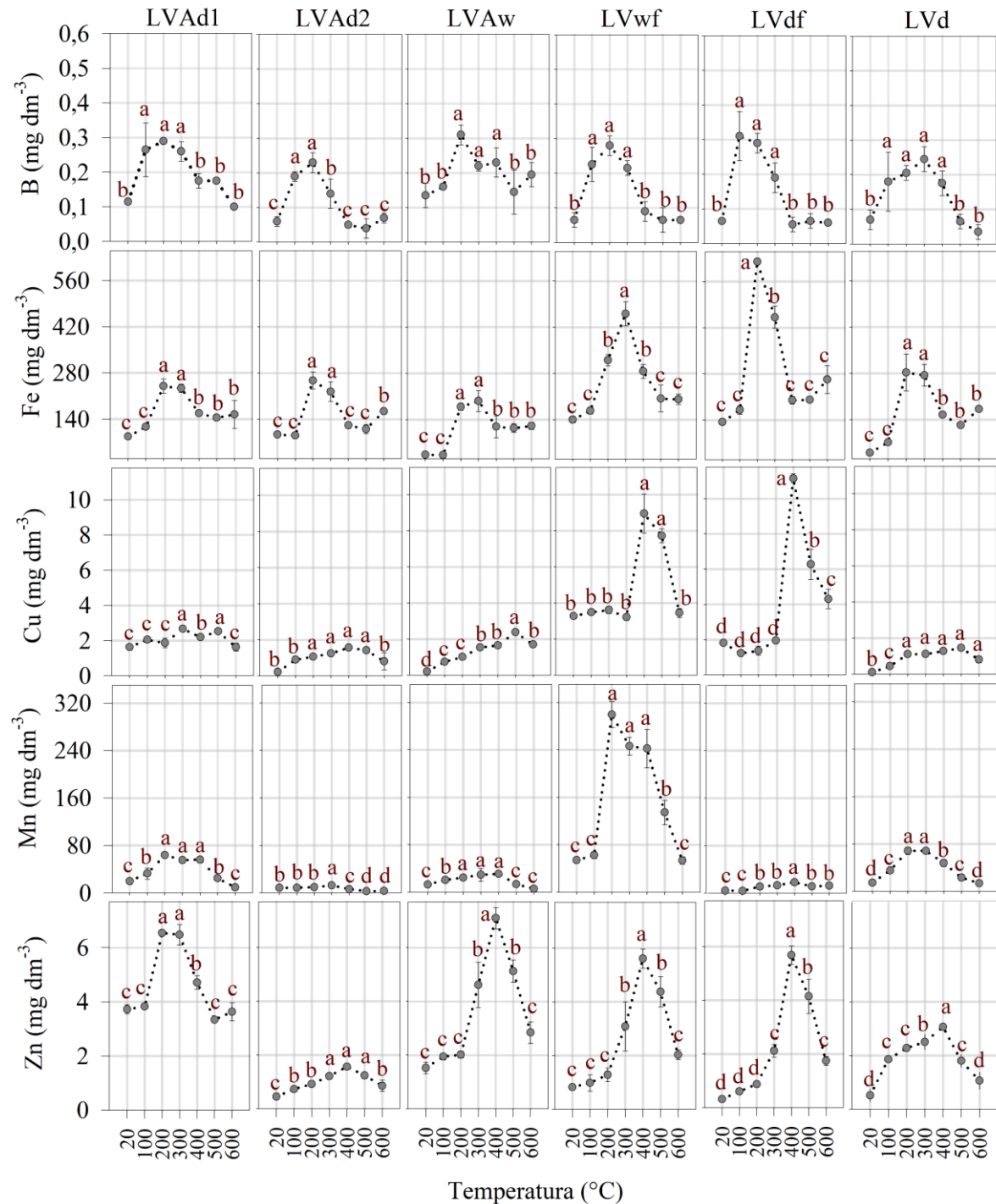
Os teores de S-SO₄²⁻ e P disponíveis, em todos os solos, aumentaram significativamente com o aquecimento, principalmente após 100° C. Para o K trocável (FIGURA 4), foi observado diferença quanto ao seu comportamento entre os solos. No LVwf não foi observado efeito do aquecimento na quantidade extraída de K. No LVAd2, LVAw e

LVdf foi observado um aumento na quantidade extraída de K na faixa de temperatura entre 300 e 500°C. Para o LVAd1 e LVd, solos com maiores teores iniciais de K trocável, uma redução significativa na quantidade extraída foi observada com o aquecimento. A tendência de diminuição também foi observada para Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis. No LVAd1 e LVAw foi observado um aumento da quantidade extraída de Ca até 200°C, com posterior diminuição até 600° C. Isso também foi observado para o Mg no LVAw. Os solos LVAd2, LVwf e LVdf apresentaram baixos teores de Mg trocável e alterações significativas não foram observadas com o aquecimento. Os solos que apresentaram teores mais elevados de Mg (LVAd1 e LVd) tiveram uma redução na quantidade extraída com o aquecimento.

4.5 Micronutrientes

Para todos os micronutrientes (B, Cu, Fe, Zn e Mn) (FIGURA 6) foi observado um aumento bastante significativo da quantidade extraída com posterior diminuição. Para B e Fe, esse aumento aconteceu na faixa de temperatura de 200° C a 300° C, reduzindo com as temperaturas mais elevadas a valores próximos ao tratamento controle (20° C). O teor de Fe consideravelmente aumentou na temperatura de 300° C e 200° C para os solos LVwf e LVdf, respectivamente. Para Cu, Mn e Zn o pico da quantidade extraída desses micronutrientes aconteceu em uma faixa de temperatura um pouco mais elevada (300-400° C), também decrescendo na temperatura mais elevada (600° C) a valores próximos do tratamento controle.

Figura 6 - Alteração na quantidade extraída dos micronutrientes (B, Fe, Cu, Mn e Zn) em função do aquecimento dos Latossolos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor (2018).

4.6 Mineralogia da fração argila

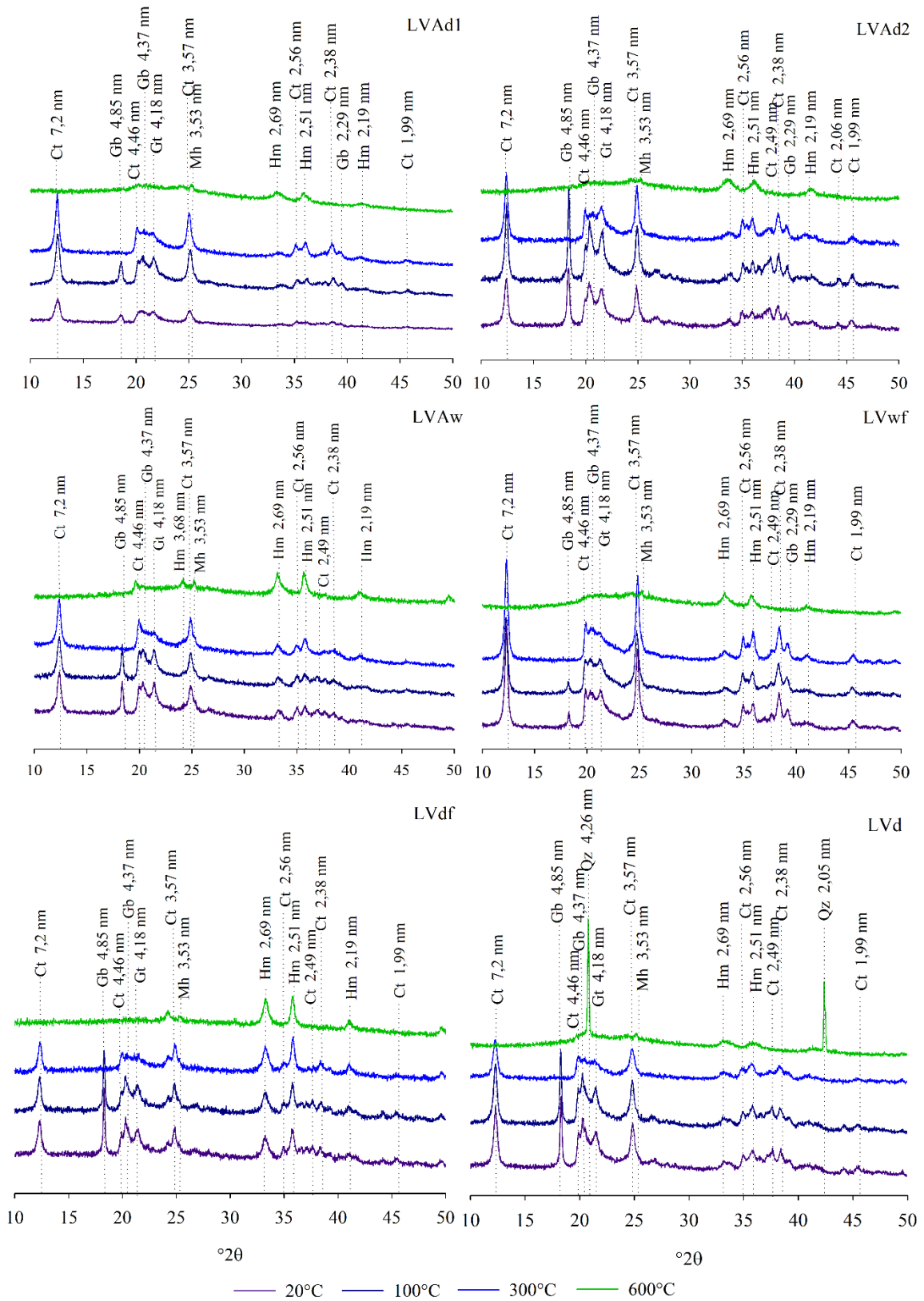
A mineralogia da fração argila (método do pó) dos Latossolos selecionados foi constituída basicamente por: caulinita (Ct), gibbsita (Gb), goethita (Gt) e hematita (Hm)

(FIGURA 7). Em todos os solos, ocorreu o desaparecimento dos picos de caulinita (12,27 e 24,91 °2θ, respectivamente) na temperatura de 600° C. Exceto no LVAd2, com a temperatura de 300° C houve o desaparecimento do pico de Gt (21,46 °2θ; d = 4,18 nm). O aquecimento a 300° C também levou ao desaparecimento da Gb (20,29 °2θ; d = 4,85). O aquecimento da fração argila levou a um aumento da intensidade dos picos de Hm (33,32 e 35,73 ° 2θ), principalmente no LVAw (600° C). Nesse mesmo solo, foi observada a formação de maghemita (Mh).

A partir do espectro obtido por MID-IR, foi possível identificar duas bandas principais: 3700 a 3300 cm⁻¹ e 1100 a 400 cm⁻¹. Essas regiões refletem a ocorrência de minerais. Todos os solos apresentaram o mesmo padrão de sinais espectrais, como apresentado nas Figuras 8 e 9. Na região 1100 a 400 cm⁻¹, picos em 1030; 1000; 914; 784; 532 e 465 cm⁻¹ são característicos da presença de minerais como caulinita, gibbsita e quartzo (MARTINELLI et al., 2014). O pico observado próximo a 1100 cm⁻¹ (1113 cm⁻¹) são atribuídos a deformação angular de O-H na gibbsita e estriamento de Si-O-Si (BENITES et al., 1999). Ainda, a ocorrência de um pico intenso em 1030 cm⁻¹ corresponde a deformação axial de Si-O de minerais silicatados (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2008). Já na região entre 3700 e 3300 cm⁻¹, onde foram identificados os picos em 3690, 3620, 3520 e 3440 cm⁻¹, os sinais representam deformação axial de O-H da caulinita e gibbsita (MAO et al., 2007).

