



EMMELINE MACHADO FRANÇA

**CARBONO ORGÂNICO E PROPRIEDADES DE SOLOS DA
SERRA DA BOA ESPERANÇA, MG: EFEITO DA ALTITUDE E
DO CULTIVO DO CAFEEIRO**

LAVRAS - MG

2020

EMMELINE MACHADO FRANÇA

**CARBONO ORGÂNICO E PROPRIEDADES DE SOLOS DA SERRA DA BOA
ESPERANÇA, MG: EFEITO DA ALTITUDE E DO CULTIVO DO CAFEIEIRO**

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. Yuri Lopes Zinn

Orientador

LAVRAS – MG

2020

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

França, Emmeline Machado.

Carbono orgânico e propriedades de solos da Serra da Boa
Esperança, MG : efeito da altitude e do cultivo do cafeeiro /
Emmeline Machado França. - 2020.

61 p. : il.

Orientador(a): Yuri Lopes Zinn.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Sequestro de carbono. 2. Matéria orgânica do solo. 3.
Mudança no uso da terra. I. Zinn, Yuri Lopes. II. Título.

EMMELINE MACHADO FRANÇA

**CARBONO ORGÂNICO E PROPRIEDADES DE SOLOS DA SERRA DA BOA
ESPERANÇA, MG: EFEITO DA ALTITUDE E DO CULTIVO DO CAFEEIRO**
**ORGANIC CARBON AND PROPERTIES OF SOILS ON THE BOA ESPERANÇA
RANGE, MG: EFFECT OF ALTITUDE AND COFFEE CULTIVATION**

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 20 fevereiro de 2020.

Dr. Carlos Alberto Silva UFLA

Dr. Alberto Vasconcellos Inda Junior UFRGS

Prof. Dr. Yuri Lopes Zinn

Orientador

LAVRAS – MG

2020

A minha filha e a minha mãe.
Às quais amo e lutam comigo.
Com carinho, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade e todo suporte. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado. A CAPES e a FAPEMIG.

Um agradecimento muito especial ao meu amigo, professor e orientador Yuri Lopes Zinn, que ao longo destes dois anos, me permitiu ser amiga e parceira de trabalho. Agradeço por toda diversão nos nossos ambientes de trabalho, pela confiança e dedicação, principalmente, pela preciosa orientação, ensinamentos compartilhados, maravilhosas correções e desafios, fazendo possível a conclusão deste ciclo tão importante.

Ao professor Carlos Alberto Silva, agradeço pela grandiosa contribuição neste trabalho, e também pelos grandes ensinamentos e incríveis aulas de Matéria Orgânica e Fertilidade do Solo.

A todos os professores os quais tive o privilégio de conviver e contribuíram imensamente com a minha formação.

Aos agricultores Lílian Vilela e Hudson Vilela, pela disponibilização da área de estudo, pela gentil recepção e amizade construída.

Aos funcionários do DCS/UFLA em especial, a Dirce, Maria Alice, Dulce, Téo, Pezão, Cristina, Denise, Cida, Alessandra, dentre os demais, pelo convívio, amizade e apoio para concretização deste trabalho.

Aos parceiros Alessandro, Hellen, Emerson, Filipe e Éder pela ajuda nas amostragens de campo e apoio com as análises.

Aos queridos amigos e companheiros do departamento, principalmente ao amigo Santiago, pela alegria da convivência, amizade e crescimento coletivo. À Júlia e Ana Terra, minhas queridas amigas. Ao meu namorado João, por todo carinho e cumplicidade.

Em especial, agradeço à minha filha Jazmín, pelo sentido da vida e dose diária de amor e alegria. À minha família, meu porto seguro, mãe, pai, irmão, cunhada, padrasto, pelo laço forte, amor, confiança e apoio incondicional.

MUITO OBRIGADA!

*“Quem não se movimenta,
Não sente as correntes que o prendem.”*

Rosa Luxemburgo

RESUMO

O carbono orgânico do solo (COS) é uma propriedade fundamental para a qualidade do solo para a agricultura e o ambiente como um todo. Entretanto, em ecossistemas de elevadas altitudes, pouco se sabe sobre como o COS se comportaria em relação à mudança de uso da terra, o que é crítico pois esses ambientes podem ser muito suscetíveis a alterações climáticas. Este trabalho buscou avaliar as mudanças ocorridas nos teores e estoques de COS, assim como nas propriedades químicas e físicas do solo sob cultivo de cafeeiro, em duas diferentes altitudes na Serra da Boa Esperança, MG. Para isso, dois Cambissolos foram amostrados sob mata nativa e cafezal, nas altitudes de 940 m e 1260 m, em camadas pré-estabelecidas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade. Foram realizadas análises físicas, químicas, micromorfológicas, e também, análises de carbono total e particulado, utilizadas para o cálculo dos estoques de COS. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 4 tratamentos correspondentes aos dois usos da terra em duas altitudes diferentes, em 4 profundidades do solo, em 3 repetições. Os dois solos-referência sob mata nativa foram classificados como CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico Tb leptofragmentário com classe textural argilosa na menor altitude, e franco-argilosa na maior altitude. Estes solos apresentaram elevada pedregosidade, especialmente o solo em maior altitude, mais raso e com menores teores de argila, condizente com um menor grau de intemperismo. Em ambas as altitudes, os solos nativos apresentaram caráter distrófico, devido à baixa fertilidade natural, além de alta acidez e baixa capacidade de troca de cátions. A conversão de mata nativa em lavoura cafeeira diminuiu significativamente a acidez do solo em todas as profundidades, assim como aumentou os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e soma de bases nas duas altitudes avaliadas. Em todos os pontos amostrais, os teores de COS diminuem com o aumento da profundidade do solo. Além disso, a maior parte do COS foi associada às frações de argila+silte, indicando estágio de maior humificação da MOS. Os estoques de COS, quando corrigidos em função da compactação e da pedregosidade, foram maiores em profundidade no solo sob mata nativa a 940 m do que a 1260 m, sugerindo influência do maior teor de argila capaz de armazenar COS e/ou maior biomassa vegetal. Os estoques de COS, corrigidos e não corrigidos para compactação e pedregosidade, foram significativamente maiores na lavoura cafeeira a 1260 m do que na mata nativa. A micromorfologia evidenciou as diferenças texturais entre os solos sob diferentes altitudes e também a marcante presença do COS particulado e humificado na camada de 0-10 cm, principalmente nos solos localizados a 1260 m.

Palavras-chave: Sequestro de carbono. Matéria orgânica do solo. Mudança no uso da terra.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) is a key property affecting soil quality for agriculture and the environment as a whole. However, in high altitude ecosystems, little is known about how SOC would respond to land use change, which is critical since these areas can be highly susceptible to climate change. This work aimed to assess the changes in the SOC contents and stocks, as well as in chemical and physical soil properties under coffee cultivation, at two different altitudes in the Boa Esperança range, Minas Gerais, Brazil. Thus, two Inceptisols were sampled under native forest and coffee plantations, at altitudes of 940 m and 1260 m, in the pre-established depths of 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm. Soil physical, chemical and micromorphological analyzes were carried out, as well as total and particulate carbon, used to calculate SOC stocks. The experimental design was completely randomized, with 4 treatments corresponding to the two land uses at two different altitudes, in 4 soil depths and in 3 replications. The two reference soils under native forest were classified as Dystrudepts, with clayey textural class at the lowest altitude, and clay loam texture at the highest altitude. These soils were highly stony, especially the soil at a higher altitude, which was also shallower and with clay contents in depth, consistent with a lower degree of weathering. At both altitudes, the native soils were dystrophic due to low natural fertility, high acidity and low effective cation exchange capacity. The conversion of native forest to coffee plantation significantly decreased soil acidity at all depths, and increased Ca^{2+} , Mg^{2+} and the sum of bases at the two altitudes. At all sampling points, SOC concentrations decrease with increasing soil depth. In addition, most SOC was associated with the clay+silt fractions, indicating a stage of greater humification. SOC stocks, corrected for compaction and stoniness or not, were significantly higher in the soil under coffee plantation at 1260 m than under native forest. Soil micromorphology illustrated textural differences between soils under different altitudes and also the marked presence of particulate and humified SOC in the 0-10 cm layer, especially in soils at 1260 m.

Keywords: Carbon sequestration. Soil organic matter. Land use change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Minas Gerais e as diferentes cotas na região de Ilícinea, onde foram feitas as amostragens.....	21
Figura 2 - Fotos das lavouras cafeeiras a 940 m (A) e 1260 m (B), mostrando entre-linhas ocupadas por braquiárias e plantas espontâneas.....	22
Figura 3 - Aspecto das matas nativas e perfis de Cambissolos descritos a 940 m (A, B) e 1.260 m (C, D)	29
Figura 4 - Seções delgadas do solo	32
Figura 5 - Seções delgadas do solo mostrando microestrutura	33
Figura 6 - Seções delgadas do solo a 1.260 m de altitude	34
Figura 7 - Fotos dos perfis de Cambissolos sob mata nativa (A e C) e cafezal (B e D)	41
Figura 8 - Teores de carbono orgânico do solo sob diferentes usos em diferentes altitudes e profundidades.	44
Figura 9 - Seções delgadas do solo sob cafezal a 1260 m.....	47
Figura 10 - Seções delgadas do solo sob cafezal a 940 m.....	48
Figura 11 - Detalhes da paisagem local, da floresta semidecidual de altitude ao lado da área de cafeicultura, e do perfil descrito do Cambissolo a 1260 m de altitude.....	57
Figura 12 - Material grosseiro impregnado com carbono orgânico.....	58
Figura 13 - Imagem da mata nativa amostrada a 940 m, e do perfil do Cambissolo descrito.....	60
Figura 14 - Feição pedológica.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Altitudes, coordenadas geográficas, declividade e outras informações sobre os locais de amostragem.	23
Tabela 2 - Caracterização física e o teor de COS dos solos sob mata nativa nas duas diferentes altitudes.	30
Tabela 3 - Indicadores de acidez dos solos sob mata nativa nas duas diferentes altitudes.....	35
Tabela 4 - Características químicas e fertilidade do solo por horizontes sob mata nativa nas diferentes altitudes.	36
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da camada superficial (0-5 cm) e subsuperficial (20-40 cm) dos solos sob mata e cafezal nas duas diferentes altitudes.	37
Tabela 6 - Indicadores de acidez do solo sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.	38
Tabela 7 - Características químicas em relação a fertilidade do solo sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.	40
Tabela 8 - Características físico-química dos solos, sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.	42
Tabela 9 - Carbono orgânico particulado ou carbono na fração areia nos dois diferentes usos e altitudes.....	45
Tabela 10 - Estoques de COS não-corrigidos para compactação e pedregosidade.	46
Tabela 11 - Estoques de COS corrigidos para compactação e pedregosidade.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1	A matéria orgânica do solo e seus mecanismos de retenção	13
2.2	Mecanismos de retenção de carbono orgânico do solo (COS)	14
2.3	Influência da altitude na retenção de COS	16
2.4	Influência da agricultura sobre o COS	17
3	JUSTIFICATIVA	20
4	OBJETIVOS.....	20
5	HIPÓTESES	20
6	MATERIAL E MÉTODOS	20
6.1	Área de estudo	20
6.2	Amostragem do solo	22
6.3	Análises químicas do solo	24
6.4	Análises físicas do solo	25
6.4.1	Densidade do solo	25
6.4.2	Análise granulométrica do solo.....	25
6.5	Carbono orgânico do solo	26
6.5.1	Teor de carbono orgânico particulado do solo	26
6.5.2	Estoques de carbono no solo.....	27
6.6	Micromorfologia do solo.....	27
6.7	Análises estatísticas.....	28
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
7.1	Caracterização dos solos	29
7.2	Efeito da altitude e uso da terra em propriedades físicas e químicas do solo .	36
7.3	Efeito da altitude e uso da terra na morfologia do solo e COS	41
8	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICES.....	56
	APÊNDICE A	56
	APÊNDICE B	59

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma grande preocupação mundial com os níveis de certos gases na atmosfera terrestre, conhecidos como gases de efeito estufa (GEE). Os GEE têm grande efeito na temperatura terrestre, aquecendo a atmosfera em aproximadamente 30°C, e permitindo que haja vida no planeta. Os GEE de maior emissão são o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e principalmente o dióxido de carbono (CO₂), considerado o principal contribuinte, pela maior quantidade em que é emitido em processos naturais e antrópicos.

A atividade humana resulta na produção excessiva desses GEE naturais e outros artificiais, promovendo o chamado aquecimento global, que pode gerar alterações climáticas, como eventos meteorológicos extremos e mudanças no balanço hídrico, colocando em ameaça a segurança alimentar global (LAL, 2004). Os solos do mundo podem contribuir para atenuar os níveis de GEE por meio do sequestro de carbono, que implica na remoção de CO₂ presente na atmosfera pela fotossíntese, com subsequente senescência e transferência da biomassa fixada para o solo, sendo o C armazenado como matéria orgânica do solo (MOS) (BRADY, 2013).

Os solos, em função da decomposição da MOS, liberam CO₂ para a atmosfera, e são importantes ao sistema de autorregulação da atmosfera terrestre. Mudanças no uso terra, como a conversão de florestas naturais em áreas de agricultura, queima de resíduos e práticas como aração e gradagem podem acelerar este processo de respiração, oxidação e perda do carbono orgânico do solo (COS) (BRADY, 2013), contribuindo para o aquecimento global e degradação ambiental. Cerca de 40% da população mundial vive da agricultura, principalmente da agricultura familiar, e quase 95% da produção agrícola global usa os solos como base primária. Lal (2004) destaca que a taxa de aumento da concentração de CO₂ na atmosfera pode ser afetada pela agricultura: alguns manejos de solo utilizados podem levar à maior decomposição da MOS, o que representa grande perda de C do sistema solo (HAGHIGHI; GORJI; SHORAFI, 2010; RESENDE et al., 2016; TEKETAY, 2001). Por outro lado, a recuperação de áreas degradadas e um manejo adequado de solos agrícolas podem resultar em sequestro de COS.

A perda do COS pode ser potencializada com a expansão da agricultura para regiões ecologicamente sensíveis, como as terras altas e áreas primárias de cerrados tropicais, florestas e turfeiras (CERRI et al., 2007a; JUNGKUNST et al., 2012). A literatura mostra que

o aumento da altitude provoca sensíveis mudanças no clima regional, na vegetação clímax e na aptidão para os diversos sistemas de uso da terra (CARVALHO et al., 2010). Tipicamente, os teores de MOS e, conseqüentemente, os estoques de COS, aumentam com a altitude em diferentes ecossistemas (PÁDUA, 2017; TASHI et al., 2016a), devido a menores temperaturas médias, que retardam a decomposição biológica da MOS. Contudo, não se sabe como o uso agrícola afetaria tais estoques em diferentes altitudes: maiores estoques iniciais de COS em altitudes elevadas implicariam em maiores perdas com o cultivo, ou menores temperaturas resultariam em aumento de COS devido à preservação de resíduos da produção agrícola? Considerando que cerca de um terço do carbono do solo do mundo é armazenado nos trópicos, e que terras tropicais sustentam vários cultivos agrícolas, é necessário conhecer os impactos do manejo agrícola em áreas de diferentes altitudes em relação ao COS (LEMMA et al., 2006).

Este trabalho busca avaliar as mudanças ocorridas nos teores e estoques de COS em terras exploradas pela cafeicultura em duas diferentes altitudes. Assim, objetivou-se uma melhor compreensão dos mecanismos de retenção de COS com o aumento do gradiente altitudinal em terras cultivadas sob clima tropical, e sobre como o C é afetado pelo cultivo agrícola.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A matéria orgânica do solo e seus mecanismos de retenção

A matéria orgânica do solo (MOS) é uma mistura complexa e variada de materiais orgânicos presente no solo, compreendendo resíduos vegetais frescos a humificados, biomassa microbiana, raízes finas mortas, e mesmo carvão (STOCKMANN et al., 2013). Para que haja estabilidade dos níveis de MOS ao longo do tempo, restos de plantas e resíduos animais devem continuamente ser aportados e parcialmente decompostos no solo, de forma que a perda total por decomposição seja menor ou igual à adição de restos vegetais (PAUL, 2016; BRADY; WEIL, 2013).

