

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Indicadores de Qualidade do Solo em Áreas de
Agricultura de Montanha no Bioma Mata Atlântica,
Sudeste do Brasil**

Silver Rodrigues Zandoná

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE
AGRICULTURA DE MONTANHA NO BIOMA MATA ATLÂNTICA,
SUDESTE DO BRASIL**

SILVER RODRIGUES ZANDONÁ

Sob a Orientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia – Ciência do Solo, Área de
Concentração em Pedologia e Física do
Solo.

Seropédica, RJ
Julho de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Z27i	<p>Zandoná, Silver Rodrigues, 1991- Indicadores de qualidade do solo em áreas de agricultura de montanha no bioma Mata Atlântica, sudeste do Brasil / Silver Rodrigues Zandoná. – Seropédica, 2024. 117 f.: il.</p> <p>Orientador: Marcos Gervasio Pereira. Tese (Doutorado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024.</p> <p>1. Manejo do solo. 2. Sistemas conservacionistas. 3. Indicadores edáficos. 4. Sustentabilidade ambiental. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia - Ciência do Solo. III. Título.</p>
------	--

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
(CIÊNCIAS DO SOLO)



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 25 / 2024 - CPGACS (12.28.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.064055/2021-11

Seropédica-RJ, 07 de agosto de 2024.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

SILVER RODRIGUES ZANDONÁ

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

TESE APROVADA EM 26/07/2024.

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Eduardo Carvalho da Silva Neto. Dr. UFRRJ

Erica Souto Abreu Lima. Dra. UFRRJ

David Vilas Boas de Campos. Dr. EMBRAPA

Renato Linhares de Assis. Dr. EMBRAPA

(Assinado digitalmente em 09/08/2024 08:34)
EDUARDO CARVALHO DA SILVA NETO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1246489

(Assinado digitalmente em 08/08/2021 08:33)
MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 03/09/2021 07:37)
DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 030.175.957-06

(Assinado digitalmente em 07/08/2024 19:00)
ERICA SOUTO ABREU LIMA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1412091

(Assinado digitalmente em 07/08/2024 15:46)
RENATO LINHARES DE ASSIS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 795.249.667-00

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **25**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data de emissão: **07/08/2024** e o código de verificação: **6a92250229**

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e,
aos meus irmãos e
aos meus amigos.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Marcos Gervasio Pereira, e ao amigo Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto, pela gigante contribuição no desenvolvimento deste estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por ter sido minha casa, escola e local de trabalho, por vários anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ) pelo apoio prestado. Aos profissionais associados, docentes, orientadores e secretários.

Aos Laboratórios de Gênese e Classificação de Solo e Indicadores de Sustentabilidade Ambiental, do Instituto de Agronomia, da UFRRJ, e a toda sua equipe.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo apoio auxiliar material.

À banca avaliadora, por ter se disponibilizado à tarefa, e pelas contribuições fornecidas.

Aos meus pais e meus tios, por disponibilizarem o terreno do Sítio Zandoná para coleta, bem como aos seus amigos/vizinhos, que colaboraram nas coletas.

Ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), meu local de trabalho, pela liberação parcial para cursar disciplinas.

À todos aqueles que contribuíram de alguma forma na realização deste estudo.

Obrigado a todos.

BIOGRAFIA

Silver Rodrigues Zandoná é natural do município de Ibiráçu - ES. Filho de agricultores, sempre esteve envolvido com o meio rural. Coursou o ensino fundamental nas escolas do município de sua naturalidade. Coursou o ensino médio concomitante ao curso Técnico em Agropecuária, na antiga Escola Agrotécnica Federal de Colatina-ES, atual Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Itapina. Estudou Engenharia Agrônômica, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Ao longo do curso de Agronomia fez longos períodos de estágio no Departamento de Solos da UFRRJ, atuando no Projeto Solos Alimentos Saúde e Vida, sob orientação da Professora Edna Riemke de Souza. Via Departamento de Fitotecnia, estagiou na Fazendinha Agroecológica, sob orientação do Professor Raul de Lucena Duarte Ribeiro. Nesse período também foi bolsita de iniciação tecnológica industrial junto à Embrapa Agrobiologia, orientado pelo Pesquisador José Antônio Azevedo Espíndola. Ingressou, via concurso público, no quadro de funcionários técnicos administrativos da UFRRJ. Após a graduação, cursou o Mestrado Profissional em Agricultura Orgânica da UFRRJ, sob orientação do Professor Antônio Carlos Souza Abboud. Em seguida ingressou no curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da UFRRJ, sob orientação do Professor Marcos Gervasio Pereira. Atualmente ocupa o cargo de Pesquisador em Propriedade Industrial, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

RESUMO GERAL

ZANDONÁ, Silver Rodrigues. **Indicadores de qualidade do solo em áreas de agricultura de montanha no bioma Mata Atlântica, sudeste do Brasil**. 2024. 117f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

As áreas de montanha são de grande relevância já que são significativas na produção de alimentos e na realização de serviços ecossistêmicos. Dessa forma compreender as alterações que ocorrem nesses ambientes durante o manejo podem prevenir impactos decorrentes do uso inadequado. O presente estudo foi dividido em três capítulos com diferentes objetivos. No capítulo I: i) realizou-se a caracterização morfológica, química e física dos atributos do solo de perfis coletados em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais; ii) verificou-se as principais classes de solos dessas áreas; e iii) avaliou-se a capacidade de uso agrícola, bem como as classes de aptidão e principais limitações. No capítulo II foi i) quantificado o armazenamento de carbono (C) e nitrogênio (N) nessas áreas, e ii) avaliado a origem desses elementos. O capítulo III teve como intuito i) verificar a possível influência do monocultivo de diferentes espécies vegetais em ambiente de montanha no acúmulo e composição da serrapilheira; ii) avaliar possíveis modificações impostas por essas coberturas e formas de cultivo nos atributos químicos associados a fertilidade do solo; e iii) analisar a compartimentalização da matéria orgânica do solo (MOS), identificando quais os tipos de cobertura estão contribuindo para aumento dos teores de carbono orgânico e suas respectivas frações orgânicas. Foram avaliadas três áreas cultivadas com banana (BN), café (CF) e cacau (CC) e uma área de referência (FS, fragmento florestal da Mata Atlântica) em três pontos distintos com relevo declivoso, típico da região sudeste do Brasil. No capítulo I verificou-se grande parte dos perfis identificados no primeiro nível categórico (ordem) como Cambissolos, em função da presença de um horizonte diagnóstico subsuperficial B incipiente, e no segundo nível categórico (subordem) como Háplicos. Quanto à aptidão agrícola, as maiores limitações de utilização foram a baixa fertilidade natural, a suscetibilidade a erosão e os impedimentos à mecanização ou cultivo, decorrentes da declividade, pedregosidade e rochiosidade. No capítulo II constatou-se que a magnitude dos efeitos causados pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais nos atributos do solo aumentou no sentido FS – BN e CC – CF. Os cultivos de BN e CC incrementaram os teores e estoques de C (em superfície) e N (em profundidade) no solo quando comparados às áreas com cobertura de FS, enquanto o cultivo de CF promoveu reduções dos valores desses atributos. Através das análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ ficaram evidentes diferenças entre os cultivos agrícolas, com destaque para a área de cultivo de CC que separou-se dos cultivos de BN e CF. No capítulo III verificou-se que os maiores estoques de serrapilheira foram quantificados nas áreas de BN e FS ($\sim 34,0$ e $22,0 \text{ Mg ha}^{-1}$). Entre as frações da MOS, a matéria orgânica leve em água foi a mais sensível ao efeito dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais, principalmente quanto aos valores das razões estequiométricas. Verificou-se similaridade para os teores de C total, N total, C orgânico total e fósforo (P) total entre as áreas de FS, BN e CC. Observou-se padrões diferenciados para as razões estequiométricas entre os compartimentos. As respostas dos teores de C, N, P e a sua estequiometria aos diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais têm aplicações significativas no desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável.

Palavras-chave: Manejo do solo. Sistemas conservacionistas. Indicadores edáficos. Sustentabilidade ambiental.

GENERAL ABSTRACT

ZANDONÁ, Silver Rodrigues. **Soil quality indicators in mountain agriculture areas in the Atlantic Forest biome, southeastern Brazil**. 2024. 117p. Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brazil, 2023.

Mountain areas, despite being relegated to a secondary level when it comes to agriculture, are of great relevance as they are significant in food production and the provision of ecosystem services. In this way, understanding the changes that occur in these environments during management can prevent impacts resulting from inappropriate use. The present study was divided into three chapters with different objectives. In chapter I i) the morphological, chemical and physical characterization of soil attributes from profiles collected in areas with different agricultural crops and vegetation cover was carried out; ii) the main soil classes of these areas were verified; and iii) the capacity for agricultural use was evaluated, as well as the suitability classes and main limitations. In chapter II, i) the storage of carbon (C) and nitrogen (N) in these areas was quantified, and ii) the origin of these elements was evaluated. Chapter III aimed to i) verify the possible influence of monoculture of different plant species in a mountain environment on the accumulation and composition of litter; ii) evaluate possible changes imposed by these covers and forms of cultivation in the chemical attributes associated with soil fertility; and iii) analyze the compartmentalization of soil organic matter (SOM), identifying which types of coverage are contributing to an increase in organic carbon levels and their respective organic fractions. Three areas cultivated with banana (BN), coffee (CF) and cocoa (CC) and a reference area (FS, forest fragment of the Atlantic Forest) were evaluated at three different points with steep terrain, typical of the southeastern region of Brazil. In Chapter I, a large part of the profiles identified at the first categorical level (order) as Cambisols, due to the presence of an incipient subsurface diagnostic horizon B, and at the second categorical level (suborder) as Haplicols, were verified. Regarding agricultural suitability, the greatest limitations of use were low natural fertility, susceptibility to erosion and impediments to mechanization or cultivation, resulting from the slope, stoniness and rockiness. In chapter II it was found that the magnitude of the effects caused by agricultural crops and vegetation cover on soil attributes increased in the FS – BN and CC – CF direction. BN and CC crops increased the contents and stocks of C (on the surface) and N (in depth) in the soil when compared to areas with FS coverage, while the CF crop promoted reductions in the values of these attributes. Through isotopic analyzes of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, differences between agricultural crops were evident, with emphasis on the CC cultivation area that was separated from BN and CF crops. In chapter III it was found that the largest litter stocks were quantified in the BN and FS areas (~ 34.0 and 22.0 Mg ha^{-1}). Among the SOM fractions, light organic matter in water was the most sensitive to the effect of agricultural crops and vegetable covers, especially in terms of stoichiometric ratio values. Similarity was verified for the contents of total C, total N, total organic C and total phosphorus (P) between the areas of FS, BN and CC. Differentiated patterns were observed for the stoichiometric ratios between the compartments. The responses of C, N, P content and their stoichiometry to different agricultural crops and vegetation cover have significant applications in the development of sustainable management strategies.

Keywords: Soil management. Conservation systems. Soil indicators. Environmental sustainability.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Fotos representativas do relevo declivoso e pedregoso do Sítio Zandoná. (A) Fragmento floresta secundária do bioma Mata Atlântica sem índices de ação antrópica. (B) Lavoura de banana. (C) Lavoura de café. (D) Lavoura de cacau. Fotos: Silver Rodrigues Zandoná e Luiz Alberto Rodrigues, 2020..... 7
- Figura 2.** Limites do Sítio Zandoná, com indicação de sua sede, e tomada de fotos representativas das culturas agrícolas e vegetação nativa da propriedade. Fonte da Imagem: Google Earth. 8
- Figura 3.** Perfis de solo nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. P01, P04 e P09: Perfis das áreas cultivadas com café; P02, P03 e P12: Perfis das áreas cultivadas com cacau; P05, P06 e P07: Perfis das áreas de floresta secundária do bioma Mata atlântica; e P08, P10 e P11: Perfis das áreas cultivadas com banana..... 19
- Figura 4.** Valores de acidez ativa (pH), argila (g kg^{-1}) e carbono orgânico total (COT, g kg^{-1}) nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. pH em H_2O (a); argila (b); e COT (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica..... 34
- Figura 5.** Valores de cálcio e magnésio trocáveis ($\text{Ca}+\text{Mg}$, cmolc dm^{-3}), alumínio trocável (Al, cmolc dm^{-3}) e potássio trocável (K, mg dm^{-3}) nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. $\text{Ca}+\text{Mg}$ (a); Al (b); e K (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica..... 36
- Figura 6.** Valores de fósforo disponível (P, mg dm^{-3}), soma de bases (Valor S, cmolc dm^{-3}) e saturação por bases (Valor V, %) e nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.; Valor S (b); e Valor V (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica. 38
- Figura 7.** Variação do estoque de carbono e nitrogênio total (ΔEstC e ΔEstN) na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais em relação a área de referência (FS, floresta secundária do bioma Mata Atlântica), Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; e CF: Área de cultivo de café..... 59
- Figura 8.** Abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ (A) e $\delta^{15}\text{N}$ (B) na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem as coberturas vegetais na camada avaliada. ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata atlântica..... 61
- Figura 9.** Análise de componentes principais integrando as variáveis relacionadas ao estoque de carbono e nitrogênio e abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica; Ds: Densidade do solo; CT: Carbono total; EstC: Estoque de carbono; NT: Nitrogênio total; EstN: Estoque de nitrogênio; C/N: Relação

carbono/nitrogênio; $\delta^{13}\text{C}$: Abundância isotópica de carbono; $\delta^{15}\text{N}$: Abundância isotópica de nitrogênio. 63

Figura 10. Razões estequiométricas C/N, C/P e N/P de diferentes compartimentos nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as razões estequiométricas no cultivo agrícola avaliado. ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. MOL: Matéria orgânica leve em água; MOP: Matéria orgânica particulada; SER: Serrapilheira; BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária. 84

Figura 11. Análise de componentes principais integrando as variáveis relacionadas à matéria orgânica do solo e às razões estequiométricas nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária. pH: Acidez ativa do solo; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial do solo; S: Soma de bases do solo; V: Saturação por bases do solo; CT: Carbono total no solo determinado pelo método de combustão a seco; NT: Nitrogênio total no solo determinado pelo método de combustão a seco; KT: Potássio total no solo; C/N: Relação carbono/nitrogênio no solo determinada pelo método de combustão a seco; CTMOP: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; NTMOP: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; COP: Carbono orgânico particulado; PTMOP: Fósforo total da MOP; KTMOP: Potássio total da MOP; N/PMOP: Relação nitrogênio/fósforo da MOP; CTMOL: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; e NTMOL: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; C/PMOL: Relação carbono/fósforo da MOL; e N/PMOL: Relação nitrogênio/fósforo da MOL. 87

Figura 12. Perfil coletado na primeira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 100

Figura 13. Perfil coletado na primeira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 101

Figura 14. Perfil coletado na terceira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 103

Figura 15. Perfil coletado na segunda área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 104

Figura 16. Perfil coletado na terceira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 106

Figura 17. Perfil coletado na segunda área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 108

Figura 18. Perfil coletado na primeira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 109

Figura 19. Perfil coletado na primeira área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 111

Figura 20. Perfil coletado na terceira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil. 112

Figura 21. Perfil coletado na terceira área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.	114
Figura 22. Perfil coletado na segunda área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.	115
Figura 23. Perfil coletado na segunda área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Descrição, localização e critérios específicos utilizados para escolha das áreas amostrais, Sudeste do Brasil.	13
Tabela 2. Informações gerais dos perfis de solos nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	16
Tabela 3. Distribuição dos horizontes e atributos morfológicos e textura dos perfis de solos nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	20
Tabela 4. Classificação dos perfis de solo das áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	40
Tabela 5. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de café, Sudeste do Brasil.	43
Tabela 6. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com floresta, Sudeste do Brasil.	44
Tabela 7. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de banana, Sudeste do Brasil.	45
Tabela 8. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de cacau, Sudeste do Brasil.	46
Tabela 9. Atributos físicos e estoque de nutrientes nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	57
Tabela 10. Matriz da análise de componentes principais (ACP). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis.	63
Tabela 11. Correlação de Pearson entre as variáveis relacionadas ao estoque de carbono e nitrogênio e abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no intervalo de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	64
Tabela 12. Granulometria e atributos químicos associados a fertilidade do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	76
Tabela 13. Estoque de serapilheira, teores (g kg^{-1}), conteúdos (Mg ha^{-1} e kg ha^{-1}) e razões estequiométricas dos nutrientes nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	77
Tabela 14. Teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg^{-1} e mg kg^{-1}), e razões estequiométricas na matéria orgânica leve em água (MOL) do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	80
Tabela 15. Teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg^{-1}), e razões estequiométricas da matéria orgânica particulada (MOP) nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	81
Tabela 16. Teores de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg^{-1}), e razões estequiométricas do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.	82

Tabela 17. Matrix da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis.....	86
Tabela 18. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de café no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.....	100
Tabela 19. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de cacau no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	102
Tabela 20. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de cacau no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	103
Tabela 21. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de café no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.....	105
Tabela 22. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	107
Tabela 23. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	108
Tabela 24. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	110
Tabela 25. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	111
Tabela 26. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de café no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.....	113
Tabela 27. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	114
Tabela 28. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	116
Tabela 29. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de cacau no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.	117

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1. Agricultura de Montanha no Mundo	3
2.2. Agricultura de Montanha no Brasil	4
2.3. Indicadores de Qualidade do Solo em Ambiente Montanhoso.....	5
2.4. Aspectos Históricos de Ocupação e Formação do “Sítio Zandoná”	5
3. CAPÍTULO I SOLOS DE ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E POTENCIALIDADES PARA USO AGRÍCOLA	9
3.1. RESUMO.....	10
3.2. ABSTRACT.....	11
3.3. INTRODUÇÃO	12
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.4.1. Características ambientais da região do estudo.....	13
3.4.2. Áreas avaliadas.....	13
3.4.3. Coleta dos perfis.....	14
3.4.4. Classificação dos solos e aptidão agrícola das terras	14
3.4.5. Tratamento estatístico dos dados	17
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
3.5.1. Caracterização dos atributos morfológicos e textura	18
3.5.2. Caracterização dos atributos químicos e físicos.....	33
3.5.3. Classificação dos solos.....	39
3.5.4. Aptidão agrícola das terras	41
3.6. CONCLUSÕES	47
3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
4. CAPÍTULO II ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: ACÚMULO E ORIGEM DE NUTRIENTES	50
4.1. RESUMO.....	51
4.2. ABSTRACT.....	52
4.3. INTRODUÇÃO	53
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	55
4.4.1. Localização, clima e colo das áreas do estudo.....	55
4.4.2. Histórico das áreas do estudo.....	55
4.4.3. Coleta das amostras.....	55
4.4.4. Estoque de carbono e nitrogênio.....	55
4.4.5. Abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$	56
4.4.6. Análises estatísticas.....	56
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.5.1. Densidade do solo e armazenamento de carbono e nitrogênio	57
4.5.2. Origem do carbono e nitrogênio armazenado	60

4.5.3. Dissimilaridade entre as áreas e correlação entre os atributos	62
4.6. CONCLUSÕES	65
4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
5. CAPÍTULO III ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COMO INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO	69
5.1. RESUMO.....	70
5.2. ABSTRACT.....	71
5.3. INTRODUÇÃO	72
5.4. MATERIAL E MÉTODOS	74
5.4.1. Localização, clima e solo das áreas do estudo	74
5.4.2. Histórico das áreas do estudo	74
5.4.3. Coleta das amostras.....	74
5.4.4. Estoque de serrapilheira	74
5.4.5. Análise granulométrica e atributos químicos	74
5.4.6. Análises de matéria orgânica do solo	75
5.4.7. Razões estequiométricas	75
5.4.8. Análises estatísticas.....	75
5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.5.1. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais nos atributos físicos e químicos	76
5.5.2. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais no acúmulo e composição da serrapilheira	77
5.5.3. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais na compartimentalização da matéria orgânica do solo	80
5.5.4. Estequiometria entre os compartimentos	84
5.5.5. Dissimilaridade entre as áreas de cultivo agrícola e a área de referência	85
5.7. CONCLUSÕES	88
5.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
6. CONCLUSÕES GERAIS	94
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	96
9. ANEXOS	99

1. INTRODUÇÃO GERAL

Estima-se que as áreas de montanha ocupem 1/4 da superfície terrestre, e que são responsáveis por sustentar economicamente 12% da população mundial (ONU, 2018). De acordo com a FAO (FAO, 2018), quase 1 bilhão de pessoas vivem em áreas montanhosas, sendo, estes ambientes, responsáveis por fornecer entre 60% e 80% da água doce do mundo, abrigar 25% da biodiversidade do planeta e 28% dos bosques do mundo.

Montanhas fornecem água, abrigo, materiais e alimentos por meio da agricultura e criação de animais. Mas, além disso, têm grande importância ambiental na manutenção do ciclo hidrológico, na formação de nuvens, na captação de água das chuvas, e no abastecimento dos lençóis freáticos.

Para Aun e Assis (2020), é fundamental conciliar a atividades econômicas com conservação ambiental nos ambientes de montanha, utilizando conhecimentos e tecnologias adequadas e sistematizando atividades agrícolas com atividades não agrícolas – como turismo, por exemplo – para uma exploração menos intensiva dos solos. Embora as montanhas sejam ricas em biodiversidade e forneçam serviços ambientais essenciais, elas estão ameaçadas pelas mudanças no uso e cobertura da terra (TOVAR et al., 2013).

O Brasil é apontado como o 16º país com a maior área montanhosa do planeta, e está no quarto lugar dentre os países que apresentam a maior área montanhosa na América Latina. Porém, pouca importância é dada a esse tema no país (LÓPEZ NETTO, 2013). A exploração dessas áreas para atividades agrícolas tem ocorrido com relativo sucesso, no entanto, de forma potencialmente impactante ao ambiente (ASSIS et al., 2019).

O clima mais frio associado à maior umidade, junto com as condições de solos localizados em áreas com com acentuado declive e pedregosidade, verificadas nos ambientes montanhosos, impossibilitam o cultivo das principais *commodities* agrícolas de grãos. Contudo, os modelos de agricultura que utilizam menores escalas de terreno, e que empregam menor grau de mecanização, normalmente conduzidas pela agricultura familiar, têm sido adotados com significativo sucesso nesses locais. E culturas perenes, como banana, café e cacau são amplamente empregadas.

Os solos em terrenos declivosos de ambientes montanhosos são mais vulneráveis às mudanças climáticas (NETTO, 2013), e podem se degradar com facilidade. Quando a erosividade das precipitações é intensa, e quando a cobertura vegetal não é adequada, matéria orgânica (FONSECA et al., 2017, 2022), solo (WANG et al., 2016), água e nutrientes, que são essenciais para o desenvolvimento das plantas, podem se perder por erosão, e causar significativos danos ambientais como assoreamento e eutrofização de cursos de água (KIPPER et al., 2022).

Quando o solo tem alguma cobertura vegetal, se reduz a energia cinética do impacto das gotas de água e a velocidade do escoamento superficial (TEIXEIRA e MISRA, 1997). Com isso, se reduzem as perdas de água, solo, matéria orgânica e nutrientes (DECHEN et al., 2015). A proteção do solo contra a erosão está diretamente relacionada com a cobertura vegetal, ou seja, quanto mais a superfície do solo estiver protegida pela vegetação, menor será a taxa de erosão e desagregação das partículas da camada superficial (BEZERRA e CANTALICE, 2006).

A partir dessa contextualização, este estudo teve como hipótese central que atributos edáficos, quantificados em áreas sob agricultura de montanha, no Bioma Mata Atlântica do sudeste do Brasil, podem servir como indicadores da qualidade dos solos, podendo indicar quais áreas estão mais protegidas contra os processos erosivos. Para avaliar a hipótese, esta tese está estruturada em três capítulos com diferentes objetivos:

O Capítulo I, intitulado “Solos de áreas de agricultura de montanha no sudeste do Brasil: Caracterização, classificação e potencialidades para uso agrícola”, teve como objetivos i) realizar a caracterização química, física e morfológica dos atributos do solo de perfis coletados em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais; ii) verificar as principais classes de solos dessas áreas; e iii) avaliar a capacidade de uso agrícola, bem como as classes de aptidão e principais limitações.

O Capítulo II, intitulado “Áreas de agricultura de montanha no sudeste do Brasil: Acúmulo e origem de nutrientes”, teve como objetivos i) quantificar o armazenamento de carbono e nitrogênio em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, e ii) avaliar a origem desses elementos nessas áreas.

O Capítulo III, intitulado “Áreas de agricultura de montanha no sudeste do Brasil: Atributos químicos e matéria orgânica do solo como indicadores de qualidade do solo”, teve como objetivos i) verificar a possível influência do monocultivo de diferentes espécies vegetais em ambiente de montanha no acúmulo e composição da serrapilheira; ii) avaliar possíveis modificações impostas por essas coberturas e formas de cultivo nos atributos químicos associados a fertilidade do solo; iii) analisar a compartimentalização da matéria orgânica do solo, identificando quais os tipos de cobertura estão contribuindo para aumento dos teores de carbono orgânico e suas respectivas frações orgânicas; e iv) investigar a dissimilaridade existente entre as áreas de cultivo agrícola em relação à área de referência.

2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1. Agricultura de Montanha no Mundo

Vários locais, com diversas características recebem o título de “montanha” mundo afora. Não existem critérios mundialmente harmonizados para atribuir este termo a determinado lugar. É comum denominar de montanha os pontos do relevo com maior elevação, associados, ou não, à declividade.

Os ecossistemas de montanha ocupam cerca de 25% da superfície terrestre, sendo a base de sustentação das principais atividades econômicas de 12% da população mundial, proporcionando bens e serviços básicos para mais de 50% da humanidade. Cerca de $\pm 10\%$ da população do mundo vive em áreas de montanha de altas encostas e aproximadamente 40% ocupam áreas de bacias hidrográficas em baixas e médias montanhas (ONU, 2018; ASSIS et al., 2019).

De acordo com a FAO (FAO, 2018), quase 1 bilhão de pessoas vivem em áreas montanhosas. Cerca de 22% da superfície terrestre está coberta por montanhas que fornecem entre 60% e 80% da água doce do mundo, abrigam 25% da biodiversidade do planeta e 28% dos bosques do mundo. Seis das 20 culturas alimentares mais importantes têm origem nas regiões montanhosas (batata, milho, cevada, sorgo, maçã e tomate). Além disso, também atraem entre 15% e 20% do turismo mundial.

Montanhas sempre foram importantes fontes de recursos para a humanidade, fornecendo alimentos, água, abrigo e materiais, tanto que alguns povos ao redor do mundo consideram esses locais sagrados. Mas, além de fornecer recursos, estes ecossistemas têm grande importância ambiental, especialmente na manutenção do ciclo hidrológico, influenciando na formação de nuvens, na captação de água das chuvas e no abastecimento dos lençóis freáticos. De acordo com Netto (2013), as montanhas são as grandes responsáveis pelo fornecimento de recursos hídricos para as terras baixas, e isso pode ser fortemente afetado pelas mudanças climáticas.

As regiões de montanhas apresentam grande variabilidade no que diz respeito à topografia, clima e solo, o que influencia diretamente a biodiversidade existente, tanto na riqueza de espécies da fauna e flora, quanto de espécies endêmicas (MARTINELLI, 2007; LÓPEZ NETTO et al., 2011). A geologia também é outro fator que apresenta grande variação nesses territórios. Segundo Martinelli (2007), os ecossistemas de montanha são a base para as bacias hidrográficas e, especialmente, para a boa qualidade da água.

Devido às condições edafambientais, os principais problemas relacionados aos ambientes de montanhas são: desmatamento; processos erosivos; queimadas e incêndios, de natureza natural ou antrópica; perda da biodiversidade; mineração; poluição e redução dos volumes dos rios e nascentes; pressões da indústria; transporte e turismo sem regulamentação; expansão urbana sem planejamento; e produção agrícola sem respeitar a aptidão das terras (NETTO et al., 2017).

As montanhas são importantes espaços de produção de alimentos e matérias-primas de diferentes origens, e nesses ambientes os sistemas florestais ocupam extensas áreas de produção. As condições climáticas e pedológicas limitantes geralmente verificadas nesses locais, impossibilitam o cultivo das principais *commodities* agrícolas de grãos. Contudo, as montanhas apresentam forte relevância na produção animal (pastagens naturais ou plantadas); e produção de espécies cinegéticas e piscícolas, que em alguns países são as principais atividades econômicas desenvolvidas nesses territórios (por exemplo, Reino Unido) (AZEVEDO et al., 2016).

Para Aun e Assis (2020), é fundamental conciliar a produção econômica com conservação ambiental nos ambientes de montanha, sendo necessário não apenas conhecimentos e tecnologias adequadas, mas sistematizar atividades agrícolas com atividades não agrícolas para viabilizar o desenvolvimento sustentável dos territórios montanos. Certamente, com vista para uma exploração menos intensiva dos solos.

Embora as montanhas sejam ricas em biodiversidade e forneçam serviços ambientais essenciais para as pessoas, elas estão atualmente ameaçadas pelas mudanças no uso e cobertura da terra (TOVAR et al., 2013).

Os solos nas áreas declivosas de ambientes montanhosos são mais vulneráveis às mudanças climáticas (NETTO, 2013), e podem se degradar com facilidade. Quando a erosividade das precipitações é intensa, e quando a cobertura vegetal não é adequada, matéria orgânica (FONSECA et al., 2017; 2022), solo (WANG et al., 2016), água e nutrientes, que são essenciais para o desenvolvimento das plantas, podem se perder por erosão, e causar significativos danos ambientais como assoreamento e eutrofização de cursos de água (KIPPER et al., 2022).

Quando o solo tem alguma cobertura vegetal, se reduz a energia cinética do impacto das gotas de água e a velocidade do escoamento superficial (TEIXEIRA e MISRA, 1997). Com isso, se reduzem as perdas de água, solo, matéria orgânica e nutrientes (DECHEN et al., 2015). A proteção do solo contra a erosão está diretamente relacionada com a cobertura vegetal, ou seja, quanto mais a superfície do solo estiver protegida pela vegetação, menor será a taxa de erosão e desagregação das partículas da camada superficial (BEZERRA e CANTALICE, 2006).

2.2. Agricultura de Montanha no Brasil

A legislação brasileira define que montanha é qualquer elevação do terreno com cota em relação a base superior a trezentos metros. Tal definição consta na Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002.

O Brasil é apontado como o 16º país com a maior área montanhosa do planeta, e fica no quarto lugar entre os países que apresentam a maior área montanhosa na América Latina. Porém, pouca importância é dada a este tema no país (LÓPEZ NETTO, 2013). Os três pontos mais altos do território brasileiro são: a) o Pico da Neblina, com ± 2.994 m (Serra do Imeri, Amazonas); b) o Pico 31 de Março, com ± 2.928 m (também na Serra do Imeri); e c) o Pico da Bandeira, com ± 2.892 m (Serra do Caparaó, entre o Espírito Santo e Minas Gerais) (IBGE, 2011).

Atividades agrícolas têm sido exploradas com expressivo sucesso nas áreas montanhosas, porém, de forma muito impactante ao ambiente (ASSIS et al., 2019). E foi a preocupação com os ecossistemas de montanha, envolvendo a produção agrícola, pagamento de serviços ecossistêmicos, turismo ecológico e mudanças climáticas, que fizeram o Brasil sediar o “Mountains 2018”. O evento foi realizado de 10 a 14 de dezembro de 2018 na cidade Nova Friburgo, na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Várias organizações nacionais e internacionais, relacionadas ao tema, apoiaram o evento: Embrapa; ONG Crescente Fértil; Centro de Investigação de Montanha, vinculado ao Instituto Politécnico de Bragança; Universidade Federal do Ceará; Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; Unesco; *Mountain Partnership*; e *University of Highlands and Islands*.

O Mountains 2018 buscou estimular e disseminar o conhecimento sobre o tema de “montanha”, baseado em lições aprendidas a partir de pesquisas científicas e experiências práticas relacionadas ao uso e aos desafios de promover o desenvolvimento sustentável nesses ambientes (EMBRAPA, 2018). Esclareceu de que forma as montanhas podem contribuir para os “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)” elaborados pela Organização das

Nações Unidas (ONU) (GOMES e FERREIRA, 2018). Algumas observações importantes sobre o evento foram feitas pela pesquisadora da Embrapa Agrobiologia e presidente da comissão organizadora do Mountains Adriana Maria de Aquino, que merecem destaque:

“O objetivo do evento é reforçar a pesquisa na área e estabelecer metas para melhorar a vida das pessoas, com sustentabilidade.” (EMBRAPA, 2018).