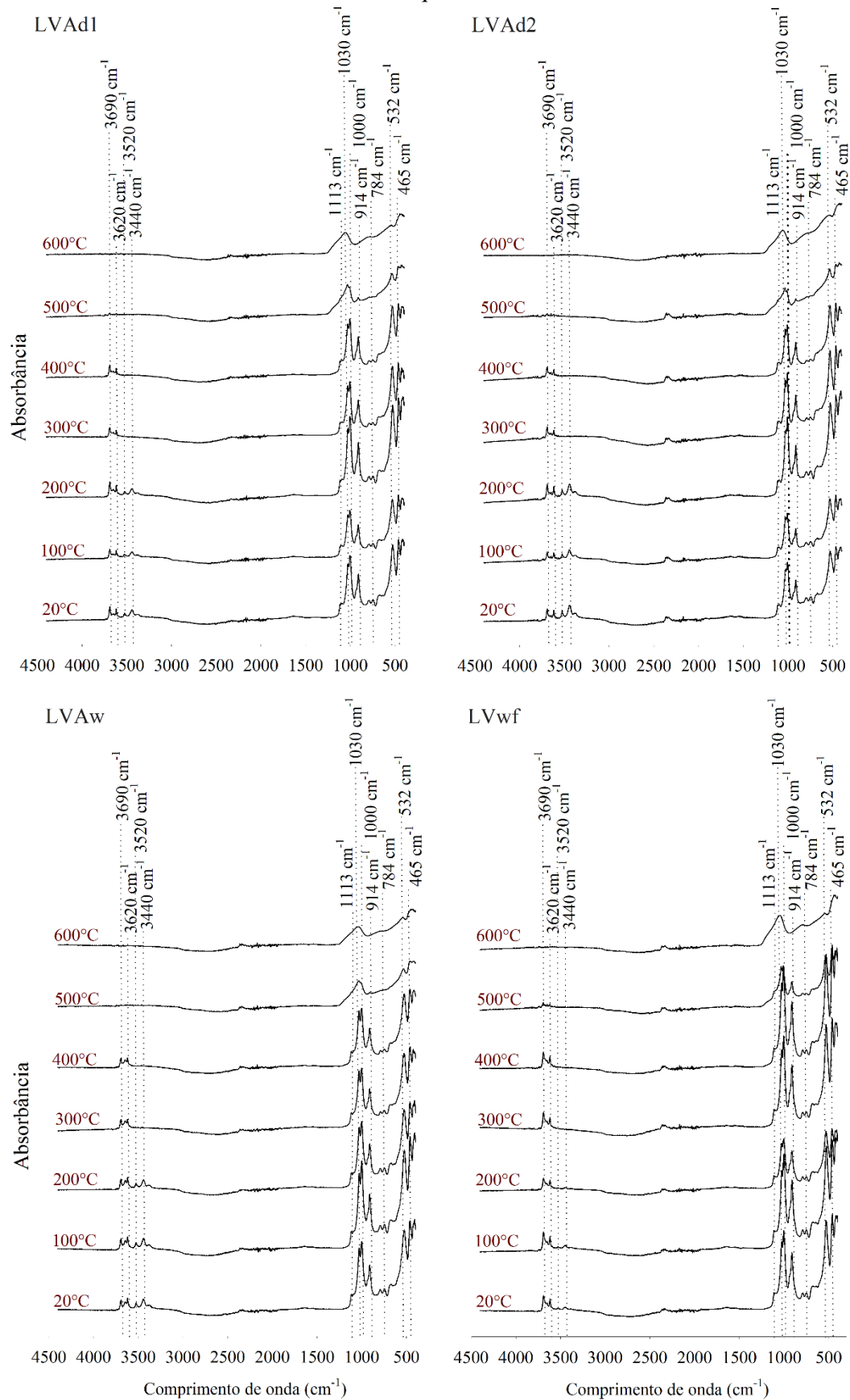
Os picos em 3520 e 3440 cm⁻¹ desaparecem a uma temperatura de 300°C. Enquanto grande parte dos picos (3690; 3620; 1113; 1000; 914; 784 cm⁻¹) desapareceram apenas a 500°C. Por fim, os picos 532 e 465 cm⁻¹ desapareceram quando as amostras foram aquecidas a 600°C. O pico em 1030 cm⁻¹ apenas sofreu redução em sua intensidade, principalmente a partir de 500°C, porém foi resistente ao aquecimento até 600°C. A espectrometria de infravermelho (FIGURA 8 e 9), confirma as alterações obtidas por difratometria de raios-X (FIGURA 7), onde há o desaparecimento de grande parte dos minerais. Identificou-se o início da degradação e alteração dos óxidos a partir de 300°C, com grandes alterações já visíveis a 400°C. O LVdf apresentou maiores reduções em seus sinais a 400°C, enquanto foi possível encontrar picos mais resistentes no LVwf, comparativamente com os demais solos.

Figura 7 - Difratomogramas de raios-X da fração argila (método do pó) dos Latossolos após tratamento térmico nas temperaturas de 100, 300 e 600° C. Ct: caulinita; Gb: gibbista; Gt: goethita; Hm: hematita; Mh: Maghemita.



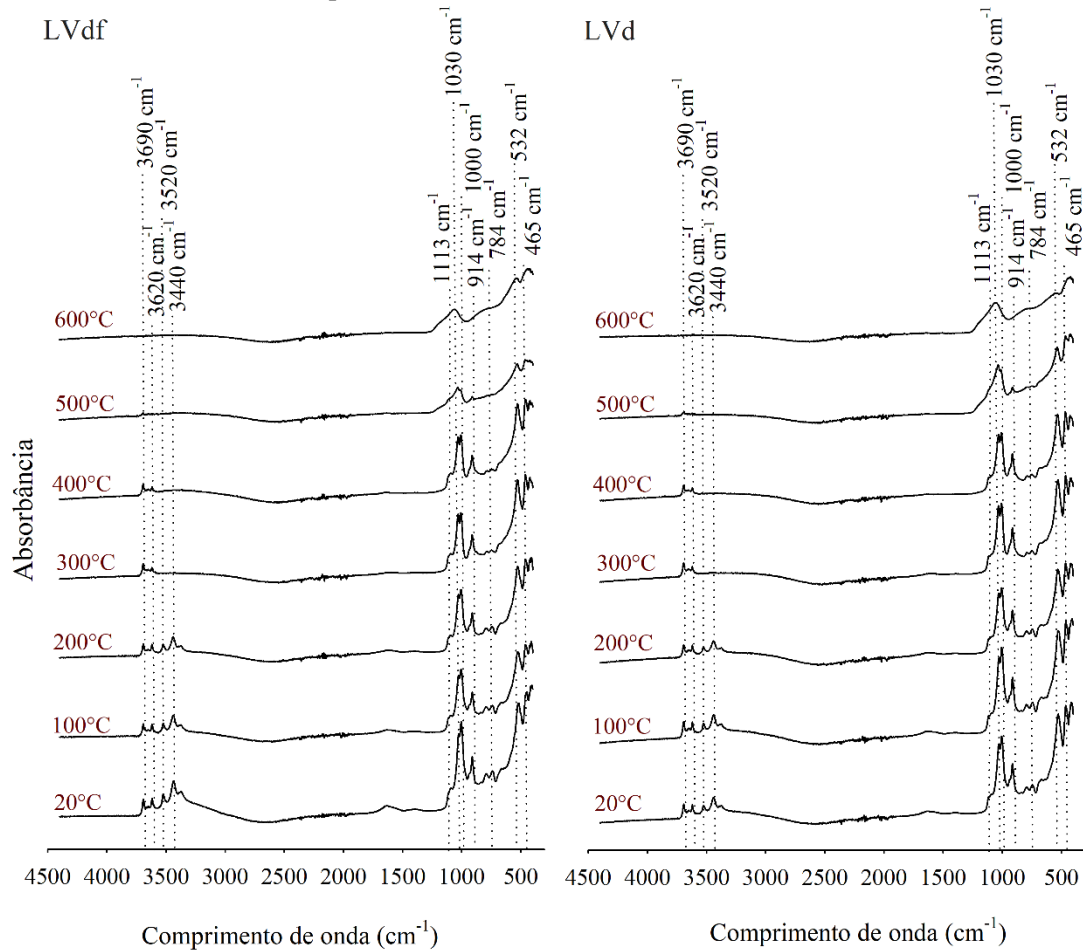
Fonte: Do autor (2018).

Figura 8 - Espectros de infravermelho médio (MID-IR) obtidos na fração argila dos Latossolos LVAd1, LVAd2, LVAw e LVwf sob efeito do aquecimento.



Fonte: Do autor (2018).

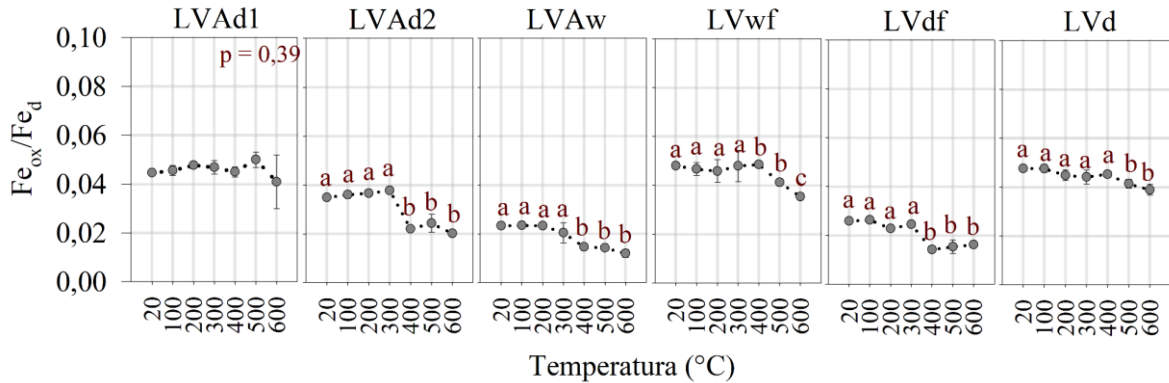
Figura 9 - Espectros de infravermelho médio (MID-IR) obtidos na fração argila dos Latossolos LVdf e LVd sob efeito do aquecimento.



Fonte: Do autor (2018).

O grau de cristalinidade dos óxidos de ferro foi avaliado pela relação Fe_{ox}/Fe_d . Os valores encontrados para essa relação foram baixos (FIGURA 10), indicando um predomínio das formas mais cristalinas. Com exceção do LVAd1 (não significativo; $p > 0,05$), após 300° C foi observada uma redução da relação Fe_{ox}/Fe_d .