Os solos altamente intemperizados, predominantes em regiões de clima tropical e subtropical úmido, são altamente dependentes da MOS para que suas propriedades químicas e físicas sejam adequadas ao crescimento das plantas (BATIONO et al., 2007; CASTELLANO et al., 2015; RESENDE et al., 2016). Devido à composição mineralógica destes solos, com predomínio de argilominerais de baixa atividade como a caulinita e elevada proporção dos óxidos de ferro (hematita, goethita) e alumínio (gibbsita), aliados à considerável precipitação pluviométrica, estes solos são predominantemente acidificados e pobres em nutrientes (Lepsch, 2011), fazendo com que a MOS seja a principal responsável por processos como capacidade de troca de cátions (CTC), retenção de água a baixas tensões, e minimização da amplitude de variação da temperatura do solo (LAL, 2004; PÁDUA, 2017), dentre outros processos.

Além disso, a MOS fornece nutrientes minerais aos cultivos à medida em que vai sendo decomposta (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Sua atuação como reservatório de macro e micronutrientes, principalmente N, P e S, é de grande importância e, devido a seus múltiplos benefícios, a MOS tem sido considerada como o principal indicador da qualidade do solo (BANWART et al., 2014; PAUL, 2016). Assim, práticas de manejo que levem ao seu depauperamento podem afetar negativamente o ciclo da água e nutrientes, além de influenciar diretamente no processo de mudança do clima global, devido ao enorme estoque de carbono nos solos, especialmente em turfeiras (HURNI et al., 2015; SCHMIDT et al., 2011).

Em média, cerca de metade da massa da MOS é composta por carbono (C), sendo este elemento o componente principal desta fração orgânica do solo (BRADY; WEIL, 2013). O carbono orgânico do solo (COS) pode exercer efeito considerável no clima global, se perdido em forma de CO₂ para a atmosfera com a conversão de extensas áreas de florestas naturais em

agricultura (BANWART et al., 2014; KEESSTRA et al., 2016; LAL; NEGASSA; LORENZ, 2015; STOCKMANN et al., 2013). Dentre os ecossistemas terrestres, o reservatório de COS estimado até 1 m de profundidade é cerca de 1.550 bilhões de toneladas, chegando a ser 3,3 vezes maior que o reservatório de carbono atmosférico e até 4,5 vezes o reservatório biótico, composto por toda biomassa presente na superfície terrestre (LAL; NEGASSA; LORENZ, 2015). O solo, como reservatório de carbono, apresenta portanto grande potencial para sequestrar o dióxido de carbono atmosférico e assim mitigar as emissões antropogênicas deste gás de efeito estufa (DIELEMAN et al., 2013; FUJISAKI et al., 2018; LAL; NEGASSA; LORENZ, 2015; TEFAYE et al., 2016; ZHANG et al., 2018).

Em uma escala global, aproximadamente 8,7 Gt (1 gigaton = 1 bilhão de toneladas) de carbono (C) são emitidos para a atmosfera a cada ano por fontes antropogênicas (Stockmann et al., 2013), destacando o desmatamento, a queima de combustíveis fósseis e as práticas inadequadas de manejo do solo. Desde a Revolução Industrial, com o aumento da queima de combustíveis fósseis, a concentração atmosférica de CO₂ vem aumentando significativamente, passando de 280 ppm em 1750 a 400 ppm em 2015. Este gás é o mais importante para o efeito estufa, e o principal contribuinte para as mudanças climáticas, devido à maior quantidade com que é emitido (CONANT et al., 2011).

Considerando que cerca de um terço do carbono do solo do mundo é armazenado nos trópicos (LEMMA et al., 2006), e que terras tropicais sustentam várias práticas agrícolas, um maior foco no impacto do manejo dessas terras no COS é indispensável (FUJISAKI et al., 2018). Futuramente, espera-se que o aumento previsto de temperatura e das concentrações de CO₂ afetarão a dinâmica da MOS, fazendo-se fundamental uma melhor compreensão dos mecanismos de retenção de MOS e sua mudança com o uso da terra (LUO; WANG; JIANXIN, 2010; MARASENI; PANDEY, 2014; HURNI et al., 2015; ZINN et al., 2018) .

2.2 Mecanismos de retenção de carbono orgânico do solo (COS)

O sequestro de carbono no solo implica na remoção de CO₂ presente na atmosfera pela fotossíntese, com sua subsequente transferência para o solo, sendo o C armazenado como MOS (BANWART et al., 2014; STOCKMANN et al., 2013). Pelo processo de fotossíntese, as plantas retiram o CO₂ da atmosfera e este passa a fazer parte dos seus tecidos vegetais, como folhas, galhos e raízes. Com a morte celular e a queda dos restos vegetais, ocorre o aporte de C ao solo (LAL; NEGASSA; LORENZ, 2015). Estes materiais orgânicos presentes no solo são sujeitos ao ataque da mesofauna e especialmente da microbiota decompositora,

que atua promovendo outras transformações. Substâncias mais lábeis, como açúcares e proteínas são decompostas mais rapidamente, ao passo que substâncias recalcitrantes, as quais apresentam cadeias mais resistentes de carbono, como ligninas e suberinas, demandam um tempo maior para serem decompostas. Essas transformações, portanto, dão origem a dois tipos de materiais, denominadas substâncias húmicas e não-húmicas. As substâncias não-húmicas representam 10-15% do COS, ao passo que as húmicas contribuem com aproximadamente 55-75% da reserva total do COS, sendo assim considerada o componente principal da MOS (STEVENSON, 1994).

Existem vários fatores extrínsecos e intrínsecos ao solo que influenciam a retenção de COS. Dentre os fatores intrínsecos ou internos do solo, destacam-se: textura, mineralogia da argila, agregação e drenagem interna do solo (ZINN et al., 2007). De modo geral, os fatores extrínsecos ao solo que condicionam a retenção de COS correspondem aos fatores de formação do solo propostos por Jenny (1941): material de origem, clima, relevo, organismos e o tempo. A topografia atua principalmente pelo transporte e deposição de solo rico em COS do topo à baixada. Os teores de COS são, em geral, inversamente proporcionais à temperatura média anual, e diretamente proporcionais à precipitação. Por isso, em solos tropicais, pode-se esperar que, devido às altas temperaturas, haja aceleração dos processos biogeoquímicos e maiores taxas de decomposição orgânica, em comparação a solos sob clima temperado. Contudo, essas perdas podem ser compensadas pelo efeito da maior e mais constante produção de biomassa ao longo do ano. Dentre os fatores externos ao solo, o relevo, as condições climáticas (temperatura e precipitação), a vegetação, o histórico de uso da terra e o tipo de manejo são os principais responsáveis pela retenção de COS.

Em relação à textura do solo, a menor fração granulométrica (argila) apresenta elevada área de superfície específica, o que permite uma maior proteção química do COS devido à adsorção de sua fração coloidal e solúvel à superfície dessa fração mineral (VASCONCELLOS et al., 2007; ZINN et al., 2007).

A mineralogia da argila também apresenta destaque na retenção e sequestro de COS, especialmente em solos com altos teores de óxidos de ferro e alumínio, como a maioria dos solos tropicais, cujo grau de intemperismo é geralmente avançado (COWARD; THOMPSON; PLANTE, 2017). Nestes solos, a MOS pode ter grande estabilidade, pois estes minerais apresentam forte interação com os grupos funcionais presentes na MOS, que pode ser adsorvida tanto nas cargas positivas quanto nas cargas negativas dos óxidos de Fe e Al, e conseqüentemente o sequestro de COS é favorecido (PAUL, 2016). Às vezes denominado COS pesado ou complexo organomineral, este COS ligado às frações menores tem maior

estado de alteração, e pode-se esperar que sua decomposição seja mais lenta por estar menos susceptível a ação dos microorganismos e preparo do solo. Já o COS associado à fração mais grosseira do solo (areia) é denominado carbono orgânico particulado, composto tipicamente por material pouco alterado, como raízes finas e tecidos foliares, que portanto é mais predisposto à decomposição (SANTOS et al., 2012; ZINN et al., 2007), embora inclua também biocarvão, que é mais resistente.

A agregação do solo também é importante, pois considera-se que os agregados proporcionam uma barreira física contra decomposição do COS pelos organismos, já que este pode ser encontrado protegido temporariamente no interior dos agregados (BATIONO et al., 2007; HAGHIGHI; GORJI; SHORAFI, 2010). Ainda, em ambientes anóxicos, onde a drenagem ineficiente é geralmente relacionada à topografia, sabe-se que a decomposição da MOS é retardada, resultando em alto acúmulo de COS (paludização).

2.3 Influência da altitude na retenção de COS

As mudanças ambientais que acompanham gradientes de altitude do terreno são de extrema variabilidade (DIELEMAN et al., 2013; NJERU et al., 2017). Korner (2007) as divide em duas categorias: geofísicas e coincidentes. As geofísicas estão relacionadas ao efeito físico de elevação acima do nível do mar, como pressão atmosférica e temperatura, ao passo que as coincidentes não são necessariamente específicas da altitude, como: umidade, horas específicas de sol, geologia e uso da terra. Estas últimas vêm trazendo confusão na literatura científica no que diz respeito a respostas ecológicas envolvendo áreas montanhosas. Diante desta complexidade, Pádúa (2017) e Tashi et al. (2016a) sugerem que as peculiaridades de cada região, em termos de clima, vegetação, relevo, entre outros, sejam estudadas cuidadosamente e levadas em consideração ao se comparar diferentes estudos.

Com relação aos estudos com COS, a literatura vem mostrando que áreas mais elevadas, sob floresta tropical, subtropical e cerrado, apresentam maiores teores de COS (PÁDUA, 2017; TASHI et al., 2016b; ZINN et al., 2018) em relação a menores altitudes. Alguns autores atribuem esta tendência ao efeito que a variação altitudinal induz no clima, vegetação e microorganismos.

Araujo et al. (2017) não encontraram correlação entre teores de argila (e argila+silte) e de óxidos de Fe e Al na concentração de SOC em terras altas tropicais (ca. 900m), sugerindo que isto possa ser devido ao efeito da altitude, já que em estudos anteriores para terras baixas tropicais (ca. 500 m), essa tendência foi relatada (Zinn et al., 2007). Ainda nessa mesma

região (Lavras-MG), Zinn et al. (2018) observaram que o controle textural (i.e., proporção entre teores argila + silte e de COS) da retenção do COS não foi aparente na altitude de 1.235 m, embora o tenha sido a 1.060 m, sugerindo que o efeito das condições climáticas na maior altitude preponderou sobre o efeito da textura na retenção do COS.

Nos estudos de Njeru et al. (2017), os estoques de COS e nitrogênio total (NT) ao longo de um gradiente altitudinal (867 a 2.200 m) na África Oriental, foram determinados pelos tipos de solo, uso da terra, topografia e diferenças ecológicas resultantes de macro- e microclimas altitudinais. De acordo com as três categorias de altitude estudada: baixa (abaixo de 1.400 m), média (entre 1.400 e 1.800 m) e alta (entre 1.800 a 2.250 m), os estoques de COS e NT foram significativamente mais baixos na faixa de altitude baixa e média em comparação com a faixa de maior altitude. Eles observaram que a temperatura diminuía ao passo em que a altitude aumentava, em acordo com Fritzsos et al. (2008), que relatam que a cada 126 m de elevação vertical, a temperatura do ar diminui aproximadamente 1°C, no estado do Paraná.

No estudo de Tashi et al. (2016) em florestas do Himalaia, aumentos nos estoques de COS e N com o gradiente altitudinal foram influenciados principalmente pelo aumento do aporte de C e N nos solos, juntamente com o efeito decrescente da temperatura que reduz a taxa de decomposição dos resíduos orgânicos.

Todavia, resultados contrastantes têm sido encontrados na literatura sobre o efeito da altitude nos estoques de COS. Alguns autores relatam ausência de correlação entre essas variáveis (MORAIS et al., 2013; ZIMMERMANN et al., 2010), ao passo que outros relatam declínio do COS com o aumento da altitude (ZHU et al., 2010; WILCKE et al., 2008; GUTIERREZ-GIRON et al., 2015). O declínio de COS associado ao aumento da altitude pode ser justificado pelo efeito do tipo de vegetação encontrada. No estudo de Zimmermann et al. (2010), a seguinte ordem decrescente para o estoque de COS foi encontrada: floresta tropical > vegetação arbustiva > campo rupestre, o que foi relacionado à profundidade dos solos em cada formação e suas respectivas capacidades de armazenamento de água, bem como à produção de biomassa.

2.4 Influência da agricultura sobre o COS

As mudanças no uso da terra, e em especial a conversão de vegetação nativa para agropecuária, podem reduzir significativamente os estoques de COS por oxidação acelerada pelo cultivo mecânico ou erosão (FUJISAKI et al., 2018; LIPPER et al., 2014; TEKETAY,

2001). Assim, a agricultura tem sido considerada como um dos principais fatores históricos da emissão antropogênica de CO₂. Segundo (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2017), entre os anos 1990 e 2015, as maiores parcelas de emissões brutas de GEE no País foram oriundas de mudanças de uso da terra, chegando a quase 80% em alguns anos. Dentro deste setor, as emissões de CO₂ estão associadas principalmente ao desmatamento na Amazônia, representando quase 60% no ano de 2014. Ainda, processos de queima de resíduos florestais são responsáveis por emissões de CH₄ e N₂O.

As emissões de GEE provenientes da agricultura e das mudanças no uso da terra são difíceis de serem quantificadas. Devido à complexidade dos ecossistemas e processos envolvidos, o impacto da mudança no uso da terra agrícola na respiração do solo e consequente emissão de CO₂ não são totalmente compreendidos (TASHI et al., 2016a; ZHANG et al., 2018). Alguns autores sugerem que mais estudos de campo sejam feitos objetivando avaliar os fluxos de CO₂, para melhor entendimento dos efeitos da mudança no uso da terra e potencial mitigação da mudança climática (CALDEIRA et al., 2008; ZHANG et al., 2018; ZINN; MARRENJO; SILVA, 2018).

Como relatado anteriormente, os estoques de carbono no solo variam substancialmente em todo o mundo, dependendo do tipo de vegetação, profundidade do solo e uma série de outras variáveis (TASHI et al., 2016). Como o reservatório de C do solo é aproximadamente três vezes a quantidade de C atmosférico, mudanças relevantes na concentração de CO₂ na atmosfera podem ocorrer a partir de uma pequena variação nos estoques de C dos solos do mundo (LUO; WANG; JIANXIN, 2010; MACHADO, 2005). Considerando que um novo equilíbrio do C no solo pode levar décadas para ser alcançado, entender sua dinâmica e adotar práticas de manejo que evitam o declínio de C é indispensável (WEST; POST, 2002).

Sabe-se que uma rápida perda de COS ocorre com o desmatamento e posterior cultivo do solo, podendo alcançar taxas de até 50% nos primeiros 20 anos, acelerando as emissões de CO₂ do solo para a atmosfera. O desmatamento na Etiópia, especificamente em altitudes mais elevadas (2100 m e 2340 m), seguido pelo cultivo de milho, provocou uma perda de 43% do total de COS na camada de 0-50 cm após 75 anos de cultivo, ao passo que 20 anos de reflorestamento com espécies exóticas promoveu o sequestro de COS (LEMMA et al., 2006).

Em se tratando de regiões em elevadas altitudes, os estudos de Teketay (2001) e Tesfaye et al. (2016) relatam que grande parte das florestas em terras altas da Etiópia estão desaparecendo ou sendo convertidas em terras agrícolas, acelerando a degradação do solo e erosão, que pode ser estimada em perda de 1,9 milhões de toneladas de solo fértil por ano. Por outro lado, Taylor et al. (2010) e Zhang et al. (2018) mostraram que mudanças de

monocultura para o cultivo em rotação contínua, assim como modificações de sistemas com pousio para sistemas contínuos e mais biodiversos, apresentam elevado potencial para aumentar o COS nos solos agrícolas. Isso mostra que se por um lado, práticas de manejo utilizadas na agricultura podem resultar em emissão de CO₂, por outro lado, formas adequadas de utilização, manejo e preparo da terra, podem causar efeito inverso, aumentando a quantidade de CO₂ capturado, pelo incremento de C no solo e na vegetação.