“Como o Brasil ainda não tem políticas públicas específicas para as montanhas e o desconhecimento em torno desse tema é muito grande, esperamos discutir essa temática com vários segmentos da sociedade, como ONGs, instituições de ensino e pesquisa, governos locais, regionais e federais, empreendedores, agricultores e montanhistas, entre outros.” (DIÁRIO DE PETRÓPOLIS, 2018).

2.3. Indicadores de Qualidade do Solo em Ambiente Montanhoso

A qualidade do solo está associada a capacidade deste sustentar a produtividade biológica, preservando a qualidade do ambiente e promovendo a saúde da flora e da fauna, abrangendo a concepção de qualidade do alimento e segurança alimentar e nutricional (DORAN e PARKIN, 1994).

Indicadores de qualidade do solo são atributos mensuráveis que sinalizam a capacidade do solo de sustentar e promover a qualidade ambiental, podendo ser classificados em físicos, químicos e biológicos (MURPHY et al., 2006). Entretanto, somente por meio de um conjunto de indicadores edáficos e suas interações, é possível monitorar e avaliar o impacto das diferentes formas de uso e manejo da terra, e condições ambientais sobre a qualidade do solo (LIMA et al., 2013). Dessa forma, supõe-se que um solo com qualidade se apresente saudável dentro dos ecossistemas naturais e antropizados, e que mantenha a qualidade ambiental, a produtividade e o bem-estar do ser humano (DORAN e PARKIN, 1994).

Ao escolher um determinado indicador para compor um índice de qualidade do solo, alguns aspectos importantes devem ser considerados, a saber: i) facilidade de medição; ii) sensibilidade a mudanças de edafoambientais; iii) economicamente viável; e iv) eficiente para explicar os processos do ecossistema e os limites claros entre condições de sustentabilidade e não sustentabilidade. Complementarmente, os atributos do solo podem ser classificados em intermediários, aqueles passíveis de modificações em função do uso e manejo adotado (por exemplo, densidade do solo); e permanentes, aqueles que pertencem à composição ou natureza do solo (por exemplo, densidade de partículas) (DORAN e PARKIN, 1994; 1996).

Os classificados como intermediários, por serem mais suscetíveis as alterações edafoambientais, são geralmente mais utilizados na avaliação da qualidade do solo. Para a avaliação em ambientes montanhosos, destacam-se: o aporte de matéria orgânica, os teores dos nutrientes associados à fertilidade e a avaliação do complexo sortivo, relacionados à qualidade química do solo; o estado de agregação, associado a qualidade física do solo; e a fauna e biomassa microbiana edáficas, intimamente relacionados à qualidade biológica do solo. Tais atributos podem ser considerados eficientes indicadores na avaliação da qualidade do solo, devido a elevada sensibilidade as modificações proporcionadas pelas ações antropogênicas que ambos apresentam.

2.4. Aspectos Históricos de Ocupação e Formação do “Sítio Zandoná”

A área de estudo fica em uma propriedade agrícola denominada Sítio Zandoná, localizada na comunidade Santo Antônio, no município de Ibirapu (ES). Essa propriedade, assim como a maioria das outras propriedades no entorno, foi obtida em uma das diversas levas

de concessões de lotes feitas aos filhos dos imigrantes italianos assentados na região, chegados no Brasil na década de 1870.

Os imigrantes que eram chefes de família puderam adquirir seus lotes de terra no entorno do então Núcleo Colonial Santa Cruz (atual cidade de Ibirapu), onde o solo era considerado de alta fertilidade e o relevo era plano a levemente ondulado. Já seus filhos, ao chegarem na mocidade, em função da ocupação do entorno do núcleo colonial, precisaram adquirir seus lotes nas áreas mais interioranas. Foi nesse contexto que Zandoná Giuseppe, imigrante italiano que chegou no Brasil aos 5 anos de idade em 1877, vindo de Gaiarine-TV, na Itália, recebeu autorização para comprar e lavrar as terras, antes devolutas, do Sítio Zandoná. Essas terras margeavam uma antiga sesmaria de nome “Coelho Rodrigues”, da qual não se tem muitas informações.

Foi o Aviso Nº 21, de 28 de março de 1891, expedido pela Diretoria de Agricultura do então Ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas, destinado à Inspeção Especial de Terras e Colonização do Estado do Espírito Santo, que autorizou a venda de lotes de terras devolutas para 22 indivíduos. Uma cópia da autorização nominal onde consta a relação dos imigrantes compreendidos na autorização de vendas dos referidos lotes naquele núcleo colonial permanece depositada no Arquivo Público do Estado do Espírito Santo (MAOP, 1891). Acredita-se que a derrubada da Mata Atlântica para exploração do solo com implantação das primeiras lavouras no Sítio Zandoná tenha começado logo após a demarcação topográfica (EES, 1892) do lote Nº 150, de 30 hectares, situado à margem esquerda do Rio Piraqueçu, destinado a Zandoná Giuseppe, em 1892.

O difícil acesso entre o núcleo colonial e a propriedade exigia a produção local dos gêneros alimentares básicos à própria subsistência, o que nos induz a conceber que as primeiras áreas abertas na área da propriedade foram destinadas às lavouras temporárias, especialmente de milho, feijão e cana-de-açúcar. E no entorno das habitações normalmente eram cultivadas espécies frutíferas como banana, manga, citros, jaca e coco, que além da alimentação humana serviam à alimentação das criações animais de pequeno porte. E, considerando que a área do Sítio Zandoná começou a ser explorada em uma etapa de colonização secundária, por filhos dos imigrantes italianos, a rentável lavoura de café que prosperava sem muitos tratos culturais nos solos virgens do entorno do núcleo colonial, certamente também foi introduzida nessa propriedade interiorana, justamente pela familiaridade que se detinha sobre esse cultivo.

Assim como na maioria das regiões cafeeiras do Brasil da época, os solos naturalmente ricos em nutrientes do lugar eram cultivados por sucessivos anos sem um adequado manejo, e quando a lavoura começava a declinar derrubava-se a floresta e novas áreas de cultivo eram formadas. As áreas que já não produziam de forma satisfatória eram abandonadas e assim permaneciam em “pousio involuntário”, às vezes, por décadas, até serem novamente desmatadas e cultivadas. Esse longo intervalo de pousio era possível pela abundância de terras inexploradas, escassez de mão-de-obra e pela dificuldade em cultivar o solo, em sua maior parte de superfície declivosa e pedregosa, em sua maior parte (Figura 1).

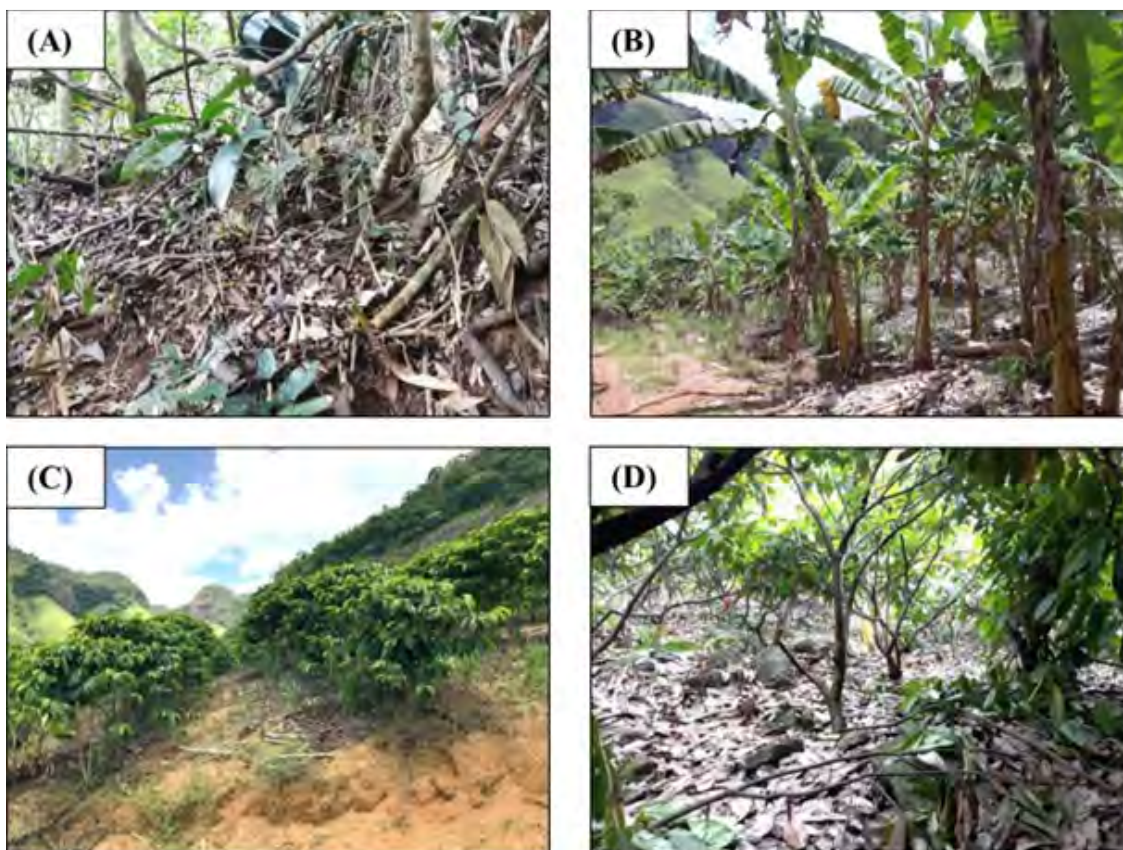


Figura 1. Fotos representativas do relevo declivoso e pedregoso do Sítio Zandoná. (A) Fragmento floresta secundária do bioma Mata Atlântica sem índices de ação antrópica. (B) Lavoura de banana. (C) Lavoura de café. (D) Lavoura de cacau. Fotos: Silver Rodrigues Zandoná e Luiz Alberto Rodrigues, 2020.

No ano de 1972, a área da propriedade (Figura 2) foi ampliada para os atuais 67 hectares inteiramente posicionados na encosta oeste do vale em que se encontra, isso graças à compra de propriedade vizinha que fazia fronteira ao sul. Geração após geração, o tradicional cultivo do cafeeiro perdura na propriedade até a presente data, porém, sob condições de manejo que se afastam da antiga exploração predatória e massiva os recursos minerais, que não levava em consideração a necessidade de reposição de nutrientes ao solo. Inicialmente variedades de café arábica foram introduzidas na propriedade, porém, com o passar do tempo, as plantas da espécie *Coffea arabica* foram sendo gradualmente substituídas por plantas de diversas variedades da espécie *Coffea canephora*, o café conilon, que melhor se adaptou ao ambiente local, e que exigia tratos culturais mais facilitados em função do menor porte das plantas. Atualmente só o café conilon é produzido na propriedade.

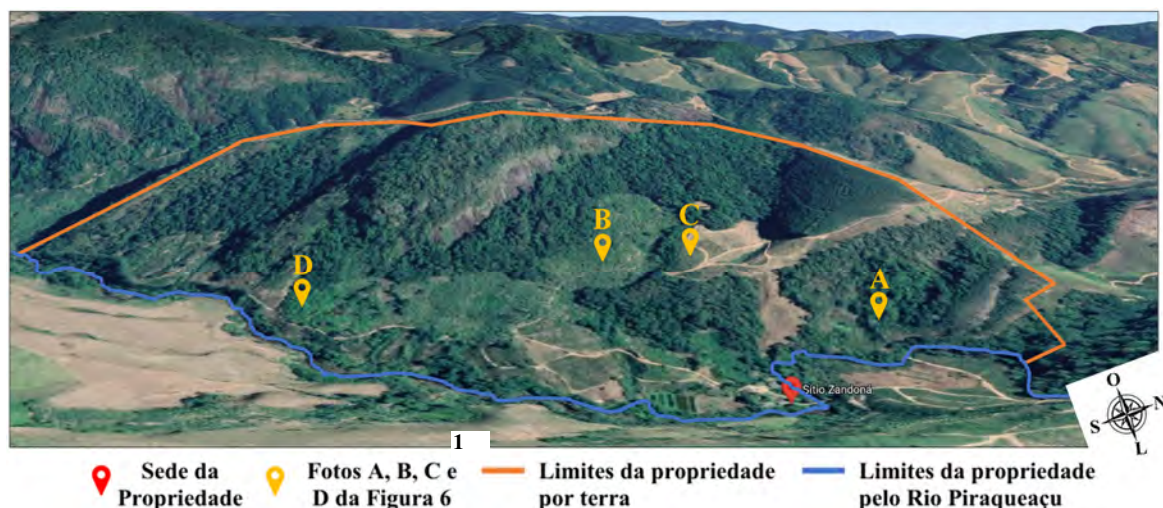


Figura 2. Limites do Sítio Zandoná, com indicação de sua sede, e tomada de fotos representativas das culturas agrícolas e vegetação nativa da propriedade. Fonte da Imagem: Google Earth.

Outras culturas, como a banana, que antes eram de menor importância à economia familiar local, passaram a compor importante fonte de renda aos herdeiros da propriedade. E culturas novas foram inseridas, como o cacau, que foi bem aceito em função de seu manejo facilitado, da boa adaptação às condições climáticas dos solos da região. Em termos comerciais, essas três culturas, o café conilon, a banana e o cacau, formam a base da matriz econômica da propriedade, mas esta não se resume a isso, pois os cultivos de olerícolas, milho, feijão, cana-de-açúcar, palmito pupunha, mandioca, e a espécie florestal “eucalipto”, mesmo em menor escala, tem sua importância econômica, por se destinarem a pequenas vendas, às necessidades de autossuficiência alimentar e ao fornecimento de madeira para pequenas vendas, e uso na propriedade em construções e combustão (lenha e carvão). Pastagens também já compuseram o rol de cultivos agrícolas da propriedade, no entanto, à época deste estudo, restavam apenas esparsos remanescentes inexplorados e sem importância econômica.

3. CAPÍTULO I

SOLOS DE ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E POTENCIALIDADES PARA USO AGRÍCOLA

Capítulo em avaliação para ser publicado no livro da XXI Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água – VIII Simpósio Mineiro de Ciência do Solo.

3.1. RESUMO

A agricultura é atividade comum nas encostas montanhosas da região sudeste do Brasil. Nestas áreas com acentuada declividade os solos estão propensos à degradação causada pela atividade humana e pelos efeitos ambientais. Portanto, são requeridas espécies vegetais e práticas de manejo adequadas nesses ambientes. Práticas de manejo que reduzem a exposição da superfície, e que mantenham níveis estáveis de matéria orgânica, parecem promissoras para manter as características originais do solo. No entanto, é necessário obter maiores informações sobre os solos desses ambientes. Para levantar essas informações, o estudo foi realizado com os objetivos de a) realizar a caracterização química, física e morfológica dos atributos do solo de perfis coletados em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais; b) verificar as principais classes de solos dessas áreas; e c) avaliar a capacidade de uso agrícola, bem como as classes de aptidão e principais limitações. Foram avaliadas três áreas cultivadas (cultivos com banana – BN, café – CF, e cacau – CC) e uma área de referência (fragmento florestal da Mata Atlântica – FS) em três pontos distintos da propriedade. Todas em relevo declivoso, típico da região sudeste do Brasil. A maior parte dos perfis foi identificados no primeiro nível categórico como Cambissolos, em função da presença de um horizonte diagnóstico subsuperficial B incipiente, foi observada baixa expressão dos processos pedogenéticos, o que levou a esse tipo de classificação. Já no segundo nível categórico, subordem os perfis foram classificados como Háplicos. Grande parte dos perfis foi identificado como Distrófico no nível categórico de Grande grupo, sendo exceção o perfil CC-P12. No quarto nível categórico, subgrupo, foram verificadas classificações como típicos e latossólicos. O perfil BN-P11 foi classificado como Argissolo no primeiro nível categórico, devido a presença de gradiente textural, no segundo nível categórico como Amarelo em função do matiz observado na maior parte do horizonte B, sendo classificado como Eutrófico (V% maior ou igual a 50 – Grande grupo) e cambissólico, no nível categórico de subgrupo. Em todos os perfis foi identificado o horizonte diagnóstico superficial A moderado. Quanto à aptidão agrícola, em grande parte das áreas do estudo as maiores limitações de utilização foram a baixa fertilidade natural, a suscetibilidade a erosão e os impedimentos a mecanização ou cultivo, decorrentes da declividade e também da pedregosidade e rochosidade observadas. Recomenda-se a utilização da área com culturas perenes associadas a práticas conservacionistas que garantam uma maior sustentabilidade ambiental associada a produção agrícola.

Palavras-chave: Manejo do solo. Sistemas conservacionistas. Indicadores edáficos.

3.2. ABSTRACT

Agriculture is a common activity on the mountainous slopes of southeastern Brazil. In these steeply sloped areas, soils are prone to degradation caused by human activity and environmental impacts. Therefore, plant species and management practices appropriate for these environments are required. Management practices that reduce surface exposure and maintain stable levels of organic matter appear promising for maintaining the original soil characteristics. However, it is necessary to obtain more information about the soils in these environments. To gather this information, the study was carried out with the objectives of a) performing the chemical, physical and morphological characterization of soil attributes from profiles collected in areas with different agricultural crops and vegetation cover; b) verifying the main soil classes in these areas; and c) evaluating the capacity for agricultural use, as well as the suitability classes and main limitations. Three cultivated areas (banana crops – BN, coffee – CF, and cocoa – CC) and a reference area (forest fragment of the Atlantic Forest – FS) were evaluated in three different points of the property. All profiles were in sloping relief, typical of the southeastern region of Brazil. Most of the profiles were identified at the first categorical level as Cambisols, due to the presence of an incipient subsurface diagnostic horizon B. Low expression of pedogenic processes was observed, which led to this type of classification. At the second categorical level, suborder, the profiles were classified as Haplic. Most of the profiles were identified as Dystrophic at the Large Group categorical level, with the exception of profile CC-P12. At the fourth categorical level, subgroup, classifications as typical and latosolic were verified. Profile BN-P11 was classified as an Argisol at the first categorical level, due to the presence of a textural gradient, at the second categorical level as Yellow due to the hue observed in most of the B horizon, being classified as Eutrophic (V% greater than or equal to 50 - Large Group) and Cambisolic, at the subgroup categorical level. In all profiles, the moderate superficial diagnostic horizon A was identified. Regarding agricultural suitability, in most of the study areas the greatest limitations to use were low natural fertility, susceptibility to erosion and impediments to mechanization or cultivation, resulting from the slope and also from the observed stoniness and rockiness. It is recommended that the area be used with perennial crops associated with conservationist practices that ensure greater environmental sustainability associated with agricultural production.

Keywords: Soil management. Conservation systems. Edaphic indicators.

3.3. INTRODUÇÃO

Cerca de 25% dos solos do planeta pertencem aos ecossistemas de montanhas, que são a base econômica para o sustento de aproximadamente 12% da população mundial (ONU, 2018). São as regiões montanhosas que fornecem entre 60% e 80% da água doce do mundo, abrigam 25% da biodiversidade do planeta e 28% dos bosques do mundo, atraindo entre 15 e 20% do turismo mundial (FAO, 2018). O Brasil é apontado como o 16º país com a maior área montanhosa do planeta, e está no quarto lugar dentre os países da América Latina. Porém, pouca importância é dada a esse tema (LÓPEZ NETTO, 2013). A exploração destas áreas para atividades agrícolas tem ocorrido com relativo sucesso, no entanto, de forma potencialmente impactante ao ambiente (ASSIS et al., 2019).

Além de fornecer alimentos, água, abrigo e materiais, os ecossistemas montanos têm grande importância ambiental, já que são responsáveis por diversos serviços ecossistêmicos, com destaque para a manutenção do ciclo hidrológico, influenciando na formação de nuvens, na captação de água das chuvas e no abastecimento dos lençóis freáticos. Também apresentam grande variabilidade no que diz respeito à topografia, clima e solo; o que influencia diretamente a biodiversidade existente, tanto na riqueza de espécies da fauna e flora quanto de espécies endêmicas (MARTINELLI, 2007; LÓPEZ NETTO et al., 2011).

Os solos declivosos de ambientes montanhosos podem ser degradados com maior facilidade quando o manejo é inadequado. Quando as precipitações são intensas, e a cobertura vegetal não é adequada, a matéria orgânica (FONSECA et al., 2017; 2022), o solo (WANG et al., 2016), a água e os nutrientes podem ser perdidos por erosão e causar significativos danos ambientais. Quando no solo observa-se algum tipo de cobertura vegetal, a energia cinética do impacto das gotas de água é reduzida, bem como a velocidade do escoamento superficial (TEIXEIRA e MISRA, 1997). Dessa forma, verifica-se a redução dos danos listados anteriormente quando a cobertura do solo atua como fator protetor desses processos (DECHEN et al., 2015). A proteção do solo contra os processos erosivos está diretamente relacionada com a cobertura vegetal, ou seja, quanto mais a superfície do solo estiver protegida pela vegetação, menor será a destruição de agregados, individualização das partículas e, conseqüentemente, a erosão (BEZERRA e CANTALICE, 2006).

Contudo, manejar solos de regiões montanhosas continua sendo um desafio para as comunidades que ocupam esses locais. A exploração dessas áreas para atividades agrícolas tem ocorrido com relativo sucesso, no entanto, de forma potencialmente impactante ao ambiente (ASSIS et al., 2019). A declividade, fatores pedológicos e ambientais, característicos destes ambientes, além de dificultarem a adoção de práticas de cultivo, prejudicam a aplicação de técnicas conservacionistas.

Na região sudeste do Brasil, grande parte dos solos de áreas montanhosas são utilizados para agricultura. Nesses locais com acentuada declividade, os solos desnudos estão propensos à degradação causada por atividade humana, calor, radiação solar, erosão e deslizamentos. Portanto, são requeridas espécies vegetais aptas e práticas de manejo adequadas, para reduzir a exposição da superfície, reduzindo os riscos de degradação. Portanto, é necessário a aquisição de maiores informações sobre as propriedades dos solos desses ambientes, a partir do exposto, o estudo teve como objetivos i) realizar a caracterização química, física e morfológica dos atributos do solo de perfis coletados em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais; ii) verificar as principais classes de solos dessas áreas; e iii) avaliar a capacidade de uso agrícola, bem como as classes de aptidão e as principais limitações.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Características ambientais da região do estudo

O estudo foi realizado no município de Ibiracú (19°47'49.3"S 40°27'10.5"W), localizado no estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil. As áreas amostradas estão inseridas na propriedade agrícola Sítio Zandoná, com aproximadamente 67 ha. O município é cortado pela rodovia BR 101, que é a principal via de escoamento da produção agrícola do estado. A rodovia é o caminho mais rápido para o transporte de produtos perecíveis (p. ex., frutas e hortaliças) até os maiores centros de distribuição e mercados consumidores da região sudeste do país (p. ex., Vitória, Rio de Janeiro e São Paulo).

O clima local engloba duas classificações, a saber: i) Tropical úmido ou subúmido (Am), predominante nas áreas onde ocorre o relevo de Tabuleiros, apresentando uma estação seca de pequena duração que é compensada pelos totais elevados de precipitação entre 1.200 e 1.300 mm; e ii) Tropical chuvoso (Aw) com estação seca no inverno, que é comum das áreas com relevo acidentado do contorno de vales e planaltos, em altitudes de até 500 m, onde a precipitação ocorre em intensidade de 1.000 a 1.400 mm (KÖPPEN, 1928; ALVARES et al., 2014).

A topografia do município abrange áreas ligeiramente onduladas da Região de Tabuleiros, se estendendo por uma região onde predomina uma paisagem intermediária de Mar de Morros (encostas com declividade superior a 20% e relevo forte ondulado), e se prolonga até alcançar a Região Elevada Interior da Serra do Castelo (ou Serra Capixaba); a vegetação natural predominante está inserida no bioma Mata Atlântica, cuja vegetação original denomina-se Floresta Ombrófila Densa (GARBIN et al., 2017); o principal material de origem é o paragnaisse, rocha de granulação média a grossa, cor cinza azulado e caráter ácido (solos com baixa fertilidade natural) (GRADIM et al., 2014).

3.4.2. Áreas avaliadas

Foram avaliadas quatro áreas com diferentes coberturas vegetais, em três setores diferentes, dentro da propriedade. Para a escolha e delimitação dos pontos amostrados (repetições de área), utilizou-se características semelhantes como o tempo de cultivo e a similaridade em relação às culturas precedentes. As coberturas vegetais avaliadas foram: áreas de cultivo com banana (*Musa spp.*) (BN); áreas de cultivo de café (*Coffea sp.*) (CF); áreas de cultivo com cacau (*Theobroma cacao* L.) (CC); e áreas de fragmentos de floresta secundária do bioma Mata Atlântica sem índices de ação antrópica (FS). Totalizando 12 áreas amostrais (quatro coberturas vegetais no solo × três repetições de área) (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição, localização e critérios específicos utilizados para escolha das áreas amostrais, Sudeste do Brasil.

Área	Perfil	Localização e descrição	Critérios específicos
BN	P08	Banana prata. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Desbrota anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	Manejo de condução da lavoura de banana por um tempo mínimo 25 anos

Continua...

Continuação da **Tabela 1.**

Área	Perfil	Localização e descrição	Critérios específicos
BN	P11	Banana prata. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Desbrota anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	Manejo de condução da lavoura de banana por um tempo mínimo 25 anos.
	P10	Banana prata. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Desbrota anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	
CC	P02	Cacau. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	Manejo de condução da lavoura de cacau por um tempo mínimo de 8 anos; e Cultura precedente na área de cultivo sendo a banana.
	P12	Cacau. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	
	P03	Cacau. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda anual. Sem mecanização do plantio à colheita.	
CF	P01	Café conilon. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda e desbrota anuais. Sem mecanização do plantio à colheita.	Manejo de condução da lavoura de café por um tempo mínimo 30 anos.
	P04	Café conilon. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda e desbrota anuais. Sem mecanização do plantio à colheita.	
	P09	Café conilon. Manejo convencional, com capina química. Calagem e fertilização mineral sob recomendação. Poda e desbrota anuais. Sem mecanização do plantio à colheita.	
FS	P07	Espécies florestais nativas da Mata Atlântica.	Ausência de histórico de desmatamento nos últimos 50 anos.
	P06	Espécies florestais nativas da Mata Atlântica.	
	P05	Espécies florestais nativas da Mata Atlântica.	

BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica.

3.4.3. Coleta dos perfis

A coleta foi realizada em dezembro de 2020, e em cada área amostral foi demarcada uma gleba de 1.000 m² respeitando dois critérios gerais previamente estabelecidos, a saber: i) Tamanho – a área amostral deveria apresentar área contínua suficiente para abrigar uma gleba preferencialmente de 40 × 25 m, e com distância mínimo 15 m das próprias extremidades para evitar a influência dos efeitos de borda; e ii) Possibilidade de coleta – considerando a inexistência de impedimentos geológicos, como excessiva declividade e pedregosidade, que limitariam a escavação manual para a coleta das amostras de terra. Após demarcação, foi aberto um perfil de solo de 0–100 cm de profundidade, perfazendo um total de 12 perfis (Tabela 2). A descrição morfológica dos perfis e a coleta das amostras deformadas dos horizontes foram realizadas no campo de acordo com Santos et al. (2015).

3.4.4. Classificação dos solos e aptidão agrícola das terras

As amostras de terra dos horizontes foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de diâmetro de malha para obter a fração terra fina seca ao ar (TFSA). A caracterização dos atributos químicos feita a partir da TFSA, e foram determinados os valores de pH e os teores de Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, K⁺, Na⁺, P e H+Al. A partir dos resultados, foram

calculados os valores do complexo sortivo do solo: soma de bases trocáveis (S); capacidade de troca catiônica do solo a pH 7,0 (T); e saturação por bases (V) (TEIXEIRA et al., 2017).

O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado via oxidação úmida da matéria orgânica do solo por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) na concentração de $0,167 \text{ mol L}^{-1}$, em meio sulfúrico e quantificado por titulação usando solução de sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \times 6H_2O$) $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ como titulante e ferroin como indicador (YEOMANS e BREMNER, 1988). A análise granulométrica foi realizada utilizando o método da pipeta, quantificando assim o conteúdo das frações areia, silte e argila (TEIXEIRA et al., 2017). Com base nos atributos morfológicos, químicos e físicos, os perfis foram classificados (SANTOS et al., 2018) e avaliados quanto ao seu potencial de uso agrícola (RAMALHO FILHO e BEEK, 1995).

Tabela 2. Informações gerais dos perfis de solos nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Perfil	Coord	Situação paisagem	Relevo local	Material de origem	Vegetação atual	Alt. (m)	Dec. %	Drenagem	Pedregosidade e rochosidade
P01	19°48'08.1"S 40°27'33.3"W	Topo de elevação	Forte Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CF	335	20 a 45	Bem drenado	Ligeiramente pedregosa e moderadamente rochosa
P02	19°48'04.1"S 40°27'24.9"W	Terço superior	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CC	299	13 a 20	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P03	19°48'04.2"S 40°27'23.5"W	Terço superior	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CC	289	13 a 20	Bem drenado	Ligeiramente pedregosa e moderadamente rochosa
P04	19°47'58.0"S 40°27'18.0"W	Terço superior	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CF	276	13 a 20	Bem drenado	Ligeiramente pedregosa e moderadamente rochosa
P05	19°47'35.2"S 40°27'15.5"W	Topo de elevação	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	FS	331	13 a 20	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P06	19°47'42.1"S 40°27'14.6"W	Terço superior	Forte Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	FS	286	20 a 45	Bem drenado	Pedregosa e moderadamente rochosa
P07	19°47'59.9"S 40°27'17.7"W	Terço superior	Forte Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	FS	272	20 a 45	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P08	19°47'57.3"S 40°27'20.9"W	Terço superior	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	BN	294	13 a 20	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P09	19°47'47.4"S 40°27'21.6"W	Topo de elevação	Forte Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CF	341	20 a 45	Bem drenado	Ligeiramente pedregosa e moderadamente rochosa
P10	19°47'56.2"S 40°27'23.4"W	Topo de elevação	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	BN	371	13 a 20	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P11	19°47'50.9"S 40°27'22.5"W	Topo de elevação	Forte Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	BN	330	20 a 45	Moderadamente drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa
P12	19°47'54.1"S 40°27'20.0"W	Terço superior	Ondulado	Produto da intemperização de paragnaisse	CC	296	13 a 20	Bem drenado	Moderadamente pedregosa e moderadamente rochosa

Coord.: Coordenadas; Alt.: Altitude; Dec.: Declividade; BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica.

3.4.5. Tratamento estatístico dos dados

Os perfis foram avaliados completos, e as variáveis pH, argila, carbono orgânico total, cálcio e magnésio trocáveis, alumínio trocável, soma de bases, potássio trocável e fósforo disponível foram selecionadas. Estas foram analisadas utilizando o pacote “AQP” (Algorithm for Quantitative Pedology) e sua função “SCP” (Soil Profile Collection) que gerou esboços gráficos dos perfis com base em seus limites de horizontes através do Software R (R CORE TEAM, 2020). Essa função foi projetada para simplificar o processo de trabalhar com a coleção de dados associados aos perfis de solo: dados em nível de local (site), dados em nível de horizonte, dados espaciais, dados de horizontes diagnósticos, metadados, entre outros. A partir dos resultados de todas as variáveis morfológicas, físicas e químicas os perfis foram classificados até o quarto nível categórico. Complementarmente, realizou-se a aptidão agrícola das terras das áreas através dos resultados de cada perfil.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Caracterização dos atributos morfológicos e textura

Na Figura 3 são apresentadas as fotos dos perfis coletados. Houve predomínio dos matizes 7,5 YR e 10 YR em quase todos os horizontes. À exceção dos horizontes AB, BA, Bi1 e Bi2 do perfil FS-P05 com matiz 5YR. A amplitude de variação das cores nos horizontes superficiais foi de bruno escuro a bruno amarelado escuro. Resultante da combinação de matéria orgânica do solo (MOS) humificada e textura mais arenosa, principalmente nas áreas de BN (Tabela 3). Em subsuperfície prevaleceu a cor amarelo avermelhado nos seus horizontes. Oriunda da combinação dos fatores de formação material de origem de natureza mais ácida (paragnaisse), clima (tropical chuvoso) e relevo (condições de boa drenagem), sendo exceção o perfil BN-P11 moderadamente drenado (Tabela 2). Não foi observado a presença de mosqueado de redução nos horizontes subsuperficiais (Tabela 3).