Figura 10 - Relação Fe_{ox}/Fe_d dos Latossolos após os tratamentos térmicos. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

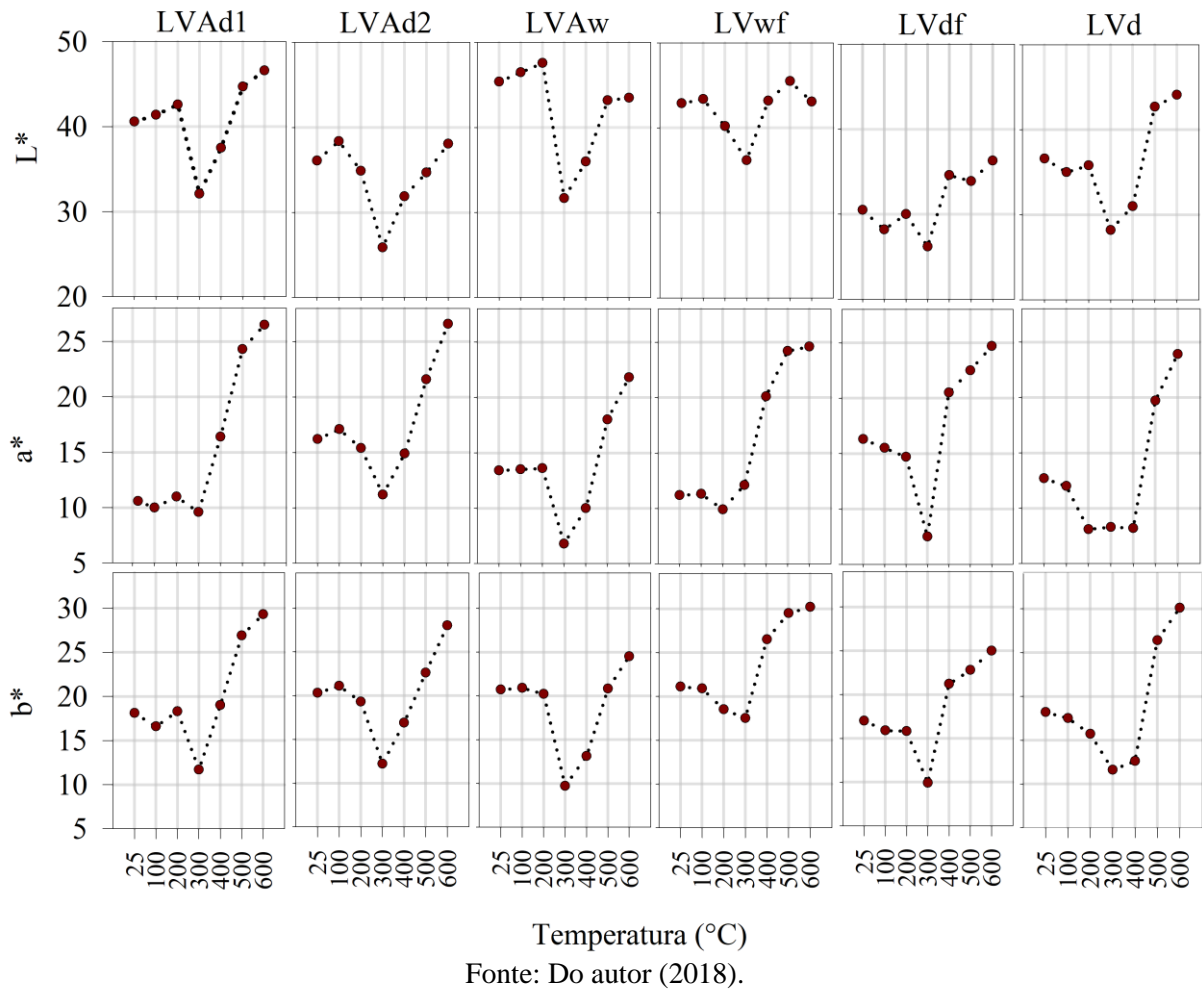


Fonte: Do autor (2018).

4.7 Cor do solo

Foi observada alteração significativa na cor dos solos com o aquecimento (FIGURA 11). Na faixa entre 20 a 300° C todos os solos escureceram, com redução média de 18% do parâmetro L^* . Após 300° C, o parâmetro se eleva novamente até 600° C. A redução do parâmetro L foi mais intensa nos Latossolos Vermelho-Amarelos (LVAd1, LVAd2 e LVAw), com uma redução média de 22%. Nos Latossolos vermelhos, a redução do parâmetro L foi menos acentuada, principalmente nos férricos (LVwf e LVdf). Uma redução nos parâmetros a e b também foi observada até 300° C, aumentando logo em seguida até 600° C. O aumento dos parâmetros a e b significa uma intensificação das cores vermelho e amarelo, respectivamente. A intensificação da cor vermelha corrobora o surgimento de picos de Hm com o aumento da temperatura (FIGURA 7).

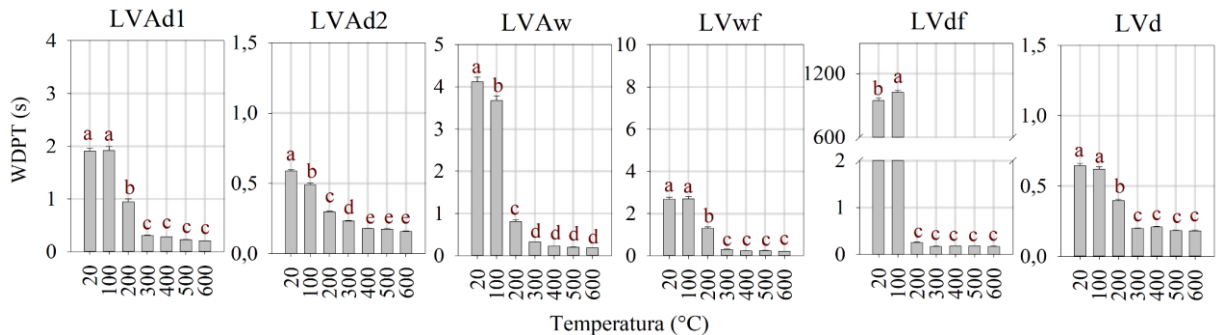
Figura 11 - Alteração nos parâmetros de cor do sistema CIELab obtidos com sensor portátil NIX Color Sensor™.



4.8 Repelência à água

Na Figura 12, são apresentados os tempos médios (s) para a completa penetração das gotas de água na superfície dos agregados. Em todos os solos foi observada uma redução significativa ($p < 0,05$) do tempo necessário para a infiltração das gotas, ou seja, menor repelência à água, principalmente após 200-300° C. No LVAd2, LVAw e LVd o aquecimento a 100° C foi suficiente para reduzir o tempo de penetração da gota de água. O LVdf, notoriamente, apresentou maior repelência à água comparativamente aos demais solos. Esse solo é o que apresenta os maiores conteúdos de óxido de ferro e matéria orgânica (TABELA 3). O aquecimento do LVdf a 100° C aumentou sua repelência à água, entretanto, foi drasticamente reduzida com temperaturas iguais ou superiores a 200° C (FIGURA 3).

Figura 12 - Repelência à água (Teste *WDPT*) dos Latossolos sob efeito do aquecimento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor (2018).

Apesar das diferenças significativas encontradas, todos os solos, independente do tratamento térmico, foram considerados hidrofílicos de acordo com a classificação proposta por Doerr et al. (1998) (TABELA 4). Apenas o LVdf foi considerado severamente repelente nas temperaturas de 20 e 100° C, porém também hidrofílico nas demais temperaturas.

Tabela 4 - Classificação dos Latossolos quanto à repelência à água segundo Doerr et al. (1998)

° C	Solos					
	LVAd1	LVAd2	LVAw	LVwf	LVdf	LVd
20	H	H	H	H	SR	H
100	H	H	H	H	SR	H
200	H	H	H	H	H	H
300	H	H	H	H	H	H
400	H	H	H	H	H	H
500	H	H	H	H	H	H
600	H	H	H	H	H	H

H: hidrofílico; SR: severamente repelente.

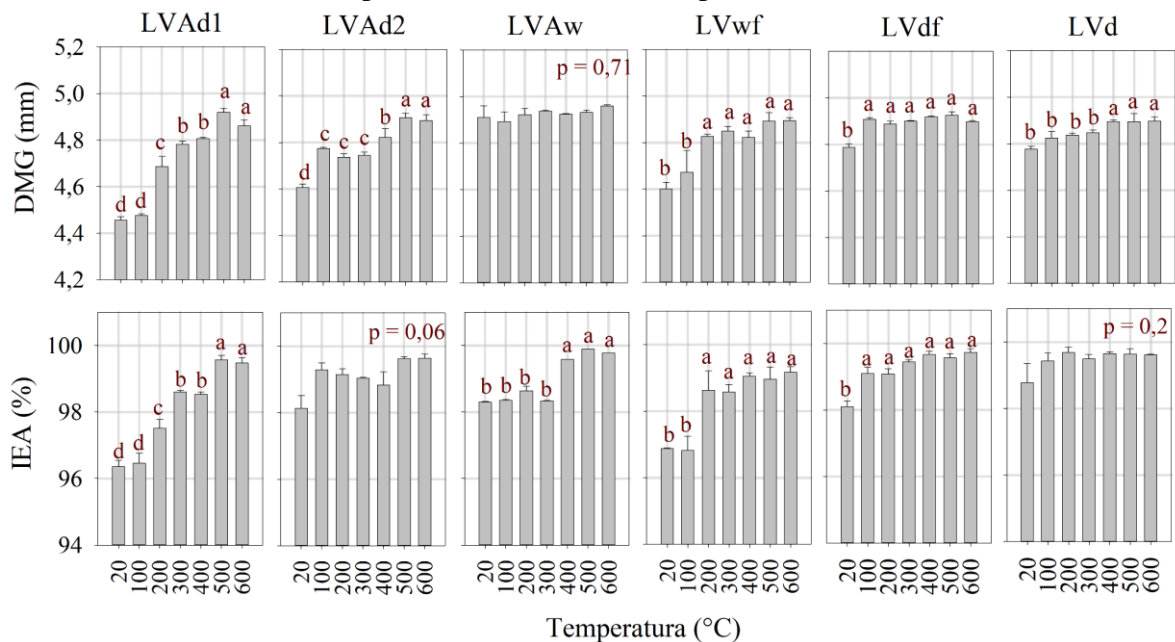
4.9 Agregação do solo

Foram encontradas diferenças significativas para a resistência à desagregação em água, avaliada pelo DMG (FIGURA 13), quando os solos foram submetidos ao aquecimento, exceto no LVAw. Os demais solos apresentaram aumento do DMG com o aumento da temperatura, principalmente no LVAd1, LVAd2 e LVwf. Resultados semelhantes foram encontrados para a variável IEA, exceto para o LVAd2 e LVd. Em relação ao IEA, as alterações não foram significativas para os solos LVAd2 e LVd. Entretanto, os solos LVAd1 e LVwf ainda apresentaram maior aumento na estabilidade com o aquecimento em comparação aos demais

solos, com variações de 3,7%. O solo LVdf, igualmente ao DMG, resultou em baixo aumento, em relação aos demais, de 2%.

Embora estatisticamente significativas, as diferenças na agregação devido ao aquecimento podem ser consideradas pouco relevantes em termos práticos, com variações de no máximo 0,5 mm para DMG e 3,7% para IEA. Entretanto, os agregados dos Latossolos submetidos ao aquecimento em várias temperaturas não se tornaram mais susceptíveis à desagregação em água.