É possível influenciar o sequestro de COS selecionando espécies de árvores para reflorestamento. O plantio de *Araucaria angustifolia* em clima tropical de altitude (1300 m) no sul de Minas Gerais resultou em alto sequestro de COS (50 Mg ha⁻¹) para camada de 0-20 cm em relação à mata nativa (FIALHO, 2012). O reflorestamento com *Eucalyptus grandis* por 20 anos, contudo, apresentou níveis iguais aos da floresta nativa. Outros autores corroboram essa informação e associam a provável diferença à maior produção de serapilheira, e a formação de agregados que favorecem o acúmulo de COS (LEMMA et al., 2006; SOUZA; PREZOTTI, 2012).

O estudo de Souza e Prezotti (2012), objetivando o monitoramento nos teores de MOS e contabilização do estoque de C em solos submetidos a 10 anos de práticas orgânicas de agricultura, mostrou que esse sistema apresenta elevado potencial para sequestro de carbono e aumento nos teores de MOS. Dentre as práticas usuais realizadas na área de estudo, os autores ressaltam: a produção diversificada de culturas com preservação parcial da vegetação nativa local, manejo da vegetação espontânea entre linhas de cultivo, adubação orgânica com esterco de galinha, uso de biofertilizante líquido em adubação de cobertura, cultivo solteiro de adubos verdes em rotação, plantio direto de hortaliças sobre palhada de adubos verdes e manutenção de corredor de refúgio com espécies espontâneas.

Os estoques de C no solo em pastagem também tendem a ser mais baixos do que em mata nativa (GROPPO et al., 2015; LEIFELD et al., 2009). Em uma pastagem sob clima subtropical, localizada na China em altitudes elevadas (2200 m), os estoques de COS mostraram-se concentrados em formas lábeis e portanto mais suscetíveis a decomposição (Leifeld et al., 2009), indicando que estas terras são potencialmente mais vulneráveis a perdas de COS se cultivadas, e apresentam portanto maior potencial de contribuição para o aquecimento global.

3 JUSTIFICATIVA

Devido à alta variabilidade dos ecossistemas sob elevadas altitudes, pouco se sabe sobre como solos cultivados se comportariam em relação à retenção e perda de COS. A potencial sensibilidade destes ambientes a alterações climáticas faz com que um maior conhecimento de mecanismos para sequestro de carbono nessas áreas seja necessário para promover o manejo sustentável, com foco na mitigação da emissão de CO₂ e manutenção da qualidade do solo.

4 OBJETIVOS

Este trabalho busca avaliar as mudanças ocorridas nos teores e estoques de COS, assim como nas propriedades químicas e físicas do solo, em terras exploradas pela cafeicultura em duas diferentes altitudes na Serra da Boa Esperança, em Ilícinea-MG. Assim, objetiva-se uma melhor compreensão dos mecanismos de retenção de COS com o aumento do gradiente altitudinal em terras cultivadas sob clima tropical.

5 HIPÓTESES

- a) A concentração de COS aumenta com o incremento da altitude nas áreas amostrais cultivadas e nativas.
- b) Se solos cultivados na altitude mais elevada armazenam maiores concentrações de COS, proporcionalmente, serão mais propensos à perda de COS do que solos em altitude mais baixa.

6 MATERIAL E MÉTODOS

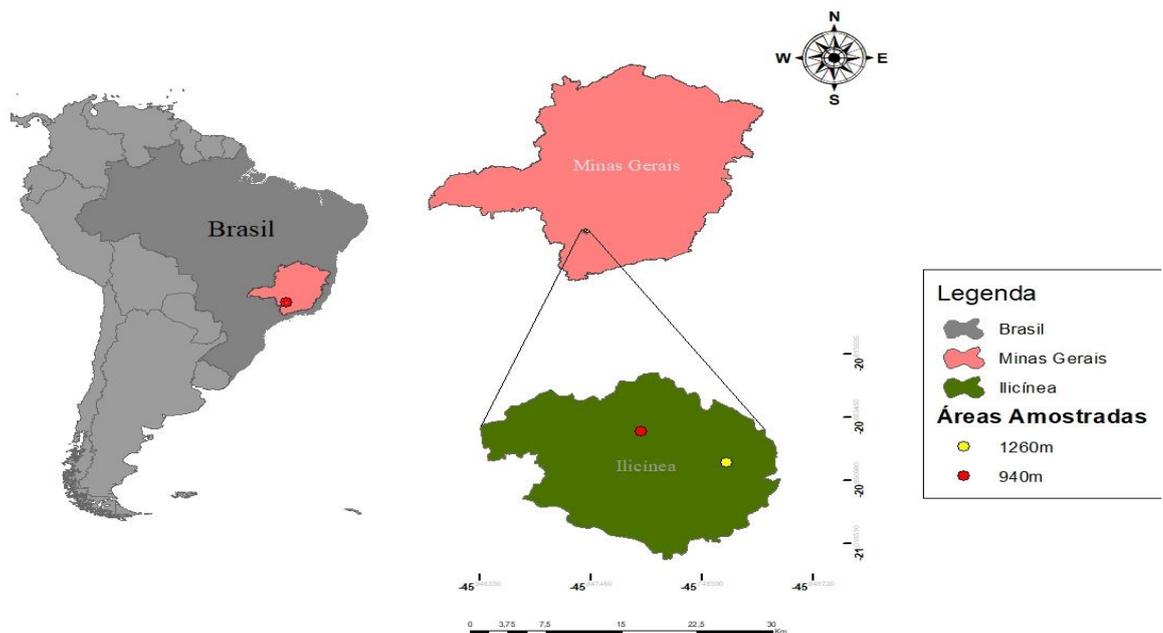
6.1 Área de estudo

Após levantamento prévio em algumas áreas sob exploração da cafeicultura, no município de Ilícinea-MG, na região Sul de Minas Gerais, foram selecionadas duas áreas semelhantes, as quais apresentaram diferença altitudinal de aproximadamente 300 m. Ambas as áreas compreendem Cambissolos formados a partir do mesmo material de origem, meta-sedimentos da Serra da Boa Esperança, dentro da mesma região climática e com o mesmo declive, que estão sendo cultivadas com *Coffea arabica* L. por aproximadamente 3,5 anos e

apresentam manejo semelhantes com entre-linhas ocupadas por braquiárias e plantas espontâneas. Outra característica comum das áreas utilizadas para seleção foi a presença de vegetação florestal nativa próximo a lavouras cafeeiras, que serviram de controle.

O clima da região, do tipo Cwa conforme classificação de Köppen, apresenta temperatura média de 20,2°C, sendo janeiro o mês mais quente e junho o mês com a menor média de temperatura. Em relação à pluviosidade, a média anual é de 1488 mm, com a maioria da precipitação ocorrendo no mês de dezembro, em uma média de 278 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2019). As áreas selecionadas encontram-se nas cotas 940 m e 1260 m de altitude.

Figura 1 Mapa de Minas Gerais e as diferentes cotas na região de Ilícinea, onde foram feitas as amostragens.



Fonte: Do autor (2019).

6.2 Amostragem do solo

Para amostragem do solo, foram selecionadas duas áreas sob altitudes diferentes cultivadas com *Coffea arabica* L. (Figura 2). A área de maior altitude, anteriormente ocupada com pastagem composta por braquiária por aproximadamente 20 anos, atualmente apresenta-se ocupada com a cultivar Catuaí e, a área de menor altitude, com a cultivar Acauã, ambos cultivares de porte baixo. Uma mata secundária, com idade aproximada de 20 anos, foi amostrada para controle do uso da terra na área de altitude mais elevada a uma distância de cerca de 20 m, assim como uma área de mata nativa na cota mais baixa.

Figura 2 Fotos das lavouras cafeeiras a 940 m (A) e 1260 m (B), mostrando entre-linhas ocupadas por braquiárias e plantas espontâneas.



Fonte: Do autor (2019).

As principais características geográficas e algumas observações relevantes de cada local amostral encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Altitudes, coordenadas geográficas, declividade e outras informações sobre os locais de amostragem.

Altitude, latitude, longitude	Declive	Uso	Observações
940 m 20°53'54,7" S 45°48'08,3" W	11°	Cafezal	Subsolagem (linha) + gradagem (área total). Alta quantidade de formigas. Adubação utilizada exclusivamente via fertilizantes químicos (NPK). Entrelinhas com menos cobertura espontânea do que a 1.260 m. Densidade de plantio = 6000 pl ha ⁻¹ .
		Mata nativa	Altura média das árvores = 8 m. Presença de cupins e braquiária esparsa.
1260 m 20°55'56,95" S 45°43'35,6" W	11°	Cafezal	Subsolagem (linha) a 50 cm na implementação da cultura. Roçagem das entre-linhas na época da seca e aplicação de herbicida em época de chuva. Adubação: 2 ton/ha/ano de fertilizante orgânico + 2 ton/ha/ano NPK + fosfatagem. Densidade de plantio = 6000 pl ha ⁻¹ .
		Mata nativa	Altura média das árvores = 5 m. Presença de minhocas. Presença de Candeia (<i>Eremanthus erythropappus</i> (D.C.) MacLeish).

Fonte: Do autor (2019).

Em cada um dos pontos amostrais (diferentes altitudes e usos da terra) foram alocadas aleatoriamente três repetições, que consistiram de trincheiras ou perfis de solo de 50 cm de profundidade, devido à rasa profundidade do solo, escavados com pá de corte, enxadão e enxada em áreas de igual declive. Uma das repetições sob mata nativa foi selecionada para descrição morfológica do perfil, conforme Santos et al. (2015) e classificação pedológica conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018).

Amostras de solo foram coletadas das paredes das trincheiras, seguindo duas formas distintas de estratificação vertical: em camadas pré-estabelecidas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–40 cm (3 repetições), e seguindo os horizontes pedogenéticos, esta última forma exclusivamente para os dois perfis selecionados para a descrição morfológica e classificação taxonômica.

As amostras indeformadas destinadas à análise de densidade do solo foram coletadas com anéis volumétricos metálicos do tipo Kopeccky, que foram inseridos com auxílio de

marreta de borracha em cada camada pré-estabelecida ao longo do perfil, removendo cuidadosamente o volume de solo e as raízes excedentes, com auxílio de uma faca.

As amostras indeformadas para a análise da micromorfologia foram coletadas em caixas de Kubiena em PVC, da camada de 0–10 cm de cada tratamento, com o auxílio de espátula e faca, e armazenadas cuidadosamente para conservação da estrutura da amostra.

As amostras deformadas de solo passaram por secagem à sombra durante 5 dias e, em seguida foram fracionadas por peneiramentos, utilizando conjunto de peneiras de malhas de 4,75 e 2 mm, para obtenção dos cascalhos e da terra fina seca ao ar (TFSA), isto é, fração peneirada < 2 mm.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com 4 tratamentos correspondentes aos dois usos da terra vs. duas altitudes diferentes, em quatro profundidades e três repetições, totalizando 48 amostras de solo.

6.3 Análise química do solo

As análises químicas do solo foram determinadas na TFSA de acordo com métodos compilados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (DONAGEMA et al., 2011) conforme detalhado a seguir.

O pH do solo foi determinado em água na proporção 1:2,5 com 10 cm³ de água destilada. Com o auxílio de um bastão de vidro, procedeu-se a agitação por aproximadamente 30 segundos, deixando posteriormente em repouso por 1 hora e, logo em seguida, a leitura em potenciômetro com eletrodo combinado foi realizada.

Para extração de P e K disponíveis, em um erlenmeyer de 250 ml foram colocados 10 cm³ de TFSA e adicionados 100 ml de solução extratora de Mehlich-1 (HCL 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N), seguido por 5 minutos em agitador circular horizontal e repouso durante aproximadamente 16 horas. Para a determinação de P disponível, foram pipetados 5 ml do sobrenadante, com uma adição de 10 ml de solução ácida de molibdato de amônio diluída e ácido ascórbico como redutor, que foi agitado e, posteriormente, deixado em repouso por 30 minutos para desenvolvimento da cor. A leitura foi feita no fotocolorímetro usando filtro vermelho (comprimento de onda = 725 nm). Para determinação do K, foram pipetados 20 ml do extrato e realizada a leitura em fotômetro de chama.

Para determinação do fósforo remanescente (P-rem), foram adicionados a um erlenmeyer de 125 ml 5 cm³ de TFSA e 50 ml de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo 60 mg L⁻¹ de P, seguido por agitação por 5 minutos e repouso durante aproximadamente 16 horas. Uma

alíquota de 10 ml do sobrenadante foi recolhida e colocada em balão volumétrico de 50 ml, tendo o volume completado com água destilada. Foram misturados 5 ml da solução diluída com 5 ml da solução coquetel (solução 725 + ácido ascórbico). Após 30 minutos, foi feita a leitura da absorbância no comprimento de onda de 725 nm.

Para extração de Ca, Mg e Al, em um erlenmeyer de 250 ml foram colocados 10 cm³ de TFSA e adicionado 100 ml de solução extratora KCl 1 mol L⁻¹, procedendo-se a agitação por 5 minutos em agitador circular horizontal, seguido por repouso durante aproximadamente 16 horas. Após este período, o Ca e Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al determinado por titulação com NaOH 0,0125 mol L⁻¹ utilizando 3 gotas de indicador azul e bromotimol.

Para a extração da acidez potencial do solo, foram colocados 10 cm³ de TFSA em erlenmeyer de 50 ml e adicionado 25 ml de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e 5 ml em solução tampão SMP. Procedeu-se a agitação por aproximadamente 15 minutos e posteriormente deixou-se em repouso durante 1 hora. A leitura foi feita posteriormente sem agitar a amostra. A acidez potencial do solo foi estimada em função da final, mistura solo-solução SMP.

6.4 Análises físicas do solo

A caracterização física do solo foi realizada por meio das análises de densidade do solo e granulometria, com 3 repetições coletadas em todas as profundidades, conforme descrito a seguir.

6.4.1 Densidade do solo

A densidade do solo (Ds) foi determinada de acordo com Grossman e Reinsch (2002), a partir das amostras coletadas nos 5 cm finais de cada camada, com anéis volumétricos de Kopecky, de volume interno de 77,78 cm³. Estas amostras foram secas em estufa por 24 horas a 105 ° C e então pesadas para a análise gravimétrica.

6.4.2 Análise granulométrica do solo

As análises granulométricas foram realizadas pelo método da pipeta, de acordo com Gee e Bauder (1986), com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16 h. Foram pesadas 10 g de TFSA em garrafas de 500 ml e adicionados 10 ml de NaOH 1N e aproximadamente 50

ml de água destilada, até cobrir a amostra. As garrafas foram alocadas em agitador rotatório de 360°, onde ficaram em agitação lenta por 16 horas. Toda a suspensão foi passada por peneira de 0,053 mm para proveta de 500 ml, onde teve o volume completado com água destilada. A fração areia, retida na peneira de 0,053 mm, foi colocada em béquer previamente tarado e identificado, o qual foi levado a estufa a 105°C por aproximadamente 24 horas, após o que a fração areia foi pesada e quantificada. Para a determinação do teor de argila e silte, foi medida a temperatura da suspensão e estipulado o tempo de sedimentação da menor partícula de silte (2 mm) segundo a Lei de Stokes, considerando a densidade de partícula igual a 2,65 g cm⁻³. Depois de decorrido o tempo de sedimentação devido, uma alíquota de 10 ml da suspensão foi pipetada a uma profundidade de 5 cm e transferida para um béquer tarado e identificado, o qual foi levado a estufa a 105°C por aproximadamente 24 horas, após o que o material foi pesado e quantificado. O teor de silte foi quantificado por diferença.

6.5 Carbono orgânico do solo

As análises de carbono orgânico do solo (COS) foram realizadas pelo método da combustão seca em analisador elementar modelo Vario TOC Cube, onde é medido o CO₂ produzido após combustão da amostra de solo a 950°C em sensor infravermelho.

Amostras de TFSA passadas na peneira de 2,00 mm foram trituradas em almofariz e passadas em peneira de 60 mesh para homogeneização, devido à pequena quantidade utilizada na análise. Aproximadamente 15 mg da amostra finamente moída foram pesadas em folhas de estanho, onde foram acondicionadas e calcinadas em analisador elementar para análise do C total.