Quanto à estrutura do solo, as formas em blocos angulares e subangulares predominaram, com tamanho e grau de desenvolvimento variável de pequena a grande e fraca a forte em ambos os horizontes (Tabela 3). Evidenciando-se a grande variabilidade estrutural que esses solos apresentam. Na avaliação da consistência, nos três estados de umidade, verificou-se variação de ligeiramente dura a dura quando seco; muito friável a firme quando úmido; e ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada. Não foi constatada a ocorrência de cerosidade nos horizontes subsuperficiais (Tabela 3).

Em relação ao grau de distinção e topografia das transições, observou-se maior ocorrência para clara e plana entre os horizontes superficiais; e gradual e ondulada entre os horizontes subsuperficiais (Tabela 3). As principais classes texturais constatadas foram franco-argilo-arenosa e argilo-arenosa nos horizontes superficiais e subsuperficiais, respectivamente. A classe textural argila foi verificada somente nos horizontes subsuperficiais Bi1 e Bi2 em CF-P01, BA, Bi1 e Bi2 em FS-P05 e Bi2 em CF-P09 (Tabela 3). O relevo mais acentuado (Tabela 2) em associação aos horizontes superficiais pouco espessos com unidades estruturais de tamanho médio e grau de desenvolvimento fraco a moderado (Tabela 3) apontam para possíveis problemas erosivos nessas áreas.

O material de origem das áreas do estudo é o produto da intemperização do paragnaisse (Tabela 2), rocha de granulação média a grossa, cor cinza azulado e caráter ácido (GRADIM et al., 2014). Tendo como principais minerais em sua composição o quartzo (50%), feldspatos (40%) e biotita (10%) (STEINHOEFEL et al., 2011). Que sob intensa ação do intemperismo químico pode originar solos de textura média a argiloarenosa.

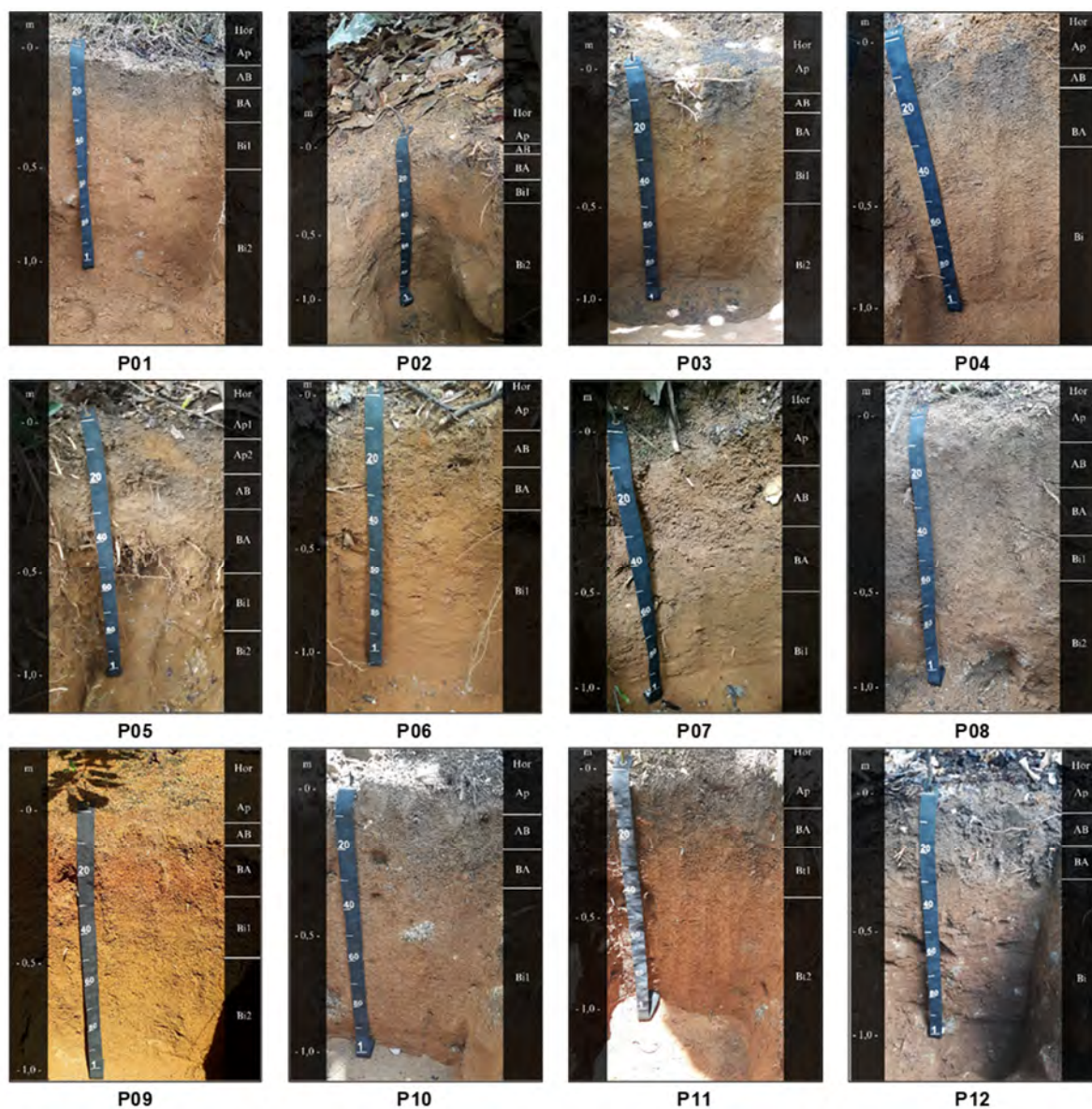


Figura 3. Perfis de solo nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. P01, P04 e P09: Perfis das áreas cultivadas com café; P02, P03 e P12: Perfis das áreas cultivadas com cacau; P05, P06 e P07: Perfis das áreas de floresta secundária do bioma Mata atlântica; e P08, P10 e P11: Perfis das áreas cultivadas com banana.

Tabela 3. Distribuição dos horizontes e atributos morfológicos e textura dos perfis de solos nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Perfil	Hor	Prof (cm)	Cor		Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾	Transição	Classe textura
			Seca	Úmida				
CF-P01	Ap	00–10	10YR 5/3	10YR 3/4	ba, bsa, pq, me, mo e fr	ld, mf, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	10–19	10YR 5/2	10YR 4/3	ba, bsa, pq, me, mo e fr	ld, mf, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	BA	19–32	---	7,5YR 5/6	ba, me, gr e mo	du, mf, lp e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi1	32–55	---	7,5YR 5/6	ba, me, gr e mo	du, mf, lp e lpe	Difusa e plana	Argila
	Bi2	55–100 ⁺	---	7,5YR 5/6	ba, me, gr e mo	ld, fr, lp e lpe	---	Argila
CC-P02	Ap	00–06	7,5YR 5/3	7,5YR 4/3	ba, pq, me e fr	du, fi, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	06–14	7,5YR 5/3	7,5YR 4/4	ba, bsa, pq, me e fr	du, fr, pl e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	BA	14–21	---	7,5YR 5/4	ba, pq, me e mo	ld, mf, lp e lpe	Difusa e ondulada	Argilo-arenosa
	Bi1	21–35	---	7,5YR 5/6	ba, pq, me e fr	du, mf, pl e lpe	Difusa e ondulada	Argilo-arenosa
	Bi2	35–100 ⁺	---	10YR 6/4	ba, pq, me e mo	ld, mf, np e lpe	---	Franco-argiloarenosa
CC-P03	Ap	00–08	7,5YR 4/3	10YR 3/3	ba, pq, me e fo	du, fi, np e lpe	Clara e plana	Argilo-arenosa
	AB	08–16	10YR 5/4	10YR 4/2	ba, pq, me e mo	du, fr, lp e lpe	Clara e plana	Argilo-arenosa
	BA	16–27	---	7,5YR 5/6	ba, bsa, me, gr e mo	du, fr, lp e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi1	27–49	---	7,5YR 5/8	ba, bsa, me, gr e fr	ld, mf, pl e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi2	49–100 ⁺	---	7,5YR 6/8	ba, pq, me e mo	ld, mf, pl e lpe	---	Argilo-arenosa
CF-P04	Ap	00–10	10YR 5/4	10YR 3/4	ba, pq, me e mo	ld, fr, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	10–16	7,5YR 5/4	7,5YR 4/4	ba, pq, me e mo	ld, mf, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	BA	16–30	---	7,5YR 5/6	ba, pq, me e fr	ld, mf, pl e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi	30–100 ⁺	---	7,5YR 6/6	ba, pq, me e fr	ld, mf, pl e lpe	---	Argilo-arenosa
FS-P05	A1	00–08	7,5YR 4/4	7,5YR 3/4	ba, mpq, pq e fo	ld, fr, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	A2	08–18	7,5YR 4/4	7,5YR 3/4	ba, mpq, pq e fo	du, fi, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	18–30	---	5YR 5/4	ba, mpq, pq e mo	du, fi, lp e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	BA	30–55	---	5YR 5/6	ba, pq, me e mo	ld, fi, pl e lpe	Gradual e ondulada	Argila
	Bi1	55–80	---	5YR 6/6	ba, pq, me e fr	ld, mf, lp e lpe	Gradual e ondulada	Argila
	Bi2	80–100 ⁺	---	5YR 6/6	ba, pq, me e fr	ld, mf, lp e lpe	---	Argila

Continua...

Continuação da Tabela 3.

Perfil	Hor	Prof (cm)	Cor		Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾	Transição	Classe textura
			Seca	Úmida				
FS-P06	A	00–10	10YR 4/4	10YR 3/3	ba, pq, me e fo	du, fi, pl e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	10–23	10YR 5/4	10YR 4/4	ba, pq, me e mo	ld, fr, pl e lpe	Clara e plana	Argilo-arenosa
	BA	23–36	---	10YR 5/4	ba, pq, me e fo	du, fi, lp e lpe	Gradual e plana	Franco-argilo-arenosa
	Bi1	36–100 ⁺	---	10YR 4/4	ba, pq, me e mo	du, fr, lp e lpe	---	Argilo-arenosa
FS-P07	A	00–10	10YR 4/6	10YR 4/4	ba, pq, me e mo	ld, mf, lp e lpe	Clara e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	AB	10–27	10YR 6/6	10YR 4/6	ba, me, gr e fo	ld, fr, lp e lpe	Gradual e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	BA	27–53	---	10YR 6/6	ba, pq, me e mo	du, fi, lp e lpe	Difusa e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	Bi	53–100 ⁺	---	10YR 5/4	ba, me, gr e fo	md, mf, lp e lpe	---	Argilo-arenosa
BN-P08	Ap	00–10	10YR 5/4	10YR 3/3	ba, me, gr e fo	ld, mf, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	10–24	10YR 5/4	10YR 4/3	ba, me, gr e fo	du, fr, lp e lpe	Clara e plana	Franco-argilo-arenosa
	BA	24–40	---	10YR 5/4	ba, pq, me e fo	md, fi, lp e lpe	Gradual e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	Bi1	40–60	---	10YR 6/4	ba, pq, me e fo	du, fr, pl e lpe	Gradual e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	Bi2	60–100 ⁺	---	10YR 6/6	ba, me, gr e mo	md, mf, pl e lpe	---	Argilo-arenosa
CF-P09	Ap	00–05	7,5YR 5/6	7,5YR 4/4	ba, bsa, pq e fr	ld, fr, pl e lpe	Abrupta e plana	Franco-argilo-arenosa
	AB	05–13	7,5YR 5/6	7,5YR 4/6	ba, bsa, pq e fr	ld, fr, lp e lpe	Clara e plana	Argilo-arenosa
	BA	13–28	---	7,5YR 4/6	ba, pq, me e fo	du, fr, pl e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi1	28–53	---	7,5YR 5/6	ba, pq e fr	ld, fr, mp e pe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bi2	53–100 ⁺	---	10YR 5/8	ba, pq e fr	ld, mf, mp e lpe	---	Argila
BN-P10	Ap	00–11	10YR 5/3	10YR 4/2	ba, me, gr e mo	du, fr, pl e lpe	Clara e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	AB	11–23	10YR 5/3	10YR 4/2	ba, me, gr e mo	du, fr, pl e lpe	Clara e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	BA	23–35	---	10YR 5/6	ba, me, gr e fo	du, mf, pl e lpe	Gradual e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	Bi	35–100 ⁺	---	10YR 5/8	ba, me, gr e mo	ld, mf, pl e lpe	---	Franco-argilo-siltosa
BN-P11	Ap	00–12	10YR 5/3	10YR 3/2	ba, me, gr e mo	ld, mf, lp e lpe	Clara e plana	Franco-arenosa
	BA	12–24	10YR 4/6	10YR 3/6	ba, me, gr e fo	du, fi, lp e lpe	Gradual e plana	Franco-argilo-arenosa
	Bt1	24–42	---	7,5YR 5/6	ba, me, gr e mo	du, mf, lp e lpe	Gradual e plana	Argilo-arenosa
	Bt2	42–100 ⁺	---	7,5YR 5/6	ba, me, gr e mo	ld, mf, lp e lpe	---	Argilo-arenosa

Continua...

Continuação da **Tabela 3.**

Perfil	Hor	Prof (cm)	Cor		Estrutura ⁽¹⁾	Consistência ⁽²⁾	Transição	Classe textura
			Seca	Úmida				
CC-P12	Ap	00–09	10YR 5/2	10YR 4/2	ba, pq e fo	du, fi, pl e lpe	Clara e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	AB	09–17	10YR 5/2	10YR 4/3	ba, pq e fo	du, mf, pl e lpe	Clara e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	BA	17–30	---	10YR 5/4	ba, me, gr e fo	du, mf, pl e lpe	Gradual e ondulada	Franco-argilo-arenosa
	Bi	30–100 ⁺	---	10YR 6/4	ba, me, gr e mo	du, mf, pl e lpe	---	Franco-argilo-arenosa

Hor: Horizonte; Prof: Profundidade; ⁽¹⁾fr: Fraca; ⁽¹⁾mo: Moderada; ⁽¹⁾fo: Forte; ⁽¹⁾mpq: Muito pequena; ⁽¹⁾pq: Pequena; ⁽¹⁾me: Média; ⁽¹⁾grd: Grande; ⁽¹⁾ba: Blocos angulares; ⁽¹⁾bsa: Blocos subangulares; ⁽¹⁾gr: Granular; ⁽²⁾so: Solta; ⁽²⁾ma: Macia; ⁽²⁾ld: Ligeiramente dura; ⁽²⁾du: Dura; ⁽²⁾md: Muito dura; ⁽²⁾ed: extremamente dura; ⁽²⁾mf: Muito friável; ⁽²⁾fr: Friável; ⁽²⁾fi: Firme; ⁽²⁾mf: Muito firme; ⁽²⁾ef: extremamente firme; ⁽²⁾np: Não plástica; ⁽²⁾lp: Ligeiramente plástica; ⁽²⁾pl: Plástica; ⁽²⁾mp: Muito plástica; ⁽²⁾npe: Não pegajosa; ⁽²⁾lpe: Ligeiramente pegajosa; ⁽²⁾pe: Pegajosa; e ⁽²⁾mpe: Muito pegajosa.

3.5.2. Caracterização dos atributos químicos e físicos

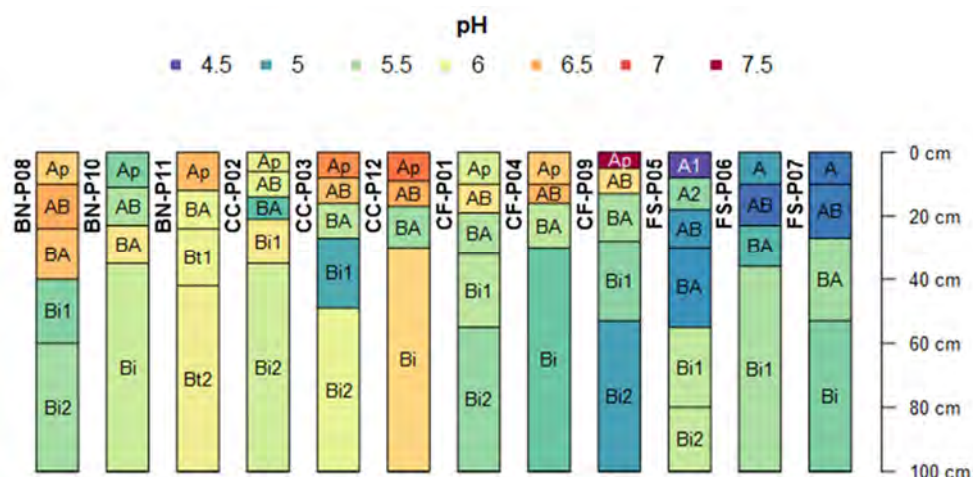
Os valores de pH (Figura 4a) variaram de 4,5–7,5. Nos horizontes A e AB dos perfis das áreas de FS foram quantificados os menores valores do atributo ($< 5,0$), exceto em A2 de FS-P05 (5,4). Em Ap e AB dos perfis das áreas cultivadas os valores de pH foram superiores a 5,34. Com destaque para os horizontes dos perfis das áreas de CF com valores acima de 6,0. Os valores de pH desses horizontes estão próximos ou dentro da faixa ideal (5,5–6,3) para o desenvolvimento das culturas brasileiras (SOUSA et al., 2007; FREIRE et al., 2013) principalmente na “camada arável”. Nessas áreas realiza-se constantemente a correção da acidez do solo com base no Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2013).

De maneira geral, foi observada uma pequena redução dos valores de pH em subsuperfície. Exceto nos perfis das áreas de FS em que o padrão de distribuição dos valores do atributo foi inverso, menor em superfície e maior em subsuperfície. Reflexo da redução dos teores de MOS em profundidade nessas áreas naturais (Figura 4c). Nos horizontes Bi, Bt e BA verificaram-se valores de pH entre 5,05–6,2 para CC; 5,0–5,62 para CF; e 5,34–6,33 para BN (Figura 4a).

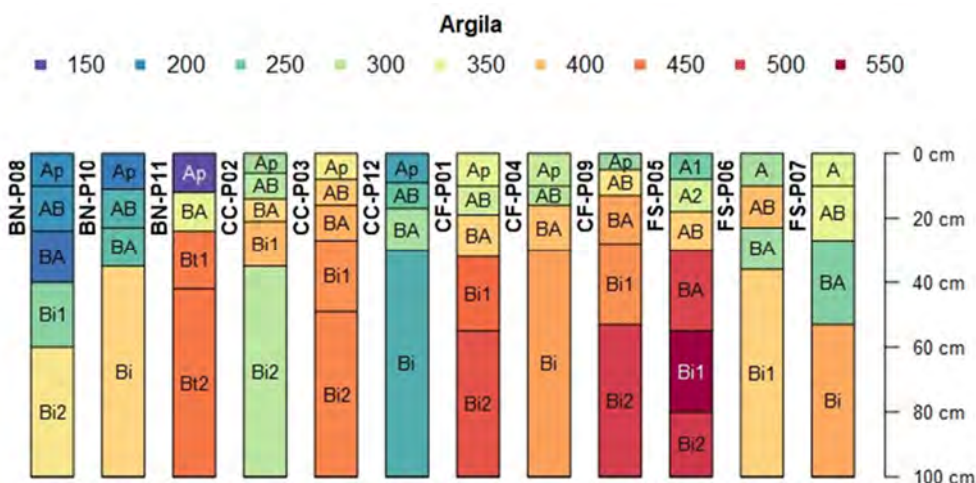
Para o atributo teores de argila foram verificados teores entre 150–550 g kg⁻¹. Os menores teores foram verificados nos horizontes Ap, AB e BA dos perfis localizados nas áreas de BN (177–202 g kg⁻¹), exceto no horizonte BA de BN-P11 (345 g kg⁻¹). Os maiores teores de argila foram observados nos horizontes BA, Bi1 e Bi2 de FS-P05 (495–540 g kg⁻¹), e no horizonte Bi2 de CF-P09 (500 g kg⁻¹). Com base na Figura 4b, é possível observar que os maiores teores de argila concentram-se nos horizontes subsuperficiais em todas as áreas. À exceção de CC-P12, na qual no horizonte Bi foi verificado valores relativamente baixos de argila (244 g kg⁻¹) (Figura 4b).

No perfil CC-P02 foi verificado padrão diferenciado na distribuição dos teores de argila quando comparado aos demais, com teores mais baixos nos horizontes superficiais (Ap, 298; e AB, 310 g kg⁻¹) e mais elevados nos subsuperficiais (BA, 385; e Bi1, 410 g kg⁻¹). Os teores do atributo verificados na sequência Ap, BA, Bt1 e Bt2 em BN-P11 apontam acúmulo de argila em subsuperfície, caracterizado pela presença de mudança textural abrupta (Figura 4b). Esse atributo diagnóstico é favorecido na área de BN-P11 pela topografia mais acentuada (relevo local forte ondulado; Tabela 2) juntamente ao clima tropical chuvoso da região, colaborando para o arraste das partículas mais finas pela água e o aumento relativo do conteúdo de argila em profundidade. Sinalizando para riscos com erosão e cuidados com o manejo nesse ambiente.

(a)



(b)



(c)

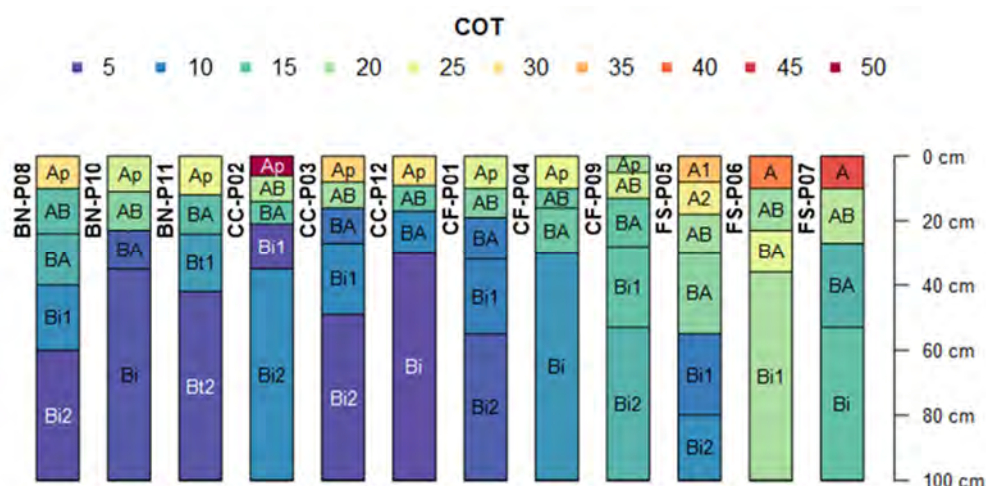


Figura 4. Valores de acidez ativa (pH), argila (g kg^{-1}) e carbono orgânico total (COT, g kg^{-1}) nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. pH em H_2O (a); argila (b); e COT (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica.

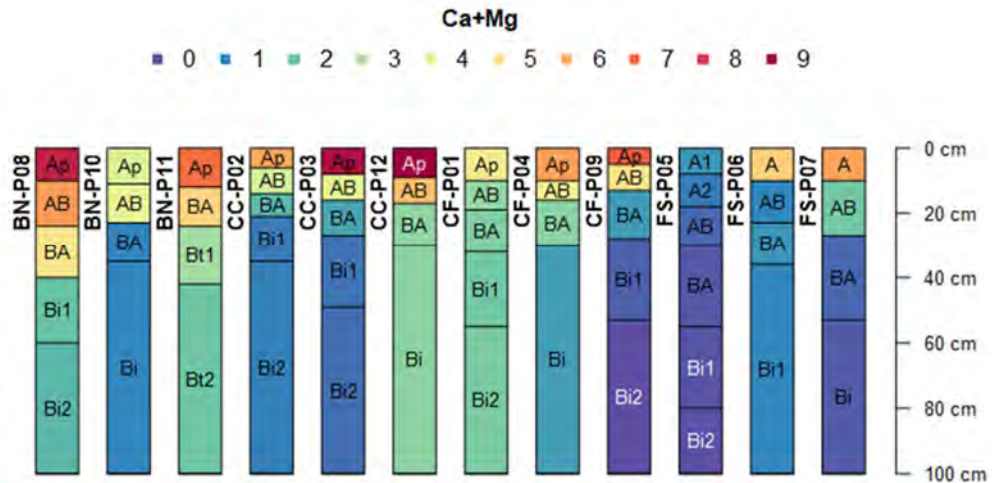
Os teores de carbono orgânico total (COT) variaram dentro da faixa de 5,0–50,0 g kg⁻¹, indicando que todos os horizontes são de constituição mineral. Os maiores teores oscilaram entre 35,6–46,1 g kg⁻¹, sendo verificados nos horizontes A e A1 dos perfis das áreas de FS, e no horizonte Ap dos perfis das áreas de CC. Os menores valores de COT foram quantificados nos horizontes subsuperficiais dos perfis das áreas cultivadas, sendo os valores mínimos (5,80 g kg⁻¹) no horizonte Bi de CC-P12. Nos perfis das áreas de FS e no perfil CF-P09 os teores de COT em subsuperfície não foram tão baixos quanto os quantificados nas demais áreas cultivadas (Figura 4c).

Os teores de cálcio e magnésio trocáveis (Ca+Mg) variaram entre 0,2–8,4 cmol_c dm⁻³, com elevados valores no horizonte Ap dos perfis BN-P08, CC-P03 e CC-P12 (7,85–8,40 cmol_c dm⁻³), sendo exceção a esse padrão os perfis BN-P10, CF-P01 e FS-P05. No horizonte Ap desses perfis foram quantificados teores de Ca+Mg entorno de 5,0 cmol_c dm⁻³. Esse benefício da calagem, que promove e aumenta a disponibilidade de cálcio, magnésio e alguns micronutrientes na camada superficial do solo. Os valores mais baixos foram verificados nos horizontes subsuperficiais de CF-P09 e FS-P05 (0,2–0,35 cmol_c dm⁻³). No perfil FS-P05 foram quantificados baixos e decrescentes teores desses elementos em profundidade, valores variando de 1,3 cmol_c dm⁻³ no horizonte A1 e 0,25 cmol_c dm⁻³ no horizonte Bi2 (Figura 5a).

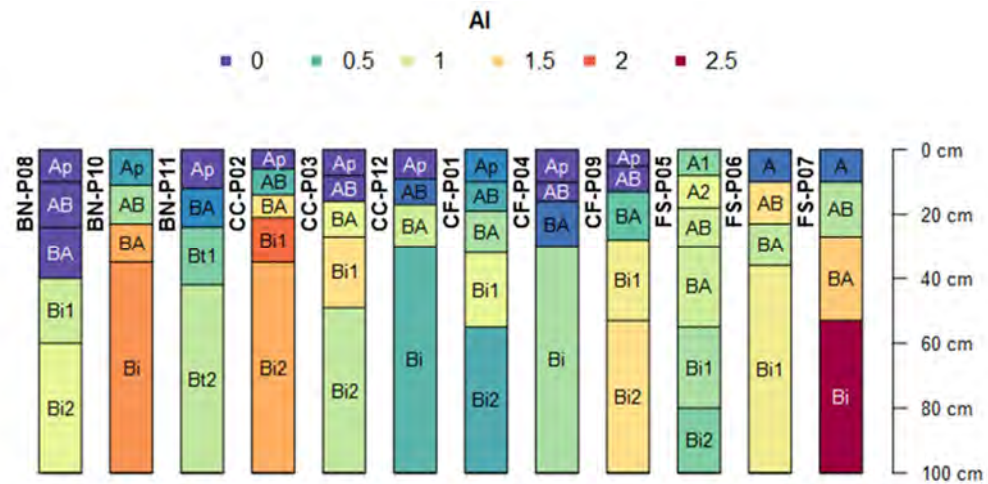
Nos horizontes Ap, AB e BA foram observados teores de Ca+Mg de 1,05–7,85 nos perfis das áreas de BN; 0,7–8,4 nas áreas de CC; e 0,2–6,8 cmol_c dm⁻³ nas áreas de CF. Segundo Prezotti et al. (2013), para as culturas de banana e café os valores ideais desses nutrientes no solo são superiores a 3,0 cmol_c dm⁻³. Ressalta-se ainda que nos horizontes superficiais foram quantificados os maiores teores de Ca+Mg, com decréscimo em profundidade. Nas áreas com cultivos agrícolas é possível observar que os maiores teores dos nutrientes concentram-se nos primeiros 20 cm de profundidade. Enquanto nas áreas com cobertura florestal os maiores teores foram constatados nos primeiros 10 cm de profundidade (Figura 5a). Tal fato está associado ao manejo das áreas cultivadas que incorpora os nutrientes na “camada arável”.

Os teores de alumínio trocável (Al) variaram de 0,0–2,5 cmol_c dm⁻³. Nos horizontes Ap das áreas cultivadas foram verificados os menores teores de Al (0,0 a 0,3 cmol_c dm⁻³), estando fora do limite mínimo (0,3 cmol_c dm⁻³) considerado como concentração tóxica para a maioria das plantas cultivadas (SOUSA et al., 2007; FREIRE et al., 2013), devido a neutralização dos íons H⁺ e Al³⁺ como efeito direto da calagem.

(a)



(b)



(c)

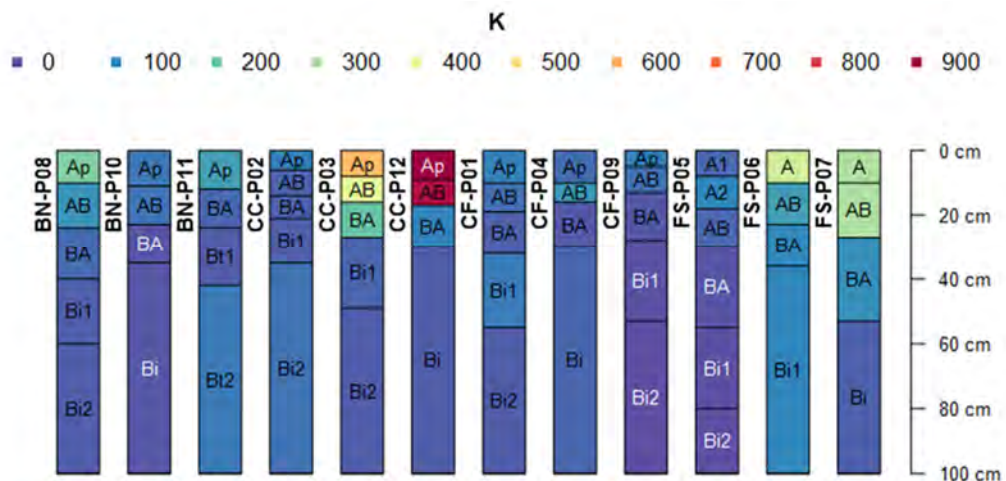


Figura 5. Valores de cálcio e magnésio trocáveis ($\text{Ca}+\text{Mg}$, cmolc dm^{-3}), alumínio trocável (Al , cmolc dm^{-3}) e potássio trocável (K , mg dm^{-3}) nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. $\text{Ca}+\text{Mg}$ (a); Al (b); e K (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica.

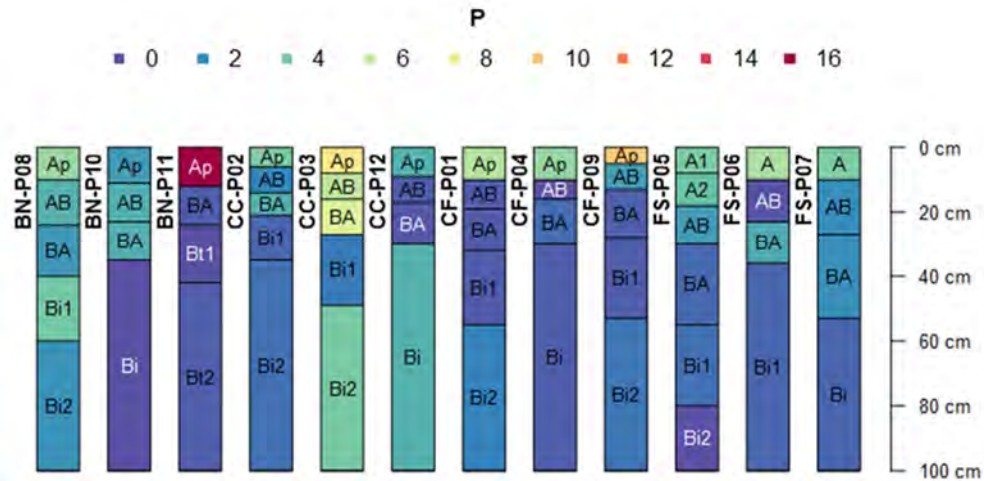
Nas áreas de FS, para este mesmo horizonte, verificou-se teores entre 0,15–0,65 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os maiores valores de Al foram observados nos horizontes Bi e Bi1 de BN-P10, CC-P02 e FS-P07 (1,6–2,25 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). No perfil FS-P05 foram quantificados valores de Al entre 0,6–1,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ao longo de todo o perfil. Nos horizontes Ap, AB e BA dos perfis das áreas de BN, CC e CF foram constatados teores entre 0–1,60; 0–1,75; 0–1,25 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente (Figura 5b).