Figura 13 - Diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) dos Latossolos sob efeito do aquecimento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

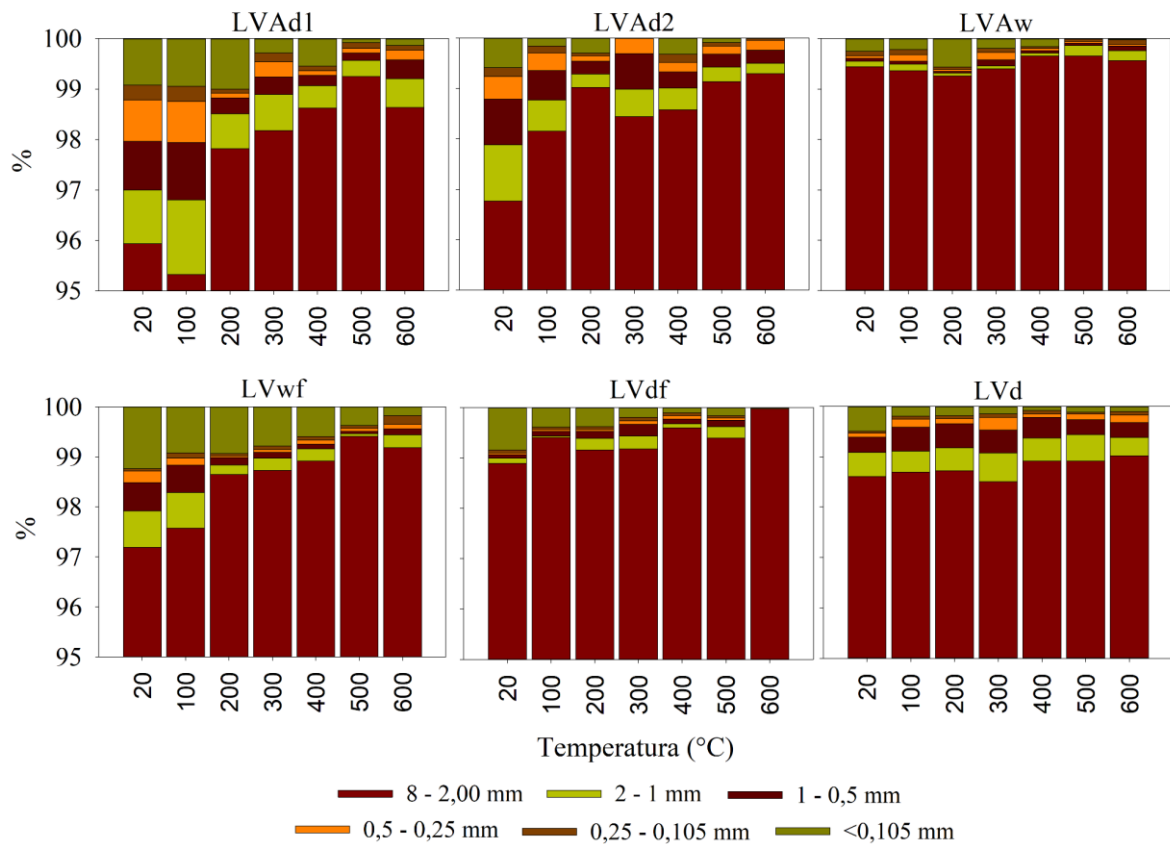


Fonte: Do autor (2018).

A distribuição percentual dos agregados em cada classe de tamanho é apresentada na Figura 14. Em todos os solos, o aquecimento a 100° C durante 30 minutos não levou a alteração da distribuição dos agregados por classe, exceto no LVAd2. Nesse solo, o aquecimento a 100° C levou a um aumento de agregados de tamanho 2 e 8 mm e uma redução dos agregados menores que 0,105 mm. Até a temperatura de 100° C o LVAd1 foi o solo que apresentou uma melhor distribuição dos agregados nas classes consideradas, seguido do LVAd2. Esses dois solos foram os que apresentaram maior aumento da classe de tamanho 2 a 8 mm com o aquecimento e redução das classes menores, especialmente a <0,105 mm. Esses resultados corroboram aqueles obtidos na Figura 4, onde o LVAd1 e LVAd2 foram os solos que apresentaram o maior aumento do DMG. Os demais solos, inicialmente, com maior

porcentagem de agregados maiores (2 a 8 mm) tiveram um aumento pequeno dessa classe. No LVd praticamente não houve alteração da distribuição dos agregados em classes com o aquecimento. O LVdf (solo mais rico em óxido de ferro) (TABELA 1) quando aquecido a 600° C teve seus agregados de tamanho 4 a 8 mm todos retidos na peneira de 2 mm (100% de agregados de tamanho 2 a 8 mm).

Figura 14 – Distribuição percentual dos agregados por classe de tamanho dos Latossolos afetados pelo aquecimento.



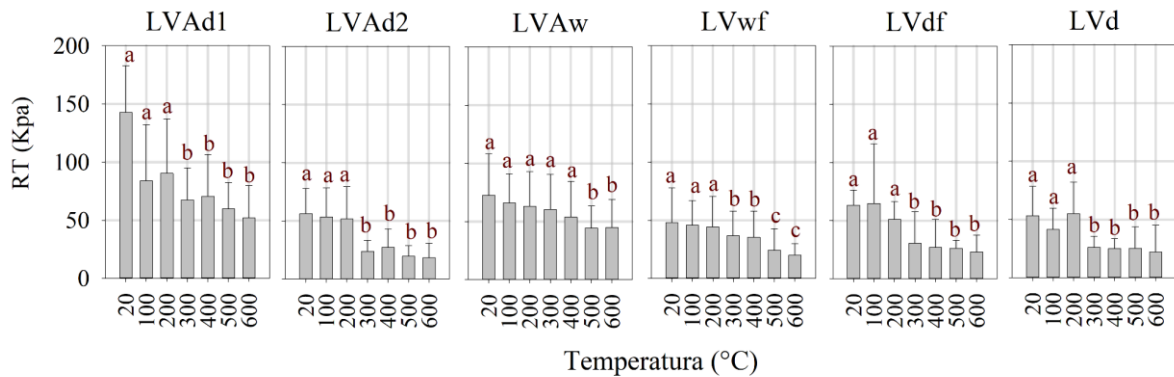
Fonte: Do autor (2018).

4.10 Resistência tênsil dos agregados

O aquecimento do solo resultou em alterações significativas na RT dos agregados (FIGURA 6). Ao contrário do aumento dos valores de DMG e IEA (FIGURA 15), o aquecimento tornou os agregados mais susceptíveis à ruptura quando submetidos a uma pressão estática vertical (FIGURA 2a). As menores temperaturas (100 – 200°C) não foram suficientes para reduzir a RT. Entretanto, a partir de 300°C reduções significativas para os solos LVAd1, LVAd2, LVdf e LVd foram observadas. Já para os solos LVAw e LVwf uma redução

significativa foi notada apenas a partir de 500°C. De forma geral, a redução total (20 a 600°C) da RT para os Latossolos foi de 27 KPa (LVAw e LVwf) a 91 KPa (LVAd1).

Figura 15 - Resistência tênsil dos agregados dos Latossolos sob efeito do aquecimento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor (2018).

5 DISCUSSÃO

5.1 Atributos químicos, MOS e mineralogia alterados pelo aquecimento

A forma e intensidade da altera o dos atributos do solo devido ao aquecimento dependem da temperatura alcançada, dura o, disponibilidade de oxig nio e do próprio solo. Assim, os efeitos encontrados podem ser muito heterog neos e específicos para cada condi o (SANTÍN; DOERR, 2016). Os Latossolos selecionados apresentaram um comportamento semelhante quanto às altera es dos seus atributos químicos e mineralógicos sob efeito do aquecimento em condi es laboratoriais. A perda/altera o da matéria orgânica e mudanças na mineralogia do solo são as principais altera es devido ao aquecimento. Tais altera es irão influenciar os demais atributos químicos do solo, os quais foram investigados neste trabalho. As altera es mineralógicas (FIGURA 7) podem ser consideradas simples, com a desidroxila o da gibbsita (250 a 350   C) e da caulinita (450 a 550  C) (ALVES; MASCARENHAS; VAZ, 2008), e oxida o do Fe com a forma o de hematita. Com o aquecimento, o aquecimento de um Latossolo e Nitossolo a temperatura de >600  C também foi observado o desaparecimento de Gt e forma o de Mh (KETTERINGS; BIGHAM; LAPERCHE, 2000). Em temperaturas elevadas (superiores a 500   C), a forma o de óxidos pode levar a fusão das partículas de argila e redu o da área superficial específica (ARAYA; MEDING; BERHE, 2016; MATAIX-SOLERA et al., 2011; SANTÍN; DOERR, 2016). Em

temperaturas elevadas ($>300^{\circ}\text{C}$), a formação dos óxidos de ferro pôde também ser confirmada pela diminuição da relação $\text{Fe}_{\text{ox.}}/\text{Fe}_{\text{d}}$ (FIGURA 10), confirmado pela desidroxilação e consolidação dos óxidos de Fe.

Com relação ao conteúdo de MOS (TABELA 3), a temperatura para diminuição em 50% (MOS_{50}) foi bastante semelhante nos Latossolos estudados ($\sim 280^{\circ}\text{C}$). Entretanto, a temperatura para início da perda da MOS (ponto de curvatura da parte superior da curva), a taxa de decaimento e temperatura para perda total foram diferentes. Isso remete à relação de retenção e proteção à decomposição da MOS garantida pela área superficial específica (ASE) de cada solo (LEPSCH; SILVA; ESPIRONELO, 1982). Grogmann (1977) encontrou correlação positiva entre ASE e teor de argila a partir de solo com argila de baixa atividade, enquanto Lepsch (1980) e Lepsch, Silva e Espironelo (1982) identificaram alta correlação entre MOS e teor de argila, em solos de baixa atividade, profundos e bem drenados.

No caso estudado, o solo com maior teor de argila ($\text{LVdf} - 777 \text{ g kg}^{-1}$) resultou em perda mais lenta ($b = -4,37$) com o aquecimento em comparação aos demais solos, além de apresentar o maior teor de MOS inicial. Já o solo com menor teor de MOS inicial (LVAd2), contém baixo teor de argila (483 g kg^{-1}) e resultou em perda mais rápida de MOS com o aquecimento ($b = -58,56$). Isso indica capacidade de proteção da MOS garantido pela argila do solo, frente a sua maior ASE em relação aos demais tamanhos de partículas. A mineralogia da fração argila influencia também a ASE (BRANTLY; MELLOTT, 2000) e, conseqüentemente, a capacidade de proteção da MOS por meio do estabelecimento de fortes ligações nos complexos organominerais (BRAIDA et al., 2011). Óxidos como gibbsita e goethita, presentes nos solos avaliados, tem papel destaque na formação e estabilização de microagregados (BARBERIS et al., 1991; DUIKER et al., 2003), garantindo, portanto, maior proteção a MO (BRAIDA et al., 2011).

Temperaturas entre 100 e 200°C são suficientes para iniciar processos de volatilização e perda de carbono orgânico (KANG; SAJJAPONGSE, 1980), com a degradação de lignina e hemicelulose. Já em temperaturas maiores que 200°C inicia-se o processo de carbonização (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2004). A partir de 300°C , a descarboxilação em macromoléculas de ácidos húmicos e fúlvicos ocorrem, além do aumento na proporção de grupos aromáticos (ALMENDROS et al., 1992; ALMENDROS; GONZALEZ-VILA; MARTIN, 1990; KNICKER et al., 1996).

A ação de queimadas sobre a MOS do solo tem sido considerada como equivalente ao processo de decomposição natural devido ao aumento dos seus índices de polimerização e humificação (ALMENDROS et al., 1998). Entretanto existem diferenças entre substâncias

húmicas formadas por atividade microbiológica e enzimáticas e por aquelas formadas por processos pirogenéticos. Durante o aquecimento, o carbono da fração ácido fúlvico é mais afetado, seguido das frações ácido húmico e humina (SANTOS, 2007), formando compostos de menor solubilidade, mais estáveis a degradação química e biológica (ALMENDROS et al., 1992).