6.5.1 Teor de carbono orgânico particulado do solo

O carbono orgânico particulado (COP, i.e. o COS contido na fração areia) foi determinado no material obtido após dispersão em NaOH 0,1 N similar à utilizada para análise textural, segundo Zinn et al. (2007a). A fração areia retida na peneira de 0,053 mm, obtida durante a análise granulométrica do solo pelo método da pipeta, foi triturada em almofariz e passadas em peneira de 60 mesh para sua homogeneização. Aproximadamente 20 mg da mesma foram pesadas em folhas de estanho, onde foram embrulhadas e colocadas no analisador elementar para análise de C total.

6.5.2 Estoques de carbono no solo

Os estoques médios de COS foram calculados para as camadas de 0-20 e 0-40 cm de solo, utilizando teor de C orgânico e densidade do solo da respectiva camada em cada repetição. O estoque de C orgânico de cada camada corresponde ao produto do teor de carbono do solo pela densidade do solo e pela profundidade da camada, conforme a seguinte fórmula (ZINN; LAL; RESCK, 2005b):

$$\text{COS} = \text{C} * (\text{Ds}) * \text{volume}$$

em que:

COS: carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1});

C: teor de carbono do solo (Mg Mg^{-1});

Ds: densidade do solo (Mg m^{-3});

Volume do solo $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (calculado a partir da espessura da camada (m) x $10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$)

6.6 Micromorfologia do solo

Os blocos indeformados coletados na camada superficial do solo (0-10 cm) passaram por lento processo de secagem ao ar, na sombra, seguidos por três dias em estufa a 40°C , e um dia a 80°C , buscando garantir a preservação da estrutura original do solo. Já secas, as amostras foram impregnadas com resina epóxi tipo Silaex SQ 2003/3182®, preparada na proporção 1,00A/0,85B, e foram submetidas a vácuo de 560 mm de Hg durante 4 dias em dessecadores acoplados a bomba de vácuo para remoção de bolhas de ar. Em seguida, foram novamente levadas à estufa por 4 horas a 100°C e mais 4 horas a 140°C , para endurecimento e cura da resina. Com a resina endurecida e curada, as amostras foram cortadas em serra de disco diamantado, polidas e coladas em lâminas de vidro com resina epóxi Hillquist® na proporção 7A/3B para confeccionar as seções finas. As seções foram então desgastadas e polidas sobre chapas de vidro, com uso de abrasivos de diferentes granulometrias até atingir a espessura desejada de $30 \mu\text{m}$, aferida por meio das cores de interferência para quartzo definidas pela Carta de Michel-Lévy. Antes de serem coladas, as lâminas de vidro também foram polidas para padronização da espessura e melhoria da qualidade das seções delgadas. A interpretação das imagens micromorfológicas foi realizada conforme Stoops (2003) com uso de microscópio petrográfico com polarizadores e câmera fotográfica acoplada.

6.7 Análises estatísticas

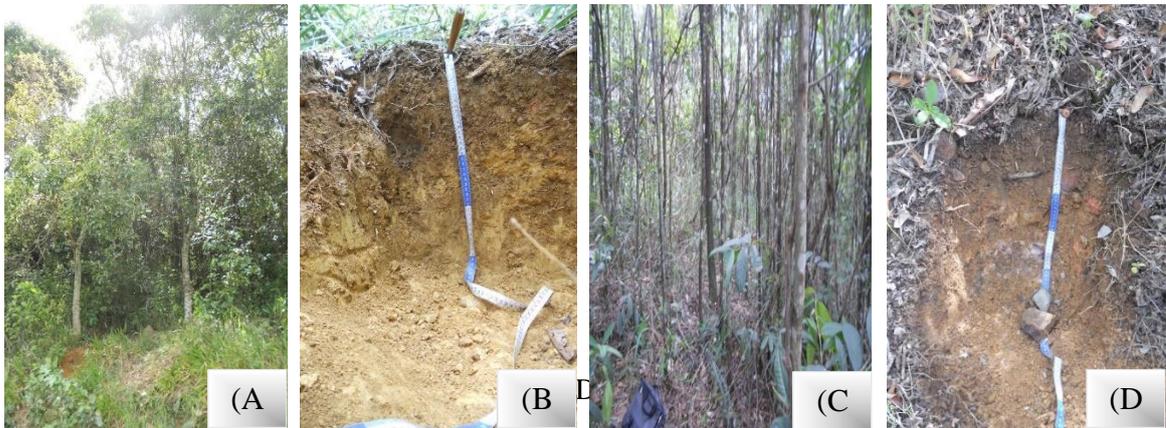
Os resultados foram submetidos à análise de variância e os dados dos tratamentos submetidos ao teste de Tukey- Kramer ($P < 0,05$), utilizando os programas estatísticos Speed Stat e Sigma Plot 12.5.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caracterização dos solos

No presente estudo, utilizou-se como referência os solos sob mata nativa nas duas diferentes altitudes estudadas (Figura 3), que são mostrados e apresentados a seguir.

Figura 3 Aspecto das matas nativas e perfis de Cambissolos descritos a 940 m (A, B) e 1.260 m (C, D).



Ambos os solos foram classificados como CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico Tb leptofragmentário (SiBCS, 2018). De acordo com a descrição morfológica dos perfis e análises laboratoriais, o solo a 940 m apresentou classe textural argilosa e profundidade de aproximadamente 50 cm, indicando intemperismo moderado, com fragmentos de saprolito observados a partir de 20 cm de profundidade. O solo a 1260 m apresentou textura franco-argilosa e foi ainda mais raso, com profundidade de aproximadamente 33 cm.

Uma tendência de diminuição dos teores de COS com a profundidade foi observada nos dois solos, assim como uma tendência oposta para a densidade do solo. A 1260 m, um horizonte A com 4 cm de espessura e alto teor de carbono total (7,6%) foi observado, o que provavelmente está relacionado à influência da altitude, reduzindo a taxa de decomposição dos resíduos biológicos, e a um elevado aporte de material vegetal na mata nativa (Tabela 2).

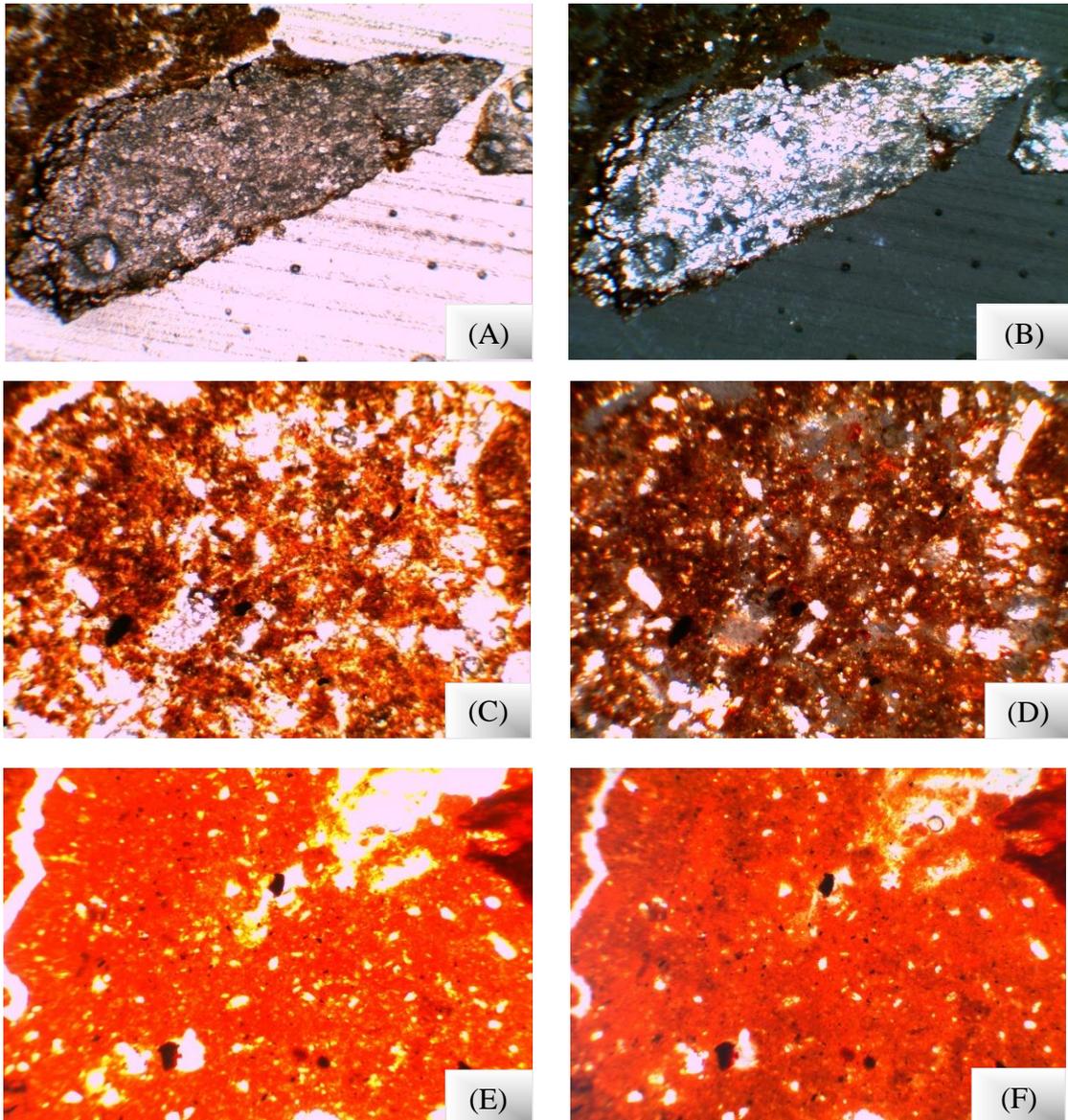
Tabela 2 Caracterização física e teor de COS dos solos sob mata nativa nas duas diferentes altitudes.

Uso/ Altitude	Horizontes e profundidades	Pedregosidade	Classe de pedregosidade	Areia	Silte	Argila	Classe textural	CT	Ds
	cm	g . Kg-1	SiBCS	g . Kg-1			SiBCS	%	Mg m ⁻³
Mata/ 940 m	A (0-6)	330	Cascalhenta	250	240	510	Argilosa	4,1	0,95
	Bi (6-20)	510		250	280	460		2,4	0,92
	C (20-50+)	300		280	360	370		0,9	1,49
Mata/ 1260 m	A1 (0-4)	520	Muito cascalhenta	350	280	370	Franco- argilosa	7,6	1,09
	A2 (4-12)	440		320	280	400		3,3	1,19
	A3 (14-20)	720		340	310	350		1,7	1,34
	B (20-33)	750		380	310	310		1,1	1,84

Fonte: Do autor (2019)

No aspecto micromorfológico, as seções finas apresentaram material grosseiro com muitos fragmentos de material de origem, formado por meta-sedimentos da Serra da Boa Esperança, basicamente grãos de quartzo e fragmentos de quartzito (Figura 4). Estes fragmentos apresentam forma angular e estão tipicamente imersos na matriz de solo (Figura 4). A angularidade dos grãos grosseiros sugere o caráter autóctone, ou seja, estes solos são formados *in situ*, com pouca evidência de transporte. A 1.260 m de altitude, pode-se perceber menores teores de argila (Tabela 2), compatíveis com menor grau de intemperismo, além de maior pedregosidade e dimensão do material grosseiro, em acordo com a tabela 2. Ocorre também uma coloração mais enegrecida do material fino, associado à maior concentração de COS (Tabela 2) quando comparado à altitude mais baixa. Tal tendência foi notada por Pádua (2017), que observou coloração cada vez mais escura da matriz do solo proporcionada pelo aumento do teor de COS, com o aumento da altitude em topossequências no Sul de Minas Gerais. Assim, a 940 m, em acordo com os maiores teores de argila na análise granulométrica (Tabela 2), o solo apresentou domínios argilosos mais expressivos, porém mais claros e alaranjados (Figura 4), em acordo o menor teor de COS e também maior teor de argila.

Figura 4 Seções delgadas do solo mostrando: A e B) fragmento angular de quartzito a 1260 m de altitude; C e D) microestrutura apedal e grãos de quartzo angulares imersos em uma matriz fina nebular brunada (1.260 m de altitude); E e F) microestrutura maciça, poro planar (fissura) e grãos de quartzo angulares imersos em uma matriz fina nebular (940 m). Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagens com 2,3 mm de largura.

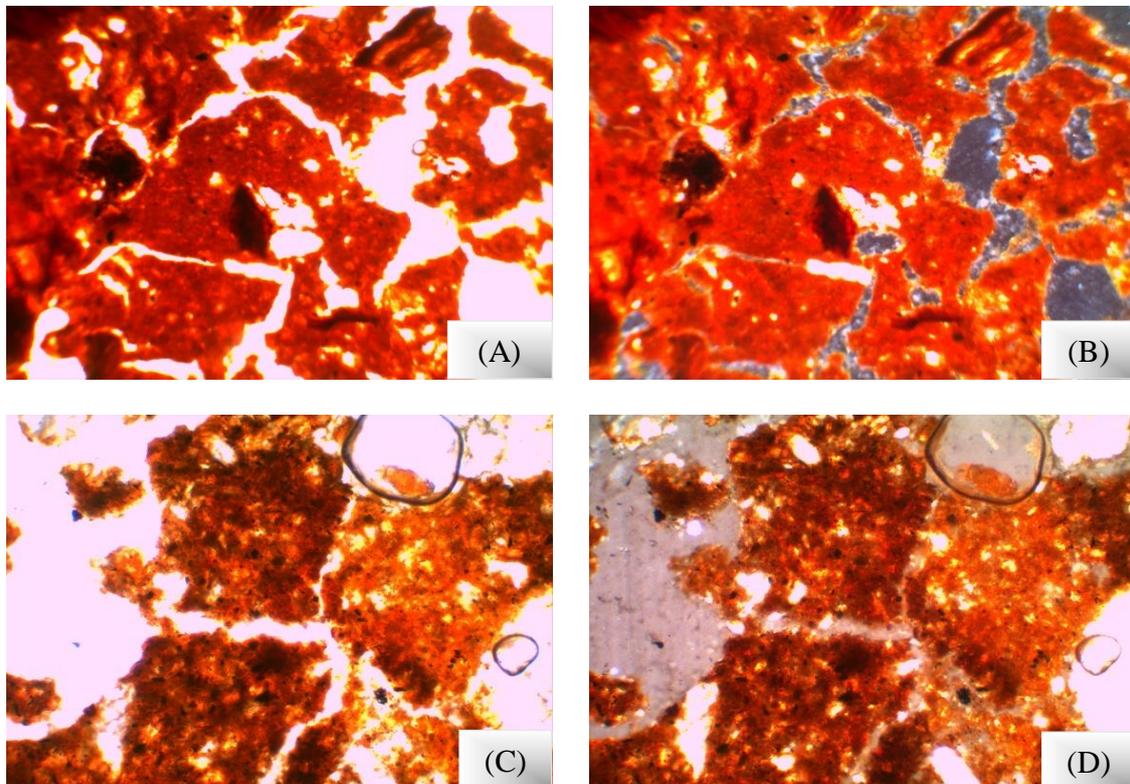


Fonte: Do autor (2019).