Os teores de potássio (K) trocável variaram entre 14–837 mg dm^{-3} . Os maiores valores foram verificados nos horizontes Ap e AB dos perfis das áreas de CC (811 a 837 mg dm^{-3}). Valores intermediários foram observados nos horizontes Ap, AB e BA de BN-P08 e CC-P03, e A, AB e BA de FS-P06 e FS-P07 (202 a 537 mg dm^{-3}). Nos perfis das áreas de CF verificam-se baixos teores de K trocável em superfície e subsuperfície, variando de 14 a 130 mg dm^{-3} . Nos horizontes Ap, AB e BA dos perfis das áreas de BN, CC e CF foi observada uma ampla variação para os valores do nutriente, entre 24 a 235; 45 a 837; e 29 a 130 mg dm^{-3} , respectivamente (Figura 5c).

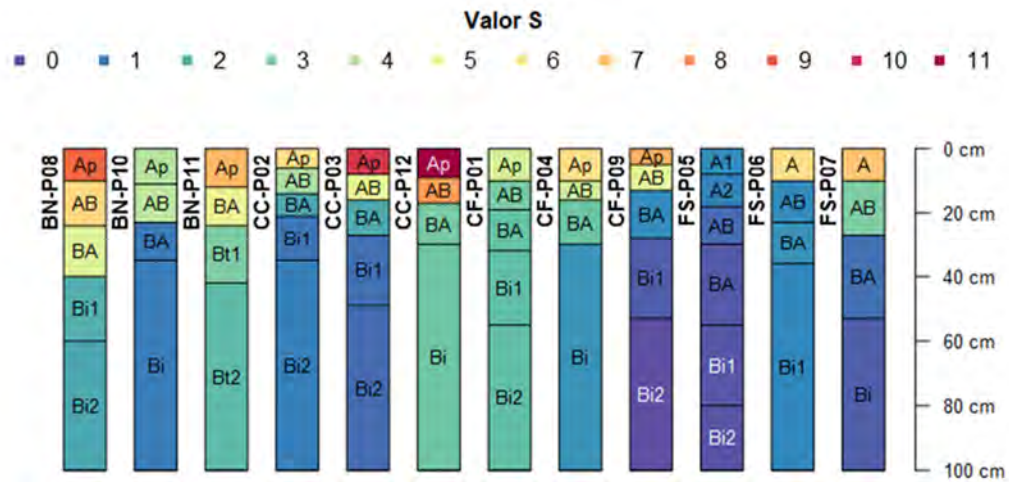
A ampla variabilidade nos teores de K trocável está relacionada a recomendação de fertilização mineral nas áreas de produção. Segundo Prezotti et al. (2013), para a cultura da banana os teores ideais desse elemento no solo são de $\pm 135 \text{ mg dm}^{-3}$. Já para o café os teores recomendados do nutriente no solo são de $\pm 90 \text{ mg dm}^{-3}$. Os maiores teores de fósforo (P) disponível foram verificados no horizonte Ap de BN-P11 (14,50 mg dm^{-3}). Valores intermediários (7,73–8,90 mg dm^{-3}) foram quantificados no horizonte Ap de CC-P03 e CF-P09. Nos horizontes subsuperficiais os teores de P variaram entre 0,38 a 6,35 mg dm^{-3} .

Nos horizontes Ap, AB e BA dos perfis das áreas cultivadas com BN, CC e CF os teores de P disponível oscilaram de 0,74 a 14,50; 0,53 a 7,73; e 0,31 a 8,90 mg dm^{-3} , respectivamente. Exceto para os perfis BN-P08, CC-P03 e CC-P12, nos quais verificou-se nos horizontes subsuperficiais baixos teores de P (0,38 a 6,35 mg dm^{-3}) (Figura 6a). Para as culturas da banana e café os teores recomendados de P disponível no solo são de aproximadamente 30,0 e 10,0 mg dm^{-3} , respectivamente (PREZOTTI et al., 2013). Os resultados de P disponível nos horizontes superficiais indicam que o nutriente pode ser uma das maiores limitações de ordem química nas áreas cultivadas.

(a)



(b)



(c)

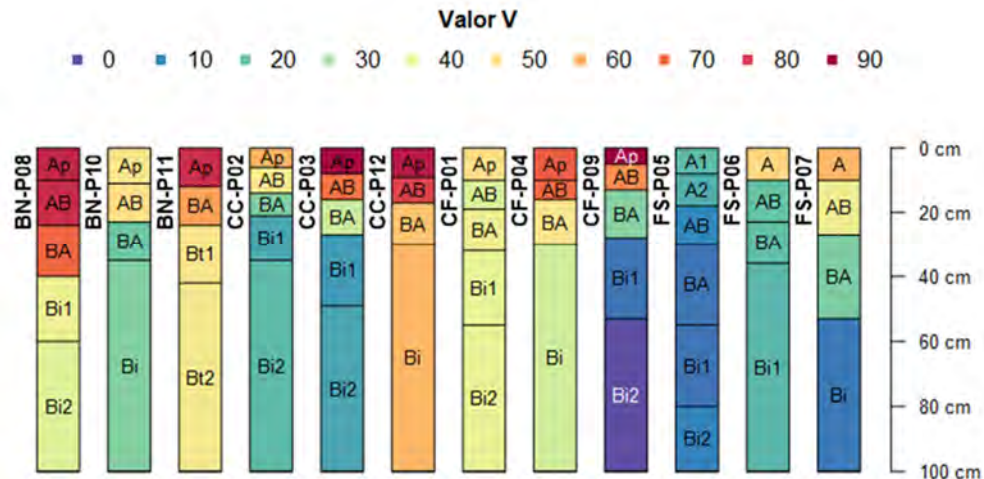


Figura 6. Valores de fósforo disponível (P, mg dm⁻³), soma de bases (Valor S, cmolc dm⁻³) e saturação por bases (Valor V, %) e nos horizontes dos perfis nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.; Valor S (b); e Valor V (c). BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica.

Os valores de soma de bases (Valor S) e saturação por bases (Valor V) variaram de 0 a 11 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 6,0 a 90,0% (Figura 6b e 6c). Os maiores valores de soma de bases foram verificados no horizonte Ap dos perfis das áreas de BN (9,57 a 10,66 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo os menores valores nos horizontes subsuperficiais: no horizonte Bi2 do perfil da área de CF (0,26 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); e sob cobertura florestal, nos horizontes Bi1 e Bi2 de FS-P05 (0,41 a 0,37 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 6b).

Nos primeiros 20 cm de profundidade das áreas de BN, CC e CF foram verificados os maiores valores de soma de bases (Figura 6b). Nos perfis das áreas de FS os valores mais elevados foram constatados nos primeiros 10 cm de profundidade, reflexo da ciclagem de nutrientes. Nos horizontes subsuperficiais de todos os perfis observou-se redução significativa dos valores de soma de bases (Figura 6b). Todos os íons constituintes do complexo sortivo do solo decresceram em profundidade (Figura 5).

Nos horizontes superficiais dos perfis das áreas de FS foram quantificados valores de saturação por bases de 23% (FS-P05), 54% (FS-P06) e 60% (FS-P07). Em superfície os valores de saturação por bases das áreas cultivadas ficaram acima de 50%, com máximo de 90% (Ap de CF-P09; Figura 6c). O que contribuiu para os altos valores de pH verificados nessas áreas (Figura 4a). Valores de saturação por bases entre 13 a 23% foram constatados nos horizontes subsuperficiais dos perfis das áreas de FS, e inferiores a 50% na mesma classe de horizontes das áreas de BN, CC e CF. Com exceção de Bt1 em BN-P11 (51%) e Bi em CC-P12 (60%) (Figura 6c).

3.5.3. Classificação dos solos

O horizonte superficial é de constituição mineral (horizonte A) em todos os perfis (Tabela 3), pois apresenta teores de COT $< 80,0 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 4c). Nos perfis das áreas cultivadas o horizonte A recebeu o sufixo “p” para indicar modificações da camada superficial resultantes de ações antrópicas. No geral, o horizonte superficial nos perfis (A e Ap) variou de 0 a 12 cm de espessura (Tabela 3). O que não atende ao primeiro critério para que este seja enquadrado como chernozêmico, húmico ou proeminente. Adicionalmente os atributos diagnósticos cor e estrutura do solo (Tabela 3) e os teores de COT $\geq 6,0 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 2c) não atendem para classificá-lo como A fraco (SANTOS et al., 2018). Em função de não poder ser classificado como nenhum outro horizonte diagnóstico superficial, todos foram identificados como A moderado (Tabela 4).

O horizonte B de quase todos os perfis recebeu o sufixo “i” para designar o incipiente desenvolvimento do mesmo (Tabela 3). Ou seja, alterações físicas e químicas em grau não muito avançado, porém suficiente para o desenvolvimento de cor ou unidades estruturais ocorrendo numa seção $\geq 10 \text{ cm}$ de espessura (SANTOS et al., 2018). Esse horizonte não apresenta expressão de processos pedogenéticos específicos, sendo classificado como horizonte diagnóstico B incipiente. Os perfis que apresentaram esse horizonte diagnóstico foram identificados no primeiro nível categórico (ordem) como Cambissolos, pois não atenderam aos critérios estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos ou Organossolos.

No segundo nível categórico (subordem) os perfis CF-P01, CC-P02, CC-P03, CF-P04, FS-P05, FS-P06, FS-P07, BN-P08, CF-P09, BN-P10 e CC-P12 foram classificados como Háplicos (Tabela 4). Visto que não se enquadraram nas classes dos Hísticos, Húricos ou Flúvicos da ordem dos Cambissolos (SANTOS et al., 2018).

Tabela 4. Classificação dos perfis de solo das áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Área	Perfil	Horizonte superficial	Horizonte subsuperficial	Ordem e Subordem	3º e 4º nível categórico
CF	P01	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico latossólico
CC	P02	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico típico
CC	P03	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico típico
CF	P04	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico latossólico
FS	P05	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico latossólico
FS	P06	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico típico
FS	P07	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico típico
BN	P08	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico típico
CF	P09	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico latossólico
BN	P10	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Distrófico latossólico
BN	P11	A moderado	B textural	Argissolo Amarelo	Distrófico cambissólico
CC	P12	A moderado	B incipiente	Cambissolo Háplico	Tb Eutrófico típico

BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata atlântica.

O perfil BN-P11 apresenta um horizonte B que recebeu o sufixo “t” para indicar o acúmulo de argila em subsuperfície (Figura 2b). Nesse perfil o horizonte diagnóstico subsuperficial foi classificado como B textural, por apresentar grande aumento de argila do horizonte superficial para o subsuperficial, caracterizado por mudança textural abrupta e espessura ≥ 15 cm. Foi identificado ao nível de ordem como Argissolo (Tabela 4), pois apresenta horizonte B textural com argila de atividade baixa (Tb, $< 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila). Reflexo da combinação de material originário mais ácido e clima chuvoso na região do estudo (Tabela 2), desfavorecendo a formação de minerais de argila de alta atividade. Ressalta-se os riscos de erosão nessa área de produção de banana.

O perfil BN-P11 também não apresentou os requisitos para ser enquadrado nas classes dos Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos (SANTOS et al., 2018). Ao nível de subordem esse perfil foi classificado como Amarelo, por apresentar cores com matriz 7,5YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA (Tabela 3).

A maioria dos perfis foi identificada como Distrófico no terceiro nível categórico (grande grupo). Ou seja, saturação por bases $< 50\%$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, incluindo BA. Excetuando o perfil CC-P12 classificado como Eutrófico (Tabela 4), com valor de saturação por bases de 60% no horizonte Bi (Figura 4c). No geral, onze dos doze perfis do estudo foram identificados como distróficos, uma vez que a composição mineralógica do material de origem (baixa presença de minerais ferromagnesianos) não contribui para a formação de solos com alta saturação por bases.

No quarto nível categórico (subgrupo) foram verificadas classificações como: latossólicos, solos que apresentam um horizonte diagnóstico com características similares as verificadas no B latossólico, porém com critérios que não atendem aos requisitos para classificá-lo como tal; cambissólicos, solos com 4% ou mais de minerais alteráveis visíveis e/ou 5% ou mais de fragmentos de rocha no horizonte B (exclusive BC ou B/C); típicos, solos que não apresentaram características que permitam enquadrá-los nas classes mais específicas (SANTOS et al., 2018).

Logo, os perfis CF-P01, CF-P04, FS-P05, CF-P09, BN-P10 correspondem a classe dos Cambissolos Háplicos Tb Distrófico latossólico (CXbd latossólico); CC-P02, CC-P03, FS-P06, FS-P07 e BN-P08 a classe dos Cambissolos Háplicos Tb Distrófico típicos (CXbd típico); CC-P12 a classe dos Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos típicos (CXbe típico); e BN-P11 a classe dos Argissolos Amarelos Distróficos cambissólicos (PAd cambissólico) (Tabela 4).

3.5.4. Aptidão agrícola das terras

Quanto à aptidão agrícola das terras, essa foi avaliada através da análise dos seguintes fatores limitantes a saber: fertilidade, oxigênio, água, suscetibilidade a erosão, e impedimentos a mecanização ou cultivo. No caso específico desse estudo só será considerado o nível tecnológico ou de manejo B. Segundo Ramalho e Beeck (1995) o nível tecnológico B é aquele:

“Baseado em práticas agrícolas que refletem um nível tecnológico médio. Caracteriza-se pela modesta aplicação de capital e de resultados de pesquisas para manejo, melhoramento e conservação das condições das terras e das lavouras. As práticas agrícolas neste nível de manejo incluem calagem e adubação com NPK, tratamentos fitossanitários simples, mecanização com base na tração animal ou na tração motorizada, apenas para desbravamento e preparo inicial do solo”. (RAMALHO e BEECK, 1995).

A avaliação da aptidão agrícola das áreas estudadas é apresentada nas Tabelas 5, 6, 7 e 8. De maneira geral, para todos os perfis verificaram-se limitações quanto a fertilidade natural, grande parte dos perfis foi classificado como distrófico (Valor V% menor que 50), sendo observado o aumento dos teores de Al em profundidade (Figura 5b) associado a redução dos valores de soma de bases (Figura 6b) e saturação por bases (Figura 6c). Adicionalmente os valores de P disponível foram abaixo de 10,0 mg dm⁻³ na maior parte dos perfis (Figura 6a). Para a fertilidade dos perfis estudados o grau desta limitação variou de ligeiro (L) a forte (F). Para a melhoria dessas limitações recomenda-se a realização da adubação na área de projeção da copa das culturas, devido a declividade observada na área (Tabela 2) o emprego de tração motorizada ou até mesmo animal se torna limitado.

Em todos os perfis não foram observadas limitações quanto a deficiência de oxigênio, sendo essa classificada como nula (N), já que quase todos os perfis foram classificados como bem drenados. Quanto a deficiência de água, verifica-se que essa foi identificada como variando de nula (N) a nula/ligeira (N/L). O clima da região é classificado como Aw, sendo verificado um pequeno déficit hídrico no período do inverno. O plantio adensado das variedades adaptadas à região, que cobrem o solo de maneira efetiva, associado ao emprego de culturas anuais, cobertura morta e/ou plantas de cobertura nas entrelinhas das culturas pode reduzir a perda de água no período mais seco do ano.

Quanto a suscetibilidade a erosão, em função da declividade das áreas (Tabela 2), essa foi classificada nos graus de forte (F) declividade variando na faixa de 13 a 20% a muito forte (MF) valores de declive entre 20 e 45%. Esse problema pode ser intensificado na área da cultura de banana, em especial na de ocorrência do perfil BN-P11, em função da presença do gradiente

textural que potencializa o processo erosivo. Para minimizar os problemas decorrentes da susceptibilidade a erosão recomenda-se o cultivo adensado em faixas, plantio de culturas anuais e /ou plantas de cobertura (adubação verde) nas entrelinhas, e implantação de sistemas agroflorestais (SAFs), que podem ser introduzidos nas áreas de café, cacau e banana, fornecendo diversidade na produção e reduzindo os processos erosivos.

As limitações à mecanização ou ao cultivo foram as principais limitações observadas nas áreas de estudo, a elevada declividade, por vezes associada a presença de pedras e/ou rochas fizeram que essa limitação fosse classificada nos graus moderado (M) ou forte (F). Essa limitação fortalece a indicação do emprego de culturas perenes associadas a práticas conservacionistas para a diminuição dos processos de degradação.

A seguir será apresentada a avaliação pormenorizada de cada perfil de solo nas diferentes áreas.

a) Avaliação da aptidão agrícola das áreas com cultivo de café

Os solos nas áreas de plantio de café (Conilon) apresentam limitações significativas para mecanização e são propensos à erosão, devido à topografia que varia de forte ondulada a ondulada. Essa característica, bem como a textura do solo, dificultam a tração animal ou motorizada. Nessas áreas o plantio é feito em covas escavadas manualmente, dispostas em curvas de nível, empregando mudas clonais de variedades adaptadas para a região, e seguindo o espaçamento recomendado para garantir a maior cobertura do solo pela copa das plantas, diminuindo dessa forma o processo erosivo.

Previamente é feita análise química de solo, para determinação das necessidades de nutrientes. Quando se verifica necessidade, adubação e calagem são feitas em pré-plantio, não sendo realizado o preparo inicial do solo.

Quanto a deficiência de água, essa limitação é contornada em função da irrigação por aspersão que é utilizada na área, porém não é realizado um estudo prévio da real necessidade de aplicação de água na lavoura.

Adicionalmente outras práticas são realizadas podendo ser citadas, nos dois primeiros anos após o plantio, antes da completa expansão da copa dos cafeeiros, as entrelinhas são manejadas com lavouras temporárias, normalmente, milho e feijão, para aproveitamento da área e cobertura do solo. Os resíduos dessas culturas temporárias são depositados nas entrelinhas, colaborando para reduzir o escoamento superficial da água das chuvas e protegendo o solo da incidência solar direta, contribuindo com a manutenção de água por mais tempo no solo e consequentemente diminuindo os problemas de estresse hídrico.

Para evitar danos às folhas das plantas jovens dos cafeeiros, nos primeiros anos após o plantio são feitas capinas manuais no entorno das plantas (coroamento) e química nas entrelinhas. Após o pleno desenvolvimento das plantas ser atingido, apenas a capina química, via pulverizador costal (não motorizado), é adotada nas áreas de cultivo. Eventualmente, são feitas análises químicas do solo para determinar a necessidade de adubação e calagem, que é feita de forma manual. Anualmente é realizada uma poda para remoção de galhos poucos produtivos. Uma desbrota anual também é realizada, para remover brotações indesejadas. A colheita é integralmente feita de modo manual, com peneiras, sem qualquer tipo de mecanização, dados os obstáculos de inclinação no relevo e pedregosidade da superfície.

Analisando especificamente os perfis da área de estudo, verifica-se para o perfil 1 como principal limitação o impedimento a mecanização, consequência do relevo movimentado observado nessa paisagem, que também favorece o processo erosivo, em função do escoamento superficial. Um outro fator limitante é a ser destacado é a fertilidade, que foi identificada no grau variando de moderado a forte (M/F) sendo influenciado principalmente

pelo valor S moderadamente baixo e aumento dos teores de Al em profundidade. Para esse perfil a classe de aptidão foi identificada como 3(a), sendo restrita para o agricultor A e inapta para os níveis tecnológicos B e C. Verifica-se que nesse caso a recomendação distanciasse da atual forma de utilização das áreas.

Para os perfis 4 e 9 foram identificadas com principais limitações o impedimento a mecanização em consequência do relevo movimentado que limita a utilização de maquinário e favorece os processos erosivos, para esses perfis também foi verificada a mesma classe de aptidão 3(a) que é discordante da forma de uso das terra que vem sendo realizada na área de estudo.

Tabela 5. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de café, Sudeste do Brasil.

Perfil CF-P01														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
M/F	L/M1	L/M1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	F	F	F
3(a)	3(b)	3 (c)	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	3(a)	4p	-
Perfil CF-P04														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
L	N/L1	N/L1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	F	F	F
1A	1B	2c	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	3(a)	4p	-
Perfil CF-P09														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
L	N/L1	N/L1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	F	F	F
1A	1B	2c	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	3(a)	4p	-

b) Avaliação da aptidão agrícola das áreas com floresta

Os solos nessa região enfrentam limitações significativas para mecanização e são propensos à erosão, devido à topografia que varia de forte ondulada a ondulada (Tabela 6). Esses solos enfrentam como principais limitações os impedimentos à mecanização e a suscetibilidade à erosão, devido ao relevo da paisagem, que varia de ondulado a forte ondulado. Embora a aptidão agrícola destes perfis (5, 6 e 7) tenha indicado o uso como pastagem plantada, é importante destinar essa área à preservação, pois se trata de uma floresta nativa.

O perfil 5 tem como principal limitação o alto grau de impedimento a mecanização, consequência do relevo acidentado que predomina na paisagem e que impacta moderadamente a erosão do solo, também impossibilitando melhorias na deficiência de fertilidade do solo que apresenta pH ácido e alta saturação por Al^{3+} . Nos perfis 6 e 7 a principal limitação também é o impedimento a mecanização, com alto grau de impedimento, consequência do relevo acidentado predominante na paisagem, que impacta moderadamente a erosão do solo e impossibilita melhorias na deficiência de fertilidade do solo que apresenta pH ácido, com alta saturação por Al^{3+} e V% baixo.

A classe de aptidão identificada para todos os perfis dessa área é (4p), porém por se tratar de fragmento florestal a sua preservação é recomendada, sendo a classe final 6, inapta.

Tabela 6. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com floresta, Sudeste do Brasil.

Perfil FS-P05														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
MF	F1	F1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
5(n)	4(p)	-	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-

Perfil FS-P06														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
F	M1	M1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	F	F	F
5n	3(b)	3(c)	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	3(a)	4p	-

Perfil FS-P07														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
M/F	L/M1	L/M1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	F	M1	M1	F	F	F
3(a)	3(b)	3(c)	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	3(a)	4p	-

c) Avaliação da aptidão agrícola das áreas com cultivo de banana

Os solos nessa região enfrentam limitações significativas para mecanização e são propensos à erosão, devido à topografia que varia de forte ondulada a ondulada. Essa característica, bem como à textura do solo, dificultam o tráfego de maquinários e animais. Embora a fertilidade não seja uma grande limitação para esses perfis (8, 10 e 11), recomenda-se que o uso de qualquer insumo, caso necessário, seja feito manualmente, levando em consideração o tamanho da área, o número de plantas e o espaçamento adequado entre elas, garantindo uma aplicação correta. Para reduzir a erosão na área, recomenda-se a adoção de técnicas como cultivos em faixa.

Os perfis 8, 10 e 11 estão em áreas cobertas com banana prata (*Musa sapientum*). A cultura é implantada via mudas, em covas dispostas em curva de nível acompanhando o contorno do terreno. Previamente é feita análise química de solo, para determinação das necessidades de nutrientes. Quando se verifica necessidade, adubação e calagem são feitas em pré-plantio, não sendo realizado preparo inicial mecanizado do solo.

Para minimizar os problemas de déficit hídrico, as áreas são totalmente irrigadas por aspersão, no entanto, sem estudo prévio da real necessidade de aplicação de água na lavoura. Ao longo do primeiro ano de cultivo as entrelinhas são utilizadas para plantio de culturas anuais, como milho e feijão. Os resíduos das culturas anuais são depositados sobre o solo do local. As capinas, durante a formação da lavoura, são feitas manualmente no entorno das plantas (coroamento), e quimicamente nas entrelinhas. Após o pleno estabelecimento da cultura, apenas capina química sem mecanização é realizada sobre toda a área.

Anualmente é feita uma desbrota na lavoura, para retirada do excesso de brotos e para a condução da lavoura. Também é feita uma desfolha, para remoção das folhas secas das bananeiras, que permanecem depositadas sobre o solo da área de cultivo. A colheita é feita

manualmente, por decepta dos caules, com permanência dos restos culturais na área de cultivo. O material depositado na superfície, contribui para o fornecimento de nutrientes via decomposição e também funciona como uma cobertura protetora quanto as perdas de água por evaporação e contra os processos erosivos.

Tabela 7. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de banana, Sudeste do Brasil.

Perfil BN-P08														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
N/L	N1	N1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
1A	1B	1C	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-
Perfil BN-P10														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
L	N/L1	N/L1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
2a	1B	2c	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-
Perfil BN-P11														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
N/L	N1	N1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
1A	1B	1C	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-

Análises químicas do solo são feitas eventualmente, para determinar a necessidade de adubação e calagem, que é feita de forma manual.

Nos perfis 8, 10 e 11 a principal limitação é o impedimento a mecanização, consequência do relevo da paisagem, forte ondulado, impactando ligeira a moderadamente a erosão do solo. Nestes perfis, a classe de aptidão identificada foi 3(ab), sendo a recomendação lavoura restrita.

d) Avaliação da aptidão agrícola das áreas com cultivo de cacau

Nas áreas cultivadas com cacau, são utilizada mudas clonais de variedades adaptadas para a região, plantadas seguindo o espaçamento recomendado para garantir a maior cobertura do solo pela copa das plantas. Estas áreas têm em comum o precedente cultivo de banana, sendo o cacau implantado associado a lavoura de banana. As touceiras de banana vão sendo suprimidas à medida que as plantas de cacau vão se desenvolvendo e cobrindo o solo das áreas de cultivo. Antes do plantio das mudas de cacau é feita análise química de solo, para determinação das necessidades de nutrientes. Quando se verifica necessidade, adubação e calagem são feitas em pré-plantio, não sendo realizado preparo inicial mecanizado do solo.

Para contornar possíveis limitações devido ao déficit hídrico, as áreas são totalmente irrigadas por aspersão, no entanto, sem estudo prévio da real necessidade de aplicação de água na lavoura. As capinas, durante a formação da lavoura, são feitas manualmente no entorno das plantas (coroamento), e quimicamente nas entrelinhas. Após o pleno estabelecimento da cultura, apenas capina química, sem mecanização, é realizada sobre toda a área. Eventualmente, são feitas análises químicas do solo para determinar a necessidade de adubação e calagem, que

são feitas de forma manual. Anualmente é realizada uma poda para condução da copa das plantas, e para remoção de galhos poucos produtivos. Uma desbrota anual também é realizada, para remover brotações indesejadas. A colheita é feita de modo manual, sem qualquer tipo de mecanização. Os resíduos culturais provenientes da poda, desbrota e da colheita permanecem sobre o solo da lavoura, e da mesma forma que verificado para a área de cultivo da banana, contribuem fornecendo nutrientes via decomposição, diminuem as perdas de água por evaporação e desfavorecem o processo erosivo. Através da análise dos perfis (Tabela 8), verifica-se que os solos nessas áreas apresentam limitações significativas para mecanização e são propensos à erosão, devido ao relevo que varia de forte ondulada a ondulada. Essa característica, bem como a textura do solo, dificultam o tráfego de maquinários e animais dificultando o emprego da tração animal ou motorizada.

Tabela 8. Aptidão agrícola das terras com base nos perfis de solo das áreas com cultivo de cacau, Sudeste do Brasil.

Perfil CC-P02														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
L/M	L1	L1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
2a	2b	2c	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-
Perfil CC-P03														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
N/L	N1	N1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M	L1	L1	M/F	M/F	M/F
1A	1B	1C	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-
Perfil CC-P12														
Deficiência de Fertilidade			Deficiência de Água			Deficiência de Oxigênio			Suscetibilidade a Erosão			Impedimentos à mecanização		
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
N/L	N1	N1	N/L	N/L	N/L	N	N	N	M/F	M1	M1	M/F	M/F	M/F
1A	1B	1C	1A	1B	1C	1A	1B	1C	3(a)	3(b)	-	2a	3(b)	-

Embora a fertilidade não seja um problema para os perfis de solos (3 e 12), apenas para o perfil 2, recomenda-se que o uso de qualquer insumo, caso necessário, seja feito manualmente, levando em consideração o tamanho da área, o número de plantas e o espaçamento adequado entre elas, garantindo uma aplicação correta. Para reduzir a erosão na área, recomenda-se a adoção de técnicas como cultivos em faixa. O perfil 2 tem como principal limitação o impedimento a mecanização, consequência do relevo da paisagem, impactando moderadamente a erosão do solo. Um outro ponto de impedimento que deve ser destacado é a fertilidade. Apresentando uma deficiência de fertilidade Moderada, com a alta saturação por Al^{3+} .

A classe de aptidão identificada para este perfil é 3(ab). A recomendação foi lavoura restrita. De maneira similar ao observado para o perfil 2, os perfis 3 e 12 apresentam como principal limitação o impedimento a mecanização, consequência do relevo da paisagem, forte ondulado. Adicionalmente a declividade também faz com que seja identificadas limitações quanto a erosão, sendo essa classificada como ligeira a moderada. Nesses perfis, a classe de aptidão identificada foi 3(ab), sendo a recomendação restrita para lavoura.

3.6. CONCLUSÕES

Foi verificada pouca variabilidade de classes de solos na área do estudo, com ampla expressão de Cambissolos Háplicos Distróficos (latossólicos e típicos) na propriedade. Os fatores mais preponderantes para a formação dos solos foram o relevo mais acentuado contribuindo para o maior escoamento superficial; o clima chuvoso favorecendo intensa perda de nutrientes em superfície; e o material de origem com sua natureza mais ácida, resultando em solos de baixa fertilidade natural e fragmentos de rochas expostos à superfície do solo.

Não foram observadas grandes diferenças entre os perfis das áreas cultivadas com o emprego da análise dos atributos morfológicos, físicos e químicos. Exceto para um perfil da ordem dos Argissolos localizado na área de banana, caracterizado por apresentar principalmente acúmulo de argila em subsuperfície e, conseqüentemente, ser mais suscetível à erosão.

Em grande parte das áreas do estudo as maiores limitações de utilização foram a baixa fertilidade natural, a suscetibilidade a erosão e os impedimentos a mecanização ou cultivo, decorrentes da declividade e também da pedregosidade e rochosidade observadas. Recomenda-se a utilização da área com culturas perenes associadas a práticas conservacionistas, que garantam uma maior sustentabilidade ambiental associada a produção agrícola, tais como plantio em faixas, cultivo consorciado e utilização de plantas como adubação verde junto aos cultivos.

3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22,711-728. 2014.
- ASSIS, R. D.; ANTONIO, G.; AQUINO, A. D. Ambientes de montanha: experiência de desenvolvimento endógeno e agricultura na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Cultura Científica**, 17, 10-17, 2019.
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p. 565-573. 2006.
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233. 2015.
- FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **Dia Internacional da Montanha**. FAO, 2018. <http://www.fao.org/3/CA2244ES/ca2244es.pdf>
- FONSECA, F.; FIGUEIREDO, T.; NOGUEIRA, C.; QUEIRÓS, A. Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area. **Geoderma**, vol. 307, p. 172-180. 2017.
- FONSECA, F.; SILVA, D.; BUENO, P.; HERNÁNDEZ, Z.; ROYER, A. C.; FIGUEIREDO, T. Temporal dynamics of carbon storage in mountains shrub areas managed by prescribed fire. **Catena**, vol. 212, art. 106107. 2022.
- FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V. B.; POLIDORO, J. .C. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013.
- GARBIN, M. L.; SAITER, F. Z.; CARRIJO, T. T.; PEIXOTO, A. L. Breve histórico e classificação da vegetação capixaba. **Rodriguésia**, 68, 1883-1894. 2017.
- GRADIM, C.; RONCATO, J.; PEDROSA-SOARES. A. C.; CORDANI, U.; DUSSIN, I.; ALKMIM, F. F.; QUEIROGA, G.; JACOBSON, T.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M. The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. **Braz J Geol** 44(1):155–180. 2014.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150 × 200 cm. 1928.
- LÓPEZ NETTO, A. **Políticas públicas para o desenvolvimento rural sustentável em ambientes de montanha no Brasil e na Argentina**. Seropédica, Tese, UFRRJ: 23-27. 2013.
- LÓPEZ NETTO, A.; AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. Agricultura de montanha: uma prioridade latente na agenda da pesquisa brasileira. **Embrapa Informação Tecnológica**, v. 41, p. 15-16, Brasília. 2011.

MARTINELLI, G. Mountain biodiversity in Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 4, p. 587-597, 2007.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Desarrollo sostenible de las regiones montañosas**. Anónimo. 2018. Disponível em: www.yachaywasi-ngo.org/SG_MTN11s.pdf. Acesso em: 22 de julho de 2018.