Um modelo para descrever a variação do conteúdo de MOS em função da temperatura experimentada pelos Latossolos foi proposto (FIGURA 3). Resultados semelhantes, mas não com o mesmo modelo estatístico, foram obtidos por Araya, Meding e Berhe (2016) para amostras de solos da camada superficial (0-5 cm) de Sierra Nevada, California, USA. Santos (2007) ajustou modelos lineares ($y=a+bx$) e quadráticos ($y=a+bx+cx^2$) para descrever a perda de MOS em função da temperatura (faixa de 25 a 450° C), entretanto, ficou claro que a perda significativa ocorreu após 200° C. Os ajustes propostos por Santos (2007) não permitiram descrever a alteração dos constituintes da MOS em função do aquecimento.

Uma redução inicial no pH do solo (FIGURA 2) sob efeito do aquecimento pode estar relacionada com a produção de íons H^+ durante o processo de dessecação do solo (SERTSU; SÁNCHEZ, 1978). Esse processo é aquele responsável pelas reações de xerólise em solos de clima árido e quente (DUCLOUX et al., 2002). De acordo com Clarke, Aguilar-Carrillo e Roychoudhury (2011) essa redução do pH é totalmente revertida com o reumedecimento do solo. Uma redução inicial no pH do solo entre 25 e 200° C também foi observada por Badía e Martí (2013) e Terefe et al. (2008). Na faixa de temperatura entre 200 e 400° C o pH foi significativamente aumentado, chegando a valores próximos de 8,0. Aumentos no pH do solo sob efeito do aquecimento estão relacionados com a desnaturação de ácidos orgânicos, liberação de cátions básicos durante a combustão da matéria orgânica e perda de hidroxilas da superfície dos argilominerais (AROCENA; OPIO, 2003; BADÍA, MARTÍ, 2013; CERTINI, 2005). Um aumento significativo no pH na faixa entre 250 e 450° C também foi observado para solos sob florestas de Sierra Nevada, California, USA (ARAYA, MEDIN E BERHE, 2016). Similarmente, o pH do solo se tornou alcalino na temperatura de 450° C chegando a valores próximos de 10,0. Ressalta-se que os solos utilizados por Araya, Medin e Berhe (2016) são arenosos, com teores de argila menores que 15%. Em um Cambissolo da Mata Atlântica, foi observado um aumento do pH em $CaCl_2$ (0,01 mol L⁻¹) em temperaturas variando de 25° C a 650° C (THOMAZ, 2017).

A disponibilidade de nutrientes em solos afetados pelo aquecimento está diretamente relacionada com a temperatura aplicada, com as alterações da MOS e das propriedades do solo (THOMAZ, 2017). A degradação significativa da MOS se inicia a partir de 300°C (THOMAZ,

2017), como também encontrado por Forgeard e Frenot (1996). Entretanto, todos os nutrientes em grande parte dos solos têm aumento em sua disponibilidade a partir de 200°C. Deve-se considerar, neste caso, que a degradação e alteração da matéria orgânica se inicia a temperaturas baixas, justificando a liberação de nutrientes anterior a perda efetiva da MOS (GIOVANNINI; LUCCHESI; GIACHETTI, 1988).

A perda de nutrientes por volatilização com o aquecimento do solo e consequente combustão do material orgânico também é abordada em alguns trabalhos (GRIER, 1975; HARWOOD; JACKSON, 1975; NEARY et al., 1999). Cada nutriente apresenta uma resposta individual ao aquecimento, estabelecendo-se assim, temperaturas limites para sua volatilização. Nutrientes como S (TIEDEMANN, 1987) e nitrogênio (HOSKING, 1938), são considerados sensíveis por serem volatilizados em baixas temperaturas, como 200 a 375°C, respectivamente. Já K e P são definidos como moderadamente sensíveis, com temperaturas limites de 774°C (RAISON et al., 1985). Por fim, os nutrientes poucos sensíveis ao aquecimento são Mg, Ca e Mn, os quais são volatilizados a altas temperaturas, como 1107°C, 1484°C e 1962°C, respectivamente (DEBANO, 1991). Neste caso, os solos foram submetidos a temperaturas inferiores às necessárias para volatilização dos nutrientes avaliados, por este motivo não é esperado a volatilização destes.

A quantidade extraída dos nutrientes P e S-SO₄²⁻ significativamente aumentou com o aquecimento do solo. A liberação desses nutrientes é atribuída a mineralização da matéria orgânica, especialmente para o P, pois o aquecimento converte sua forma orgânica para inorgânica (PO₄³⁻) (CADE-MENUM, et al. 2000; GALANG; MARKEWITS; MORRIS, 2010), tornando-se mais disponível no solo (CERTINI, 2005). Ressalta-se, entretanto, que essa forma inorgânica de P pode ser adsorvida nos óxidos de Fe formados em temperaturas elevadas, o que reduziria a disponibilidade de P (THOMAZ, 2017). Thomaz (2017) observou um aumento da quantidade de P e S extraída até a temperatura de 350° C, diminuindo em temperaturas superiores a essa. Como observado na Figura 4, a diminuição da quantidade extraída de P e S não foi observada.

Os micronutrientes B, Fe, Cu, Mn, Zn apresentaram um pico de maior disponibilidade nas temperaturas intermediárias de 200 – 400°C (FIGURA 6). Kang e Sajjapongse (1980) sugere que a maior disponibilidade de micronutrientes a temperaturas intermediárias está relacionada principalmente com a alteração da matéria orgânica. No estudo de Thomaz (2017) o aquecimento a 250° C em um Cambissolo húmico levou a um aumento da quantidade extraída de Fe e Mn, entretanto, nenhum efeito foi observado para B e Cu e uma redução significativa foi observada para o Zn. Com exceção a alguns solos, esse padrão de aumento da quantidade

extraída até uma determinada temperatura seguido de diminuição também foi observado para os macronutrientes Ca, Mg e K (FIGURA 4). O aumento da disponibilidade pode estar relacionado com a mineralização da matéria orgânica e, a diminuição, com alterações da matriz (orgânica e mineral) do solo fazendo com que os elementos não sejam extraídos da mesma forma anterior ao aquecimento.

O aquecimento em temperaturas mais altas ($> 400^{\circ}\text{C}$) resultaram em efeito adverso sobre a disponibilidade de nutrientes. Os cátions trocáveis e os micronutrientes apresentaram significativa redução em suas concentrações. Kang e Sajjapongse (1980) também obtiveram tais resultados e justificaram que, com a completa destruição da MOS, a fusão das partículas de argila em temperaturas altas reduzem a área de retenção de nutrientes, levando a redução da CTC. Por outro lado, Araya, Meding e Berhe (2016) constataram aumento da área superficial específica do solo com o aquecimento devido a fragmentação de partículas de MOS. Thomaz (2017) também não encontrou redução da disponibilidade de nutrientes em temperaturas mais altas, entretanto, o aquecimento a 650°C não foi suficiente para levar a destruição total da MOS.

As mudanças na cor dos solos, obtidas com sensor portátil, refletem tanto as variações no teor de MOS como as alterações mineralógicas. Até a temperatura de 300°C há o forte escurecimento das amostras, indicando o processo de carbonização da MOS, como reportado por Terefe et al. (2008) e Araya, Meding e Berhe (2016). A partir de 400°C , quando o conteúdo de MOS já reduziu a aproximadamente 94% (FIGURA 3), a cor prevaiente no solo reflete a sua condição mineralógica, tornando mais avermelhadas com o aquecimento pela formação de hematita (TEREFE et al. 2008).

5.2 Atributos físicos alterados pelo aquecimento

Diversos estudos têm reportado os efeitos do aquecimento na capacidade de infiltração de água e repelência à água em solos (DOERR et al., 2004; GARCÍA-CORONA et al., 2004; THOMAZ; FACHIN, 2014). Robichaud e Hungeford (2000), em condições laboratoriais, identificaram que o aquecimento promove uma redistribuição de substâncias hidrofóbicas no solo, podendo levar a volatilização de tais compostos. DeBano (1991) sugeriu que solos que não apresentam repelência à água em sua condição natural e que possuem teor de MOS maior que 2% sempre iriam induzir a repelência à água com o aquecimento, o que não foi observado no presente trabalho (FIGURA 2).

A MOS dos Latossolos variou de 2,9 a 4,3% (TABELA 1), entretanto, o aquecimento tornou mais fácil a penetração da gota de água. Resultados semelhantes foram encontrados por

Mataix-Solera et al. (2008) em estudos realizados em área de Neossolo aquecidos em forno mufla. Essas situações ocorrem devido ao alto teor de argila em relação ao conteúdo de MOS (GIOVANNINNI; LUCCHESI, 1983), ou podem estar relacionadas aos argilominerais presentes e formados com o aquecimento (LICHNER et al., 2006; MATAIX-SOLERA et al., 2008). Lichner et al. (2006) identificaram que a caulinita, comparada a alguns minerais 2:1, se mostrou mais efetiva para a redução da persistência da repelência à água em partículas de areia em solos de clima temperado. Mataix-Solera et al. (2008) observaram que a caulinita não contribui para a formação de repelência à água durante queimadas. A influência da caulinita, neste caso, é atribuída ao caráter hidrofílico com grupos de hidroxilas associados à sua camada octaédrica, havendo a absorção preferencial de água nesses grupos e, conseqüentemente, limitando a adsorção de moléculas orgânicas hidrofóbicas (JORDÁN et al. 2010). Os Latossolos estudados apresentam, majoritariamente, a caulinita como o principal argilomineral (FIGURA 7).

O LVdf apresentou hidrofobicidade severa em sua condição natural e quando aquecido a 100°C (FIGURA 3 e TABELA 3), mas perdendo tal caráter hidrofóbico com o aquecimento. O LVdf foi o que apresentou maior conteúdo de matéria orgânica e óxido de ferro (TABELA 1). A repelência à água pode estar ligada a qualidade da MOS, pois os ácidos húmicos podem induzir a hidrofobicidade dos solos, não dependendo diretamente da quantidade de MOS (DEBANO, 1971; DOERR et al., 1998, ROY; MCGILL, 2000). A partir de 200°C a repelência à água no LVdf deixa de ocorrer, corroborando os trabalhos de Robichaud e Hungerford (2000), García-Corona et al. (2004) e Mataix-Solera e Guerrero (2007). Acima de 350°C a repelência à água tende a diminuir ainda mais, como ocorreu em casos de solos ácidos e pobres em nutrientes da Espanha (JORDÁN et al., 2010), assemelhando-se aos demais solos.

Os efeitos do aquecimento na agregação são bastante variáveis (MATAIX-SOLERA et al., 2011). A forma e intensidade como a agregação é afetada pelo aquecimento, em condições de queimadas naturais ou em condições laboratoriais, estão diretamente ligadas ao principal agente cimentante do solo, sendo tanto a MOS ou seus minerais. Além disso, a intensidade da queimada, neste caso indicada pela temperatura de aquecimento, também é responsável pelas alterações na agregação do solo.

Trabalhos como os de Campo et al. (2008), Badia e Martí (2003), Zavala et al. (2010), Garcia-Corona et al. (2004) e Marcos et al. (2007), identificaram em solos com alto a médio teor de MOS (principal responsável pela cimentação das partículas do solo), uma redução na agregação do solo após o aquecimento. Essa redução da agregação do solo associada à perda de MOS durante o aquecimento é percebida em situações que temperaturas mais baixas (100 –

200°C) não são suficientes para alterarem significativamente a agregação e MOS, enquanto temperaturas elevadas, a partir de 250°C, com a carbonização e perda da MOS, promovem redução da estabilidade de agregados. Em Nitossolo da Espanha, foi observado uma redução dos agregados de tamanho 4 a 0,25 mm com o consequente aumento dos agregados menores que 0,25 mm (JIMÉNEZ-PINILLA et al., 2014). Já em solos da Eslováquia, foi observado um aumento do diâmetro médio geométrico dos agregados afetados pelo aquecimento (ŠIMANSKY, 2015). Um fator determinante no aumento ou redução da estabilidade de agregados de solos afetados pelo aquecimento será o conteúdo de argila.