Sabe-se que a textura do solo tem forte ligação com o material de origem (Brady, 2013). Todavia, como mostrado nos estudos de Pádua (2017), há uma relação entre pedoplasmação (gênese da argila), altitude e intemperismo ao longo de serras e montanhas, fazendo com que áreas mais baixas (e mais quentes) apresentem maior grau de intemperismo e, portanto, maiores teores de argila independentemente do material de origem, ao passo que,

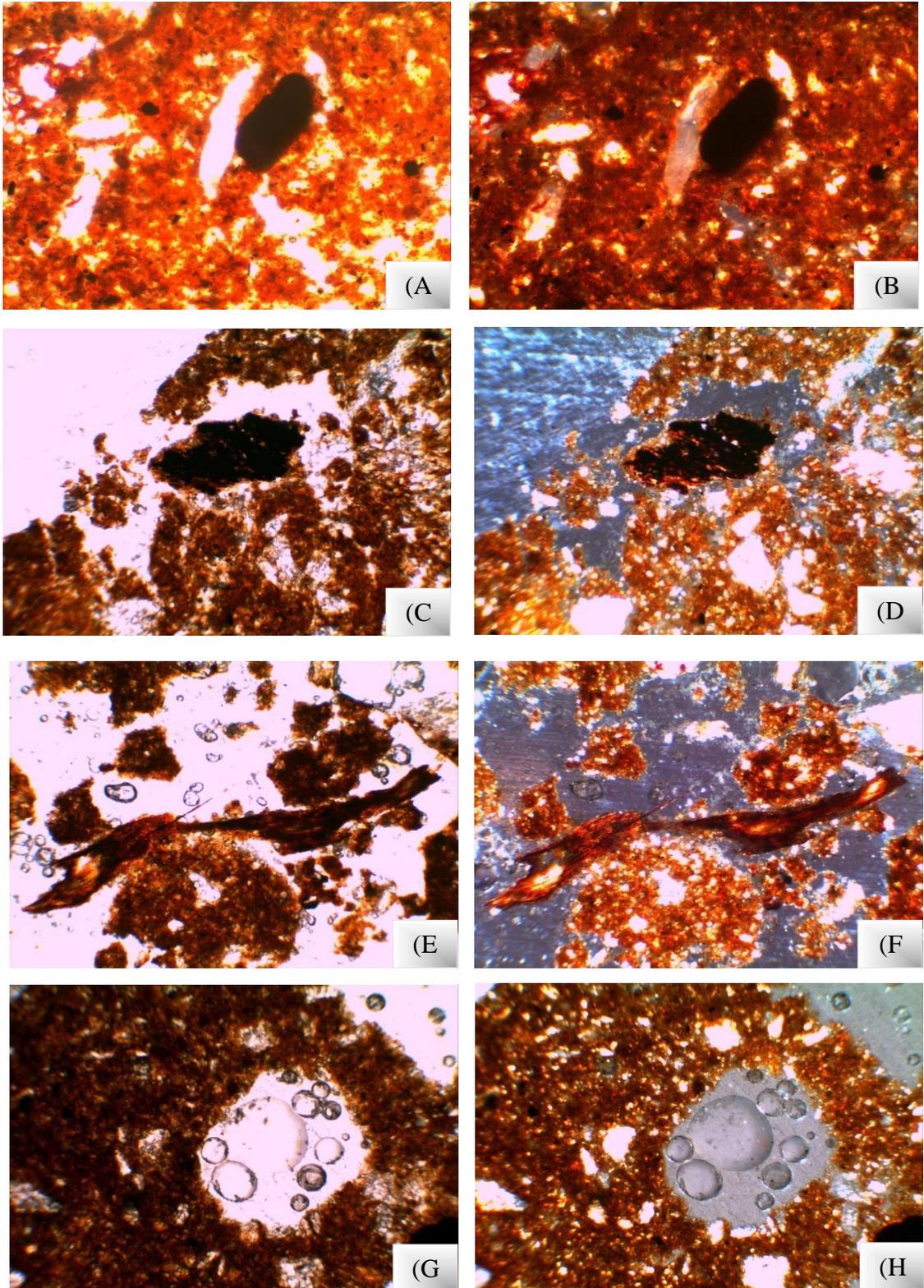
nas áreas mais elevadas do terreno, os menores teores da fração argila são observados. Tal tendência também foi observada no presente trabalho (Tabela 2). Estudos de difração de raios-x da fração argila de alguns solos da Serra da Boa Esperança (Pádua, E.J., não publicado), mostram a dominância de caulinita, com menores proporções de óxidos de ferro (goethita/hematita) e alumínio (gibbsita), consistentes com processos pedogênicos de remoção moderada a pronunciada de sílica e xantização, i.e. predomínio de cor amarelada devida maior presença de goethita (FeOOH). A coloração alaranjada (indicando formação de ferrihidrita, compatível com maior intemperização) a 940 m (Figura 4 E, F) e bruno-amarelada a 1260 m (Figura 4 C, D) do material fino condiz com essa condição ambiental, assim como a estrutura maciça ou apedal (Figura 4), tendendo a blocos subangulares (Figura 5), também observada em Cambissolos a 800 e 975 m de altitude por Pádua (2017) na mesma região, sendo esta estrutura condicionada por ciclos de umedecimento e secagem em intensidade moderada em solos de mineralogia caulínica. A tabela 2 e 3 também indica maior intemperização a 940 m devido menores valores de pH e maiores teores de Al^{3+} comparado a 1260 m.

Figura 5 Seções delgadas do solo mostrando microestrutura em blocos subangulares sob mata nativa a 940 m (A e B) e a 1.260 m (C e D). Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagens com 2,3 mm de largura.



Fonte: Do autor (2019)

Figura 6 Seções delgadas do solo a 1.260 m de altitude mostrando: A e B) nódulo intrusivo de óxido de Fe; B e C) nódulo impregnativo de óxido de Fe; E e F) raiz viva; G e H) canal de fauna. Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagens com 2,3 mm de largura.



Fonte: Do autor (2019).

Nas seções finas, foi possível observar alguns nódulos intrusivos e impregnativos de óxidos de Fe (Figura 6), brunificação (escurecimento) da matriz do solo de maior altitude, devido maior teor de COS além da maior presença de tecidos vegetais em decomposição e canais de fauna (Figura 6).

Ambos os solos apresentaram acidez ativa elevada, com valores de pH variando de muito baixo a baixo, ao passo que a acidez trocável (Al^{3+}) foi alta a muito alta e a saturação por Al^{3+} (m) variou entre média (48,1%) a muito alta (87,9%) (Tabela 3). O elevado nível de saturação por Al^{3+} é um problema ao crescimento de plantas cultivadas, já que o comportamento fitotóxico do Al afeta o desenvolvimento radicular. Entretanto, em áreas sob mata nativa, com moderada a abundante massa vegetal, há maior tolerância das espécies nativas aos elevados níveis de Al^{3+} (Novais et al., 2007). Além disso, os valores elevados de acidez potencial (H+Al) em ambas as altitudes, principalmente nos horizontes mais superficiais (Tabela 3), podem também ser explicados pelos altos índices pluviométricos anuais que intensificam a lixiviação de bases, saturando o complexo de troca com Al^{3+} e H^+ . Enquanto o Al^{3+} deriva do intemperismo, a MOS, a qual ocorre em maior presença, apresenta carboxilas e grupos funcionais com H ionizáveis, com capacidade para saturar os sítios responsáveis pela capacidade de troca de cátions do solo. Sendo assim, a baixa densidade de cargas negativas presentes nestes solos, refletidas pela baixa capacidade de troca de cátions efetiva (t), está mais intimamente ligada à presença da MOS como fonte de cargas negativas dependentes do pH do que à fração mineral da argila, já que estes solos são abundantes em argilominerais 1:1 e óxidos de Fe e Al, com baixa capacidade de reter cátions (Tabela 4).

Tabela 3 Indicadores de acidez dos solos sob mata nativa nas duas diferentes altitudes.

Altitude	Horizontes e profundidades (cm)	pH	Al^{3+}	$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$	Saturação por alumínio
		H_2O	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$		%
940 m	A (0-6)	4,4	2,61	14,51	63,8
	Bi (6-20)	4,4	2,78	11,24	85,5
	C (20-50+)	4,7	2,11	5,46	87,9
1260 m	A1 (0-4)	4,9	1,89	10,05	48,1
	A2 (4-12)	4,7	2,14	9,2	68,1
	A3 (14-20)	4,6	2,12	8,8	81,2
	B (20-33)	4,8	1,73	5,58	84,0

Fonte: Do autor (2019).

Como comentado anteriormente, os Cambissolos estudados apresentaram baixa fertilidade, com baixos teores de P disponível e Ca e Mg trocáveis, mas a disponibilidade de K é adequada nos horizontes subsuperficiais (Tabela 4). Como os teores de nutrientes são muito baixos e diminuem mais ainda em profundidade, pode-se inferir que a mata supre parte de suas exigências nutricionais através da ciclagem de nutrientes, que ocorre via decomposição da serrapilheira pela biota do solo. Todavia, a pobreza química destes solos, condicionando seu caráter distrófico, representado pelo baixo valor da soma de bases (Tabela 4), está relacionada principalmente à lixiviação de nutrientes oriundos da rocha de origem caracterizada como rocha ácida. Além disso, os teores de P-rem apresentaram valores altos, consistentes com a presença discreta dos óxidos de Fe e Al e predomínio da caulinita, além dos altos teores de MOS.

Tabela 4 Características químicas e fertilidade do solo por horizontes sob mata nativa nas diferentes altitudes.

Uso/ Altitude	Horizontes e profundidades (cm)	K	P	Ca	Mg	SB	t	T	V	P-Rem
		mg dm ⁻³				cmol _c .dm ⁻³			%	mg L ⁻¹
Mata/ 940 m	A (0-6)	139,0	5,1	0,8	0,3	1,5	4,1	16,0	9,2	33,2
	Bi (6-20)	66,0	1,8	0,2	0,1	0,5	3,2	12,0	4,0	30,1
	C (20-50+)	36,0	0,7	0,1	0,1	0,3	2,4	5,7	5,1	32,6
Mata/ 1260 m	A1 (0-4)	138,0	4,5	1,3	0,3	2,0	4,0	12,1	17,0	35,2
	A2 (4-12)	138,0	3,3	0,5	0,1	1,0	3,1	10,2	9,8	26,5
	A3 (14-20)	97,4	2,0	0,1	0,1	0,5	2,6	9,3	5,3	26,4
	B (20-33)	52,1	1,0	0,1	0,1	0,3	2,1	6,0	5,6	25,5

Fonte: Do autor (2019).

7.2 Efeito da altitude e uso da terra em propriedades físicas e químicas do solo

No geral, observou-se uma variação textural com o aumento da altitude, sendo os teores de argila maiores nos solos a 940 m, em relação a 1260 m, tanto na camada de 0-5 cm quanto na camada de maior profundidade, 20-40 cm (Tabela 5). Esta informação justifica a classificação textural dos solos avaliados, principalmente nos solos-referência sob mata nativa, que foi argilosa na menor altitude, condizente com o maior grau de intemperismo. Na maior altitude, o solo recebeu a classificação textural franco-argilosa, sendo os teores de areia, silte e argila observados em proporções mais semelhantes entre si.

Tabela 5 Distribuição granulométrica da camada superficial (0-5 cm) e subsuperficial (20-40 cm) dos solos sob mata e cafezal nas duas diferentes altitudes.

Altitude	Uso	%			Classe textural SiBCS
		Areia	Silte	Argila	
0-5 cm					
940 m	Mata	26,3 Bb	20,7 Bb	52,9 Aa	argiloso
	Cafezal	36,6 Ba	24,9 Aa	38,4 Ab	franco-argiloso
1260 m	Mata	37,9 Aa	27,3 Aa	34,6 Ba	franco-argiloso
	Cafezal	42,9 Aa	25,9 Aa	31,1 Ba	franco-argiloso
20-40 cm					
940 m	Mata	31,3 Aa	21,1 Ba	47,4 Ab	argiloso
	Cafezal	27,5 Aa	17,2 Ba	55,2 Aa	argiloso
1260 m	Mata	30,5 Aa	34,2 Aa	35,1 Ba	franco-argiloso
	Cafezal	28,8 Aa	39,5 Aa	31,6 Ba	franco-argiloso

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019)

A tabela 6 apresenta a média dos indicadores de acidez para cada altitude e uso da terra nas quatro profundidades diferentes. Pode-se dizer que a altitude não influenciou a acidez dos solos avaliados, já que diferenças significativas não foram observadas entre as áreas de mata nativa a 940 m e 1260 m de altitude. Apenas para a profundidade de 10-20 cm, a acidez trocável (Al^{3+}) assim como a acidez potencial ($H+Al$) mostraram diferenças significativas, sendo os valores mais baixos observados na área de maior altitude.

Por outro lado, a conversão de mata nativa em lavoura cafeeira afetou conforme esperado os indicadores de acidez do solo em todas as profundidades. Há um forte aumento do pH na área do cafezal, em acordo a uma diminuição do teor de acidez trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($H+Al$), aliados a uma significativa redução nos valores de saturação por alumínio (m), principalmente nas profundidades mais superficiais (0-5 e 5-10 cm), associado à prática de calagem. Assim, íons acidificantes como H^+ e Al^{3+} são trocados por Ca^+ e Mg^{2+} , propiciando condições para melhor crescimento radicular e consequentemente favorecendo a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Percebe-se, entretanto, que nas camadas mais profundas (10-20, 20-40 cm), o aumento do pH se deu apenas para a lavoura localizada na altitude mais baixa. Já na lavoura a 1260 m, não houve correção de acidez abaixo de 5 cm, com alta acidez potencial observada, o que provavelmente está relacionado ao alto teor de H^+ proporcionado pelo alto nível de COS em profundidade, que será relatado mais adiante.

Tabela 6 Indicadores de acidez do solo sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.

Altitude	Uso	pH	Al	H+Al	m
		H ₂ O	cmol _c dm ⁻³		%
0-5 cm					
940 m	Mata	4,47 Ab	2,59 Aa	13,82 Aa	58,83 Aa
	Cafezal	6,67 Aa	0,05 Ab	1,51 Ab	0,50 Ab
1260 m	Mata	4,6 Ab	2,28 Aa	11,63 Aa	62,25 Aa
	Cafezal	6,1 Ba	0,02 Ab	2,59 Ab	0,21 Ab
5-10 cm					
940 m	Mata	4,47 Ab	2,97 Aa	11,94 Aa	80,67 Aa
	Cafezal	7,13 Aa	0,04 Bb	1,21 Bb	0,41 Bb
1260 m	Mata	4,73 Aa	2,49 Aa	9,41 Aa	80,49 Aa
	Cafezal	5,03 Ba	1,09 Ab	7,51 Aa	29,97 Ab
10-20 cm					
940 m	Mata	4,37 Ab	2,86 Aa	11,01 Aa	87,83 Aa
	Cafezal	6,47 Aa	0,09 Bb	2,19 Bb	1,38 Bb
1260 m	Mata	4,63 Aa	2,12 Ba	8,01 Ba	83,88 Aa
	Cafezal	4,63 Ba	2,20 Aa	9,07 Aa	71,87 Ab
20-40 cm					
940 m	Mata	4,53 Ab	2,45 Aa	7,38 Aa	88,91 Aa
	Cafezal	4,95 Aa	1,00 Bb	3,54 Ba	45,83 Bb
1260 m	Mata	4,77 Aa	1,69 Aa	5,24 Ab	84,29 Aa
	Cafezal	4,53 Ba	2,09 Aa	9,04 Aa	80,38 Aa

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

A tabela 7 apresenta os valores médios relativos aos nutrientes P, K, Ca, e Mg do solo e também os valores médios para soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions em pH 7 (T) e fósforo remanescente (P-rem), em função dos diferentes usos da terra e altitudes amostrados. Observou-se uma diminuição geral dos teores de nutrientes com a profundidade, assim como nos valores de SB, T e P-rem para todos os tratamentos avaliados. O efeito da altitude nas áreas de mata nativa foi observado apenas pela diminuição da CTC a pH 7 com o aumento da altitude nas camadas 5-10 e 10-20 cm, assim como uma tendência a diminuição do P-rem, todavia apenas para a profundidade de 5-10 cm. Esses resultados podem refletir o menor teor de argila na maior altitude.

No geral, os teores de P disponível foram baixos, condizente com o material de origem do solo pré-intemperizado, e moderado grau de intemperismo. Assim, o P pouco disponível é resultado da baixa quantidade nos meta-sedimentos e adsorção pelos óxidos hidratados de Fe

e Al presentes nos solos tropicais intemperizados, mesmo que em teores moderados (Sanchez e Uehara, 1980; Sanyal e De Datta, 1991; Valladares et al., 2003; Rolim Neto et al., 2004; Novais et al., 2007).

Os teores de K disponível foram considerados satisfatórios para todos os tratamentos, provavelmente devido à presença de micas na rocha de origem, especialmente muscovita. Para todas as profundidades do cafezal a 940 m, os teores de K foram altos, enquanto que para o cafezal a 1260 m os teores foram altos para a camada superficial e baixos a partir de 10 cm de profundidade, mostrando grande contribuição dos resíduos do café na adição de K em superfície.

Efeitos significativos do uso da terra foram observados para os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e portanto, também para a SB, em todas as profundidades avaliadas, com maiores teores nas áreas de cultivo do cafeeiro. Este resultado é devido à prática de calagem e gessagem realizada, com intuito de corrigir a acidez do solo em superfície e profundidade, além de aumentar as bases do complexo sortivo em todo o perfil, principalmente do Ca, devido tipo de corretivo utilizado, já que os teores de Mg, mesmo sendo maiores do que nas áreas de mata nativa, ainda foram considerados baixos nas lavouras cafeeiras em ambas altitudes.