PREZOTTI, L. C.; OLIVEIRA, J. A.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G. (2013). **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPACNPS, 1995. 65p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356 p., 2018.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: SBCS. 100 p. 2015.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274. 2007.

STEINHOEFEL, G.; BREUER, J.; VON BLANCKENBURG, F.; HORN, I.; KACZOREK, D.; SOMMER, M. Micrometer silicon isotope diagnostics of soils by UV femtosecond laser ablation. **Chemical Geology**, 286(3-4), 280-289. 2011.

TEIXEIRA, P. C.; MISRA, R. K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. **Catena**. v. 30, p. 199- 134. 1997.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, Livro técnico (INFOTECA-E), 3. ed. rev. e ampl. 573p. 2017.

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, vol. 137, p. 256-268. 2016.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, 19:1467-1476, New York 1988.

4. CAPÍTULO II

ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: ACÚMULO E ORIGEM DE NUTRIENTES

Artigo submetido à revista Environmental Monitoring and Assessment em 19/05/2024.

4.1. RESUMO

A conversão de ambientes naturais em áreas de produção agrícola promove impactos na qualidade do solo. A intensidade desses impactos pode ser mensurada através de análise das propriedades do solo. Nesse contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) avaliada através de aspectos quantitativos e qualitativos pode indicar a dimensão dos efeitos da mudança do uso das terras em função do uso. Objetivou-se com o estudo a) quantificar o armazenamento de carbono (C) e nitrogênio (N) em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais; e b) verificar a origem desses elementos nas áreas cultivadas. Foram avaliadas três áreas de monocultivos, a saber: banana (BN), café (CF) e cacau (CC) e uma área de floresta secundária da Mata Atlântica (FS, referência) em três pontos distintos da propriedade. As áreas localizam-se em relevo declivoso, feição típica da região sudeste do Brasil. Verificou-se uma pequena variação dos valores de densidade do solo nas áreas. Não foi constatada significância dos teores de C total (CT) e estoque de C (EstC). Entretanto, na camada superficial observou-se acréscimo percentual dos teores de CT nas áreas de BN e CC. Para o EstC, os valores foram superiores a 20% nas áreas de CC e BN quando comparados a CF; e superiores a 6% nas mesmas áreas em comparação a FS. Os teores de N total (NT) foram influenciados pelas coberturas de BN e CC em comparação as coberturas de CF e FS, sendo verificado maiores teores na camada superficial. Quanto ao estoque de N (EstN), constatou-se aumento percentual dos valores nas áreas de cultivo de BN e CC entre as áreas de CF e FS. Os dados da variação do EstC indicam declínio dos valores de estoque nas áreas de cultivo agrícola. Já os dados da variação do EstN evidenciam incremento deste nas áreas cultivadas. Os valores menos negativos de abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ foram quantificados na área de CC ($-21,70$ a $-23,90\text{‰}$), intermediários nas áreas de BN e CF ($-23,43$ a $-24,56\text{‰}$) e mais negativos na área de FS ($-24,99$ a $-26,03\text{‰}$). Na área de FS, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ variaram de $3,23$ a $5,70\text{‰}$; nas áreas de BN e CF verificaram-se valores entre $3,70$ a $5,97\text{‰}$; e na área de CC, valores entre $5,13$ e $8,10\text{‰}$. Os resultados da análise multivariada apresentaram aspectos distintos para as coberturas vegetais no intervalo de 0–100 cm. Entre os parâmetros, destaque para CT, EstC e NT. A magnitude dos efeitos causados pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais nos atributos do solo aumentou obedecendo a seguinte sequência FS – BN e CC – CF. Através das análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foi possível evidenciar outras diferenças entre os cultivos agrícolas, com destaque para a área de cultivo de CC que individualizou-se das áreas de cultivos de BN e CF.

Palavras-chave: Estoque de carbono e nitrogênio. Abundância isotópica. Monocultivos.

4.2. ABSTRACT

The conversion of natural environments into agricultural production areas has an impact on soil quality. The intensity of these impacts can be measured by analyzing soil properties. In this context, soil organic matter (SOM) assessed through quantitative and qualitative aspects can indicate the extent of the effects of land use change. The aim of this study was to a) quantify the storage of carbon (C) and nitrogen (N) in areas with different agricultural crops and vegetation cover; and b) verify the origin of these elements in cultivated areas. Three monoculture areas were evaluated: banana (BN), coffee (CF) and cocoa (CC) and an area of secondary Atlantic Forest (FS, reference) at three different points on the property. The areas are located on sloping terrain, a typical feature of the southeastern region of Brazil. There was little variation in the soil density values in the areas. The total C (TC) and C stock (EstC) contents were not significant. However, in the surface layer there was a percentage increase in TC levels in the BN and CC areas. For EstC, the values were over 20% in the CC and BN areas when compared to CF; and over 6% in the same areas when compared to FS. The total N content (NT) was influenced by the BN and CC covers compared to the CF and FS covers, with higher levels in the surface layer. As for the N stock (EstN), there was a percentage increase in values in the BN and CC cultivation areas compared to the CF and FS areas. The EstC variation data indicates a decline in stock values in agriculturally cultivated areas. The EstN variation data shows an increase in EstN in the cultivated areas. The least negative $\delta^{13}\text{C}$ isotope abundance values were quantified in the CC area (-21.70 to -23.90‰), intermediate in the BN and CF areas (-23.43 to -24.56‰) and most negative in the FS area (-24.99 to -26.03‰). In the FS area, $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 3.23 to 5.70‰; in the BN and CF areas, values ranged from 3.70 to 5.97‰; and in the CC area, values ranged from 5.13 to 8.10‰. The results of the multivariate analysis showed different aspects for the vegetation covers in the 0-100 cm interval. Among the parameters, CT, EstC and NT stand out. The magnitude of the effects caused by agricultural crops and plant covers on soil attributes increased in the following sequence FS - BN and CC - CF. Through the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopic analyses, it was possible to highlight other differences between the agricultural crops, with the CC crop area standing out from the BN and CF crop areas.

Keywords: Carbon and nitrogen stocks. Isotopic abundance. Monocultures.

4.3. INTRODUÇÃO

A conversão de áreas de florestas nativas em áreas de cultivo, particularmente em ambientes montanhosos localizados em regiões tropicais tem aumentado consideravelmente. Essas mudanças surgem em função da crescente demanda por alimentos e outros produtos. Fatores como a mudança no uso das terras, clima quente e úmido, relevo com elevada declividade e solos propensos à erosão e/ou com impedimentos à mecanização, podem favorecer as reduções nas reservas naturais de matéria orgânica do solo (MOS), armazenadas ao longo do tempo. Além dos efeitos deletérios na qualidade do solo, a redução progressiva do conteúdo de MOS é um fator de grande preocupação devido ao aumento das emissões de gases de efeito de estufa à atmosfera (LAL, 2004; GUIMARÃES et al., 2014).

Em grande parte das áreas de agricultura realizadas em ambientes de montanha na região Sudeste do Brasil, a matriz econômica de inúmeras pequenas propriedades com agricultura familiar, que passaram ou ainda vêm passando por esse processo de mudança na forma do uso das terras baseia-se principalmente na produção de café, banana, cacau, cultivos de olerícolas, milho, feijão, cana-de-açúcar, palmito pupunha, mandioca, eucalipto e pastagens. Nesse contexto, a MOS é o componente chave na manutenção ou melhoria da qualidade do solo desses ambientes de produção, tendo em vista sua forte influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

A MOS é apontada como a principal fonte e um importante reservatório de nutrientes às plantas nos solos em condições naturais e nos cultivados (GUIMARÃES et al., 2014). Dessa forma, avaliações da MOS baseadas na determinação dos teores e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) através da quantificação desses nutrientes contribuem para o estudo dos mecanismos de estabilização e posterior acúmulo destes nutrientes no solo. O estoque de C no solo é dependente dos processos de adição (entrada) e perda (saída) de C. Dessa forma uma alta taxa de sequestro de C é consequência do elevado aporte e da mínima redução dos teores do nutriente no sistema solo-planta-atmosfera (SILVA et al., 2023).

Nas florestas naturais, a fonte de C no solo é proveniente de resíduos orgânicos da vegetação presente ou pretérita. Enquanto nas áreas cultivadas, a taxa anual de C pode ser derivada de diferentes fontes, com destaque para o material orgânico remanescente da vegetação nativa, a decomposição do sistema radicular (rizodeposição), os resíduos culturais de plantas cultivadas e a aplicação de calcário (DORTZBACH et al., 2015). Além desses fatores e pools tradicionais de C no solo, é necessário destacar o fluxo do nutriente em pluvio-lixiviados, serrapilheira e resíduos urbano-industrial. Há também C associado à macrofauna, mesofauna e biomassa microbiana, logo, MOS associada a metabólitos e exsudados da biota do solo (CERRI et al., 2022).

O maior acúmulo de MOS, as plantas cultivadas (cobertura ou principais), o sistema de cultivo adotado, a adubação nitrogenada e a predominância de leguminosas que fixam N_2 regulam o estoque de N no solo (SILVA, 2023). Maiores valores normalmente são quantificados nas camadas mais superficiais, entretanto pode haver acúmulo N em subsuperfície. Ressalta-se que é possível e viável manejar a MOS visando otimizar os processos de ganhos de N e minimizar suas perdas por volatilização e lixiviação, principalmente em áreas de agricultura de montanha, onde a topografia favorece as perdas por escoamento superficial.

A mensuração dos teores e estoques de MOS e a identificação dos isótopos estáveis de C ($\delta^{13}C$) e N ($\delta^{15}N$) são ferramentas imprescindíveis no entendimento da dinâmica do componente orgânico, assim como na investigação dos efeitos da mudança do uso das terras nos solos agricultáveis. Logo, é de grande importância identificar a dinâmica desses elementos no sistema solo-planta-atmosfera, uma vez que C e N têm papel fundamental no estabelecimento e desenvolvimento das espécies vegetais (LOSS et al., 2014; INÁCIO e

URQUIAGA, 2017; BRIEDIS et al., 2020), na funcionalidade da fauna edáfica e na manutenção dos agroecossistemas.

As análises de composição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ são amplamente recomendadas para o monitoramento das modificações da cobertura vegetal, ciclagem de nutrientes e dinâmica da MOS (LOSS et al., 2014; MIRANDA et al. 2016). As variações na abundância isotópica desses elementos estão associadas aos processos fisiológicos das plantas; à composição microbiana; ao uso de fertilizantes; e às necessidades de N dos vegetais (HOGBERG, 1997; GUARESCHI et al., 2014; ROSSET et al., 2022). Entretanto, existem poucos estudos sobre os efeitos da conversão de florestas nativas em áreas de produção de frutas, sementes e grãos sob ambiente de montanha. Especialmente no que tange o armazenamento de MOS e a identificação isotópica do C e N acumulado.

A partir do exposto, foram formuladas as seguintes hipóteses, a saber: a conversão de ambientes naturais em sistemas de produção pode proporcionar variações nos teores e estoques de C e N; e as técnicas isotópicas podem funcionar como ferramenta para a avaliação da qualidade da MOS, demonstrando as modificações que as áreas foram submetidas em razão da mudança na cobertura vegetal. Para testar as hipóteses, o estudo teve como objetivos i) quantificar o armazenamento de C e N em áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, e ii) avaliar a origem desses elementos nessas áreas.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Localização, clima e colo das áreas do estudo

A localização, clima e o solo da área de estudo estão apresentados no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1; e no tópico Resultados do Capítulo I.

4.4.2. Histórico das áreas do estudo

O histórico, descrição e localização detalhada das áreas amostrais encontram-se apresentados na Tabela 1 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2.

4.4.3. Coleta das amostras

A amostragem está apresentada no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.3. Nos perfis, coletou-se amostras deformadas e indeformadas de terra nas camadas de 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50, 50–60, 60–80 e 80–100 cm de profundidade. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de diâmetro de malha para obter a fração terra fina seca ao ar (TFSA) (TEIXEIRA et al., 2017).

4.4.4. Estoque de carbono e nitrogênio

O carbono e o nitrogênio total (CT e NT) foram determinados pelo método de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN. As análises foram realizadas utilizando 1,0 ($\pm 0,1$) g de amostra de agregados macerados em almofariz e passado por peneira de 100 mesh (149 μm) (NELSON e SOMMERS, 1996; SATO et al., 2014). Em seguida, calculou-se a relação C/N.

A densidade do solo foi quantificada pelo método do anel volumétrico (anel de Kopeck) (TEIXEIRA et al., 2017). Os estoques de CT e NT (EstC e EstN, Mg ha^{-1}) foram calculados pelo método da massa equivalente (ELLERT e BETTANY, 1995; SISTI et al., 2004), usando como referência a massa do solo da área de FS (Equação 1). Antes da correção pela massa de solo, os estoques de carbono de cada camada foram calculados pela expressão matemática proposta por Veldkamp (1994) (Equação 2). Determinou-se também a variação do EstC e EstN (ΔEstC e ΔEstN , Mg ha^{-1}), que foi obtida pela diferença entre os estoques totais das áreas de BN, CC e CF em relação aos estoques totais da área de FN na camada de 0–100 cm, correspondendo à taxa de sequestro no solo.

$$\text{EstC ou EstN} = \sum_{i=1}^{n-1} \text{Cti ou Nti} + \left[\text{Mtn} - \left(\sum_{i=1}^n \text{Mti} - \sum_{i=1}^n \text{Msi} \right) \right] \times \text{Ctn ou Ntn} \quad (1)$$

Em que: EstC ou EstN: Estoque de carbono ou nitrogênio total corrigido em razão da massa de solo de uma área de referência; $\sum_{i=1}^{n-1} \text{Cti}$: Somatório dos estoques de carbono ou nitrogênio do solo da primeira à penúltima camada amostrada no tratamento considerado (Mg ha^{-1}); Mtn: Massa do solo da última camada amostrada no tratamento (Mg); $\sum_{i=1}^n \text{Mti}$: Somatório da massa total do solo amostrado sob o tratamento (Mg ha^{-1}); $\sum_{i=1}^n \text{Msi}$: Somatório da massa total do solo amostrado na área de referência (Mg ha^{-1}); e Ctn ou Ntn: Teores de carbono ou nitrogênio do solo na última camada amostrada (Mg Mg^{-1}).

$$\text{Estoque de C ou N} = \frac{(\text{CT ou NT} \times \text{Ds} \times e)}{10} \quad (2)$$

Em que: Estoque de C ou N (Mg ha^{-1}); CT ou NT: Teores de carbono ou nitrogênio total na camada amostrada (g kg^{-1}); Ds: Densidade do solo na camada amostrada (Mg m^{-3}); e: Espessura da camada considerada (m).

4.4.5. Abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$

Para a análise de composição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) e $\delta^{15}\text{N}$ ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) foi utilizada ± 300 mg de cada amostra de terra macerada em almofariz e passada por peneira de 100 mesh ($149 \mu\text{m}$). As amostras foram avaliadas por meio de um espectrômetro de massa Delta V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Alemanha) no Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de C e N (LABCEN), Santa Maria – RS. Os resultados de ^{13}C foram expressos na forma de delta $\delta^{13}\text{C}$ (‰), em relação ao padrão internacional PDB (Belemnite da formação Pee Dee) (FAURE e MENSING, 2005) (Equação 3). Enquanto que os resultados de ^{15}N foram expressos na forma de delta $\delta^{15}\text{N}$ (‰), em relação ao padrão $\delta^{15}\text{N}$ do ar ($0,3663\%$) (Equação 4).

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{PDB}}}{R_{\text{PDB}}} \right) \times 1000 \quad (3)$$

Em que: $\delta^{13}\text{C}$ é a abundância isotópica; R amostra é a taxa isotópica de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$; e R PDB é a taxa do padrão internacional PDB.

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} \right) \times 1000 \quad (4)$$

Em que: O padrão internacional é o ar atmosférico, e R amostra e R padrão são as taxas entre $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ da amostra e do padrão, respetivamente.

4.4.6. Análises estatísticas

Assumiu-se como delineamento para o estudo, o inteiramente casualizado (quatro coberturas vegetais \times três repetições). Em que os dados de estoque de carbono e nitrogênio e abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foram analisados quanto a normalidade dos resíduos e a homocedasticidade das variâncias por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As variáveis que não apresentarem distribuição normal ou homogeneidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e foram novamente testadas. Na sequência, os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do Teste de F (ANOVA) quando os pressupostos de normalidade e homogeneidade foram atendidos (variáveis transformadas ou não).

Algumas variáveis não atenderam os pressupostos da análise de variância mesmo após transformação, nesses casos, foram analisadas pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis mais diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. Adicionalmente foi realizada a análise de componentes principais (APC) baseada na matriz de correlação de Pearson, a partir dos atributos avaliados. Todos os testes estatísticos foram realizados à 5% de significância pelo Software R (R CORE TEAM, 2020) com os pacotes “Openxlsx”, “ExpDes.pt” e “Ggplot2”.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Densidade do solo e armazenamento de carbono e nitrogênio

Foram verificadas poucas variações dos valores de densidade do solo (Ds) nas áreas do estudo. Apenas nas camadas de 10–20 e 80–100 cm foram quantificados os maiores valores desse atributo nas áreas cultivadas em comparação a área de referência (FS). Com destaque para as áreas de BN e CF, na camada de 10–20 cm, e BN e CC de 80–100 cm (Tabela 9).

Tabela 9. Atributos físicos e estoque de nutrientes nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Camada (cm)	BN	CC	CF	FS	CV%	BN	CC	CF	FS	CV%
	Ds (Mg m ⁻³)					CT (g kg ⁻¹)				
0–10	1,24	1,14	1,16	1,01	7,80	31,63	32,60	26,81	30,80	27,70
10–20	1,30 a	1,18 ab	1,23 a	0,94 b	8,00	23,58	25,40	20,86	27,14	24,90
20–30	1,20	1,22	1,14	0,97	11,60	17,65	16,80	15,12	21,95	25,60
30–40	1,21	1,22	1,16	0,94	12,50	15,40	14,54	15,00	19,92	25,80
40–50	1,24	1,25	1,23	0,92	13,40	14,58	12,88	14,19	18,71	28,80
50–60	1,73	1,26	1,11	1,00	8,50	14,44	11,90	13,00	19,25	28,10
60–80	1,33	1,23	1,15	0,95	7,80	10,60	10,00	11,53	15,64	32,70
80–100	1,24 a	1,31 a	1,14 ab	0,94 b	6,70	9,31	8,27	11,27	13,96	32,70
	EstC (Mg ha ⁻¹)					NT (g kg ⁻¹)				
0–10	32,40	32,88	27,21	30,91	28,90	3,14	3,22	2,98	2,84	25,30
10–20	22,11	23,14	19,73	24,85	21,60	2,48	2,61	2,24	2,57	25,00
20–30	17,19	16,16	14,65	21,00	24,80	1,87	1,92	1,64	2,14	25,60
30–40	14,82	13,68	13,77	18,42	29,20	1,70	1,53	1,51	1,91	20,80
40–50	13,90	12,42	12,85	17,01	38,20	1,53	1,45	1,48	1,80	28,50
50–60	14,62	12,07	12,88	19,63	32,00	1,50	1,34	1,34	1,84	27,70
60–80	19,87	18,75	21,57	30,01	32,00	1,13	1,04	1,19	1,49	29,30
80–100	17,85	15,90	20,98	26,72	38,80	1,02	0,89	1,11	1,31	28,50
	EstN (Mg ha ⁻¹)					C/N				
0–10	3,82	3,62	3,45	2,85	21,20	10,07	10,12	9,00	10,85	9,10
10–20	3,24	3,04	2,76	2,35	23,70	9,51	9,73	9,31	10,56	6,90
20–30	2,17	2,13	1,87	2,05	21,60	9,44	8,75	9,22	10,26	10,50
30–40	2,02	1,87	1,74	1,77	18,20	9,06	9,50	9,93	10,43	6,40
40–50	1,87	1,75	1,80	1,64	21,20	9,53	8,88	9,59	10,39	7,30
50–60	1,72	1,70	1,48	1,88	28,20	9,63	8,88	9,70	10,46	6,60
60–80	2,76	2,79	2,73	2,87	29,80	9,38 b	9,62 ab	9,69 ab	10,50 a	7,80
80–100	2,54	2,35	2,51	2,50	28,90	9,13	9,29	10,15	10,66	7,90

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na linha diferem as áreas avaliadas. Ausência de letra indica que os dados não diferem entre si. ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica; Ds: Densidade do solo; CT: Carbono total; EstC: Estoque de carbono; NT: Nitrogênio total; EstN: Estoque de nitrogênio; e C/N: Relação carbono/nitrogênio.

A menor variabilidade nos resultados de Ds entre as áreas de cultivo pode estar relacionada à forma de manejo convencional do solo (Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2) e/ou predominância da classe dos Cambissolos Háplicos na região do estudo (Tabela 4 do tópico Resultados e Discussão do Capítulo I, subitem 3.5.3). No Nordeste do Brasil (Chapada do Apodi – CE), Mota et al. (2017) também verificaram poucas variações dos valores de Ds e porosidade total nas áreas de produção de banana, mamão, abacaxi e figo em Cambissolos Háplicos. Os autores justificaram seus resultados a presença da

mesma unidade taxonômica na região. Apesar de não ter sido constatada diferenças dos valores de Ds, observou-se um padrão de aumento dos valores desse atributo na camada de 20–100 cm nas áreas de cultivo de BN e CC (Tabela 9).

Não foi verificada significância dos teores e estoque de C total (CT e EstC) (Tabela 9). Entretanto, na camada de 0–10 cm quantificou-se um acréscimo percentual dos teores de CT nas áreas de BN e CC, valores variando de 18% (BN) e 22% (CC) em comparação a CF, e 3% (BN) e 6% (CC) em comparação a FS. Para o EstC, os valores foram superiores a 20% nas áreas de CC e BN em comparação a CF; e superiores a 6% nas mesmas áreas em comparação a FS na camada de 0–10 cm. Esses resultados são decorrentes da constante deposição de resíduos vegetais derivados das culturas de BN e CC na camada superficial do solo durante os ciclos de produção.

Na área de cultivo de BN, a adição de folhas, pseudocaule e rizomas; e na área de cultivo de CC, folhas, a deposição de galhos, frutos e fragmentos de raízes, podem ter favorecido o aumento percentual dos valores de CT e EstC nesses ambientes de produção em confronto, particularmente, a área de cultivo de CF nos primeiros 10 cm de profundidade (Tabela 9). Padrão similar foi observado nas camadas subsequentes com o acréscimo dos valores de EstC somente verificado entre os cultivos de BN e CC quando comparados ao CF, valores oscilando de 12% (BN) e 17% (CC) na camada de 10–20 cm, 17% (BN) e 10% (CC) na camada de 20–30 cm, 8% (BN) na camada de 30–50 cm e 14% (BN) na camada de 50–60 cm.

A semelhança nos resultados de EstC nas áreas de cultivo de BN e CC em profundidade pode estar relacionada ao fato que na área de CC (tempo de adoção \geq 8 anos) a cultura precedente era a banana (Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2). Segundo Borges et al. (2008), aproximadamente 66% da massa vegetativa da bananeira é devolvida ao solo e os nutrientes retornam ao sistema via ciclagem, influenciando no acúmulo de C em subsuperfície. Logo, é possível inferir que as frações mais solúveis de C provenientes da decomposição do material orgânico em maior quantidade da BN foram translocadas e acumularam-se nas camadas mais profundas do solo nos sucessivos ciclos de cultivo.

Os atributos N total (NT) e estoque de NT (EstN) também não difeririam entre as áreas (Tabela 9), corroborando com os resultados de CT. Os teores de NT foram influenciados pelos cultivos de BN e CC em comparação as coberturas de CF e FS, aumentando proporcionalmente seus teores na camada de 0–10 cm. O incremento observado foi de 5 e 8% nas áreas de BN e CC em comparação a CF, e 11 e 13% nas mesmas áreas em comparação a FS. Quanto ao EstN, constatou-se aumento percentual dos valores nas áreas de BN e CC entre as áreas de CF e FS. Padrão equivalente ao observado para o EstC. Na área de BN verificou-se incremento de 11 a 16% em comparação a CF na camada de 0–60 cm; e 6 a 38% em comparação a FS na camada de 0–50 cm. Para o cultivo de CC quantificou-se um incremento de 7 a 14% em comparação a CF na camada de 0–40 cm; e 7 a 29% em comparação a FS na camada de 0–50 cm.

Em relação ao padrão dos resultados de EstC e EstN na área de CF (Tabela 9), estes podem estar relacionado a forma de utilização, sistema convencional de cultivo do café com manejo químico (Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2), predominante nas áreas de produção brasileira. Os sistemas de cultivo do café influenciam no teores de MOS e, consequentemente, nos valores de EstC e EstN e nas propriedades do solo em função da presença do material orgânico. Neste contexto, sistemas mais conservacionistas tendem a preservar e acumular maiores teores desses nutrientes no solo. O sistema agroflorestal (SAF) é o que apresenta maior potencial de sequestrar C e N no solo e melhorar as propriedades edáficas (MELO et al., 2023).

Nas lavouras de café a pleno sol a dinâmica da MOS é acentuada e complexa, visto que se trata de uma cultura perene com significativa produção e ciclagem de biomassa (folhas, galhos e ramos) ao longo dos ciclos de cultivos. Segundo Guimarães et al. (2014), as reduções

nos valores de EstC no solo em áreas de cultivo convencional da cultura podem chegar a 30% em comparação as florestas primárias e secundárias (retirada das plantas para renovação das lavouras e revolvimento do solo para manutenção das entrelinhas sem a presença de vegetação). Nessas condições esse efeito negativo pode ser reduzido com a adoção de SAFs, que contribuem para o aumento dos teores de carbono no solo (EHRENBERGEROVÁ et al., 2016).

As áreas de produção de café em ambientes de montanha são muito suscetíveis as perdas de solo, água e nutrientes por processos erosivos. Práticas conservacionistas podem ser sugeridas para minimizar esses problemas, podendo ser citado como exemplo o adensamento da lavoura cafeeira e/ou o uso de plantas de cobertura na entrelinha. Entretanto, o SAF é a forma de manejo mais recomendada, pois além da elevada capacidade de sequestrar C, o sombreamento de 50% promovido pelas espécies arbóreas tem potencial de diminuir a temperatura do ar e mitigar o efeito das mudanças climáticas, mantendo aptas à produção de áreas de café de montanha, principalmente em pequenas propriedades cafeeiras (MELO et al., 2023), o que tem sido observado em estudo recente na região da Zona da Mata em Minas Gerais (GOMES et al., 2020).

Os valores da relação C/N diferiram somente na camada de 60–80 cm, com maiores valores na área de FS (10,50) e menores na área de BN (9,38), reflexo dos teores de CT e NT quantificados nessa camada (Tabela 9). Todos os valores da relação C/N foram inferiores a 20, indicando maior mineralização de nitrogênio (MULLEN, 2011). A taxa de decomposição observada nas áreas de BN, CC e CF deve-se provavelmente à calagem e adubação mineral, promovendo melhor equilíbrio entre os nutrientes. A calagem reduz a acidez do solo, neutraliza o alumínio fitotóxico e disponibiliza cálcio e magnésio ao meio. A aplicação de fertilizantes diminui a relação C/N e aumenta a disponibilidade dos nutrientes. Ambas as práticas podem potencialmente aumentar a atividade microbiana e estimular a decomposição da MOS (GUIMARÃES et al., 2014).

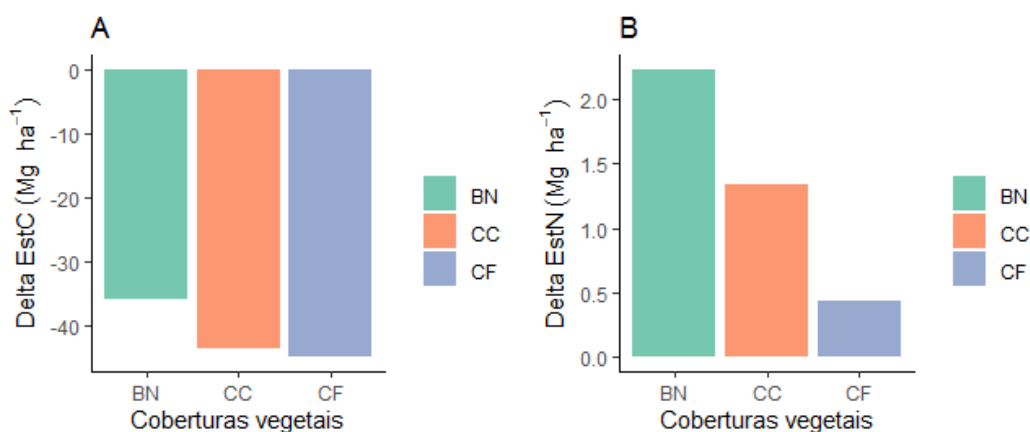


Figura 7. Variação do estoque de carbono e nitrogênio total (ΔEstC e ΔEstN) na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais em relação a área de referência (FS, floresta secundária do bioma Mata Atlântica), Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; e CF: Área de cultivo de café.

Os dados da variação do EstC (ΔEstC) apontam declínio dos valores nas áreas de cultivos agrícolas quando comparados aos valores de EstC da área de FS até 100 cm de profundidade. Na área de BN foi observada a taxa de sequestro de C (ΔEstC) menos negativa ($-35,79 \text{ Mg ha}^{-1}$), intermediária em CC ($-43,54 \text{ Mg ha}^{-1}$) e mais negativa em CF ($-44,92 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura 7A). Padrão discordante foi constatado nos dados da variação do EstN (ΔEstN)

em comparação ao valores de ΔEstC , evidenciando incremento do atributo nas áreas cultivadas em comparação a área de FS na camada de 0–100 cm.

Nas áreas de cultivos de BN e CC foram observadas as maiores taxas de sequestro de N (2,20 e 1,30 Mg ha⁻¹) (Figura 7B), justificadas pelos aumentos percentuais verificados para os valores de EstN nessas áreas. Os EstC e EstN refletem o acúmulo desses nutrientes no solo de forma mais estável, principalmente nas camadas mais profundas, o que pode ser explicado pela menor ação de fatores climáticos, pelas características intrínsecas dos resíduos vegetais e pela mínima perturbação do solo (OLIVEIRA et al., 2008; DORTZBACH et al., 2015). Os resultados de ΔEstN reafirmam o acúmulo de N em profundidade nas áreas de cultivos agrícolas.

4.5.2. Origem do carbono e nitrogênio armazenado

Os valores de abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) variaram entre as diferentes coberturas vegetais no intervalo de 0–100 cm. Os valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ foram quantificados na área de CC (–21,70 a –23,90‰), intermediários nas áreas de BN e CF (–23,43 a –24,56‰) e mais negativos na área de FS (–24,99 a –26,03‰) (Figura 6A). Durante a fotossíntese, plantas dos ciclos fotossintéticos C₃, C₄ e CAM discriminam o isótopo ¹³C com diferentes graus de intensidade. Os níveis de $\delta^{13}\text{C}$ identificados nas áreas do estudo caracterizam plantas C₃ (ou ciclo de Calvin) na camada de 0–100 cm (–21 a –35 ‰; SMITH e EPSTEIN, 1971; MARTINELLI et al., 1998). Esse padrão é resultante de espécies vegetais que fixam CO₂ atmosférico através da enzima RUBISCO (Ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase).

Enquanto as plantas C₄ contam com o processo enzimático adicional de fixação de CO₂ da enzima PEP carboxilase (fosfoenolpiruvato carboxilase). O sinal isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ das plantas C₄ varia de –7 a –19‰ (SMITH e EPSTEIN, 1971; MARTINELLI et al., 1998). Esse atributo está diretamente relacionado à natureza química e estrutural (qualidade) do C introduzido e armazenado no sistema (C₃ e C₄), e não à quantidade do nutriente aportado ao solo. Ressalta-se ainda que a utilização da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ para sinalizar a origem do C do solo pressupõe que sua matéria orgânica reflita o material vegetal do qual foi derivado.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ na área de FS (Figura 8A) são característicos de solos sob florestas do Brasil, sendo semelhantes aos estudos de Mendonça et al. (2010) em áreas de Floresta Úmida, Cerradão, Cerrado e Caatinga na região Nordeste; Guareschi et al. (2014) e Loss et al. (2014) no Cerrado Goiano, região Centro-Oeste; Dortzbach et al. (2015) e Rosset et al. (2022) na Mata Atlântica, região Sul; Couto et al. (2017) na Amazônia, região Norte. Os dados de $\delta^{13}\text{C}$ sob cobertura florestal, indicam que a vegetação dessa área sempre foi composta por plantas de ciclo fotossintético C₃.