Neste estudo, o aumento na agregação para maioria dos Latossolos pode estar associado às alterações mineralógicas ocorridas (FIGURAS 7, 8, 9 e 10). Os Latossolos apresentam como mineralogia principal a caulinita e óxidos de Fe e Al, tornando-se mais oxídico com o aquecimento, com formação de hematita, principalmente. De acordo com Bronick e Lal (2005), óxidos de Fe e Al associados a caulinita presente na fração argila de solos de clima temperado contribui na estruturação do solo como agente cimentante de agregados. Entretanto, Ferreira, Fernandes e Curi (1999) discute a impotência dos óxidos de Fe e Al para a alta estabilidade dos agregados de solos tropicais. Ainda neste trabalho, identificou-se a relação inversa entre presença de caulinita e macroporos nos solos, enquanto a presença de gibbsita se correlacionou positivamente com essa propriedade. Neste sentido, a formação de óxidos com o aquecimento pode ter contribuído para uma reestruturação das partículas do solo, favorecendo a estabilidade dos agregados. Além da oxidação do solo, temperaturas elevadas (> 600°C) são capazes de causar fusão termal das partículas de argila (CERTINI, 2005). Por essas razões, espera-se que o aquecimento em solos tropicais, compostos principalmente por óxidos de Fe e Al e minerais 1:1, resulte no aumento da agregação, como também identificado por outros trabalhos (TEREFE et al., 2008; THOMAZ; FACHIN, 2014; THOMAZ, 2017).

A resistência tênsil de todos os solos foi significativamente reduzida com o aquecimento (FIGURA 5), o que pode ser explicado pela redução do conteúdo de matéria orgânica dos solos (CAP. 2 FIGURA 2). A MOS é capaz de ser incorporada em pequenos poros existentes entre os domínios de argila e acúmulos de partículas, estabilizando os microagregados (DEXTER, 1988) e aumentando a resistência tênsil. Entretanto, em solos tropicais com elevados teores de óxidos de Fe e Al, a contribuição da MOS na RT pode ser reduzida (IGWE; AKAMIGBO; MBAGWU, 1999). A influência da MOS na cimentação de partículas do solo em relação a RT foi citada por diversos autores (IHMHOFF; SILVA; DEXTER, 2002; RAHIMI; PAZIRA; TAJIK, 2000). Neste estudo, a MOS foi considerada mais importante que os óxidos na resistência tênsil dos agregados.

Em resumo, a superfície de um solo repelente e com baixa estabilidade de agregados implicaria em grandes consequências ambientais, uma vez que a repelência à água predispõe a baixa infiltração de água e formação do escoamento superficial (JORDÁN et al., 2010). Agregados de baixa estabilidade contribui para possível perda de solo, podendo resultar em processos erosivos intensos. Entretanto, no caso estudado, o aquecimento do solo em um intervalo de temperatura de 100 – 600°C, frequentemente encontrado em situações de queimadas diminuiu significativamente a repelência à água, o que pode ser entendido como um aumento da micro infiltração de água. Além disso não tornou o solo mais propenso à desagregação em água. Ambos resultados não apontam influência negativa sobre as propriedades físicas do solo. Contudo, a redução da RT em todos os solos indica menor suporte de pressão dos agregados do solo com o aquecimento, devido a redução da MO, principalmente a partir de 300°C, momento em que a MOS é intensamente reduzida (FIGURA 3). Tal condição pode favorecer a ruptura dos agregados em condições naturais. Agregados maiores podem ser mais facilmente rompidos pelo pisoteio ou tráfego de máquinas a agregados menores, sendo esses mais propensos ao transporte pela enxurrada.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, seis Latossolos foram submetidos ao aquecimento em diferentes temperaturas (20 a 600°C) em condições laboratoriais, tendo seus atributos químicos e mineralógicos alterados. Os Latossolos estudados apresentaram comportamento semelhante quanto à alteração dos seus atributos químicos e mineralógicos quando submetidos ao aquecimento. A relação entre temperatura e alteração dos atributos químicos não é diretamente proporcional e dependente das alterações da matéria orgânica e mineralogia do solo. Em geral, os Latossolos submetidos a uma temperatura de 300° C apresentaram um aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes e redução em 50% do conteúdo de matéria orgânica; temperaturas mais elevadas (acima de 300° C) levaram a uma diminuição da disponibilidade de nutrientes. O aquecimento alterou a eletroquímica das partículas, tornando-as com a carga líquida mais próxima de zero. A alteração da cor do solo reflete e ilustra bem as modificações observadas.

Na avaliação da qualidade estrutural de solos, o método empregado deve ser fortemente considerado. Com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o aquecimento do solo nas diferentes temperaturas (20 a 600° C) não predispôs à desagregação em água. Se a matéria orgânica é considerada o principal agente cimentante das partículas do solo, contribuindo para

a agregação, a sua perda pode ser compensada pelos óxidos naturalmente presentes no solo e por aqueles formados durante o processo de aquecimento. Entretanto, agregados secos e afetados pelo aquecimento tornaram-se significativamente menos resistentes à ruptura devido às pressões aplicadas. Devido à perda de matéria orgânica do solo, a repelência à água dos Latossolos foi reduzida.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, S.; STRAIN, B. R.; ADAMS, M. S. Water-Repellent Soils, Fire, and Annual Plant Cover in a Desert Scrub Community of Southeastern California. **Ecology**, [s.l.], v. 51, n. 4, p.696-700, jul. 1970. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.2307/1934051>.
- AGEU, C. A. et al. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES, determination. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 25, p.3321-3333, 1994.
- ALCAÑIZ, M. et al. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 572, p.1329-1335, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.115>.
- ALCAÑIZ, M. et al. Effects of prescribed fires on soil properties: A review. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 613-614, p.944-957, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>.
- ALMENDROS, G.; GONZALEZ-VILA, F. J.; MARTIN, F. Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest. **Soil Science**, [s.l.], v. 149, n. 3, p.158-168, mar. 1990. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199003000-00005>.
- ALMENDROS, Gonzalo et al. Pyrolysis of carbohydrate-derived macromolecules: its potential in monitoring the carbohydrate signature of geopolymers. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 40-41, p.599-610, maio 1997. Elsevier BV.
- ALMENDROS, G. et al. Solid state NMR studies of fire-induced changes in the structure of humic substances. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 117-118, p.63-74, maio 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90073-2](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(92)90073-2).
- ALVES, M. E.; MASCARENHAS, Y. P.; VAZ, C. M. P. Comparação de procedimentos de quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.569-577, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000200012>.
- ARAYA, S. N.; MEDING, M; BERHE, A. A. Thermal alteration of soil physico-chemical properties: a systematic study to infer response of Sierra Nevada climosequence soils to forest fires. **Soil**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.351-366, 22 jul. 2016. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-2-351-2016>.
- ARCENEGUI, V. et al. Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. **European Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 58, n. 6, p.1254-1259, dez. 2007. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00917.x>.
- ARE, K. S. et al. Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 103, n. 1, p.4-10, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.08.011>.

AROCENA, J. M.; OPIO, C. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. **Geoderma**, [s.l.], v. 113, n. 1-2, p.1-16, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00312-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00312-9).

AZEVEDO, A. C. de; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p.609-617, mar. 2004.

BADÍA, D. et al. Burn effects on soil properties associated to heat transfer under contrasting moisture content. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 601-602, p.1119-1128, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.254>.

BADÍA, D.; MARTÍ, C. Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemical and Physical Properties of Two Contrasting Soils. **Arid Land Research And Management**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.23-41, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15324980301595>.

BARBERIS, E. et al. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. **Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.535-542, dez. 1991. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00100.x>.

BARRAL, M.T.; ARIAS, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 46, n. 3-4, p.261-272, jun. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987\(98\)00092-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987(98)00092-0).

BENITES, V. M. et al. Caracterização dos ácidos húmicos extraídos de um latossolo vermelho-amarelo e de um podzol por análise termodiferencial e pela espectroscopia de absorção no infravermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 23, p. 543-551, 1999.

BISDOM, E. B. A.; DEKKER, L. W.; SCHOUTE, J.F. T. H. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. **Geoderma**, [s.l.], v. 56, n. 1-4, p.105-118, mar. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90103-r](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(93)90103-r).

BLANCO-CANQUI, H. et al. Mechanical Properties and Organic Carbon of Soil Aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 69, n. 5, p.1472-1481, 2005. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0356>.

BORRGAARD, O.; GAFUR A.; PETERSEN, L. Sustainability appraisal of shifting cultivation in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. **Ambio**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.118-123, mar. 2003.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Fire in the Earth System. **Science**, [s.l.], v. 324, n. 5926, p.481-484, 24 abr. 2009. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1163886>.

BRAIDA, J. A. et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p.221-278, 2011.

BRANTLEY, S. L.; MELLOTT, N. P. Surface Area and Porosity of Primary Silicate Minerals. **Mineralogical Magazine**, [s.l.], v. 62, n. 1, p.229-230, 1998. Mineralogical Society. <http://dx.doi.org/10.1180/minmag.1998.62a.1.121>.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre A Proteção da Vegetação Nativa; Altera As Leis nos 6.938, de 31 de Agosto de 1981, 9.393, de 19 de Dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de Dezembro de 2006; Revoga As Leis nos 4.771, de 15 de Setembro de 1965, e 7.754, de 14 de Abril de 1989, e A Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de Agosto de 2001; e Dá Outras Providências.** Brasil, Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 02 fev. 2018.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, [s.l.], v. 124, n. 1-2, p.3-22, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

CADE-MENUN, B. J. et al. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. I. A comparison of two forest types. **Canadian Journal Of Forest Research**, [s.l.], v. 30, n. 11, p.1714-1725, nov. 2000. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x00-098>.

CAMPO, J. et al. Aggregation of under canopy and bare soils in a Mediterranean environment affected by different fire intensities. **Catena**, [s.l.], v. 74, n. 3, p.212-218, ago. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.05.002>.

CADE-MENUN, B. J. et al. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. I. A comparison of two forest types. **Canadian Journal Of Forest Research**, [s.l.], v. 30, n. 11, p.1714-1725, nov. 2000. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x00-098>.

CANCELO-GONZÁLEZ, J. et al. Colourimetric variations in burnt granitic forest soils in relation to fire severity. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 46, p.92-100, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.037>.

CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J. (Ed.). **Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en Españã**: El estado de la cuestión visto por los científicos espanõles. Valencia: Càtedra de Divulgació de La Ciència, Universitat de Valencia, 2009. p. 25-53.

CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. **Oecologia**, [s.l.], v. 143, n. 1, p.1-10, 2 fev. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>.

CHOROMANSKA, U; DELUCCA, T. H. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects. **Soil Biology And Biochemistry**, [s.l.], v. 34, n. 2, p.263-271, fev. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717\(01\)00180-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717(01)00180-8).

CLARKE, C. E.; AGUILAR-CARRILLO, J.; ROYCHOUDHURY, A.N. Quantification of drying induced acidity at the mineral–water interface using ATR-FTIR spectroscopy. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [s.l.], v. 75, n. 17, p.4846-4856, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2011.06.012>.