A CTC a pH 7 (T) apresentou valores variando entre médios a muito bons, de acordo com Alvarez V. et. al (1999). Como os solos apresentam teores moderados de argila e provável mineralogia composta por minerais pouco ativos como a caulinita e os óxidos de Fe e Al, pode-se considerar a relevante contribuição da MOS como fonte de cargas negativas dependentes do pH, sendo estas essenciais para construção da fertilidade dos solos tropicais e subtropicais.

Tabela 7 Características químicas em relação a fertilidade do solo sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.

Altitude	Uso	P	K	Ca	Mg	SB	t	T	P-rem
		mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³				mg L ⁻¹		
0-5 cm									
940 m	Mata	4,3 Ab	126,2 Aa	0,9 Aa	0,5 Ab	1,8 Ab	4,4 Ab	15,6 Aa	34,7 Ab
	Cafezal	8,5 Aa	168,6 Aa	7,2 Aa	2,9 Aa	10,6 Aa	10,6 Aa	12,1 Ab	47,5 Aa
1260 m	Mata	4,3 Aa	123,8 Aa	0,9 Ab	0,2 Ab	1,4 Ab	3,7 Bb	13,0 Aa	28,4 Aa
	Cafezal	3,8 Ba	172,7 Aa	5,9 Ba	1,5 Ba	8,8 Ba	7,9 Ba	11,4 Aa	30,3 Ba
5-10 cm									
940 m	Mata	2,8 Ab	87,5 Ab	0,3 Ab	0,2 Ab	0,7 Ab	3,7 Ab	12,6 Aa	29,9 Ab
	Cafezal	11,4 Aa	183,4 Aa	7,3 Aa	2,8 Aa	10,6 Aa	10,6 Aa	11,8 Aa	37,7 Aa
1260 m	Mata	2,6 Aa	99,7 Aa	0,2 Ab	0,1 Ab	0,6 Ab	3,1 Aa	10,0 Ba	24,7 Ba
	Cafezal	4,1 Aa	85,7 Ba	2,5 Ba	0,4 Ba	3,4 Ba	4,5 Ba	11,0 Aa	26,5 Ba
10-20 cm									
940 m	Mata	1,6 Aa	58,9 Ab	0,1 Ab	0,1 Ab	0,4 Ab	3,3 Ab	11,4 Aa	27,6 Ab
	Cafezal	1,9 Aa	191,1 Aa	4,8 Aa	1,9 Aa	7,4 Aa	7,4 Aa	9,5 Aa	36,4 Aa
1260 m	Mata	1,5 Aa	76,00 Aa	0,1 Ab	0,1 Aa	0,4 Aa	2,5 Aa	8,4 Ba	24,0 Aa
	Cafezal	2,9 Aa	64,9 Ba	1,1 Ba	0,1 Ba	1,5 Ba	3,4 Ba	10,6 Aa	24,1 Ba
20-40 cm									
940 m	Mata	4,3 Ab	34,3 Ab	1,0 Ab	0,1 Ab	0,3 Ab	2,7 Aa	7,7 Aa	28,5 Aa
	Cafezal	10,1 Aa	134,5 Aa	7,2 Aa	0,6 Aa	1,8 Aa	2,9 Aa	6,5 Ba	24,6 Aa
1260 m	Mata	4,3 Aa	45,4 Aa	0,9 Ab	0,1 Aa	0,3 Aa	2,0 Bb	5,6 Ab	22,8 Aa
	Cafezal	3,8 Ba	48,8 Ba	5,9 Ba	0,1 Ba	0,5 Ba	2,6 Aa	9,6 Aa	22,3 Aa

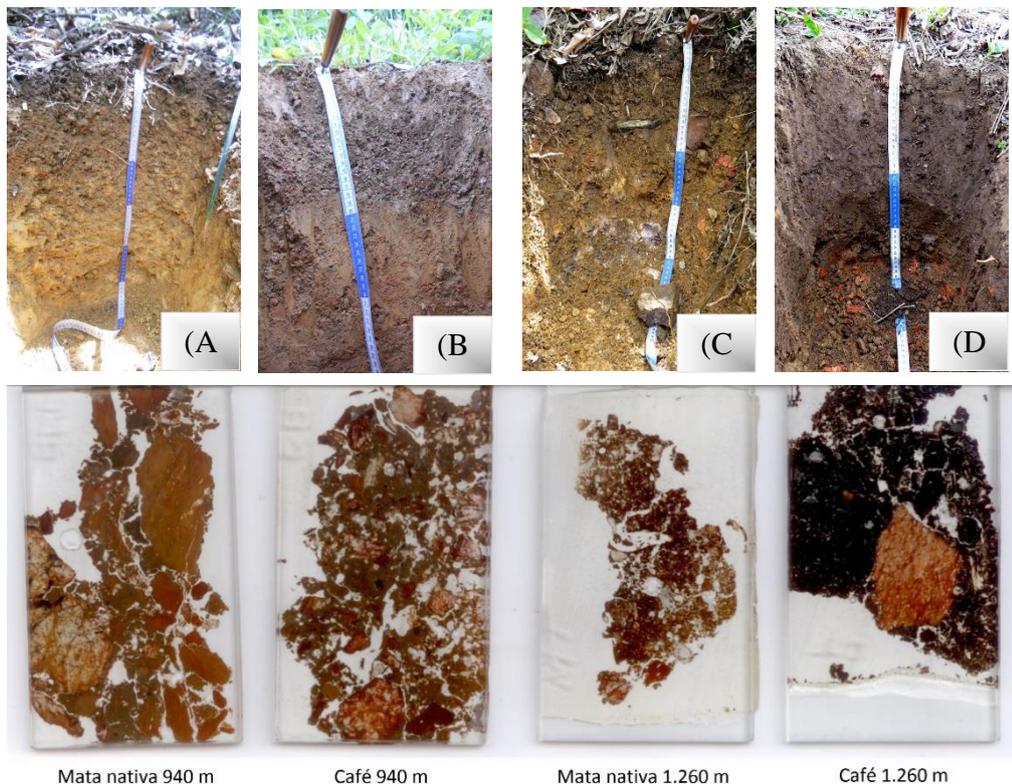
Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

7.3 Efeito da altitude e uso da terra na morfologia do solo e COS

Os solos amostrados são predominantemente pedregosos a muito pedregosos. As imagens abaixo mostram grande presença de fragmentos grosseiros do material de origem.

Figura 7 Fotos dos perfis de Cambissolos sob mata nativa (A e C) e cafezal (B e D) descritos a 940 m (A e B) e 1260 m (C e D). Abaixo: imagens digitalizadas das seções delgadas de solo (camada 0-10 cm). Cada lâmina possui 2,5 cm de largura. Notar o tamanho dos fragmentos de rocha e o escurecimento do material de solo a 1260 m sob cafezal.



Fonte: Do autor (2019).

O efeito da altitude na pedregosidade (Tabela 8) foi observado apenas nas camadas mais profundas (20-40 cm), provavelmente devido às maiores taxas de intemperismo físico em altitudes mais baixas, eficiente em promover uma decomposição mais acelerada da rocha de origem, gerando consequentemente produtos de alteração de menor tamanho e, aumentando a profundidade do perfil de solo como apresentado na tabela 2. Por isso, as camadas mais profundas do solo em maior altitude são mais pedregosas e com fragmentos maiores. Todavia, no caso do solo sob cafezal a 1.260 m, a pedregosidade foi muito menor do que na mata. Embora seja possível que isso seja consequência parcial das práticas de

gradagem e subsolagem realizadas com o uso de máquinas agrícolas, é mais provável que isto reflita uma variação natural na pedregosidade do solo, mesmo em pequena distância.

Tabela 8 Características físico-química dos solos, sob dois usos e diferentes profundidades, nas duas diferentes altitudes.

Altitude	Uso	Pedregosidade (fração em peso)	Densidade do solo	Carbono total	N	C/N
		g kg^{-1}	g cm^{-3}	%	g kg^{-1}	
0-5 cm						
940 m	Mata	0,39 Aa	0,94 Ab	4,29 Aa	0,51 Aa	8,42 Aa
	Cafezal	0,39 Aa	1,28 Aa	2,97 Ab	0,40 Ab	7,47 Aa
1260 m	Mata	0,41 Aa	1,09 Aa	3,86 Aa	0,26 Ba	16,05 Aa
	Cafezal	0,06 Bb	0,97 Ba	3,29 Aa	0,30 Ba	12,17 Aa
5-10 cm						
940 m	Mata	0,61 Aa	1,07 Aa	2,88 Aa	0,40 Aa	7,07 Ba
	Cafezal	0,48 Aa	1,32 Aa	2,46 Aa	0,36 Aa	6,93 Ba
1260 m	Mata	0,35 Ba	1,22 Aa	2,94 Aa	0,25 Ba	11,64 Aa
	Cafezal	0,07 Bb	1,03 Ba	3,32 Aa	0,26 Ba	12,49 Aa
10-20 cm						
940 m	Mata	0,52 Aa	1,17 Aa	2,18 Aa	0,31 Aa	7,00 Ba
	Cafezal	0,62 Aa	1,45 Aa	1,96 Ba	0,29 Aa	6,77 Ba
1260 m	Mata	0,65 Aa	1,32 Aa	2,04 Ab	0,21 Bb	9,71 Aa
	Cafezal	0,07 Bb	1,15 Aa	2,80 Aa	0,26 Ba	10,79 Aa
20-40 cm						
940 m	Mata	0,29 Ba	1,37 Aa	1,34 Aa	0,22 Aa	6,11 Ba
	Cafezal	0,23 Aa	1,42 Aa	1,10 Ba	0,23 Aa	5,00 Ba
1260 m	Mata	0,76 Aa	1,08 Bb	1,05 Ab	0,14 Aa	7,35 Ab
	Cafezal	0,13 Ab	1,28 Ba	2,35 Aa	0,23 Aa	10,30 Aa

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

A altitude não afetou significativamente os teores médios de COS sob mata nativa em nenhuma das profundidades. Tal resultado não era esperado de acordo com a literatura (ZINN et al., 2012; HU et al., 2018; DEVI, 2019), e pode talvez ser explicado pela maior altura média (~8 m) e biomassa da mata a 940 m em relação a 1260 m (~5 m), sendo portanto, o maior aporte de resíduos tão eficiente quanto o efeito da altitude em promover a adição de carbono nos sistemas naturais. Os teores de COS a 20-40 cm sob mata são relativamente baixos (1%), devido à proximidade do saprolito, muito pobre em matéria orgânica. Em

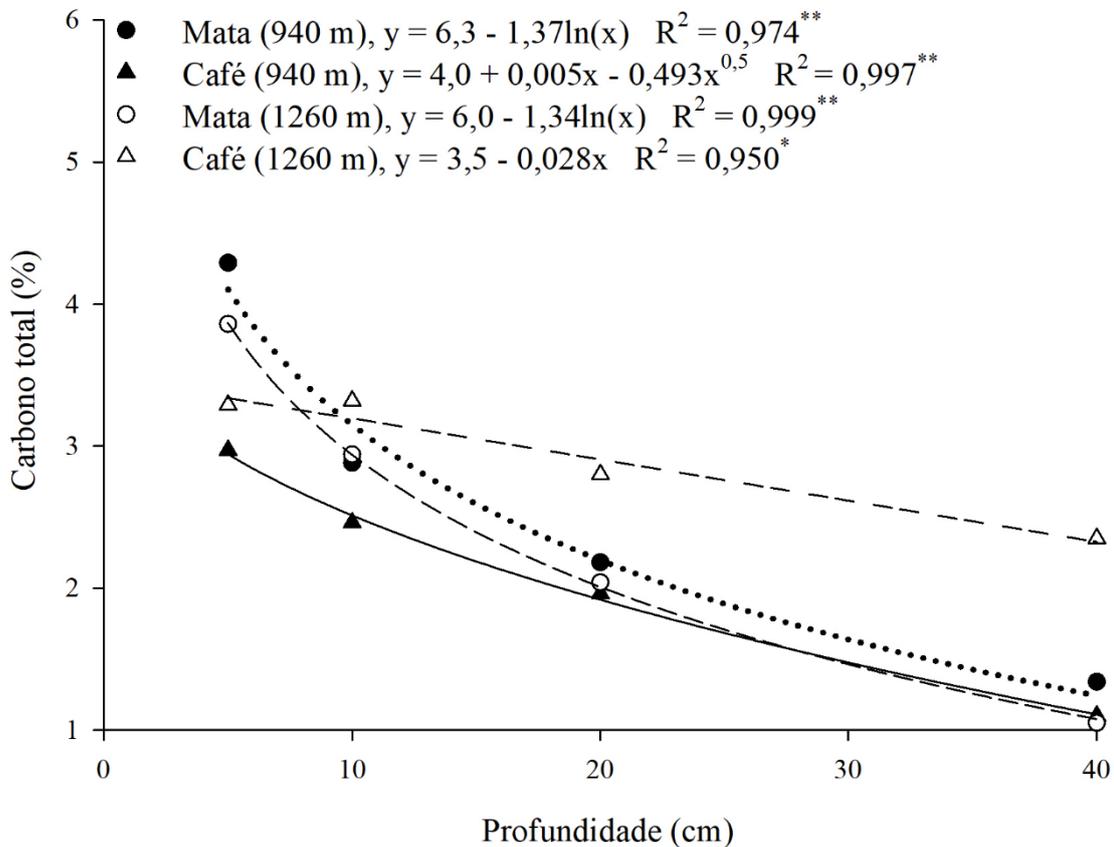
relação às áreas cultivadas, houve tendência preponderante a maiores teores de COS no cafezal a 1260 m, ao longo dos 40 cm amostrados.

Os teores de COS foram influenciados pelo uso da terra: a 940 m, na conversão de mata para lavoura, o teor caiu para 2,97% a 0-5 cm, mas não houve diferenças significativas para as demais profundidades. Para a altitude de 1260 m, os teores de COS sob cafeeiro não diferiram daqueles sob mata até 10 cm de profundidade, mas nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm, os teores de COS foram até 135% maiores do que sob mata. Este resultado pode ser devido à alta produção de biomassa de cafeeiro e plantas espontâneas, adubação organomineral ($2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e relativamente lenta decomposição da matéria orgânica na altitude de 1260 m.

Foi observada tendência muito clara no decréscimo de COS, à medida em que se aumenta a profundidade do solo (Tabela 8 e Fig. 8), corroborando resultados encontrados na literatura (BORTOLOTTI et al., 2013; FIALHO, 2012; NJERU et al., 2017; PÁDUA, 2017). As duas matas apresentaram perfis semelhantes em forma e parâmetros da equação logarítmica de decréscimo de COS em profundidade. Contudo, os solos sob cafezais seguiram padrões diferentes: enquanto o solo do cafezal a 940 m seguiu o mesmo modelo de decréscimo em profundidade das matas, embora com menor teor de COS em superfície, o solo sob cafezal a 1260 m mostrou decréscimo linear e de menor declive, devido à melhor distribuição do COS ao longo dos 40 cm amostrados.

Em relação a razão C:N, fundamental para indicação da qualidade do solo e do estágio de decomposição do COS (Zinn et al., 2007), observa-se que, assim como as outras variáveis, esta relação diminui com a profundidade do solo, devido à diminuição proporcionalmente maior do teor de COS (Tabela 8). O efeito da altitude foi observado nas profundidades 5-10 e 10-20 cm, sendo a menor razão C:N observada na área de mata nativa em menor altitude, podendo-se dizer que o C na maior altitude sofre menor ou mais lenta decomposição do que na menor altitude. Já o efeito do uso da terra foi observado apenas na camada mais profunda da maior altitude, onde a maior razão C:N foi constatada na área de lavoura cafeeira em comparação a área de mata nativa. A ausência de efeitos do uso da terra na razão C:N de solos brasileiros já havia sido notada por Zinn et al. (2018), e foi atribuída a mudanças proporcionais em teores de COS e N.

Figura 8 Teores de carbono orgânico do solo sob diferentes usos em diferentes altitudes e profundidades.



Fonte: Do autor (2019).