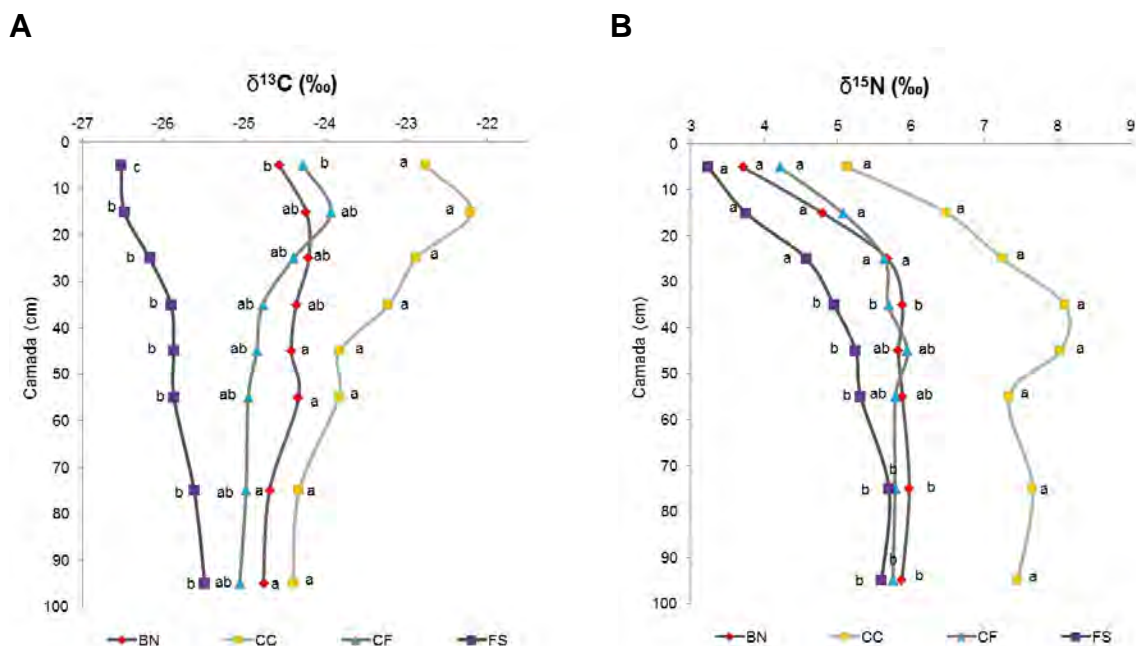


Figura 8. Abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ (A) e $\delta^{15}\text{N}$ (B) na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem as coberturas vegetais na camada avaliada. ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária do bioma Mata atlântica.

Mesmo com níveis dentro da faixa reportada para plantas com rota metabólica C_3 , foi verificado maior enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ na área de cultivo de CC em profundidade, especialmente na camada de 0-40 cm (Figura 8A). A diferença foi de 4,30 a 2,70‰ menos negativo em relação a FS; 2,20 a 1,60‰ menos negativo em relação a CF; e 2,10 a 1,20‰ menos negativo em relação a BN. Quando a vegetação predominante é do tipo C_3 e não há indícios de mudança da cobertura vegetal no passado, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ são submetidos a um aumento em direção as camadas mais subsuperficiais do solo. Em geral, o aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ da MOS é de aproximadamente 3 a 4‰ entre a camada superficial e as camadas mais profundas (MARTINELLI et al. 2009; LOSS et al., 2014; COUTO et al., 2017).

Esse incremento pode ser decorrente de diferentes causas: decomposição de substratos orgânicos que podem desenvolver um efeito isotópico normal, tornando os produtos microbianos mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$ em comparação aos substratos; ocorrência de pequenas variações inter e intramoleculares de $\delta^{13}\text{C}$ nos organismos do solo (plantas e fauna); variações climáticas globais e locais, onde os sinais isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ estão sendo modificados no tempo; MOS mais antiga; e tendência dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ aumentarem durante o mecanismo de estabilização do carbono via humificação (BALLESSENT et al., 1987; MENDONÇA et al., 2010; DORTZBACH et al., 2015).

Os resultados da assinatura isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade sugerem que na área de FS não houve influência da substituição da cobertura vegetal (gramíneas e leguminosas) ao longo do tempo nos primeiros 100 cm de profundidade; e que a mudança do uso da terra não modificou a origem do carbono armazenado nas áreas cultivadas. Para Dortzbach et al. (2015), são necessários longos períodos de uso sob espécies de gramíneas para se observarem

diferenças significativas no sinal isotópico do carbono armazenado, principalmente quando esse cultivo estiver intercalado entre longos períodos com culturas de ciclo C₃.

Os valores de abundância isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ (‰) também variaram entre as diferentes coberturas vegetais no intervalo de 30–100 cm. Os sinais de $\delta^{15}\text{N}$ foram enriquecidos isotopicamente em profundidade, sendo esse padrão mais proeminente nas áreas cultivadas (Figura 8B). Tal fato pode estar associado às transformações que envolvem a decomposição da MOS e à liberação do N, assumindo a forma inorgânica (N-orgânico para N-mineral) (GUARESCHI et al., 2014). Na medida em que as reações de mineralização, nitrificação, desnitrificação e volatilização ocorrem associadas às assimilações de N pelas plantas tem-se maior decomposição do isótopo mais leve de N (^{14}N), deixando a matéria orgânica restante enriquecida em átomos de ^{15}N (HOGBERG, 1997; BUSTAMANTE et al., 2004; LOSS et al., 2014).

Na área de FS, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ variaram de 3,23 a 5,70‰; nas áreas de BN e CF verificaram-se valores entre 3,70 a 5,97‰; e na área de CC, valores entre 5,13 e 8,10‰ (Figura 8B). Elevados valores de $\delta^{15}\text{N}$ em áreas de produção agrícola são considerados por Mendonça et al. (2010) como um índice de maior grau de decomposição da MOS. Outros autores também reportaram essa pressuposição (LOSS et al., 2014; GUARESCHI et al., 2014; COUTO et al., 2017). Vale destacar que práticas de manejo conservacionista do solo também podem influenciar o sinal isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ ao longo dos anos de adoção, como constatado por Rosset et al. (2022) especialmente na camada de 0–30 cm, apontando modificações na qualidade da MOS acumulada.

Nas áreas de BN, CF e CC foram realizadas práticas de calagem e fertilização mineral por vários anos (Tabela 1 do tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2), o que pode ter ocasionado acréscimo da proporção de formas inorgânicas de N em comparação a orgânica. Assim, a reserva orgânica torna-se mais vulnerável às reações de transformação mencionadas, ficando isotopicamente mais pesada, com menores proporções de $\delta^{15}\text{N}$ e melhorada em átomos de ^{15}N (MARTINELLI et al., 2009). Como a MOS é um grande reservatório de N, avaliações de $\delta^{15}\text{N}$ associadas a de $\delta^{13}\text{C}$, contribuem para a compreensão da dinâmica da vegetação (MENDONÇA et al., 2010).

Analisando ainda dos dados de $\delta^{15}\text{N}$, pode-se deduzir que o processo relatado anteriormente está acontecendo com maior expressão na área de CC em função dos valores mais altos de $\delta^{15}\text{N}$ (Figura 8B). Outra possível explicação está relacionada ao tipo de fertilizante nitrogenado aplicado na área de CC. Por exemplo, adições prolongadas de NH_4 -fertilizantes podem desencadear o enriquecimento de ^{15}N em virtude das perdas parciais do N-fertilizante como nitrato por desnitrificação, uma vez que o N- NH_4 residual (aquele que não foi nitrificado) fica acrescido em ^{15}N (TRIVELIN, 2001; GUARESCHI et al., 2014).

4.5.3. Dissimilaridade entre as áreas e correlação entre os atributos

Em relação a análise de componentes principais (ACP), foi observada variância acumulada para as componentes principais (PC) 1 e 2 de 81,20% (Figura 9). Examinando a ACP, constatou-se a separação das diferentes coberturas vegetais por meio da formação de três grupos distintos: (1) formado pelas coberturas de BN e CC (quadrante superior esquerdo); (2) formado pela cobertura de CF (quadrante inferior esquerdo); e (3) formados pela cobertura de FS (quadrante inferior direito). Esse padrão reforça os resultados obtidos nos testes univariados (Tabela 9 e Figura 7).

O eixo principal que explica a maior parte da variabilidade total dos dados (PC1; 56,4%) separou as coberturas de BN e CC de CF e FS. Em segundo plano, as áreas de cultivadas foram individualizados da área de referência ao longo do eixo secundário (PC2; 24,8%). O

agrupamento das áreas de BN e CC (Figura 9), bem como o padrão dos resultados de Ds, CT, EstC, NT e EstN fortalece a teoria da similaridade desses dois ambientes de produção em profundidade (Tabela 9).

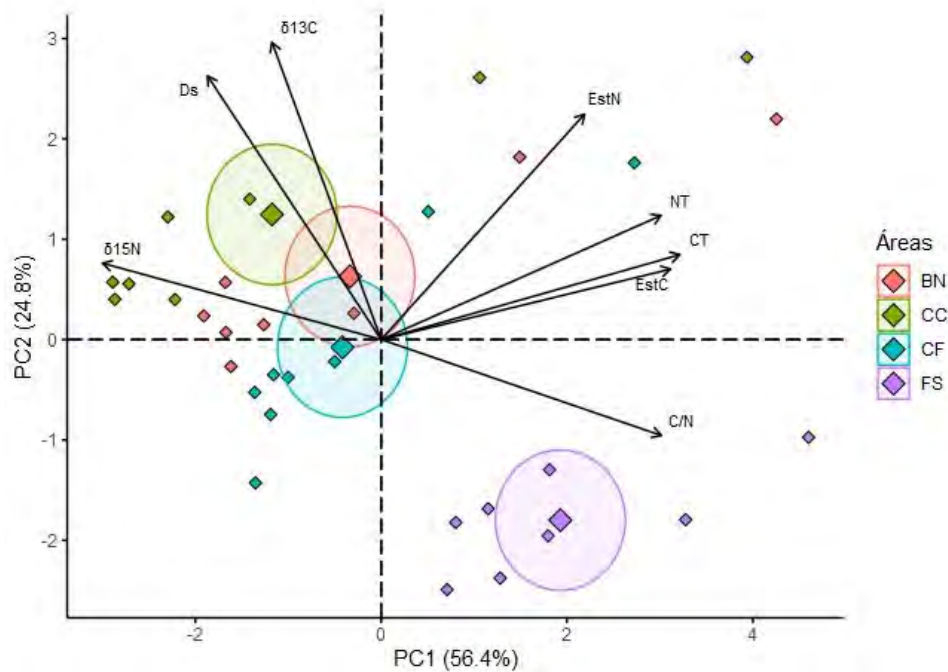


Figura 9. Análise de componentes principais integrando as variáveis relacionadas ao estoque de carbono e nitrogênio e abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ na camada de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária do bioma Mata Atlântica; Ds: Densidade do solo; CT: Carbono total; EstC: Estoque de carbono; NT: Nitrogênio total; EstN: Estoque de nitrogênio; C/N: Relação carbono/nitrogênio; $\delta^{13}\text{C}$: Abundância isotópica de carbono; $\delta^{15}\text{N}$: Abundância isotópica de nitrogênio.

Tabela 10. Matriz da análise de componentes principais (ACP). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis.

Variáveis	PC1	PC2
Ds	-0,52	0,74
CT	0,90	0,24
EstC	0,88	0,20
$\delta^{13}\text{C}$	-0,33	0,83
NT	0,85	0,35
EstN	0,62	0,63
$\delta^{15}\text{N}$	-0,85	0,21
C/N	0,91	-0,27

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). Ds: Densidade do solo; CT: Carbono total; EstC: Estoque de carbono total; $\delta^{13}\text{C}$: Abundância isotópica de carbono; NT: Nitrogênio total; EstN: Estoque de nitrogênio total; $\delta^{15}\text{N}$: Abundância isotópica de nitrogênio; e C/N: Relação estequiométrica carbono e nitrogênio.

As variáveis discriminantes para a formação do eixo principal (elevada correlação, $-0,70 \geq r \geq 0,70$) foram C/N (0,91), CT (0,90), EstC (0,88), NT (0,85) e $\delta^{15}\text{N}$ ($-0,85$) (Tabela 10). Dentre essas variáveis, a relação C/N foi o único parâmetro associado à área FS (Figura 9). Entretanto esse índice não apresentou elevada correlação com nenhum parâmetro avaliado (Tabela 11). As variáveis CT, EstC, NT e EstN estão fortemente correlacionadas entre si e são independentes principalmente das variáveis Ds, $\delta^{13}\text{C}$ e C/N na camada de 0–100 cm (Tabela 3). Ênfase para os maiores valores de correlação de Pearson quantificados entre os atributos CT e NT (0,97; Tabela 11), fortalecendo a hipótese de que o sequestro de C no solo depende das entradas e permanência de N no sistema.

Tabela 11. Correlação de Pearson entre as variáveis relacionadas ao estoque de carbono e nitrogênio e abundância isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no intervalo de 0–100 cm nas áreas com diferentes coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Variáveis	Ds	CT	EstC	$\delta^{13}\text{C}$	NT	EstN	$\delta^{15}\text{N}$	C/N
Ds	1,00	–0,34	–0,30	0,44	–0,24	0,13	0,34	–0,58
CT	–0,34	1,00	0,76	–0,02	0,97	0,63	–0,62	0,57
EstC	–0,30	0,76	1,00	–0,14	0,70	0,83	–0,54	0,53
$\delta^{13}\text{C}$	0,44	–0,02	–0,14	1,00	0,08	0,14	0,54	–0,29
NT	–0,24	0,97	0,70	0,08	1,00	0,70	–0,55	0,43
EstN	0,13	0,63	0,83	0,14	0,70	1,00	–0,35	0,18
$\delta^{15}\text{N}$	0,34	–0,62	–0,54	0,54	–0,55	–0,35	1,00	–0,51
C/N	–0,58	0,57	0,53	–0,29	0,43	0,18	–0,51	1,00

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). Ds: Densidade do solo; CT: Carbono total; EstC: Estoque de carbono total; $\delta^{13}\text{C}$: Abundância isotópica de carbono; NT: Nitrogênio total; EstN: Estoque de nitrogênio total; $\delta^{15}\text{N}$: Abundância isotópica de nitrogênio; e C/N: Relação esquimétrica carbono e nitrogênio.

No estudo da ACP verificou-se padrão de oposição de $\delta^{15}\text{N}$ e C/N, ou seja, distribuição contrária dos autovetores (Figura 9). Na análise de Pearson entre essas variáveis também foi constatada correlação média e negativa ($-0,51$; Tabela 11). O padrão inversamente proporcional entre $\delta^{15}\text{N}$ e C/N indica que à medida que os valores de $\delta^{15}\text{N}$ aumentam no sistema, os valores da relação C/N tendem a diminuir. Possivelmente devido ao processo de decomposição do material orgânico, reflexo da intensa mineralização da MOS observada nas áreas através da análise dos valores de relação C/N (Tabela 9).

Os atributos $\delta^{13}\text{C}$ (0,83) e Ds (0,74) foram as variáveis de maior relevância para construção do eixo secundário da ACP (Tabela 10), sendo que estes encontram-se mais relacionados às áreas de CC e BN (Figura 9). Os resultados da análise multivariada apresentaram aspectos distintos das coberturas vegetais no intervalo de 0–100 cm. Entre os parâmetros avaliados, destaque para CT, EstC e NT, tanto na formação do principal eixo da ACP, como na correlação entre as variáveis (análise de Pearson).

4.6. CONCLUSÕES

A magnitude dos efeitos causados pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais nos atributos do solo aumentou no sentido floresta secundária – plantios de banana e cacau – plantio de café. Os cultivos de banana e cacau reduziram os teores e estoques de C (em superfície) e N (em profundidade) no solo quando comparados aos quantificados na área de cobertura de floresta, enquanto o cultivo de café promoveu reduções dos valores desses atributos.

Os níveis de abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ demonstraram que a conversão das áreas de floresta em áreas de produção agrícola de produção agrícola apontaram diferença na composição isotópica, no entanto, sem grande impacto, não sendo suficiente para afetar a origem do carbono armazenado nessas áreas, uma vez que a substituição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ é um processo lento e gradual.

A abundância isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ reforçou a hipótese da maior mineralização da MOS nas áreas do estudo, o que foi confirmado pelos baixos valores da relação C/N, padrão que está sendo observado com maior expressão nas áreas cultivadas e em profundidade.

Através das análises isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foi possível evidenciar outras diferenças entre os cultivos agrícolas, com destaque para a área de cultivo de cacau que separou-se dos cultivos de banana e café. Esse padrão foi distinto da separação e agrupamento das áreas de produção agrícola observada com o emprego da análise multivariada.

4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLESSENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural abundance as a tracer for studies of Soil organic matter dynamics. **Soil. Biol. Biochem.** 19:25-30. 1987.
- BORGES, A. L.; SOUZA, L. S.; PEIXOTO, C. A. B.; SANTOS JÚNIOR, J. L. C. Distribuição do sistema radicular da bananeira 'Prata-Anã' em duas frequências de fertirrigação com uréia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, p. 259-262, 2008.
- BRIEDIS, C.; BALDOCK, J.; SÁ J. C. M.; DOS SANTOS, J. B.; MCGOWAN, J.; MILORI, D. M. Organic carbon pools and organic matter chemical composition in response to different land uses in Southern Brazil. **Eur J Soil Sci.** 2020.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A.; SILVA, D. A.; CAMARGO, P. B.; KLINK, C. A.; DOMINGUES T. F.; SANTOS, R. V. ¹⁵N natural abundance in woody plants and soils of central brazilian savannas (Cerrado). **Ecological Applications**, Nova York, v. 14, n. 4, p. 200-213. 2004.
- CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R.; DENNY, D. M. T.; CANTARELLA, H.; NOGUEIRA, L. A. H.; MATSUURA, M. I. D. S. F.; STUCHI, A. A. Carbon balance in the sugarcane sector- Conference Report. **Journal of Cleaner Production**, 375, 134090. 2022.
- COUTO, W. H.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; ASSUNÇÃO, S. A.; WADT, P. G. S. Carbono, Nitrogênio, Abundância Natural de Δ 13 C e Δ 15 N do Solo sob Sistemas Agroflorestais. **Floresta e ambiente**, 24. 2017.
- DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; BLAINSKI, É.; GONZÁLEZ, A. P. Estoque de C e abundância natural de 13C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, 1643-1660. 2015.
- EHRENBERGEROVÁ, L.; CIENCIALA, E.; KUČERA, A.; GUY, L.; HABROVÁ, H. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. **Agroforestry Systems**, v. 90, p. 433-445, 2016.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Can. J. Soil. Sci.** 75:529-38. 1995.
- FAURE, G. D.; MENSING, T. M. **Isotopes: Principles and Applications**. Third ed. John Wiley & Sons, New Jersey. 2005.
- GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J. J. A.; CARDOSO, I. M.; FERNANDES, R. B. A.; FILHO, E. I. F.; SCHULTE, R. P. O. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 294, 106858.
- GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Carbono, nitrogênio e abundância natural de δ 13C e δ 15N em uma cronossequência de agricultura sob plantio direto no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, 1135-1142. 2014.

GUIMARÃES, D. V.; GONZAGA, M. I.; MELO NETO, J. D. O. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18(3), 301-306. 2014.

HÖGBERG, P. ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. **New Phytologist**, Sweden, v. 137, n. 95, p. 179-203. 1997.

INACIO C.; URQUIAGA, S. **Aplicações da análise de isótopos estáveis na agricultura**. Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E). 2017.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, p. 1-22, 2004.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em sistemas de manejo conservacionista no Cerrado. **Bioscience Journal**, 30(3), 604-615. 2014.

MARTINELLI, L. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERRAZ, E. S. B.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; MOREIRA, M. Z. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos. 143 p. 1990.2009.

MELO, L. C. A.; LAGO, B. C.; JINDO, K. A matéria orgânica do solo na cultura do café. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp. 705-727. 2023.

MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. M. F.; CAMARGO, P. B.; LIMA, J. O. G.; MENDES FILHO, J. Identificação de mudanças florestais por ^{13}C e ^{15}N dos solos da Chapada do Araripe/Ceará. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 14:314-319. 2010.

MIRANDA, E.; CARMO, J.; COUTO, E.; CAMARGO, P. P. Long-term changes in soil carbono stocks in the Brazilian Cerrado under Commercial Soybean. **Land Degrad Dev** 27(6):1586-594. 2016.

MOTA, J. C. A.; FREIRE, A. G.; ALVES, C. V. O.; ALENCAR, T. L. Impactos de uso e manejo do solo na variabilidade e qualidade de atributos físicos de Cambissolos. **Revista Agro@ mbiente on-line**, 11(4), 277-289. 10.18227/1982-8470ragro.v11i4.4040. 2017.

MULLEN, R. W. Nutrient cycling in soils: nitrogen. In: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. (Eds.). **Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture**. Am. Soc. Agron./Soil Sci. Soc. Am., Madison. pp. 67-78. 2011.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, organic carbono and organic matter. p. 961-1010. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1996.

OLIVEIRA, J. T.; MOREAU, A.; PAIVA, A. Q.; MENEZES, A. A.; COSTA, O. V. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. **R. Bras Ci. Solo.**, 32:2821-9. 2008.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2020.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; SCHIAVO, J. A.; PICCOLO, M. C.; PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. M.; PEREIRA, M. G. Organic matter and isotopic composition of soils under different management systems in western Paraná State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 81(4), 136. 2022.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHAO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil carbon determination in Brazilian savannah soil. **Scientia Agrícola**, v. 71, n. 4, p. 302-308, 2014.

SILVA, C. A. Matéria orgânica e a fertilidade do solo. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Embrapa, CDD (21. ed.), pp. 49-84. 2023.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (eds) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Embrapa, CDD (21. ed.), pp 17-48. 2023.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHAN, R.; ALBES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, 76, 39-58. 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, Livro técnico (INFOTECA-E), 3^a. ed. rev. e ampl. 573p. 2017.

TRIVELIN, P. C. O. **Caracterização da abundância natural de ¹⁵N de solos**. Piracicaba, CENA/USP, 20p. 2001.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 58:175-80. 1994.

5. CAPÍTULO III

ÁREAS DE AGRICULTURA DE MONTANHA NO SUDESTE DO BRASIL: ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COMO INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

Artigo submetido à revista Catena em 10/12/2023.

5.1. RESUMO

Os ambientes de montanha são amplamente utilizados com sistemas agrícolas na região sudeste do Brasil, e devido as suas particularidades, com destaque para as elevadas declividades, tornam-se extremamente frágeis quando submetidos a práticas de manejo intensivo. O impacto de diferentes formas de uso da terras e da substituição da cobertura vegetal primária do solo pode ser avaliado e monitorada através da análise de seus atributos, que podem funcionar como indicadores de qualidade do solo, e consequentemente do ambiente. O estudo realizado teve como objetivos a) verificar a possível influência do cultivo de espécies vegetais em ambiente montanhoso no acúmulo e composição da serrapilheira; b) avaliar as possíveis modificações impostas por essas formas de cultivo e coberturas vegetais nos atributos químicos associados a fertilidade do solo; e c) analisar a compartimentalização da matéria orgânica do solo (MOS), identificando quais os tipos de coberturas estão contribuindo para aumento dos teores de carbono e suas respectivas frações orgânicas. Foram avaliadas três áreas cultivadas (cultivos com banana – BN, café – CF, e cacau – CC) e uma área de referência (fragmento florestal da Mata Atlântica – FS) em três pontos distintos da propriedade. As áreas localizam-se em relevo declivoso, feição típica da região sudeste do Brasil. A fertilidade do solo foi influenciada pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais, com destaque para as áreas de BN e CC. Os maiores estoques de serrapilheira foram quantificados nas áreas de BN e FS, com valores de acima de 34,0 e 22,0 Mg ha⁻¹, respectivamente. Entre as frações da MOS, a matéria orgânica leve em água foi a mais sensível ao efeito dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais, principalmente quanto aos valores das razões estequiométricas. Verificou-se similaridade para os teores de carbono total, nitrogênio total, carbono orgânico total e fósforo total entre as áreas de FS, BN e CC. Observou-se padrões diferenciados para as razões estequiométricas entre os compartimentos. As respostas dos teores de carbono, nitrogênio, fósforo e a sua estequiometria aos diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais têm aplicações significativas no desenvolvimento de estratégias de formas de manejo sustentável.

Palavras-chave: Ambientes frágeis. Serrapilheira. Matéria orgânica do solo. Razões estequiométricas.

5.2. ABSTRACT

Mountain environments are widely used for agricultural systems in the southeastern region of Brazil, and due to their particularities, especially the steep slopes, they become extremely fragile when subjected to intensive management practices. The impact of different forms of land use and the replacement of primary vegetation cover on the soil can be assessed and monitored through the analysis of their attributes, which can function as indicators of soil quality, and consequently of the environment. The study carried out had the following objectives: a) to verify the possible influence of the cultivation of plant species in mountainous environments on the accumulation and composition of litter; b) to evaluate the possible modifications imposed by these forms of cultivation and vegetation covers on the chemical attributes associated with soil fertility; and c) to analyze the compartmentalization of soil organic matter (SOM), identifying which types of covers are contributing to the increase in carbon contents and their respective organic fractions. Three cultivated areas (banana crops – BN, coffee – CF, and cocoa – CC) and a reference area (forest fragment of the Atlantic Forest – FS) were evaluated at three different points of the property. The areas are located on sloping terrain, a typical feature of the southeastern region of Brazil. Soil fertility was influenced by agricultural crops and vegetation cover, with emphasis on the BN and CC areas. The largest stocks of litter were quantified in the BN and FS areas, with values above 34.0 and 22.0 Mg ha⁻¹, respectively. Among the SOM fractions, light organic matter in water was the most sensitive to the effect of agricultural crops and vegetation cover, especially regarding the values of stoichiometric ratios. Similarity was observed for the contents of total carbon, total nitrogen, total organic carbon and total phosphorus between the FS, BN and CC areas. Differentiated patterns were observed for the stoichiometric ratios between the compartments. The responses of carbon, nitrogen, phosphorus levels and their stoichiometry to different agricultural crops and plant covers have significant applications in the development of sustainable management strategies.

Keywords: Fragile environments. Leaf litter. Soil organic matter. Stoichiometric ratios.

5.3. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, muitas regiões tropicais do mundo estão enfrentando sérios problemas em função do aumento populacional. A crescente demanda para a produção de alimentos e os processos de urbanização, são exemplos de fatores que estão conduzindo de forma acelerada mudança nas formas de ocupação e manejo das terras, e para que estas modificações sejam realizadas torna-se necessário a remoção da cobertura vegetal original. Essas modificações quando não realizadas de forma adequada comprometem os serviços ecossistêmicos realizados nestes ambientes, o que se torna mais grave em ambientes que já possuem uma elevada fragilidade como os de montanha.

Em torno de 22 a 25% da superfície terrestre está coberta por montanhas que fornecem entre 60% e 80% da água doce do mundo; abrigam 25% da biodiversidade do planeta; e 28% dos bosques do mundo. Cerca de 10 a 12% da população do mundo vive em áreas de montanha de altas encostas, e aproximadamente 40% ocupam áreas de bacias hidrográficas em baixas e médias montanhas (ONU, 2011; ASSIS et al., 2019). De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), quase 1 bilhão de pessoas vivem em áreas montanhosas (FAO, 2018).

As áreas de montanha localizadas em regiões de clima tropical são ambientes com elevada biodiversidade e recursos naturais. As condições biofísicas, como temperatura, precipitação, evapotranspiração, classe de solo e tipo de vegetação podem variar acentuadamente ao longo dos gradientes altitudinais (GOMES et al., 2020). Ao nível mundial, são de grande importância, pois realizam vários serviços ecossistêmicos, com destaque para o abastecimento de água; a manutenção da biodiversidade, sequestro de carbono; sendo também amplamente utilizadas para o turismo (BENISTON, 2003; GARRARD et al., 2016; CATALAN et al. 2017; ASSIS et al., 2019). Entretanto, estes ambientes, naturalmente frágeis, são rapidamente degradados quando submetidos a práticas de manejo que não respeitam suas limitações, com destaque para susceptibilidade a erosão e as restrições a mecanização (RAMALHO FILHO e BEEK, 1995).

A aptidão dessas terras para a agricultura também pode variar em função das condições biofísicas, necessitando de mais atenção e, principalmente, monitoramento das atividades agrícolas desenvolvidas nesses ambientes. Os processos que conduzem à excessiva exploração e degradação dos solos, especialmente em regiões montanhosas, são complexos e ocorrem ao longo de diversas escalas temporais e especiais, com efeitos ambientais, sociais e econômicos interligados (GARRARD et al., 2016). O impacto das diferentes formas de uso das terras e da substituição da cobertura vegetal primária por outros tipos de vegetação, em especial culturas agrícolas, pode ser avaliado e monitorado através da análise de seus atributos, que podem funcionar como indicadores de qualidade do solo, e consequentemente do ambiente.

Nas áreas de produção agrícola conduzidas em regiões de clima tropical úmido, verifica-se um acelerado processo de ciclagem de nutrientes. Associado a este fator, os solos localizados em ambientes de montanha, em sua grande maioria, com destaque para os da área de estudo, são ácidos e com baixa capacidade de retenção de cátions. As condições de umidade e temperatura observadas nesse ambiente intensificam a ação do intemperismo sobre as rochas, contribuindo para o fornecimento de nutrientes. No entanto, ao mesmo tempo, a camada superficial do solo também é facilmente erodida, e os nutrientes perdem-se rapidamente quando a proteção oferecida pela cobertura vegetal não é apropriada (LU et al., 2002). A elevada declividade e alta precipitação pluviométrica (chuvas fortes e erosivas) são fatores que intensificam a remoção de nutrientes por escoamento superficial e/ou lixiviação, contribuindo para a redução da fertilidade natural do solo. Nesse contexto, torna-se necessário o

fornecimento de nutrientes às culturas sem a adoção de práticas e políticas sustentáveis de uso e manejo das terras (YINGA et al., 2022).

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha um papel essencial nos ecossistemas terrestres. Mantém ou melhora a agregação do solo; favorece a infiltração da água e reduz o risco de erosão do solo; aumenta a capacidade de retenção de água dos solos; e através de sua decomposição pelos organismos do solo, fornece nutrientes às plantas (GARCIA-PAUSAS et al., 2017). A FAO publicou um documento destacando um conjunto de indicadores recomendados para a avaliação do manejo sustentável dos solos, por serem eficientes, práticos e de baixo custo-benefício (FAO-ITPS, 2020). No documento, a organização destaca o carbono orgânico do solo como um indicador comumente reconhecido, que reflete o estado químico, físico e biológico do solo, respondendo às mudanças através da implementação de práticas mais sustentáveis. Segundo os autores, o carbono orgânico do solo apresenta relação direta com outros atributos do solo, como a disponibilidade de nutrientes; estrutura e agregação; porosidade; capacidade de retenção de água; e presença de macro, meso e micro fauna.

As formas de uso e manejo das terras e o tipo de cobertura vegetal são fatores que podem ser determinantes nas alterações dos teores de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio no solo. Tais alterações podem estar interligadas às espécies vegetais presentes, que estão relacionadas com as transformações da serrapilheira e MOS. O estudo das razões estequiométricas entre carbono e outros nutrientes do solo pode i) fornecer informações sobre os ciclos geoquímicos e as relações entre os elementos no solo; ii) indicar a presença ou ausência de nutrientes limitadores ao crescimento e desenvolvimento vegetal e a correta funcionalidade do ecossistema; e iii) ser uma ferramenta chave para melhorar a compreensão dos processos biológicos no sistema edáfico (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007; OLIVEIRA FILHO et al., 2019). As relações C/N, C/P e N/P são indicadores da composição e qualidade da serrapilheira e MOS, especialmente quanto aos mecanismos de equilíbrio e ciclagem dos nutrientes no solo (liberação, mineralização e imobilização).

Para compreender melhor os problemas relacionados à fertilidade do solo, bem como os processos de estabilização e acúmulo da MOS sob diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais num ambiente de montanha, foram abordadas as seguintes questões: (1) variações significativas podem ser verificadas nos atributos físicos e químicos e, principalmente, nos teores de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio e respectivas razões estequiométricas? e (2) essas variações estão associadas às coberturas vegetais?