COUTINHO, M. L. Fire in the ecology of Brazilian cerrado. In: GOLDAMMER, G. (Ed.). **Fire in the tropical biota: ecosystem process and global changes**. Berlin: Springer-verlag, 1990. p. 82-105.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**. Weinheim: Vch Verlag, 1996. 570 p.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 31, n. 6, p.1862-1866, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542007000600039>.

DAS, B. et al. Effect of Organic Inputs on Strength and Stability of Soil Aggregates Under Rice-Wheat Rotation. **International Agrophysics**, [s.l.], v. 28, n. 2, p.163-168, 1 jan. 2014. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/intag-2014-0004>.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: America Society of Agronomy, 1965. Part. 1, p. 545-567.

DEBANO, L. F.; KRAMES, J. S. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. **International Association Of Scientific Hydrology**. Bulletin, [s.l.], v. 11, n. 2, p.14-19, jun. 1966. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626666609493457>.

DEBANO, L. F., NEARY, D. G., FELLIOTT, P. F. **Fire effects on ecosystems**. [s.l.]: John Wiley & Sons, 1998. 333p.

DEBANO, L. F. The effect of fire on soil. In: HARVEY, A. E.; NEUENSCHWANDER, L. F. (Ed.). **Management and productivity of western-montane forest soils**. Ogden: General Technical Report Int-280. Intermountain Forest And Range Experimental Station, United States Department Of Agriculture, Forest Service, 1991.

DEBANO, L. F. The effect of fire on soil properties. In: **Symposium on management and productivity of western-montane forest soils: Proceedings-management and productivity of western-montane forest soils**. Ogden: Gen. Tech. Rep. Int-280, 1991. p. 151 - 156.

DEBANO, L. F. The Effect of Hydrophobic Substances on Water Movement in Soil during Infiltration1. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.340-343, 1971. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500020044x>.

DEBANO, L. F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 231-232, p.195-206, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00194-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00194-3).

DEBANO, L.F Water repellency in soils: a historical overview. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 231-232, p.4-32, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00180-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00180-3).

DEBANO, L. F. **Water repellent soils: A State-of-the-Art**. Berkeley: Us Department Of Agriculture Forest Service General Technical Report, Psw-46, 1981. 21 p.

DEKKER, L. W. et al. Methods for determining soil water repellency on field-moist samples. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 45, n. 4, p.1-6, abr. 2009. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1029/2008wr007070>.

DEKKER, L. W.; RITSEMA, C. J. How water moves in a water repellent sandy soil 1: Potential and actual water repellency. **Repellent Sandy Soil**, [s.i.], v. 30, n. 9, p.2507-2517, set. 1994.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 11, n. 3-4, p.199-238, jun. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5).

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Of Agricultural Engineering Research**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.139-147, fev. 1985. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](http://dx.doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6).

DOERR, S. H. et al. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. **Australian Journal Of Soil Research**, [s.l.], v. 43, n. 3, p.225-237, 2005. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/sr04091>.

DOERR, S. H. et al. Heating effects on water repellency in Australian eucalypt forest soils and their value in estimating wildfire soil temperatures. **International Journal Of Wildland Fire**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.157-163, 2004. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/wf03051>.

DOERR, S. H. On standardizing the ‘Water Drop Penetration Time’ and the ‘Molarity of an Ethanol Droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils. **Earth Surface Processes And Landforms**, [s.l.], v. 23, n. 7, p.663-668, jul. 1998. Wiley-Blackwell. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199807\)23:73.0.co;2-6](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199807)23:73.0.co;2-6).

DOERR, S. H.; SHAKESBY, R. A.; WALSH, R. P.D. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. **Soil Science**, [s.l.], v. 163, n. 4, p.313-324, abr. 1998. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199804000-00006>.

DOERR, S.H.; THOMAS, A.D. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 231-232, p.134-147, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00190-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00190-6).

DMIF/ICMBIo – Divisão de Monitoramento de Informações do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Ciência para sustentabilidade**. 2017. Disponível em: < <http://www.ccst.inpe.br/patrimonio-natural-chapada-dos-veadeiros-arde-em-chamas/>> Acesso em: 10 jan. 2018.

DUCLoux, J et al. Xerolysis: a hypothetical process of clay particles weathering under Sahelian climate. **Geoderma**, [s.l.], v. 105, n. 1-2, p.93-110, jan. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(01\)00094-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(01)00094-5).

- DUIKER, S. W. et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society Of America Journal**, Madison, v. 67, p.606-611, 2003.
- DUNN, P. H., DEBANO, L. F. Fire's effect on biological and chemical properties of chaparral soils. In: MOONEY, H., CONRAD, C. E. **Symposium of the environmental consequences of fire and fuel management in Mediterranean ecosystems**. Washington office: USDA Forest service, p.75-84, 1977.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 225p.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, [s.l.], v. 79, n. 1-4, p.69-116, set. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(97\)00039-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(97)00039-6).
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.515-524, set. 1999. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831999000300004>.
- FORGEARD, F.; FRENOT, Y. Effects of nurning on Heathland soil chemical properties: na experimental study on the effect of heating and ash depositis. **Journal of Applied Ecology**, [s.l.], v. 33, p.803-811, ago. 1996.
- FULLER, L. G.; GOH, T. B.; OSCARSON, D. W. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. **Canadian Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 75, n. 1, p.101-107, fev. 1995. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss95-013>.
- GALANG, M. A.; MARKEWITZ, D.; MORRIS, L. A. Soil phosphorus transformations under forest burning and laboratory heat treatments. **Geoderma**, [s.l.], v. 155, n. 3-4, p.401-408, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.026>.
- GARCÍA-CORONA, R. et al. Effects of heating on some physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. **International Journal Of Wildland Fire**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.195-199, 2004. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/wf03068>.
- GIARDINA, C. P.; SANFORD JUNIOR, R. L.; DOCKERSMITH, I. C. Changes in Soil Phosphorus and Nitrogen During Slash-and-Burn Clearing of a Dry Tropical Forest. **Soil Science Society American Jornal**, [s.i.], v. 64, p.399-4, jan. 2000.
- GIOVANNINI, G.; LUCCHESI, S. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. **Soil Science**, [s.i.], v. 136, n. 1, p.231-236, out. 1983.
- GIOVANNINI, G.; LUCCHESI, S. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at diferente intensities. **Soil Science**, [s.l.], v. 162, n. 7, p.479-486, jul. 1997. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199707000-00003>.

- GIOVANNINI, G. The effect of fire on soil quality. In: SALA, M.; RUBIO, J. L. (Ed.). **Soil erosion and degradation as a consequence of forest fire**. Logrono: Geofoma Ediciones, 1994. p. 15-27.
- GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A. et al. The effect of fire on soil organic matter—a review. **Environment International**, [s.l.], v. 30, n. 6, p.855-870, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>.
- GONZÁLEZ-PÉREZ, M. et al. ¹³C NMR and FTIR spectroscopy characterization of humic acids in spodosols under tropical rain forest in southeastern Brazil. **Geoderma**, [s.l.], v. 146, n. 3-4, p.425-433, ago. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.018>.
- GREGORICH, E. G.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. **Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.649-659, set. 1989. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01306.x>.
- GRIER, C. C. Wildfire Effects on Nutrient Distribution and Leaching in a Coniferous Ecosystem. **Canadian Journal Of Forest Research**, [s.l.], v. 5, n. 4, p.599-607, dez. 1975. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x75-087>.
- GROHMANN, F. Correlação entre superfície específica e outras propriedades de solos de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 1, p.9-12, 1977.
- HARRIS, R. F. et al. Mechanisms Involved in Soil Aggregate Stabilization by Fungi and Bacteria¹. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.529-532, 1964. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800040023x>.
- HARWOOD, C. E.; JACKSON, W. D. Atmospheric Losses of Four Plant Nutrients During a Forest Fire. **Australian Forestry**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.92-99, jan. 1975. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00049158.1975.10674144>.
- HOEFT, R. G.; WALSH, L. M.; KEENEY, D. R. Evaluation of various extractants for available sulfú. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v. 37, n.2, p.401-404, 1973.
- HOSKING, J. S. The ignition at low temperatures of the organic matter in soils. **The Journal Of Agricultural Science**, [s.i.], v. 28, n. 3, p.393-400, jul. 1938.
- IGWE, C.A.; AKAMIGBO, F. O. R.; MBAGWU, J. S. C. Chemical and mineralogical properties of soils in southeastern Nigeria in relation to aggregate stability. **Geoderma**, [s.l.], v. 92, n. 1-2, p.111-123, set. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(99\)00029-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(99)00029-4).
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; DEXTER, A. Factors Contributing to the Tensile Strength and Friability of Oxisols. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 66, n. 5, p.1656-1661, 2002. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2002.1656>.
- INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, [s.l.], v. 27, n. 6, p.1139-1147, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832003000600018>.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Brasil). Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. 2018. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: 3 jan. 2018.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.177-188, mar. 1988. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02011711>.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advanced course**. Madison: Prentice-Hall, 895 p. 1979.

JACKSON, M. L.; LIM, C. H.; ZELAZNY, L. W. Oxides, hydroxides and aluminosilicates. Section 6-4. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Parte 1. Madison: American Society of Agronomy, p. 118-124, 1986.

JACOMINE, P.K.T. Solos sob caatingas - características e uso agrícola. In: ALVAREZ, V.H.V.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. eds. **Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, SBCS/UFV, 1996. p. 95-112.

JIMÉNEZ-PINILLA, Patricia et al. Advances in the knowledge of how heating can affect aggregate stability in Mediterranean soils: a XDR and SEM-EDX approach. **Catena**, [s.l.], v. 147, p.315-324, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.036>.

JORDÁN, A. et al. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. **Catena**, [s.l.], v. 84, n. 3, p.136-147, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.10.007>.

JORDÁN, A.; GONZÁLEZ, F. A.; ZAVALA, L. M. Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain). **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.736-748, 8 dez. 2009. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7519>.

KANG, B. T.; SAJJAPONGSE, A. Effect of heating on properties of some soils from Southern Nigeria and growth of rice. **Plant And Soil**, [s.l.], v. 55, n. 1, p.85-95, fev. 1980. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02149712>.

KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal Of Wildland Fire**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.116-126, 2009. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/wf07049>.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, [s.i.], v. 5, n. 1, p.17-40, 1997.

KETTERINGS, Q. M.; BIGHAM, J. M.; LAPERCHE, V. Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 64, n. 3, p.1108-1117, 2000. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6431108x>.

KNICKER, H. et al. ^{13}C - and ^{15}N -NMR spectroscopic examination of the transformation of organic nitrogen in plant biomass during thermal treatment. **Soil Biol. Biochem.**, [s.l.], v. 28, p.1053-1060, 1996.

LEPSCH, I. F. Influência do cultivo de Eucalyptus e Pinus em propriedades de solo sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p.103-107, 1980.

LEPSCH, I. F.; SILVA, N. M. da; ESPIRONELO, A. Relação entre matéria orgânica e textura de solos sob cultivo de algodão e cana-de-açúcar, no estado de São Paulo. **Bragantia**, [s.l.], v. 41, n. 1, p.231-236, 1982. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051982000100027>.

LESTRELIN, G. et al. Challenging established narratives on soil erosion and shifting cultivation in Laos. **Natural Resources Forum**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.63-75, 1 mar. 2012. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01438.x>.

LIANG, B. et al. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 70, n. 5, p.1719-1730, 2006. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>.