O teor de N apresentou mudanças significativas com a variação da altitude, de modo que, na mata nativa a 1260 m, a % de N no solo foi menor que na área a 940 m, acompanhando os teores de COS.

Não foram encontradas diferenças significativas para o teor de COP (carbono orgânico particulado ou COS na fração areia), exceto para a mata nativa a 940 m na profundidade de 20-40 cm, em comparação à mata a 1260 m. Além disso, os teores encontrados são baixos em relação ao carbono total, variando de 5,22 a 18,87 % (Tabela 9). Este resultado mostra que o COS, em sua grande maioria está associado às frações argila e silte, o que provavelmente é reflexo de alta humificação em ambas as altitudes, resultando em decomposição eficiente do material orgânico e, portanto, retenção preferencial de material humificado. Tais resultados são similares aos obtidos por Fialho (2012), Cogo (2012), Santos (2012), Pádua (2017) e Araújo et al., (2015), e corroboram a ideia de que a humificação da MOS é altamente eficiente

nos planaltos do Sul de Minas Gerais. Não houve diferença significativa entre tratamentos para este indicador.

Tabela 9 Carbono orgânico particulado, ou COS da fração areia, nos dois diferentes usos e altitudes.

Uso do solo / altitude	COP (% do COS total)	
	0-5 cm	20-40 cm
Mata / 940 m	15,68 Aa	6,17 Ba
Cafezal/ 940 m	18,87 Aa	5,22 Aa
Mata / 1260 m	9,91 Aa	10,34 Aa
Cafezal/ 1260 m	10,08 Aa	7,22 Aa

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

Em relação aos estoques de COS, estes foram calculados de duas maneiras: da convencional, em função somente da densidade do solo, espessura e percentagem de COS na camada, e com correção da pedregosidade e densidade do solo, considerando que o manejo agrícola altera a densidade do solo e conseqüentemente a espessura das camadas do perfil (Zinn et al., 2014).

Em relação aos estoques de COS não-corrígidos (Tabela 10), os estoques de COS a 20-40 cm e 0-40 cm na lavoura a 1260 m, foram maiores do que na mata nativa adjacente, e também maiores do que o estoque de COS na lavoura sob altitude mais baixa (940 m), apresentando assim, efeito da altitude e do uso da terra. Contudo, isso não ocorreu para as camadas de 0-20 cm, onde não houve diferença entre tratamentos. Este resultado pode estar associado a uma combinação de manejo organomineral e altitude elevada, os quais, simultaneamente, conferem condições favoráveis ao armazenamento de COS, como: temperatura mais baixa ao ambiente, menor atividade microbiana, observada pela presença de esporos de micorrizas (Figura 9 E e F), e bom aporte de materiais orgânicos, como observado pelos restos de tecidos vegetais em decomposição provavelmente oriundos do composto organomineral (Figura 9).

Tabela 10 Estoques de COS não corrigidos para compactação e pedregosidade.

Uso do solo / altitude	Estoques de COS (Mg ha ⁻¹)		
	0-20 cm	20-40 cm	0-40 cm
Mata / 940 m	61,7 Aa	37,3 Aa	99,1 Aa
Cafezal/ 940 m	65,1 Aa	32,0 Ba	97,1 Ba
Mata / 1260 m	67,0 Aa	29,0 Ab	96,0 Ab
Cafezal/ 1260 m	66,1 Aa	60,8 Aa	126,0 Aa

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

Os estoques corrigidos de COS em relação às matas nativas não diferiram entre si nas camadas mais superficiais do solo (0-20 cm) e, portanto, não apresentaram influência da altitude nesta profundidade (Tabela 11). Todavia, nas camadas de 20-40 cm e na soma das camadas, 0-40 cm, o estoque de COS foi no mínimo 40% maior a 940 m do que a 1.260 m. Provavelmente, o efeito do intemperismo na fragmentação da rocha e conseqüentemente, na maior formação de argila em profundidade, favoreceu o acúmulo de COS na altitude mais baixa, além de maior biomassa florestal a 940 m.

Tabela 11 Estoques de COS corrigidos para compactação e pedregosidade.

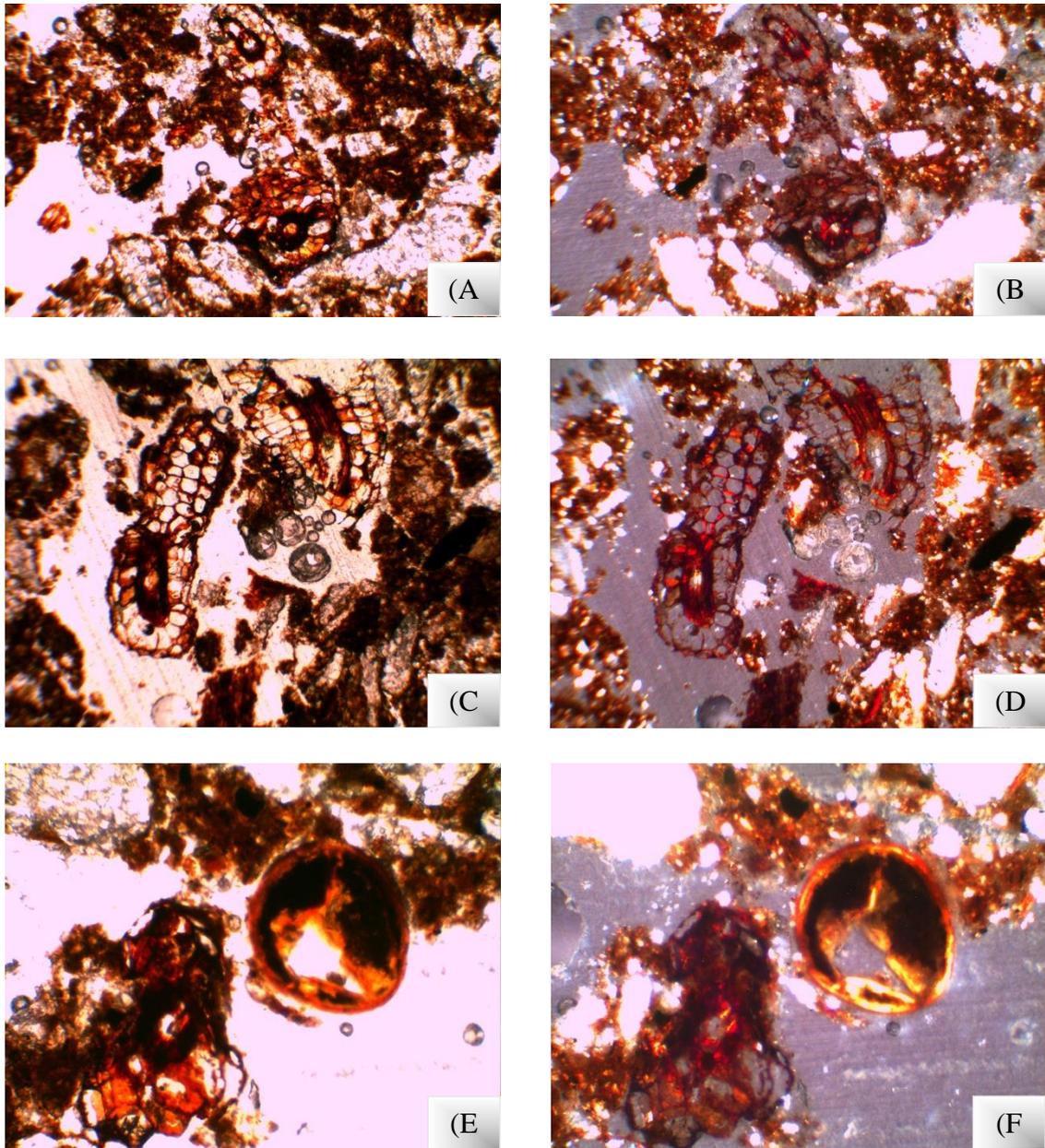
Uso do solo / altitude	Estoques de COS (Mg ha ⁻¹)		
	0-20 cm	20-40 cm	0-40 cm
Mata / 940 m	30,5 Aa	25,9 Aa	56,4 Aa
Cafezal/ 940 m	24,0 Bb	24,0 Ba	47,9 Ba
Mata / 1260 m	33,3 Ab	6,9 Bb	40,3 Bb
Cafezal/ 1260 m	71,0 Aa	55,5 Aa	126,6 Aa

Médias na coluna seguidas por uma mesma letra, maiúscula comparando diferentes altitudes de um mesmo uso da terra, e minúscula comparando diferentes usos da terra na mesma altitude, não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

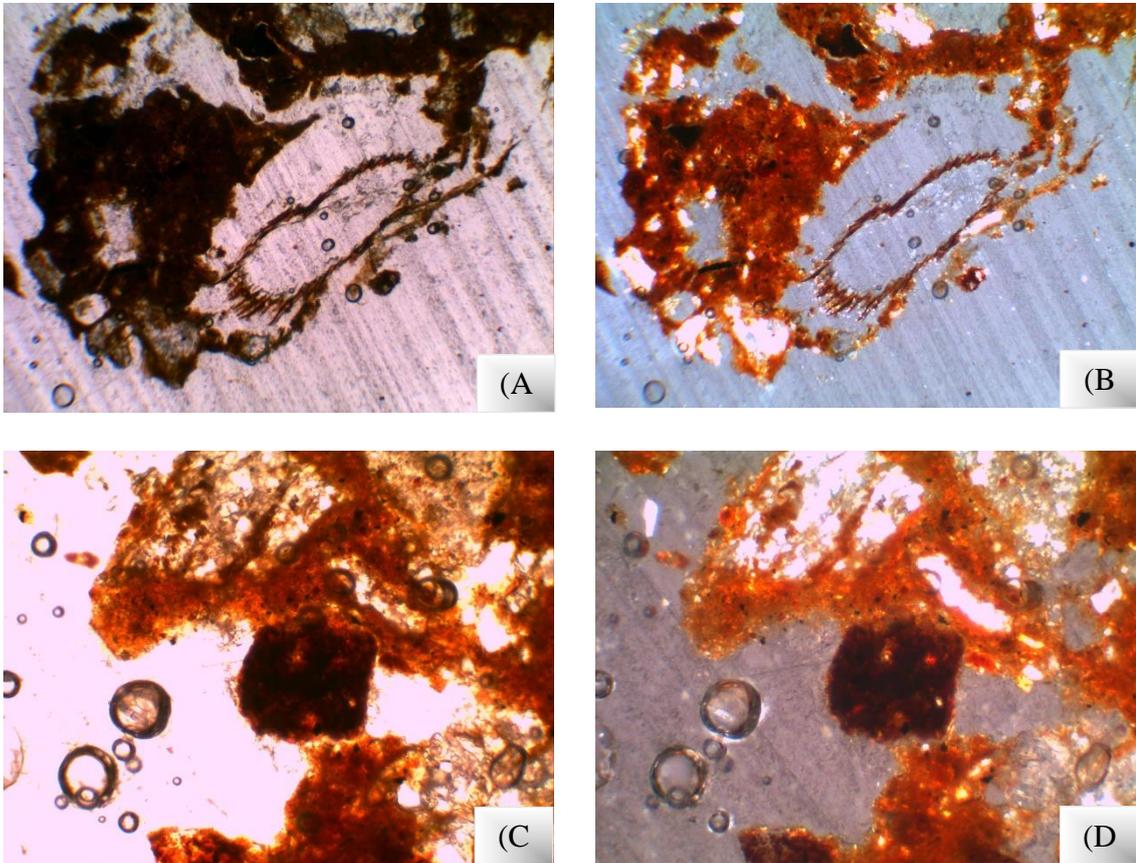
Os estoques de COS corrigidos para pedregosidade e compactação mostraram um grande efeito positivo do cafezal a 1260 m em relação à mata nativa, especialmente nas camadas de 20-40 cm, o que não ocorreu a 940 m. Tais diferenças são em grande parte devido à menor pedregosidade do solo sob cafezal a 1260 m (Tabela 8), e devem ser interpretados com cautela, embora sugiram um bom potencial de sequestro de COS em altitudes maiores.

Figura 9 Seções delgadas do solo sob cafezal à 1260 m mostrando: A, B, C e D) material orgânico; E e F) material orgânico (resíduo fino): esporo de micorriza. Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagens com 2,3 mm de largura.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 10 Seções delgadas do solo sob cafezal à 940 m mostrando: A e B) material orgânico: raiz morta; C e D) agregado hexagonal derivado da compactação de pedrs granulares. Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagens com 2,3 mm de largura.



Fonte: Do autor (2019).

8 CONCLUSÃO

Os solos sob mata semidecidual nativa estudados são naturalmente ácidos e pobres em nutrientes (com exceção para o K^+), independentemente da altitude, sendo a MOS o principal responsável pela geração de cargas negativas e consequentemente pela CTC. O desenvolvimento da vegetação florestal de baixo a médio porte se dá devido ao grande aporte e ciclagem eficiente da água e dos nutrientes presentes na serapilheira. O aumento da altitude foi eficiente em promover menores taxas de intemperismo no solo sob altitude mais elevada (1260 m), consequentemente, os teores de argila e a profundidade do perfil foram menores comparados ao solo em menor altitude (940 m).

Independentemente da variação altitudinal, os teores de COS diminuem com o aumento da profundidade do solo, de forma similar nas matas, e diferente nos cafezais. O plantio de café com braquiária nas entrelinhas e a adubação organomineral em clima tropical de altitude (1260 m) no Sul de Minas Gerais, mostrou ser um sistema conservacionista e uma alternativa viável para o armazenamento de carbono no solo. Na lavoura cafeeira localizada em altitude mais baixa e sem prática de adubação organomineral, os teores e estoques de COS corrigidos para compactação e pedregosidade do solo não diferiram daqueles da mata testemunha, o que ao menos sugere o aspecto de conservação de COS no cafezal. Contudo, na altitude de 1260 m, o cafezal mostrou cerca de $38 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a mais de COS na camada de 0-20 cm em relação à mata nativa adjacente, e a diferença foi ainda maior na camada inferior, devido à grande diferença de pedregosidade. Mesmo quando os estoques de COS não são corrigidos para compactação e pedregosidade, são mantidas tendências de estoques iguais entre cafezal e mata a 940 m, e estoques maiores no cafezal do que na mata, a 1260 m.

A primeira hipótese do trabalho foi parcialmente aceita, já que o efeito da maior altitude na maior concentração de COS foi demonstrado apenas no solo sob uso da cafeicultura, não sendo essa tendência confirmada para a área sob mata nativa. A segunda hipótese foi amplamente rejeitada, pois os teores e estoques de COS aumentaram de fato com o cultivo do cafezal, i.e. houve sequestro e não perda de COS. O aporte de resíduos vegetais do café e da braquiária, associado ausência de aração e gradagem anual e adubação organomineral, em altitudes mais elevadas, não necessariamente implica em perda de COS com o cultivo, e muito pelo contrário, sugere um potencial de sequestro de COS ainda pouco explorado e entendido.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.
- ARAÚJO, M. A.; ZINN, Y. L.; LAL, R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. *Geoderma*, v. 300, p. 1–10, 2017.
- BORTOLOTTI, A. et al. Estoques de carbono no solos e em plantas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). *Interciência*, v. 38, p 286-291, 2013.
- BANWART, S. et al. Benefits of soil carbon : report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop. *Carbon Management*, v. 5, n. 2, p. 185-192, 2014.
- BATIONO, A. et al. Soil organic carbon dynamics , functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, v. 94, p. 13–25, 2007.
- BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Aeração e temperatura do solo. In: BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. - Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013. p. 222-260.
- CALDEIRA, M. V. W et al. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. *Ciências Agrárias*, v. 29, n. 1, p. 53-68, jan./mar. 2008.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277–289, 2010.
- CASTELLANO, M. J. et al. Integrating plant litter quality , soil organic matter stabilization , and the carbon saturation concept. *Global Change Biology*, v. 21, p. 3200–3209, 2015.
- CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, v. 64, p. 83-99, 2007
- CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. [s.d.] Disponível em: <<https://pt.climate-data.org>>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.
- COGO, F. D. Carbono orgânico em latossolo sob lavoura cafeeira e outros usos da terra no sul de MG. 2012. 85 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) –Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- CONANT, R. T. et al. Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation In a nutshell : *Frontiers in ecology*, v. 9, p. 169-173, 2011.