Para responder os questionamentos, o estudo teve como objetivos i) verificar a possível influência do cultivo de espécies vegetais em ambiente de montanha no acúmulo e composição da serrapilheira; ii) avaliar as possíveis modificações impostas por essas formas de cultivo e coberturas vegetais nos atributos químicos associados a fertilidade do solo; iii) analisar a compartimentalização da MOS, identificando quais os tipos de coberturas estão contribuindo para aumento dos teores de carbono e suas respectivas frações orgânicas; e iv) investigar a dissimilaridade existente entre as áreas cultivadas e a área de referência.

5.4. MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1. Localização, clima e solo das áreas do estudo

A localização, clima e o solo da área de estudo estão apresentados no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.1; e no tópico Resultados do Capítulo I.

5.4.2. Histórico das áreas do estudo

O histórico, descrição e localização detalhada das áreas amostrais encontram-se apresentados na Tabela 1 no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.2.

5.4.3. Coleta das amostras

A amostragem está apresentada no tópico Material e Métodos do Capítulo I, subitem 3.4.3. Após demarcada, em cada gleba foram coletas aleatoriamente três amostras de resíduos vegetais na superfície do solo (serrapilheira) com gabarito de madeira; e três amostras compostas de terra formadas por cinco amostras simples, coletadas aleatoriamente na camada de 0–0,10 m de profundidade. Perfazendo um conjunto de 36 unidades amostrais (12 subáreas amostrais × três pseudorepetições).

5.4.4. Estoque de serrapilheira

A serrapilheira foi coleta com auxílio de gabarito de madeira com dimensões de 0,25 × 0,25 m (área útil de 0,0625 m²). O estoque de serrapilheira (EstSer) foi quantificado pela fração da massa seca (após secagem em estufa de circulação forçada de ar, 65 °C, 72 h) de cada coletor (kg) em relação à área do gabarito (m²), com conversão para Mg ha⁻¹. Posteriormente, este material foi moído, e uma fração da amostra foi submetida à digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995), para a determinação dos teores totais de fósforo e potássio (PT e KT; respectivamente). Outra fração foi usada para a determinação de carbono e o nitrogênio total (CT_{SER} e NT_{SER}, respectivamente) pelo método de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN segundo Nelson e Sommers (1996) e Sato et al. (2014). O conteúdo de nutrientes foi estimado utilizando a equação determinada por Cuevas e Medina (1986) (Equação 5).

$$\text{QNT} = \text{EstSer} * [\text{nutriente}] \quad (5)$$

Em que: QNT – Conteúdo do nutriente (Mg ha⁻¹ ou kg ha⁻¹); EstSer – Estoque de serrapilheira (Mg ha⁻¹); e [nutriente] – Teor do nutriente (C, N, P ou K; g kg⁻¹).

5.4.5. Análise granulométrica e atributos químicos

No laboratório, as amostras de terra foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2.0 mm de diâmetro de malha para a obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). A análise granulométrica foi realizada utilizando o método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017), quantificando assim o conteúdo das frações areia, silte e argila. As análises referentes aos atributos químicos foram feitas a partir da TFSA, e sendo determinados os valores de pH e os teores de Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, K⁺, Na⁺, P e H+Al (TEIXEIRA et al., 2017). O pH em água, foi determinado potenciométricamente na suspensão solo-líquido de 1:2,5 (m:v). A determinação dos cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺), foi realizada a extração com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹ (proporção solo:solução 1:10 m:v). Para a determinação de sódio e

potássio trocáveis (Na^+ e K^+) e fósforo disponível foi utilizada a solução de ácido clorídrico (HCl) 0.05 mol L^{-1} e (H_2SO_4) $0.0125 \text{ mol L}^{-1}$ (proporção solo:solução 1:10 m:v). A acidez potencial do solo ($\text{H}+\text{Al}$) foi determinada com solução de acetato de cálcio ($\text{C}_4\text{H}_6\text{CaO}_4$) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, ajustado a pH 7,0 (proporção solo:solução 1:15 m:v). A partir dos resultados, foram calculados a soma de bases trocáveis (S), a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo a pH 7,0 e a saturação por bases (V).

5.4.6. Análises de matéria orgânica do solo

O carbono orgânico total (COT) foi determinado via oxidação úmida da matéria orgânica do solo segundo Yeomans e Bremner (1988). Para o fracionamento físico granulométrico foi utilizado o método proposto por Cambardella e Elliott (1993), determinando-se a carbono orgânico particulado (COP) e a fração associada aos minerais (ou carbono orgânico associado aos minerais - COam), ligada frações silte e argila. A fração Coam foi obtida por diferença entre o COT e COP.

A matéria orgânica leve em água (MOL) foi obtida pelo método da flotação em meio aquoso (ANDERSON e INGRAM, 1989; LOSS et al., 2014). O carbono da MOL (C_{MOL}) foi quantificado segundo Yeomans e Bremner (1988). Também foram determinados os teores de PT e KT das amostras de TFSA, MOP e MOL pelo método da digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995). O carbono e o nitrogênio total (CT e NT, respectivamente) das amostras de TFSA, MOP e MOL também foram determinados pelo método de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN no Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de C e N (LABCEN), Santa Maria (RS). As análises foram realizadas utilizando $1,1 (\pm 0.1) \text{ mg}$ de amostras de pesadas em micro balança acoplada ao aparelho (NELSON e SOMMERS, 1996; Sato et al., 2014).

5.4.7. Razões estequiométricas

Através dos teores totais de CT e NT (método de combustão a seco), e P total (digestão sulfúrica) foram calculadas as razões estequiométricas C/N, C/P e N/P em cada compartimento avaliado (serrapilheira, MOL, MOP e TFSA).

5.4.8. Análises estatísticas

Os resultados foram analisados estatisticamente em esquema unifatorial em delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram analisados quanto a normalidade dos resíduos e a homocedasticidade das variâncias por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As variáveis que não apresentaram distribuição normal ou homogeneidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e foram novamente testadas. Na sequência, os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do Teste de F (ANOVA) quando os pressupostos de normalidade e homogeneidade foram atendidos (variáveis transformadas ou não) e suas médias comparadas pelo teste de Tukey.

Algumas variáveis não atenderam os pressupostos da análise de variância mesmo após transformação, nesses casos, foram analisadas pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis mais diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. Adicionalmente foi realizada a análise de componentes principais (APC) baseada na matriz de correlação de Pearson, a partir dos atributos avaliados. Todos os testes estatísticos foram realizados à 5% de significância pelo Software R (R Core Team, 2020) com os pacotes “Openxlsx”, “ExpDes.pt” e “Ggplot2”.

5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais nos atributos físicos e químicos

Não foram verificadas diferenças nos teores das frações areia, silte e argila entre as áreas (Tabela 12). Quanto a textura das áreas nos primeiros 0,10 m de profundidade do solo, esta foi classificada como franco-argiloarenosa na área de BN. Enquanto nas áreas de CC, CF e FS a classe textural foi a franca. Os solos das áreas de montanha tendem a serem submetidos constantemente a processos de rejuvenescimento, mesmo que numa larga escala de tempo, devido a erosão que ocorre nestas áreas, sendo altamente influenciados pelo material de origem e a topografia. A textura do solo é um dos atributos mais relevantes nessas áreas, estando condicionada principalmente pela composição química e mineralógica das rochas que serviram como material de origem para os solos estudados (GARCIA-PAUSAS et al., 2017).

Tabela 12. Granulometria e atributos químicos associados a fertilidade do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Áreas	Areia ⁽¹⁾	Silte ⁽¹⁾	Argila ⁽³⁾	pH ⁽¹⁾	Ca ²⁺ ⁽¹⁾	Mg ²⁺ ⁽¹⁾	Al ³⁺ ⁽³⁾	H+Al ⁽¹⁾
	g kg ⁻¹			H ₂ O	cmol _c dm ⁻³			
BN	525 a	254 a	221 a	5,98 a	5,74 a	3,49 a	0,00 b	3,26 b
CC	502 a	297 a	201 a	5,80 a	4,63 ab	3,76 a	0,00 b	4,18 b
CF	433 a	310 a	257 a	6,11 a	3,72 b	2,35 b	0,07 b	3,59 b
FS	452 a	323 a	225 a	4,39 b	1,26 c	1,38 c	1,02 a	8,56 a
CV%	16,70	32,70	36,50	10,20	30,10	27,40	106,30	34,50
	S ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	V ⁽¹⁾	K ⁺ ⁽¹⁾	P ⁽²⁾			
	cmol _c dm ⁻³		%	mg dm ⁻³				
BN	9,73 a	12,99 a	76 a	151 ab	1,97 a			
CC	9,03 a	13,21 a	68 a	222 a	2,51 a			
CF	6,42 b	10,01 b	65 a	111 b	2,05 a			
FS	3,11 c	11,67 ab	26 b	123 b	1,74 a			
CV%	23,30	11,90	23,40	38,60	93,50			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os cultivos agrícolas na camada avaliada.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária; pH: Acidez ativa do solo; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial do solo; S: Soma de bases do solo; T: Capacidade de troca catiônica do solo à pH 7.0; V: Saturação por bases do solo; K⁺: Potássio trocável; e P: Fósforo disponível.

O principal material de origem da região do estudo é o paragnaisse, rocha de granulação média a grossa, cor cinza azulado e caráter ácido (GRADIM et al., 2014). Os principais minerais de sua composição são quartzo (50%), feldspatos (40%) e biotita (10%) (STEINHOEFEL et al., 2011) que sob intensa ação do intemperismo químico pode originar solos de textura média a argiloarenosa. Justificando os teores de areia, silte e argila, bem como a similaridade nas classes texturais das áreas avaliadas (textura franca). Exceto para a área de BN (textura franco-argiloarenosa).

Os atributos químicos associados a fertilidade do solo foram influenciados pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais (Tabela 12). Foram verificados valores de pH acima de

5,80 e saturação por bases (V) acima de 50% em todas as áreas cultivadas. Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e valores S e T foram maiores nas áreas de BN e CC. Foram observados teores de Al^{3+} de 0,07 e 1,02 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas áreas de CF e FS. Na área de CC foram constatados os teores mais elevados de K^+ , seguida da área de BN (Tabela 12). As áreas de cultivos de BN e CC destacaram-se quanto aos maiores teores de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) e menores valores de acidez trocável (Al^{3+}). Refletindo em valores mais elevados do complexo sortivo.

Esses resultados podem estar associados à diversos fatores, como calagem e adubação, maior eficiência na ciclagem de nutrientes; menor perda de nutrientes por escoamento superficial ou lixiviação; e benefícios da correção do solo e adubação mineral. Os valores de acidez ativa (pH) nas áreas BN, CC e CF estão dentro da faixa ideal (5,5–6,3) para o desenvolvimento das culturas brasileiras (SOUSA et al., 2007). Os valores de acidez trocável estão fora do limite mínimo (0,3 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) considerado como concentração tóxica para a maioria das plantas cultivadas (SOUSA et al., 2007).

5.5.2. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais no acúmulo e composição da serrapilheira

Os maiores estoques de serrapilheira (EstSer) foram quantificados nas áreas de BN e FS com valores de acima de 34,0 e 22,0 Mg ha^{-1} , respectivamente (Tabela 13). Quanto aos teores de nutrientes na serrapilheira, nas áreas de CC, FS e CF foram quantificados os maiores teores de carbono total (CT_{SER}) e nitrogênio total (NT_{SER}) nesse compartimento. Na área de BN verificou-se teores mais baixos de ambos os atributos. Para o potássio total na serrapilheira (KT_{SER}), os maiores valores foram observados na área de BN, com teores cerca de 1,5 a 4,0 vezes maiores em comparação as outras áreas (Tabela 13).

Tabela 13. Estoque de serrapilheira, teores (g kg^{-1}), conteúdos (Mg ha^{-1} e kg ha^{-1}) e razões estequiométricas dos nutrientes nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Áreas	EstSer ⁽²⁾ Mg ha ⁻¹	CT _{SER} ⁽¹⁾	NT _{SER} ⁽¹⁾	PT _{SER} ⁽¹⁾	KT _{SER} ⁽²⁾	CT _{SER} ⁽²⁾	NT _{SER} ⁽²⁾
		----- g kg ⁻¹ -----				----- Mg ha ⁻¹ -----	
BN	34,52 a	214,43 b	12,12 b	0,91 a	3,20 a	7,07 a	0,41 a
CC	15,89 b	344,81 a	20,45 a	0,86 a	1,96 ab	5,49 a	0,32 a
CF	17,79 b	286,99 ab	20,05 a	0,99 a	0,97 b	5,10 a	0,36 a
FS	22,36 ab	333,57 a	19,77 a	0,78 a	0,83 b	7,25 a	0,43 a
CV%	40,10	23,40	23,50	28,50	74,40	39,90	45,30

Áreas	P _{SER} ⁽¹⁾	K _{SER} ⁽²⁾	C/N _{SER} ⁽¹⁾	C/P _{SER} ⁽²⁾	N/P _{SER} ⁽²⁾
	---- kg ha ⁻¹ ----				
BN	31,78 a	117,05 a	17,90 a	239 b	13,45 b
CC	13,93 b	29,98 b	17,00 a	419 a	24,73 a
CF	17,29 b	16,74 b	14,49 b	304 ab	21,09 ab
FS	17,04 b	16,97 b	16,82 a	469 a	33,95 a
CV%	48,90	104,40	10,90	40,40	55,50

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os cultivos agrícolas na camada avaliada.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária; CT_{SER}: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco; NT_{SER}: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco; P_{SER}: Fósforo total; K_{SER}: Potássio total; C/N_{SER}: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco; C/P_{SER}: Relação carbono/fósforo; e N/P_{SER}: Relação nitrogênio/fósforo.

A serrapilheira depositada na superfície do solo é gradualmente fragmentada pela ação dos organismos e decomposta, sendo parte do carbono liberado na forma de dióxido de carbono (CO_2). Porém uma parte é incorporada aos horizontes superficiais do solo como matéria orgânica dissolvida ou particulada, a qual será mineralizada ou estabilizada (GARCIA-PAUSAS et al., 2017). A composição química e estrutural dos resíduos orgânicos são fatores que regulam suas taxas de decomposição (CORNWELL et al., 2008) determinando o tempo de mineralização da maioria dos nutrientes (MALUF et al., 2015). A superioridade dos valores de EstSer na área de BN é decorrente do maior aporte de material orgânico bruto derivado da cultura (folhas e pseudocaule) atrelado aos resíduos orgânicos das espécies herbáceas nativas (FONTANA et al., 2011).

Os resultados de EstSer em associação aos teores de K_{SER} e P_{SER} na área de BN resultaram em elevadas concentrações desses nutrientes (K_{SER} e P_{SER}) (Tabela 3). A biomassa proveniente da cultura da BN é rica em potássio (K_{SER}) liberando e disponibilizando uma maior concentração do nutriente ao solo. O K é um nutriente de ciclo rápido, estando prontamente disponível às plantas. Segundo Silveira et al. (2007), o nutriente é encontrado em maior concentração nas folhas e frutos da bananeira. Avaliando três sistemas agroflorestais no bioma Mata Atlântica, Freitas et al. (2018) quantificaram maiores teores do nutriente nos sistemas com predomínio de bananeiras. Para os autores, o potássio pode ser acumulado em elevadas concentrações na biomassa da cultura e, progressivamente, ser liberado via ciclagem de nutrientes. Entretanto, no estudo foi verificado que a serrapilheira da área de BN é composta por baixos teores de C_{SER} e N_{SER} .

Os menores valores de EstSer nas áreas de CC e CF (15,89 e 17,79 Mg ha^{-1} ; Tabela 2) estão interligados ao tipo de material vegetal depositado a superfície do solo como folhas, galhos e frutos. Porém, a serrapilheira de ambas as culturas é rica em C_{SER} e N_{SER} . Tal fato está relacionado aos teores de celulose, lignina, hemicelulose e polifenóis nos tecidos dessas espécies vegetais, originando resíduos orgânicos mais recalcitrantes e favorecendo a adição de carbono e nitrogênio ao solo via decomposição. O carbono capturado na biomassa e depositado a superfície do solo na forma de serrapilheira é indiretamente sequestrado como carbono orgânico do solo após sua decomposição (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; 2011). Carbono e nitrogênio são componentes estruturais e suas relações de acúmulo e consumo são relativamente fixas (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007).

Para as três razões estequiométricas calculadas no compartimento serrapilheira (C/N_{SER} , C/P_{SER} e N/P_{SER}), os maiores valores de C/N_{SER} foram verificados nas áreas de BN (17,90), CC (17,00) e FS (16,82). Nas áreas de FS e CC foram quantificados os valores mais elevados de C/P_{SER} (469 e 419, respectivamente) e N/P_{SER} (33,95 e 24,73, respectivamente). Os valores mais baixos das mesmas relações foram constatados na área de BN (C/P_{SER} , 239; e N/P_{SER} , 13,45) (Tabela 13).

As taxas de decomposição dos resíduos orgânicos regulam os processos de imobilização e mineralização dos nutrientes. Essas taxas podem ser afetadas mais pelos teores de lignina e nitrogênio (ou relação lignina/N) do que pela relação C/N (JOHNSON et al., 2007). Para o fósforo, o processo de mineralização é regulado pela relação C/P em que valores ≥ 300 tendem à imobilização, e ≤ 200 favorecem à mineralização. O estudo da teoria estequiométrica está voltado principalmente para C/N/P. Entretanto, outros nutrientes também podem ser influenciados pela estequiometria. Quanto ao potássio, este encontra-se associado a componentes estruturais do tecido vegetal permitindo fácil e rápida liberação após o rompimento da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). Em síntese, o processo de mineralização não é considerado um pré-requisito para a transferência do nutriente dos resíduos orgânicos para o solo, sendo o termo liberação mais adequado (MALUF et al., 2015).

Os valores da relação C/N_{SER} das áreas foram inferiores a 20, indicando áreas em equilíbrio, com maior mineralização de nitrogênio, especialmente na área de CF (14,49; Tabela 13). Para os resíduos orgânicos, espera-se que a decomposição microbiana promova imobilização de nitrogênio com valores da relação $C/N > 30$. Enquanto valores < 20 resultam na mineralização do nutriente (MULLEN, 2011). Para valores entre 30–20, a imobilização será igual à mineralização. As formas de uso e manejo do solo podem acelerar a mineralização de carbono e nitrogênio dos resíduos orgânicos diminuindo os valores da relação C/N_{SER} . Uma vez que as perdas de carbono na forma de dióxido de carbono são potencialmente mais elevadas em comparação as perdas de nitrogênio (ZINN et al., 2018).

A mobilização do solo aumenta o potencial de mineralização com a entrada de oxigênio, resultando em aumento da atividade microbiana e, subsequentemente, maior liberação de nitrogênio inorgânico para a solução do solo (MULLEN, 2011). A fertilização ou fixação biológica de nitrogênio são fatores que também podem intensificar a redução dos valores da relação C/N , pois aumentam a depleção do carbono do solo. Os valores mais baixos da relação C/N_{SER} sob culturas de leguminosas sugerem melhor qualidade do solo. Dessa forma constata-se que valores da relação C/N_{SER} em torno de 25 são considerados ideais, pois estão fora da taxa requerida pelos microrganismos decompositores presentes no solo (> 30). Que sob condições igualmente favoráveis de umidade, temperatura e aeração, aceleram a decomposição da MOS resultando na rápida transformação da serrapilheira em dióxido de carbono, consequentemente refletindo em baixo potencial de sequestro de carbono (DENARDIN et al., 2012).

Os valores da relação C/P_{SER} nas áreas de FS, CC e CF propiciam em menor disponibilidade de fósforo. Principalmente na área de cultivo de CC, sinalizando maior imobilização deste nutriente. Na área de cultivo de BN, os valores estão dentro da faixa de equilíbrio 300–200, significando pouca alteração nas concentrações de fósforo na serrapilheira. A relação N/P_{SER} é considerada como indicativo da limitação de nitrogênio ou fósforo ao nível da comunidade vegetal, sendo apontada como um importante fator da decomponibilidade dos resíduos orgânicos (BUI e HENDERSON, 2013). A composição e qualidade da serrapilheira são fatores que afetam significativamente sua relação N/P , e esta encontra-se diretamente correlacionada à relação N/P do solo e demais compartimentos da MOS.

Nas áreas de FS, CC e CF foram verificados valores de relação $N/P_{SER} > 16$ (limitação de fósforo), com destaque para a área de FS. Embora elevados valores da relação N/P_{SER} em áreas de florestas tropicais apontem limitação de fósforo, segundo Cleveland e Liptzin (2007) são raras as provas diretas da limitação do nutriente nos processos biogeoquímicos em ecossistemas tropicais continentais. Na área de cultivo de BN os valores de $N/P_{SER} < 14$ indicam limitação de nitrogênio. Nessa área foram quantificados os menores teores de N_{SER} (12,12 g kg^{-1} ; Tabela 13), influenciando nos baixos valores da relação N/P no compartimento serrapilheira.

A introdução de comunidades vegetais ricas em plantas da família *Fabaceae* (leguminosas) fixadoras de nitrogênio nas áreas de cultivos de BN aumentaria os teores de nitrogênio na mistura dos resíduos orgânicos aportados, elevando as concentrações do nutriente no solo. Ressalta-se que a cultura da banana também apresenta benefícios consideráveis quando moderadamente sombreada, refletindo em aumento da produtividade (COELHO, 2017) e redução da incidência de pragas e doenças (Sigatoka amarela – *Mycosphaerella musicola*) (NORGROVE e HAUSER, 2013) com sombreamento suave.

5.5.3. Influência dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais na compartimentalização da matéria orgânica do solo

Entre as frações da matéria orgânica do solo, a matéria orgânica leve em água (MOL) foi a mais sensível ao efeito dos cultivos agrícolas e coberturas vegetais, principalmente no que diz respeito aos valores das razões estequiométricas (Tabela 14).

Tabela 14. Teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg^{-1} e mg kg^{-1}), e razões estequiométricas na matéria orgânica leve em água (MOL) do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Áreas	CT _{MOL} ⁽²⁾	NT _{MOL} ⁽²⁾	CMOL ⁽²⁾	PT _{MOL} ⁽²⁾	KT _{MOL} ⁽²⁾	C/N _{MOL} ⁽¹⁾	C/P _{MOL} ⁽¹⁾	N/P _{MOL} ⁽³⁾
	----- g kg ⁻¹ -----			----- mg kg ⁻¹ -----				
BN	1,51 ab	0,07 b	1,39 b	5,60 a	37,38 a	22,16 ab	293 b	13,21 c
CC	1,63 ab	0,07 b	1,48 ab	5,67 a	53,55 a	24,28 a	301 b	12,74 c
CF	1,47 b	0,09 ab	1,34 b	4,45 a	14,47 b	17,20 c	345 b	20,63 b
FS	2,21 a	0,11 a	1,98 a	4,01 a	15,97 b	20,07 bc	535 a	27,23 a
CV%	32,90	36,30	28,80	37,10	70,20	12,80	24,40	24,80

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os cultivos agrícolas na camada avaliada.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade; e ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária; CT_{MOL}: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; e NT_{MOL}: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; CMOL: Carbono orgânico da MOL; PT_{MOL}: Fósforo total da MOL; KT_{MOL}: Potássio total da MOL; C/N_{MOL}: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco; C/P_{MOL}: Relação carbono/fósforo; e N/P_{MOL}: Relação nitrogênio/fósforo.

A MOL é uma fração leve da MOS que inicialmente é separada por granulometria ($2,0 > \phi \geq 0,25 \text{ mm}$) e posteriormente por densidade (flotação em meio aquoso). Ou seja, corresponde a todo material orgânico (em diferentes graus de decomposição e transformação) com tamanho superior à $0,25 \text{ mm}$ e densidade inferior à $\pm 1,0 \text{ Mg m}^{-3} (\text{H}_2\text{O})$ (ROSSI et al. 2023). Dentre os compartimentos da MOS, a MOL pode ser considerada como um reservatório lento dentro da dinâmica dos nutrientes no solo. A manutenção desse compartimento torna-se fundamental para a sustentabilidade dos sistemas de produção. Dado que este representa, em curto e médio prazo, potencial para ciclagem de nutrientes (FONTANA et al., 2011).

Na área de FS foram quantificados os maiores valores de CT_{MOL}, NT_{MOL} e CMOL e as maiores relações de C/P_{MOL} (535) e N/P_{MOL} (27,23). Nas áreas de CC e BN observou-se os teores mais elevados de KT_{MOL} (Tabela 14). Também foi quantificado na área de CC os valores mais elevados de C/N_{MOL} (24,28), seguida pela área de BN (22,16). Nas mesmas áreas foram verificados os menores valores de N/P_{MOL} (CC, 13,21; e BN, 12,74) (Tabela 3).

Nas áreas de cultivos de BN e CC os valores da relação C/N_{MOL} apontam equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização do nitrogênio. Nas áreas de CC e CF foram quantificados valores da relação C/P_{MOL} que assinalam imobilização de fósforo. Os valores das relações N/P_{SER} e N/P_{MOL} foram similares entre áreas de BN (limitação de nitrogênio) e CF (limitação de fósforo). Para o cultivo de CC, os valores das relações N/P_{SER} e N/P_{MOL} refletem padrões diferenciados, em que a relação N/P_{SER} apontou limitação de fósforo e a relação N/P_{MOL} sinalizou limitação de nitrogênio. Esses resultados de N/P_{SER} e N/P_{MOL} evidenciam que durante a transformação da serrapilheira em MOL ocorre uma perda de nitrogênio na área de CC.

A diversificação de espécies vegetais nas áreas de produção de cacau tem sido uma importante proposta para contrabalançar os riscos socioeconômicos e ecológicos associados ao monocultivo (ALVIM e NAIR, 1986; GAMA-RODRIGUES et al., 2010; 2011). Próximo a região desse estudo, o cacau é cultivado em sistemas agroflorestais no bioma Mata Atlântica (Sul da Bahia) sob dois principais tipos de sistema de plantio “cabruca” e “cacau + erythrina” (*Erythrina* spp.) (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; 2011). A biomassa proveniente da cultura do cacau e das árvores de sombra (acima e abaixo do solo) representa uma fonte significativa de entrada de carbono no solo. Estudos mostraram que esses sistemas agroflorestais de cacau são comparáveis as florestas naturais no que diz respeito a estabilização e acúmulo de MOS.

Em relação a matéria orgânica particulada (MOP) não foram verificadas diferenças nos teores de CT_{MOP}, NT_{MOP} e COP entre as áreas (Tabela 15). Quantificou-se na área de FS os maiores teores de carbono associado aos minerais (COAM), seguida das áreas de BN e CC (Tabela 15). Os resultados de CT_{MOL}, NT_{MOL}, C_{MOL} e COAM na área de FS são derivados da maior estabilidade e equilíbrio ambiental devido à ausência de ação antrópica. Os valores de C/P_{MOL} e N/P_{MOL} nessa área indicam maior imobilização e limitação do fósforo, respectivamente.

Tabela 15. Teores totais de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg⁻¹), e razões estequiométricas da matéria orgânica particulada (MOP) nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Áreas	CT _{MOP} ⁽¹⁾	NT _{MOP} ⁽³⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽¹⁾	PT _{MOP} ⁽¹⁾	KT _{MOP} ⁽²⁾
	----- g kg ⁻¹ -----					
BN	6,16 a	0,33 a	6,39 a	18,25 ab	0,57 a	1,29 a
CC	5,20 a	0,35 a	5,96 a	17,08 ab	0,52 ab	1,24 a
CF	6,25 a	0,48 a	6,40 a	13,84 b	0,54 ab	0,43 b
FS	4,80 a	0,32 a	5,02 a	20,40 a	0,33 b	0,47 b
CV%	45,60	51,60	42,80	25,10	36,20	61,70
	C/N _{MOP} ⁽²⁾	C/P _{MOP} ⁽¹⁾	N/P _{MOP} ⁽³⁾			
BN	18,44 a	10,72 b	0,58 b			
CC	14,86 b	10,70 b	0,72 ab			
CF	13,74 b	11,14 b	0,83 ab			
FS	15,30 ab	15,68 a	1,02 a			
CV%	14,60	28,80	29,10			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os cultivos agrícolas na camada avaliada.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade; e ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária; CT_{MOP}: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; NT_{MOP}: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; PT_{MOP}: Fósforo total da MOP; KT_{MOP}: Potássio total da MOP; C/N_{MOP}: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco; C/P_{MOP}: Relação carbono/fósforo; e N/P_{MOP}: Relação nitrogênio/fósforo.

Os teores de COAM nas áreas de BN e CC são beneficiados por condições favoráveis à estabilização química e bioquímica da MOS mediante diferentes interações com argilas e formação de complexos organo-minerais (LAL, 2018). Para que se tenha maiores teores de COAM é necessário que ocorra uma maior transformação do carbono orgânico particulado (COP), para posterior associação com os minerais de silte e argila no solo. O COP é uma fração significativa da MOS que corresponde a todo material orgânico que possui tamanho de partícula

de 53-2000 μm (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1993). Esse compartimento é mais prontamente disponível, porém sua utilidade ou qualidade para decompositores pode variar em função de sua composição química e nutricional que geralmente segue a qualidade dos insumos das plantas (LAVALLEE et al., 2019; PINTO et al., 2023).

Nas áreas de BN e CC foram verificados os teores mais elevados de fósforo e potássio total na MOP (PT_{MOP} e KT_{MOP} , respectivamente) (Tabela 15). Corroborando ao padrão observado para os resultados do nutriente potássio nos compartimentos serapilheira e MOL (Tabelas 13 e 14). Na área de BN foram observados os maiores valores de C/N_{MOP} (18,44) e menores valores de N/P_{MOP} (0,58). Entretanto, na área de FS foram quantificados os valores mais elevados de C/P_{MOP} (15,68) e N/P_{MOP} (1,02) (Tabela 15).

Os valores da relação C/N_{MOP} das áreas foram inferiores a 20 (maior mineralização de nitrogênio), semelhante ao padrão observado para a relação C/N_{SER} . Importante salientar que os valores das relações C/P_{MOP} e N/P_{MOP} das áreas avaliadas foram inferiores ao ponto de ruptura para a mineralização de fósforo ($\text{C/P} \leq 200$) e limitação de nitrogênio ($\text{N/P} < 14$) (Tabela 15). Os resultados de C/P_{MOP} e N/P_{MOP} nas áreas foram influenciados pelos baixos teores de CT_{MOP} e NT_{MOP} , e ressaltam que a dinâmica dos nutrientes durante as transformações do material orgânico não possui um padrão definido.

Verificou-se similaridade para os valores de carbono total, nitrogênio total, carbono orgânico total e fósforo total (CT, NT, COT e PT, respectivamente) entre as áreas de FS, BN e CC (Tabela 16). Os maiores teores de potássio total (KT) foram observados nas áreas de CC e BN (Tabela 16). Os teores de KT_{SER} (Tabela 13), KT_{MOL} (Tabela 14), KT_{MOP} (Tabela 15) e KT (Tabela 16) quantificados na área de BN apresentam padrão de concordância. Os maiores valores das razões estequiométricas do solo foram verificados na área de FS para C/N (10,68), e na área de CF para C/N (10,37) e C/P (92,21). Os valores de N/P no solo não diferiram entre as áreas avaliadas (Tabela 16).

Tabela 16. Teores de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio (g kg^{-1}), e razões estequiométricas do solo nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil.

Áreas	CT ⁽¹⁾	NT ⁽¹⁾	COT ⁽²⁾	PT ⁽³⁾	KT ⁽¹⁾	C/N ⁽¹⁾	C/P ⁽³⁾	N/P ⁽³⁾
	----- g kg ⁻¹ -----							
BN	35,56 ab	3,85 a	24,64 a	0,97 a	3,97 a	9,27 b	46,58 ab	4,92 a
CC	32,64 ab	3,57 ab	23,04 ab	1,05 a	4,44 a	9,17 b	33,58 b	3,67 a
CF	30,56 b	2,98 b	20,24 b	0,56 b	2,11 b	10,37 a	92,21 a	9,25 a
FS	37,96 a	3,58 ab	25,42 a	0,76 ab	1,54 b	10,68 a	50,17 ab	4,70 a
CV%	14,60	16,50	17,10	35,90	34,30	8,00	67,10	68,00

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os cultivos agrícolas na camada avaliada.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformações de dados a 5% de probabilidade; ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade; e ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária; CT: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco; NT: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco; COT: Carbono orgânico total; PT: Fósforo total; KT: Potássio total; C/N: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco; C/P: Relação carbono/fósforo; e N/P: Relação nitrogênio/fósforo.

Os resultados de carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT) e fósforo total (PT) na área de FS são corroborados pelos resultados de CT_{MOL} , NT_{MOL} , C_{MOL} e COAM . Reforçando a hipótese que ambientes naturais sem indícios de perturbação antrópica fornecem condições favoráveis aos mecanismos de estabilização da MOS

possibilitando a melhor funcionalidade dos serviços ecossistêmicos (p. ex., sequestro de carbono).