LIMA JUNIOR, J. A. et al. Desempenho de cultivares de cenoura em função da água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 16, n. 5, p.514-520, maio 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662012000500007>.

LICHNER, L. et al. Evaluation of different clay minerals as additives for soil water repellency alleviation. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 31, n. 3-4, p.238-248, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2005.10.012>.

MAO, J. et al. Molecular-scale heterogeneity of humic acid in particle-size fractions of two Iowa soils. **Geoderma**, [s.l.], v. 140, n. 1-2, p.17-29, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.014>.

MARCOS, E.; TÁRREGA, R.; LUIS, E. Changes in a Humic Cambisol heated (100–500 °C) under laboratory conditions: The significance of heating time. **Geoderma**, [s.l.], v. 138, n. 3-4, p.237-243, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.017>.

MARTINELLI, A. C. et al. Evaluation of the leached cadmium and nickel from the degradation of nickel-cadmium batteries in a column of soil. **Química Nova**, [s.l.], v. 37, n. 3, p.465-472, 2014. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140073>.

MATAIX-SOLERA, J; DOERR, S. H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. **Geoderma**, [s.l.], v. 118, n. 1-2, p.77-88, jan. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(03\)00185-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00185-x).

MATAIX-SOLERA, J. et al. Can terra rossa become water repellent by burning? A laboratory approach. **Geoderma**, [s.l.], v. 147, n. 3-4, p.178-184, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.013>.

MATAIX-SOLERA, J.; GUERRERO, C. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. In: MATAIX-SOLERA, J. (Ed.). **Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica**. Font Roja: Cemacam, 2007. p. 5-40.

MATAIX-SOLERA, J. et al. Fire effects on soil aggregation: A review. **Earth-science Reviews**, [s.l.], v. 109, n. 1-2, p.44-60, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>.

MATAIX-SOLERA, J. et al. Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. **Catena**, [s.l.], v. 108, p.6-13, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.006>.

MAZURAK, A. P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. **Soil Science**, [s.l.], v. 69, n. 2, p.135-148, 1950.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M. I. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays And Clay Minerals**, [s.l.], p.317-327, 1960. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-009235-5.50026-7>.

MIRANDA, H. S. et al. Fires in the cerrado, the Brazilian savanna. In: COCHRANE, Mark A. **Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics**. Chichester: Springer, 2009. p. 427-450.

MUKUL, S. A.; HERBOHN, J. The impacts of shifting cultivation on secondary forests dynamics in tropics: A synthesis of the key findings and spatio temporal distribution of research. **Environmental Science & Policy**, [s.l.], v. 55, p.167-177, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.005>.

NEARY, D. G et al. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. **Forest Ecology And Management**, [s.l.], v. 122, n. 1-2, p.51-71, set. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(99\)00032-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00032-8).

NEERGAARD, A. de; MAGID, J.; MERTZ, O. Soil erosion from shifting cultivation and other smallholder land use in Sarawak, Malaysia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 125, n. 1-4, p.182-190, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.013>.

OSMAN, K. S. et al. Effect of shifting cultivation on soil physical and chemical properties in Bandarban hill district, Bangladesh. **Journal Of Forestry Research**, [s.l.], v. 24, n. 4, p.791-795, maio 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-013-0368-3>.

PEREIRA, P. et al. Wildfire effects on extractable elements in ash from a Pinus pinaster forest in Portugal. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.3681-3690, 21 jun. 2013. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9907>.

PINHEIRO-DICK, D.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, [s.l.], v. 74, n. 1-2, p.49-63, nov. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s00167061\(96\)00047-x](http://dx.doi.org/10.1016/s00167061(96)00047-x).

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação do p hem cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas:IAC, p.181-188, 2001.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 54, n. 3-4, p.145-153, abr. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987\(00\)00086-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987(00)00086-6).

RAINE, S. R.; SO, H. B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. **Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 44, n. 2, p.249-259, jun. 1993. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00449.x>.

RAISON, R. J. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: A review. **Plant And Soil**, [s.l.], v. 51, n. 1, p.73-108, fev. 1979. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02205929>.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. **Environmental Management**, [s.l.], v. 26, n. 6, p.675-684, dez. 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s002670010124>.

RAISON, R. J.; KHANNA, P. K.; WOODS, P. V. Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal Of Forest Research*, [s.l.], v. 15, n. 1, p.132-140, fev. 1985. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x85-022>.

REID, P. H.; COPELAND, C. Tentative analytical methods used for the testing of farmers samples by the Soil Testing Division, North Carolina Department of Agriculture. **Raleigh**, 1966.

RIBEIRO, B. T. **Aplicação da vinhaça em solos: efeito no balanço de cargas e dispersão de partículas**. 2009. 96 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

RIBEIRO FILHO, A. A.; ADAMS, C.; MURRIETA, R. S. S. The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.693-727, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1981-81222013000300013>.

ROBICHAUD, P.R.; HUNGERFORD, R.D. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 231-232, p.207-219, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00195-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00195-5).

RODRIGUES, T.E. Solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V.H.V.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. eds. **Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, SBCS/UFV, 1996. p. 16-60.

- ROY, J. L.; MCGILL, W. B. Characterization of disaggregated nonwetttable surface soils found at old crude oil spill sites. **Canadian Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 78, n. 2, p.331-344, maio 1998. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/s97-039>.
- RUNDEL, P. W. Impact of Fire on Nutrient Cycles in Mediterranean-Type Ecosystems with Reference to Chaparral. **Mediterranean-type Ecosystems**, [s.l.], p.192-207, 1983. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-68935-2_11.
- SANTÍN, C.; DOERR, S. H. Fire effects on soils: the human dimension. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, [s.l.], v. 371, n. 1696, p.1-10, 23 maio 2016. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- SANTOS, R. F. dos. **Termondecomposição, estudos de carbonização e silificação da matéria orgânica e corpos silicosos em ecossistemas terrestres no Brasil e na Antártica**. 2007. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Solos e Nutrição de Plantas, Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente; Secretaria da Agricultura e Abastecimento; União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. **Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista**. São Paulo, 4 jun. 2007. Disponível em . Acesso em: 20 jan. 2014.
- SCHARENBRUCH, B. C. et al. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. **Geoderma**, [s.l.], v. 183-184, p.80-91, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.010>.
- SCHOEN, R.; ROBERSON, C. E. Structures of aluminum hydroxide and geochemical implications. **The American Mineralogist**, [s.i.], v. 55, n. 1, p.43-77, jan. 1970.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v.139, p.344-350, 1985.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extration from soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 53, p.244-246, 1973.
- SEBEN, G. de F. et al. Aggregate Shape and Tensile Strength Measurement. **Soil Science**, [s.l.], p.1-7, set. 2013. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0b013e3182a4a0a6>.
- SERTSU, S. M.; SÁNCHEZ, P. A. Effects of Heating on Some Changes in Soil Properties in Relation to an Ethiopian Land Management Practice1. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 42, n. 6, p.940-944, 1978. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200060023x>.

SILVA, P. et al. Future Projections of Fire Occurrence in Brazil Using EC-Earth Climate Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.288-297, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150142>.

SIMANSKÝ, V. Changes in Soil Structure and Soil Organic Matter Due to Different Severities of Fire. **Ekológia** (bratislava), [s.l.], v. 34, n. 3, p.226-234, 1 jan. 2015. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/eko-2015-0022>.

SOTO, B; BENITO, E.; DIAZ-FIERROS, F. Heat-Induced Degradation Processes in Forest Soils. **International Journal Of Wildland Fire**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.147-152, 1991. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/wf9910147>.

STIGLITZ, R. et al. Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s.l.], v. 121, p.141-148, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.014>.

SUN, Q.; ZHANG, W.; QIAN, H. Effects of high temperature thermal treatment on the physical properties of clay. **Environmental Earth Science**, [s.i.], v. 75, n. 1, p.1-8, jan. 2016.

TEREFE, T. et al. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. **Geoderma**, [s.l.], v. 143, n. 3-4, p.273-280, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.018>.

THOMAZ, E. L.; ANTONELI, V.; DOERR, S. H. Effects of fire on the physicochemical properties of soil in a slash-and-burn agriculture. **Catena**, [s.l.], v. 122, p.209-215, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.016>.

THOMAZ, E. L.; FACHIN, P. A. Effects of heating on soil physical properties by using realistic peak temperature gradients. **Geoderma**, [s.l.], v. 230-231, p.243-249, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.025>.

THOMAZ, E. L. Fire changes the larger aggregate size classes in slash-and-burn agricultural systems. **Soil And Tillage Research**, [s.i.], v. 165, p.210-217, 2017a.

THOMAZ, E. L. High fire temperature changes soil aggregate stability in slash-and-burn agricultural systems. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 74, n. 2, p.157-162, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2015-0495>.

THOMAZ, E. L. Realistic soil-heating gradient temperature linearly changes most of the soil chemical properties. **Soil Science And Plant Nutrition**, [s.l.], v. 63, n. 1, p.84-91, 2 jan. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2016.1255538>.

TIEDEMANN, A. R. Combustion Losses of Sulfur from Forest Foliage and Litter. **Forest Science**, [s.i.], v. 33, n. 1, p.216-223, mar. 1987.

TSCHAPEK, M. Criteria for Determining the hydrophilicity-hydrophobicity of Soils. **Zeitschrift Für Pflanzenernährung Und Bodenkunde**, [s.l.], v. 147, n. 2, p.137-149, 1984. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.19841470202>.

ÚBEDA, X.; OUTEIRO, L. Physical and Chemical Effects of Fire on Soil. **Fire Effects On Soils And Restoration Strategies**, [s.l.], p.105-132, 5 jan. 2009. Science Publishers. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439843338-c4>.

ULERY, A. L.; GRAHAM, R. C. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 57, n. 1, p.135-140, 1993. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010026x>.

VEGA, J. A. et al. Testing the effects of straw mulching and herb seeding on soil erosion after fire in a gorse shrubland. **Geoderma**, [s.l.], v. 223-225, p.79-87, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.014>.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Escritório de Pedologia e Fertilidade de Solos, 34p, 1969.

VOGELMANN, E. S. et al. Soil hydrophobicity: comparative study of usual determination methods. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.260-266, fev. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140042>.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.**, v. 37, p.29-38, 1934.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 49, n. 1, p.73-84, mar. 1998. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>.

WESSEL, A. T. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. **Earth Surface Processes And Landforms**, [s.l.], v. 13, n. 6, p.555-561, set. 1988. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290130609>.

WOLF, B. The determination of boron in soil extracts, plant materials, composts, water and nutrient solutions. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.** V. 2, p.363-374, 1971.

WOLF, D. C.; SKIPPER, H. D. Soil sterilization. In: WEAVER, R. W. et al. (Eds) **Methods of soil analysis part 2**. Soil Science Society of America, Madison, USA, p. 41-50, 1994.

YODER, R. E. Adirect method of aggregate analysis of soils and study of the physycal nature erosion losses. **Journal American Society Agronomy**, Madison, v. 28, n. 5, p. 337-351, Maio 1936.

ZAVALA, L. M. et al. Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. **Geoderma**, [s.l.], v. 158, n. 3-4, p.366-374, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.004>.

ZIHMS, S. G. et al. Effects of high temperature processes on physical properties of silica sand. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 164, p.139-145, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.004>.

ZISMAN, W. A. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution. **Advances In Chemistry**, [s.l.], p.1-51, jan. 1964. American Chemical Society (ACS).
<http://dx.doi.org/10.1021/ba-1964-0043.ch001>.