- COWARD, E. K.; THOMPSON, A. T.; PLANTE, A. F. Iron-mediated mineralogical control of organic matter accumulation in tropical soils. **Geoderma**, v. 306, p. 206–216, 2017.
- DEVI, S. B.; SHERPA, S. S. S. S. Soil carbon and nitrogen stocks along the altitudinal gradient on the Darjeeling Himalayas, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 361, p. 1-18, May 2019.
- DIELEMAN, W. I. J. et al. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. **Geoderma**. v. 204–205, p. 59–67, 2013.
- DONAGEMMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B. TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- FIALHO, R. C. Carbono , física e química de solos sob reflorestamento em clima tropical de altitude. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Lavras- MG, p. 86, 2012.
- FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; AGUIAR, D. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 49–64, 2008.
- FUJISAKI, K. et al. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 259, p. 147–158, 2018.
- GEE, G.W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. v. 1, 2nd. Madison: SSSA, 1986. p. 383-411.
- GROPPO, J. D. et al. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeoscience**, v. 12, n. 15, p. 4765–4780, 2015.
- GROSSMAN R. B., REINSCH T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 5, cap. 2.1, p. 201-228.
- GUTIÉRREZ-GIRÓN, A. et al. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils. **Geoderma**, v. 237-238, p. 1-8, jan. 2015.
- HAGHIGHI, F.; GORJI, M.; SHORAFI, M. A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. **Land Degradation and Development**, v. 502, p. 496–502, 2010.
- HU, P., LIU, S., YE, Y., ZHANG, W., WANG, K., & SU, Y. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration. **Land Degradation & Development**, v. 29, 387– 397, 2018.
- HURNI, H. et al. Soils, agriculture and food security: The interplay between ecosystem functioning and human well-being. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.

15, p. 25–34, 2015.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: A system of quantitative pedology. New York: McGraw Hill, 1941, 279 p.

JUNGKUNST HF, KRÜGER JP, HEITKAMP F et al. Accounting more precisely for peat and other soil carbon resources. In: **Recarbonization of the Biosphere**. Von Braun J (Eds). Springer, Holland, 127–157, 2012.

KEESSTRA, S. D. et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, v. 2, n. 1, p. 111–128, 2016.

KORNER, C. The use of ‘ altitude ’ in ecological research. **Trends in Ecology & Evolution**. v. 22, n. 11, p. 569-574, 2007.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

LAL, R. **World soils and the carbon cycle in relation to climate change and food security**. Disponível em: <https://gsf.globalsoilweek.org/wp-content/uploads/2014/12/GSW-2012_IssuePaper_Soils_in_the_Global_Cycle.pdf> Acesso em: 07 de jun. 2019.

LAL, R.; NEGASSA, W.; LORENZ, K. Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 15, p. 79–86, 2015.

LEIFELD, J. et al. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 668–679, 2009.

LEMMA, B. et al. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia. **Geoderma**, v. 136, p. 886–898, 2006.

LIPPER, L. et al. Climate-smart agriculture for food security. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 12, p. 1068–1072, 2014.

LUO, Z.; WANG, E.; JIANXIN, O. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems : A review and synthesis. **Geoderma**, v. 155, n. 3–4, p. 211–223, 2010.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**. v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005.

MARASENI, T. N.; PANDEY, S. S. Can vegetation types work as an indicator of soil organic carbon? An insight from native vegetations in Nepal. **Ecological Indicators**, v. 46, p. 315–322, 2014.

MORAIS, V. A. et al. Modelagem do teor de carbono orgânico em solos de fragmentos de Cerrado de Januária e Bonito de Minas, Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 76, p. 343-354, dez. 2013.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras:

Editora UFLA, 2006. 729p.

NJERU, C. M. et al. Assessing stock and thresholds detection of soil organic carbon and nitrogen along an altitude gradient in an east Africa mountain ecosystem. **Geoderma Regional**, v. 10, p. 29–38, 2017.

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1117 p. 2007.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Emissões de GEE do Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris**. p.166, 2017.

PÁDUA, E. J. Retenção de Carbono Orgânico e Nitrogênio em solos do sul de Minas Gerais: Efeito da Altitude. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras - MG, 2017, p.105, 2017.

PAUL, E. A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 98, p. 109–126, 2016.

RESENDE, Á. V. et al. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas N° 156**, Dezembro, 2016. International Plant Nutrition Institute -Brasil, p. 1–19, 2016.

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

SANCHEZ, P. A & UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C & KAMPRATH, E. J., eds. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, America Society of Agronomy, 1980. p.379-438.

SANYAL, S. K. & De DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science.**, v. 16, p. 1-120, 1991.

SANTOS, D. C. et al. Agregação e proteção física da matéria orgânica em Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 54–63, 2012.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed., rev. e ampl. BRASÍLIA, DF: EMBRAPA, 2018. 356p.

SCHMIDT, M. W. I. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49–56, 2011.

SELVARAJ, S. et al. Influence of long-term successive rotations and stand age of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties. **Geoderma**, v. 306, p. 127–134, 2017.

SOUZA, J. L. DE; PREZOTTI, L. C. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas

- sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. **Idesia** (Chile). v. 30, p. 7–15, 2012.
- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2nd ed. New York, NY: J. Wiley, 1994. 496 p.
- STOCKMANN, U. et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 164, p. 80–99, 2013.
- STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p.
- TASHI, S. et al. Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data. **Global Change Biology**, v. 22, n. 6, p. 2255–2268, 2016a.
- TAYLOR, P.; JARECKI, M. K.; LAL, R. Crop Management for Soil Carbon. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 22, n. 6, p. 37–41, 2010.
- TEKETAY, D. Deforestation, wood famine, and environmental degradation in Ethiopia's highland ecosystems: urgent need for action. **Northeast African Studies**, v. 8, n. 1, p. 53–76, 2001.
- TESFAYE, M. A. et al. Impact of changes in land use, species and elevation on soil organic carbon and total nitrogen in Ethiopian Central Highlands. **Geoderma**, v. 261, p. 70–79, 2016.
- VALLADARES, G. S. et al. Adsorção de fósforo em solos de argila de baixa atividade. **Bragantia**, v. 62, p. 111-118, 2003.
- VASCONCELLOS, A. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, 2007.
- WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation : a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 6, p. 1930–1946, 2002.
- WILCKE, W. et al. Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 2, p. 220-230, abr. 2008.
- ZHANG, Q. et al. Agricultural land use change impacts soil CO₂ emission and its ¹³C-isotopic signature in central China. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 105–112, 2018.
- ZHU, B. et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. **Journal of Plant Research**, v. 123, n. 4, p. 439-452, jul. 2010.
- ZIMMERMANN, M. et al. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. **Ecosystems**, v. 13, p. 62–74, 2010.
- ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under

agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 28-40, nov. 2005b.

ZINN, Y. L. et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian cerrado: texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 4, p. 1204, 2007.

ZINN, Y. L. et al. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: Modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1395-1406, nov. 2012.

ZINN, Y. L. et al. Soil organic carbon and morphology as affected by pine plantation establishment in Minas Gerais, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 318, p.261-169, 2014.

ZINN, Y. L. et al. Soil organic carbon retention more affected by altitude than texture in a forested mountain range in Brazil. **Soil Research**, v. 56, n. 3, p. 284, 2018.

ZINN, Y. L.; MARRENJO, G. J.; SILVA, C. A. Soil C:N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 255, n. December 2017, p. 62–72, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DO PERFIL SOB MATA NATIVA A 1260 m

DESCRIÇÃO – 05/11/2018

CLASSIFICAÇÃO SiBCS – CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico leptofragmentário

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO e COORDENADAS – Serra da Boa Esperança, Ilícinea-MG, S 20°55'56,95" e W 45°43'35,6"

ALTITUDE – 1260 m

SITUAÇÃO, DECLIVE, ASPECTO E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - coletado em terço superior de encosta com 11 % de declive, aspecto leste, sob vegetação nativa (floresta semidecidual montana com candeal).

LITOLOGIA - predomínio de formações quartzíticas e metapelíticas.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Meta-sedimentos da Serra da Boa Esperança

MATERIAL ORIGINÁRIO - Produto de alteração de rocha supracitada

PEDREGOSIDADE – muito pedregoso

ROCHOSIDADE – rochoso (apresenta afloramento de rocha)

RELEVO LOCAL /REGIONAL - Ondulado /Montanhoso

DRENAGEM - bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – semidecidual de altitude, com candeia

USO ATUAL – vegetação nativa

CLIMA – Cwa (classificação de Köppen)

DESCRITO E COLETADO POR – Emmeline M. França, Lílian C.O.N. Vilela, Hellen Carla. S. Amorim, Alessandro V. Pedroso, Yuri L. Zinn.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A1 0 - 4 cm, cor 10YR 5/3; estrutura grumosa com transição gradual, alta pedregosidade, raízes finas e abundantes ao longo do horizonte.

A2 4 - 12 cm, cor 10 YR 6/3, estrutura grumosa a blocos fraca pequena; alta pedregosidade, transição gradual, raízes grossas e comuns, presença de minhocas.

A3 14 - 20 cm, cor 10 YR 6/3, estrutura em blocos fraca pequena, alta pedregosidade, transição gradual, raízes finas e raras. (Diferenciado do A1 pela cor).

Bi 20 - 33 cm, cor 10 YR 7/3, estrutura em blocos fraca pequena, muito pedregoso, transição gradual, raízes finas e raras.

Figura 11 - Detalhes da paisagem local, da floresta semidecidual de altitude ao lado da área de cafeicultura, e do perfil descrito do Cambissolo a 1260 m de altitude.

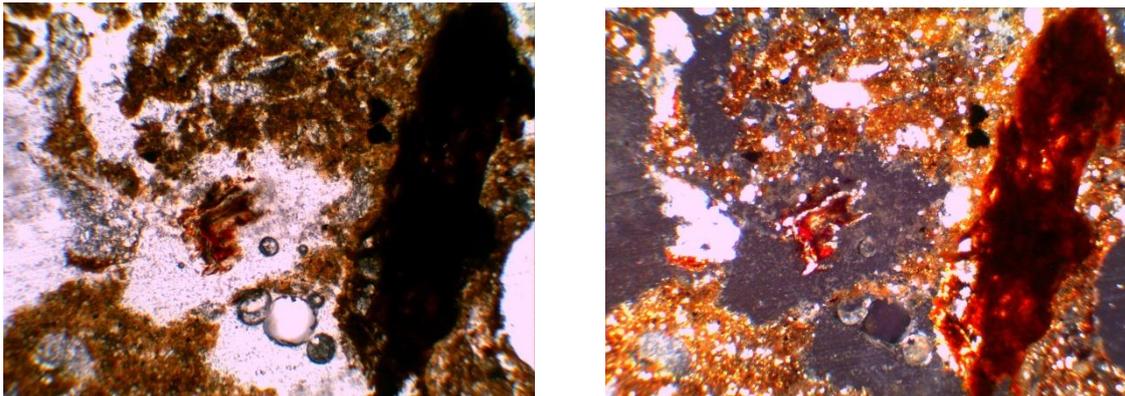


Fonte: Do autor (2019)

DESCRIÇÃO MICROMORFOLÓGICA

Microestrutura maciça (apedal) tendendo a blocos subangulares; poros: planares e canais. Distribuição relativa G/F: porfírica; Limite G/F: 9 μm . Material grosso: grãos de quartzo na fração areia e fragmentos de quartzito (até 40 mm) angulares e laminares e impregnados com óxido de Fe. Material fino: nebular; Bruno-amarelado; trama birrefringente salpicada pontilhada. Material orgânico: raízes vivas. Feição pedológica: nódulo intrusivo de óxido de Fe; nódulo impregnativo de óxido de Fe.

Figura 12 Material grosso impregnado com óxidos de Fé cristalinos, camada de 0–10 cm do Cambissolo a 1.260 m de altitude sob uso de Mata Nativa. (Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagem com 2,3 mm de largura).



Fonte: Do autor (2019)

APÊNDICE B

DESCRIÇÃO DO PERFIL SOB MATA NATIVA A 940 m

DESCRIÇÃO – 12/12/2018

CLASSIFICAÇÃO SiBCS – CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico leptofragmentário

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO e COORDENADAS – Serra da Boa Esperança, Ilicínea-MG, S 20°53'54,7" W 45°48'08,3"

ALTITUDE – 940 m

SITUAÇÃO, DECLIVE, ASPECTO E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL - coletado em terço superior de encosta com 11 % de declive, aspecto leste, sob vegetação nativa (floresta semidecidual).

LITOLOGIA - predomínio de formações quartzíticas e metapelíticas.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA - Meta-sedimentos da Serra da Boa Esperança

MATERIAL ORIGINÁRIO - Produto de alteração de rocha supracitada

PEDREGOSIDADE – muito pedregoso

ROCHOSIDADE – não rochoso (não apresenta afloramento de rocha)

RELEVO LOCAL /REGIONAL - Ondulado /Montanhoso

DRENAGEM - bem drenado

USO ATUAL – vegetação nativa

CLIMA – Cwa (classificação de Köppen)

DESCRITO E COLETADO POR – Emmeline M. França, Lílian C.O.N. Vilela, Alessandro V. Pedroso, Yuri L. Zinn.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

A 0 - 6 cm, cor 10 YR 6/4, estrutura em blocos sub-angulares fraca grande; transição difusa irregular, cerosidade fraca e rara, muito pedregoso, raízes muitas e finas.

Bi 6 - 20 cm, cor 10 YR 7/3, estrutura em blocos angulares moderada pequena média, transição irregular, muito pedregoso, raízes finas, médias e comuns.

C 20 - 50 + cm, cor 10 YR 7/3, estrutura saprolito da rocha, raízes finas e raras.

Figura 13 Imagem da mata nativa amostrada a 940 m, e do perfil do Cambissolo descrito.

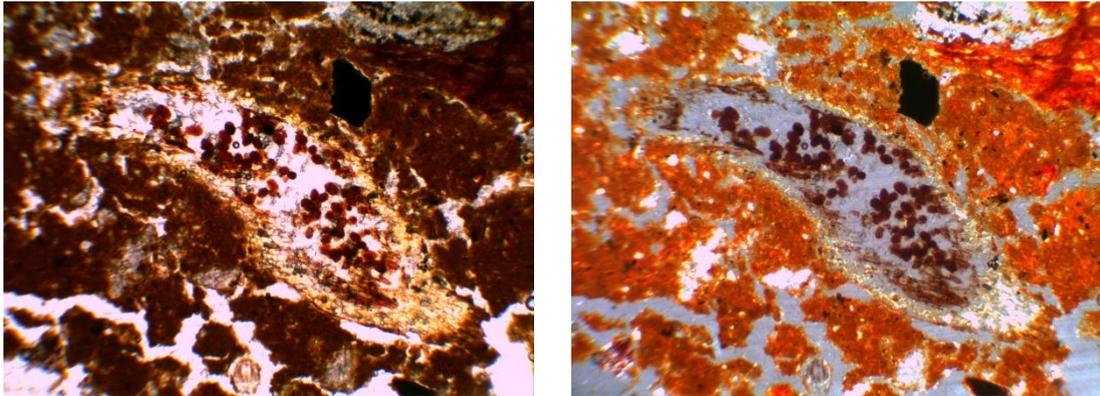


Fonte: Do autor (2019).

DESCRIÇÃO MICROMORFOLÓGICA

Microestrutura tendendo a blocos subangulares; poros: planares e canais. Distribuição relativa G/F: porfírica; Limite G/F: 9 μm . Material grosso: grãos de quartzo na fração areia, fragmentos de quartzito (até 20 mm) angulares e laminares e impregnados com óxido de Fe, fragmentos de rocha metapelítica. Material fino pontilhado e amarelado; trama birrefringente salpicada discreta, poroestriada e granoestriada. Material orgânico: raízes (mortas e vivas). Feição pedológica: nódulo intrusivo de óxido de Fe; nódulo impregnativo de óxido de Fe e preenchimento solto descontínuo.

Figura 14 Feição pedológica: preenchimento solto descontínuo, indicando presença de fauna; microestrutura tendendo blocos subangulares, camada de 0–10 cm do Cambissolo à 940 m de altitude sob uso de Mata Nativa. (Luz polarizada planar (PPL) à esquerda, luz polarizada cruzada (XPL) à direita, imagem com 2,3 mm de largura).



Fonte: Do autor (2019).