Na área de BN, os teores de CT, NT, COT e PT estão correlacionados aos maiores valores de EstSer. Embora os teores de CT_{SER} e NT_{SER} sejam mais baixos a biomassa proveniente da cultura da banana é muito elevada, proporcionando maiores teores de carbono e nitrogênio no solo após decomposição dos seus resíduos culturais. No Sudeste do Brasil, Fontana et al. (2011) quantificaram maiores teores de COT em áreas de plantio de banana (sistema agroflorestal) e floresta secundária. Os autores justificaram seus resultados ao maior aporte de matéria orgânica bruta (cultura semi-perene) e menor grau de antropização (fragmento florestal).

Na área de CF foram quantificados os menores teores de CT, NT, COT e PT (Tabela 16), COAM e KT_{MOP} (Tabela 15) e CT_{MOL} e KT_{MOL} (Tabela 14). A produção de café a pleno sol está geralmente associada ao cultivo intensivo e práticas agrícolas não sustentáveis, levando à ruptura dos agregados do solo. Expondo o carbono encapsulado ao ataque microbiano e enzimático, e aumentando as emissões de C- CO_2 (ANDERSON e DOMSCH, 2010; GAMA-RODRIGUES et al., 2010; THOMAZINI et al., 2015). Como consequência, mais nutrientes são liberados e disponibilizados devido à rápida mineralização da MOS (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; THOMAZINI et al., 2015). Alguns fatores intrínsecos (natureza e quantidade dos resíduos orgânicos aportados) e extrínsecos (luminosidade, umidade, temperatura e práticas de manejo) ao cultivo de CF podem estar desfavorecendo os mecanismos de estabilização e, consequentemente, o acúmulo de MOS.

A adoção de uma matriz agrícola mais diversificada utilizando a agrofloresta, em que as árvores nativas são consorciadas com o café, tem sido apontada como uma das melhores opções para a conservação, regeneração e reflorestamento do bioma Mata Atlântica. Na mesma região do estudo, Thomazini et al. (2015) observaram que o sistema agroflorestal com café foi mais eficiente no armazenamento de carbono que o cultivo de café a pleno sol. Para os autores, os benefícios do sistema podem ultrapassar o sequestro de carbono ao proporcionar i) geração antecipada de rendimentos por meio de culturas intercalares anuais e semi-perenes, e ii) melhoria da qualidade nutricional dos alimentos. Todas estes benefícios estão associados aos aspectos socioeconômicos e à conservação da biodiversidade. Destaca-se que o consórcio de árvores nativas com o café pode reduzir a perda de nutrientes por lixiviação e maximizar a eficácia do uso de nutrientes em função do sombreamento.

Os elevados teores de K^+ , KT_{MOL} , KT_{MOP} e KT nas áreas de BN e CC são provenientes da fragmentação e decomposição da serrapilheira rica em potássio de ambas as espécies vegetais (KT_{SER}). Por analogia com a relação C/N da serrapilheira, os valores da relação C/N do solo das áreas indicam maior mineralização do nitrogênio, corroborando aos resultados de C/N_{SER} e C/N_{MOP} . A redução dos valores da relação C/N do solo sugere uma rápida decomposição da MOS e/ou perda de carbono mais solúvel. Assim, a MOS restante tende a ser mais estável e/ou humificada (ZINN et al., 2018). Justificando os maiores teores de COAM nas áreas. Complementarmente, essa redução pode alterar outras relações estequiométricas do solo e modificar com maior intensidade o equilíbrio entre os ciclos de carbono e nitrogênio nas áreas agrícolas em comparação aos solos florestais (GAO et al., 2014).

Assim como verificado nos resultados das relações C/P_{MOP} e N/P_{MOP} (Tabela 15), os valores das relações C/P e N/P do solo também diminuíram nas áreas avaliadas (Tabela 16). Porém não tão abruptamente como observado no compartimento MOP. Os processos de mineralização de fósforo ($C/P \leq 200$) e limitação de nitrogênio ($N/P < 14$) foram preponderantes nas áreas. A relação C/P é um parâmetro da eficácia de fósforo, ou seja, menores valores indicam maior eficácia do nutriente no solo. Os baixos valores da relação N/P do solo podem sinalizar que os teores de nitrogênio do solo limitam fortemente o funcionamento adequado do

ecossistema (CLEVELAND e LIPTZIN, 2007; BUI e HENDERSON, 2013; OLIVEIRA FILHO et al., 2019). Em geral, a relação N/P pode ser regulada por fatores bióticos e abióticos. Fatores climáticos como temperatura e precipitação podem influenciar os teores de nitrogênio nas plantas; regular as concentrações de carbono da biomassa microbiana; e controlar os teores totais de nitrogênio e a relação N/P no solo (NIE et al., 2023).

5.5.4. Estequiometria entre os compartimentos

Na Figura 10 são apresentadas as razões estequiométricas de C/N, C/P e N/P dos diferentes compartimentos. Para a relação C/N, os maiores valores foram quantificados no compartimento MOL (17–24). Vale destacar que para os compartimentos serapilheira e MOP (14–18) foram verificados valores similares para esta relação; e no solo quantificou-se os valores mais baixos de C/N (9–11). Para as razões C/P e N/P observou-se padrão semelhante, sendo que os maiores valores foram verificados nos compartimentos MOL e serrapilheira, e os menores nos compartimentos MOP e solo em todas as áreas (Figura 10).

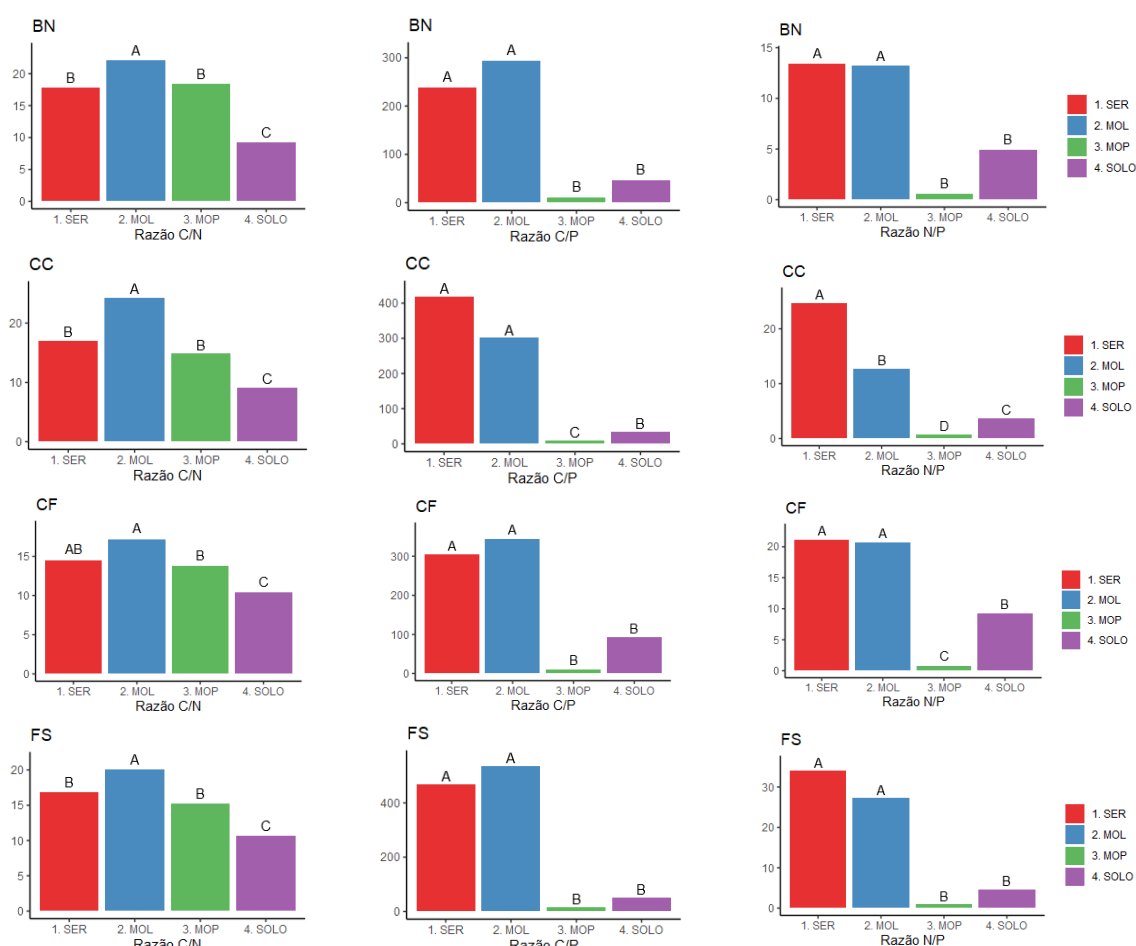


Figura 10. Razões estequiométricas C/N, C/P e N/P de diferentes compartimentos nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as razões estequiométricas no cultivo agrícola avaliado. ANOVA + Teste de Tukey com transformações de dados a 5% de probabilidade. MOL: Matéria orgânica leve em água; MOP: Matéria orgânica particulada; SER: Serrapilheira; BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; e FS: Área de floresta secundária.

Para as razões estequiométricas foram verificados padrões diferenciados entre os compartimentos, independentemente do cultivo agrícola e cobertura vegetal. Os valores das relações C/P e N/P diminuíram em função do grau de transformação do material orgânico: maiores valores foram quantificados na serrapilheira (material primário) e MOL (material menos transformado); e menores valores na MOP (material com transformação intermediária) e solo (material mais transformado). Para a relação C/N, os maiores valores foram verificados na MOL; intermediários na serrapilheira e MOP; e menores valores no solo. A razão estequiométrica é geralmente inversamente proporcional às taxas de decomposição da MOS.

Teoricamente, quando os valores da relação C/N aumentam, sugere-se convencionalmente um aumento nos teores da matéria orgânica menos transformada (MOL), podendo resultar numa maior mineralização do nitrogênio (ZINN et al., 2018). O padrão verificado para a relação C/N entre os compartimentos pode ser em função da retomada da atividade microbiana devido ao aumento momentâneo das formas disponíveis de carbono, geradas pela decomposição da biomassa fresca em razão do “efeito priming” (FONTAINE et al., 2003). As formas disponíveis de carbono orgânico do solo representam o estado energético microbiano, segundo Zhang et al. (2023).

A natureza bioquímica do carbono é especialmente importante, pois limita o fornecimento de energia para a produção de enzimas e crescimento microbiano. O “efeito priming” é resultante do aumento da atividade microbiana global devido à maior disponibilidade de energia e nutrientes libertados pela biomassa fresca (FONTAINE et al., 2003). Por outro lado, para Zhang et al. (2023) os compartimentos mais lábeis da MOS podem ser menos vulneráveis ao “efeito priming” em comparação aos mais estáveis, quando recebem fontes exógenas de carbono. Segundo os autores, esse fato está correlacionado a afinidade de determinados microrganismos do solo à compostos mais estáveis da MOS. Ressalta-se que embora carbono e nitrogênio estejam intimamente interligados na MOS, estes seguem caminhos distintos após a decomposição biológica (ZINN et al., 2018).

5.5.5. Dissimilaridade entre as áreas de cultivo agrícola e a área de referência

Na Tabela 17 estão apresentados os valores da correlação de cada variável com os eixos da componente principal (PC). Os valores de correlação $-0,70 \geq r \geq 0,70$ (elevada correlação) foram selecionados para compor a análise de componentes principais (ACP; Figura 11). Verificou-se que a ACP apresentou variância acumulada para as componentes principais (PC) 1 e 2 de 64,2%.

Através da análise da Figura 11, foi possível observar a separação das áreas cultivadas da área de FS, sendo formados dois grupos distintos: FS (1º; quadrante superior esquerdo) e BN e CC (2º; quadrante inferior direito). A área de CF encontra-se no centro da ACP. Tanto o eixo principal (PC1; 44,1%) quanto o secundário (PC2; 20,1%) estão separando as áreas de FS, BN e CC (Figura 9). As variáveis que mais contribuíram para a formação do PC1 foram: os valores de pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H+Al, KT, PT_{MOP} e KT_{MOP} ; os valores S e V; e as relações de C/N, N/P_{MOP} , C/P_{MOL} e N/P_{MOL} . Os teores de CT, NT, COP, CT_{MOP} , NT_{MOP} , CT_{MOL} e NT_{MOL} foram as variáveis discriminantes que auxiliaram na construção do PC2 (Tabela 17).

Tabela 17. Matrix da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
Areia	0,30	0,04	COT	0,11	0,38
Silte	-0,33	0,29	CT	-0,16	0,70
Argila	0,08	-0,39	NT	0,24	0,70
EstSer	0,25	0,30	PT	0,46	-0,23
CT _{SER}	-0,37	0,09	KT	0,76	0,06
NT _{SER}	-0,35	0,18	C/N	-0,70	0,15
PT _{SER}	0,29	0,22	C/P	-0,25	0,39
KT _{SER}	0,57	-0,15	N/P	-0,19	0,39
C/N _{SER}	0,08	-0,21	COP	0,31	0,70
C/P _{SER}	-0,47	-0,01	COAM	-0,06	0,00
N/P _{SER}	-0,49	-0,07	CT _{MOP}	0,28	0,74
QCT _{SER}	-0,08	0,38	NT _{MOP}	0,13	0,70
QNT _{SER}	-0,08	0,44	PT _{MOP}	0,70	0,24
QP _{SER}	0,38	0,38	KT _{MOP}	0,71	0,12
QK _{SER}	0,53	0,02	C/N _{MOP}	0,29	0,17
pH	0,70	0,19	C/P _{MOP}	-0,58	0,59
Ca ²⁺	0,80	0,31	N/P _{MOP}	-0,70	0,57
Mg ²⁺	0,81	0,18	C _{MOL}	-0,44	0,57
Al ³⁺	-0,84	-0,05	CT _{MOL}	-0,44	0,70
H+Al	-0,70	-0,21	NT _{MOL}	-0,49	0,70
S	0,87	0,26	PT _{MOL}	0,37	0,35
T	0,42	0,12	KT _{MOL}	0,56	-0,02
V	0,79	0,29	C/N _{MOL}	0,35	-0,21
K ⁺	0,53	-0,02	C/P _{MOL}	-0,75	0,18
P	0,19	0,04	N/P _{MOL}	-0,81	0,31

Valores em **negrito**: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). EstSer: Estoque de serrapilheira; CT_{SER}: Carbono total na serrapilheira determinado pelo método de combustão a seco; NT_{SER}: Nitrogênio total na serrapilheira determinado pelo método de combustão a seco; P_{SER}: Fósforo total na serrapilheira; K_{SER}: Potássio total na serrapilheira; C/N_{SER}: Relação carbono/nitrogênio na serrapilheira determinada pelo método de combustão a seco; C/P_{SER}: Relação carbono/fósforo na serrapilheira; N/P_{SER}: Relação nitrogênio/fósforo na serrapilheira; QCT_{SER}: Conteúdo de carbono total na serrapilheira; QNT_{SER}: Conteúdo de nitrogênio total na serrapilheira; QP_{SER}: Conteúdo de fósforo total na serrapilheira; QK_{SER}: Conteúdo de potássio total na serrapilheira; pH: Acidez ativa do solo; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial do solo; S: Soma de bases do solo; T: Capacidade de troca catiônica do solo à pH 7,0; V: Saturação por bases do solo; K⁺: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; CT: Carbono total no solo determinado pelo método de combustão a seco; NT: Nitrogênio total no solo determinado pelo método de combustão a seco; COT: Carbono orgânico total no solo; PT: Fósforo total no solo; KT: Potássio total no solo; C/N: Relação carbono/nitrogênio no solo determinada pelo método de combustão a seco; C/P: Relação carbono/fósforo no solo; N/P: Relação nitrogênio/fósforo no solo; CT_{MOP}: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; NT_{MOP}: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; PT_{MOP}: Fósforo total da MOP; KT_{MOP}: Potássio total da MOP; C/N_{MOP}: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco da MOP; C/P_{MOP}: Relação carbono/fósforo da MOP; N/P_{MOP}: Relação nitrogênio/fósforo da MOP; CT_{MOL}: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; e NT_{MOL}: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; C_{MOL}: Carbono orgânico da MOL; PT_{MOL}: Fósforo total da MOL; KT_{MOL}: Potássio total da MOL; C/N_{MOL}: Relação carbono/nitrogênio determinada pelo método de combustão a seco da MOL; C/P_{MOL}: Relação carbono/fósforo da MOL; e N/P_{MOL}: Relação nitrogênio/fósforo da MOL.

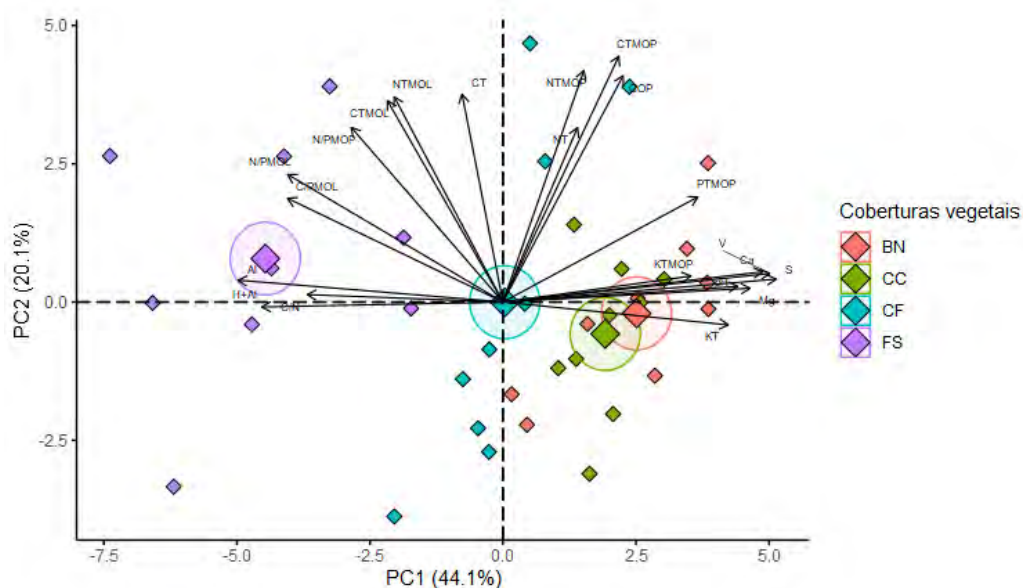


Figura 11. Análise de componentes principais integrando as variáveis relacionadas à matéria orgânica do solo e às razões estequiométricas nas áreas com diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais, Sudeste do Brasil. BN: Área de cultivo de banana; CC: Área de cultivo de cacau; CF: Área de cultivo de café; FS: Área de floresta secundária. pH: Acidez ativa do solo; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial do solo; S: Soma de bases do solo; V: Saturação por bases do solo; CT: Carbono total no solo determinado pelo método de combustão a seco; NT: Nitrogênio total no solo determinado pelo método de combustão a seco; KT: Potássio total no solo; C/N: Relação carbono/nitrogênio no solo determinada pelo método de combustão a seco; CTMOP: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; NTMOP: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOP; COP: Carbono orgânico particulado; PTMOP: Fósforo total da MOP; KTMOP: Potássio total da MOP; N/PMOP: Relação nitrogênio/fósforo da MOP; CTMOL: Carbono total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; e NTMOL: Nitrogênio total determinado pelo método de combustão a seco da MOL; C/PMOL: Relação carbono/fósforo da MOL; e N/PMOL: Relação nitrogênio/fósforo da MOL.

De acordo com a matriz de correlação das componentes principais (Tabela 6), o primeiro grupo de variáveis altamente ponderadas implica que a PC1 está principalmente associada a fertilidade do solo; e aos teores de potássio e fósforo da MOL e suas relações estequiométricas. Na PC2, as variáveis altamente ponderadas sugerem que a componente está principalmente relacionada aos teores de carbono e nitrogênio das frações mais lábeis da MOS. Ambas as componentes principais estão separando as áreas de FS, BN e CC (Figura 11). Reforçando as dissimilaridades existentes entre os cultivos agrícolas em relação a área de referência, bem como a semelhança na dinâmica dos atributos do solo nas áreas de BN e CC. No presente estudo, os indicadores do solo selecionados pela PCA (Tabela 17) são considerados mais críticos e eficientes para expressar a qualidade do solo e a resposta subsequente as diferentes formas de cultivo agrícola e coberturas vegetais no ambiente de estudo.

5.7. CONCLUSÕES

Os atributos químicos associados a fertilidade do solo foram afetados pelos cultivos agrícolas e coberturas vegetais na “camada arável”, com destaque para os cultivos de banana e cacau. Os maiores estoques de serrapilheira foram verificados no cultivo de banana e no fragmento de floresta secundária. A matéria orgânica leve em água foi o compartimento mais sensível.

Os cultivos de banana e cacau, bem como o fragmento de floresta secundária proporcionaram os maiores teores de carbono total, nitrogênio total, carbono orgânico total e fósforo total. As razões estequiométricas apresentaram padrões diferenciados entre os compartimentos. As transformações da serrapilheira e derivadas frações orgânicas das áreas de banana e cacau favorecem a liberação de potássio ao meio.

As respostas dos teores de carbono, nitrogênio, fósforo e a sua estequiometria aos diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais têm aplicações significativas para melhorar as estratégias do desenvolvimento sustentável de manejo sustentável do solo.

5.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22,711-728. 2014.
- ALVIM, P. T.; NAIR, P. K. R. Combination of cocoa with other plantation crops: an agroforestry system in Southeast Bahia, Brazil. **Agroforest Syst.** 4:3-15. 1986.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility**: a handbook of methods. Wallingford: CAB International, 171 p. 1989.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biol. Biochem.** 42, 2039-2043. 2010.
- ASSIS, R. D.; ANTONIO, G.; AQUINO, A. D. Ambientes de montanha: experiência de desenvolvimento endógeno e agricultura na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Cultura Científica**, 17, 10-17. 2019.
- BENISTON, M. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. In: DIAZ, H. F.; GROSJEAN, M.; GRAUMLICH, L. (eds). **Climate variability and change in high elevation regions**: past, present & future. Springer, New York, pp 5-31. 2003.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, 56, p. 449-457. 1993.
- CATALAN, J.; NINOT, J. M.; ANIZ, M. M. The high mountain conservation in a changing world. **Adv. Glob. Change Res.** 62:3-36. 2017.
- CLEVELAND, C. C.; LIPTZIN, D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? **Biogeochemistry** (Dordrecht) 85, 235-252. 2007.
- COELHO, G. C. Ecosystem services in Brazilian's southern agroforestry systems. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, 20(3). 2017.
- CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within amazonian forest ecosystems. **Oecologia**, (68):446-472. 1986.
- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 39, 2012.
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Intergovernmental Technical Panel on Soils Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management**. Rome: FAO. 2020.
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. **International Mountain Day**. Rome: FAO. 2018.

- FONTAINE, S.; MARIOTTI, A.; ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? **Soil Biol. Biochem.** 35:837-843. 2003.
- FONTANA, A.; SILVA, C. F. D.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BRITO, R. J. D.; BENITES, V. D. M. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum Agronomy**, 33, 545-550. 2011.
- GAMA-RODRIGUES E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; NAIR, R. P. K. Soil carbon sequestration in cacao agroforestry systems: a case study from Bahia, Brazil. In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Eds.) Carbon Sequestration potential of agroforestry 85 systems: opportunities and challenges. **Advances in Agroforestry** 8. 2011.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BALIGAR, V. C.; MACHADO, R. C. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, 45, 274-283. 2010.
- GAO Y.; HE, N.; YU, G.; CHEN, W.; WANG, Q. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China. **Ecological Engineering**, 67, 171-181. 2014.
- GARBIN, M. L.; SAITER, F. Z.; CARRIJO, T. T. PEIXOTO, A. L. Brief history and classification of capixaba vegetation. **Rodriguésia** 68: 1883-1894. 2017.
- GARCIA-PAUSAS, J.; MONTANÉ, F.; RIOS, A. I.; TAULL, M.; ROVIRA, P.; CASALS, P. Are soil carbon stocks in mountain grasslands compromised by land-use changes? In: CATALAN, J.; NINOT, J. M.; ANIZ, M. (Eds.) **High mountain conservation in a changing world**. Springer Nature, Cham, pp 207-230. 2017.
- GOMES, L. C.; BIANCHI, F. J.; CARDOSO, I. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHULTE, R. P. Land use change drives the spatio-temporal variation of ecosystem services and their interactions along an altitudinal gradient in Brazil. **Landscape Ecology**, 35, 1571-1586. 2020.
- GRADIM, C.; RONCATO, J.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F.; DUSSIN, I. A.; ALKMIM, F. F.; QUEIROGA, G.; JACOBSON, T.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M. The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. **Brazilian Journal of Geology**, 44(1), 155-180. 2014.
- JOHNSON, J. M. F.; BARBOUR, N. W.; LACHNIGHT-WEYERS, S. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 71:155-62. 2007.
- LAL, R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Glob. Change Biol.** 24 (8), 3285-3301. 2018.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21 st century. **Global Change Biology**. 2019.

LOSS, A.; COSTA, E. M.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J. Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. **Revista de la Facultad Agronomia**, 113:01-08. 2014.

LU D.; MORAN E.; MAUSEL, P. Linking Amazonian secondary succession forest growth to soil properties. **Land Degrad. Dev.** 13(4):331-343. 2002.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, B. E. M.; SILVA, I. R. D.; NEVES, J. C. L.; SILVA, L. D. O. G. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39, 1681-1689. 2015.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. New York: Academic Press. 2012.

MULLEN, R. W. Nutrient cycling in soils: nitrogen. In: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. (Eds.). **Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture**, pp. 67-78 (Am. Soc. Agron./Soil Sci. Soc. Am., Madison). 2011.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, organic carbono and organic matter. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis - Part 3 - Chemical methods**. pp. 961-1010. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1996.

NIE, X.; WANG, D.; REN, L.; ZHOU, G.; DU Y. Soil N/P ratio and its regulation factors in alpine wetlands across the Three Rivers Source Region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 23(1), 1138-1148. 2023.

NORGROVE, L.; HAUSER, S. Black leaf streak disease and plantain fruit characteristics as affected by tree density and biomass management in a tropical agroforestry system. **Agroforestry Systems**, 87(2), 349-354. 2013.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; VIEIRA, J. N.; SILVA, E. M. R.; OLIVEIRA, J. G. B.; PEREIRA, M. G.; BRASILEIRO, F. G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. **Journal of Arid Environments**, 166, 1-10. 2019.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Desarrollo sostenible de las regiones montañosas**. Anónimo. Disponível em: www.yachaywasi-ngo.org/SG_MTN11s.pdf. Acesso em: julho de 2023. 2011.

PINTO, L. A. S. R.; MORAIS, I. S.; OZÓRIO, J. M. B.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 195(1), 253. 2023.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3^a. ed. Rev. Rio de Janeiro: EMBRAPACNP. 65p. 1995.

ROSSI, C. Q.; PINTO L. A. S. R.; SOUZA, R. C. D.; MORAIS, I. D. S.; MIRANDA, L. H. D. S.; SILVA, T. P. D.; PEREIRA, M. G. Organic matter fractions of soil aggregates under agroecological production systems in the southeast of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, 55, e20228601. 2023.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356 p. 2018.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHAO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil carbon determination in Brazilian savannah soil. **Scientia Agrícola**, v. 71, n. 4, p. 302-308. 2014.

SILVEIRA, N. D.; PEREIRA, M. G.; POLIDORO, J. C.; TAVARES, S. R. L.; MELLO, R. B. Aporte de nutrientes e biomassa via serrapilheira em sistemas agroflorestais em Paraty (RJ). **Ciência Florestal**, 17(2), 129-136. 2007.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, I. R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 205-274. 2007.

SOUZA, H. N.; GOEDE, R. G. M.; BRUSSAARD, L.; CARDOSO, I. M.; DUARTE, E. M. G.; FERNANDES, R. B. A.; GOMES, L. C.; PULLEMAN, M. M. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry system in the Atlantic Rainforest biome, **Agric. Ecosyst. Environ.** 146, 179-196. 2012.

STEINHOEFEL, G.; BREUER, J.; VON BLANCKENBURG, F.; HORN, I.; KACZOREK, D.; SOMMER, M. Micrometer silicon isotope diagnostics of soils by UV femtosecond laser ablation. **Chemical Geology**, 286(3-4), 280-289. 2011.

TEDESCO, M. J.; GIANCELO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, Departamento de Solos, UFRGS. 174p. (Boletim Técnico, 5). 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, Livro técnico (INFOTECA-E), 3. Ed. Rev. E ampl. 573p. 2017.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, 5, 15-24. 2015.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, 19:1467-1476. 1988.

YINGA, O. E.; KUMAR, K. S.; CHOWLANI, M.; TRIPATHI, S. K.; KHANDURI, V. P.; SINGH, S. K. Influence of land-use pattern on soil quality in a steeply sloped tropical mountainous region, India. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 68(6), 852-872. 2022.

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 & environment**, 255, 62-72. 2018.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A classe dos Cambissolos Háplicos Distróficos (latossólicos e típicos) predomina na área do estudo. Foram observadas poucas diferenças entre os perfis das áreas de produção por meio da caracterização morfológica, física e química dos atributos do solo. Verificou-se a ocorrência da classe dos Argissolos Amarelos na área de banana, caracterizada por apresentar principalmente acúmulo de argila em subsuperfície.

Analisando a capacidade de uso agrícola, verificou-se que as principais limitações foram a reduzida fertilidade natural, a suscetibilidade a erosão e as restrições a mecanização ou cultivo, provenientes da elevada declividade, pedregosidade e rochiosidade presentes na área do estudo. Logo, sugere-se a adoção de práticas conservacionistas em conjunto com culturas perenes, tais como plantio em faixas, cultivo consorciado e utilização de plantas como adubação verde junto aos cultivos.

Ainda sobre o estudo dos perfis do solo, constatou-se que os cultivos de banana, cacau e café diminuíram o estoque de carbono, e aumentaram o estoque de N no solo, quando comparados à cobertura de floresta secundária.

Para os teores de C, foi verificado aumento na camada superficial. Já, para os valores de N, foi observado maiores valores nas camadas subsuperficiais.

Os sinais isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foram eficazes em separar o cultivo de cacau do cultivo de banana; demonstrar baixo efeito da mudança do uso das terras ao longo dos anos de produção; e identificar as áreas com maior grau de mineralização da MOS.

O maior aporte de resíduos vegetais adicionados à superfície foi verificado nas coberturas de banana e floresta secundária. Na “camada arável” foi observado maiores níveis de fertilidade e teores de C, N e P total nos cultivos de banana e cacau. A MOL foi o indicador mais eficiente na avaliação da distribuição e quantificação do componente orgânico.

As respostas dos teores de C, N, P e a sua estequiometria aos diferentes cultivos agrícolas e coberturas vegetais têm aplicações significativas para melhorar as estratégias do desenvolvimento sustentável do manejo do solo. Reforçando a teoria da utilização de práticas e sistemas conservacionistas, exemplificando as agroflorestais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na região de estudo se constatou que o material de origem do solo, apresenta uma baixa fertilidade natural, devido a natureza do material de origem, predominantemente rochas de caráter ácido ou sedimentos produzidos a partir do intemperismo dessas. Esse fator torna necessário a emprego de fertilizantes, que devem ser manejados evitando a perda por escoamento superficial. Adicionalmente declividade e pedregosidade são outros fatores que limitam o manejo agrícola, e a adoção de culturas anuais. Devido às restrições à mecanização, devem ser adotadas práticas de manejo como: terraceamento, quando as condições de relevo permitirem, para conter o escoamento superficial, e para a incorporação de corretivos e fertilizantes, garantindo dessa forma o melhor desenvolvimento de raízes e parte aérea das culturas, favorecendo um maior ancoramento dos vegetais ao solo e uma maior cobertura e consequentemente diminuição do processo erosivo.

Culturas perenes como café, banana e cacau, entre outras, podem ser implantadas, desde que sejam adotadas práticas de manejo conservacionistas, sendo uma boa alternativa para o uso da terras nas regiões montanhosas do sudeste do Brasil.

Sugere-se que os cultivos em áreas de montanha, quando realizados, sejam realizados em consórcios e com o emprego de plantas de cobertura nas entre linhas, em prol do ciclo sustentável e equilíbrio estequiométrico dos nutrientes do solo. Os resultados auxiliam na compreensão dos ciclos biogeoquímico dos nutrientes entre a serapilheira e os compartimentos da matéria orgânica do solo.

Dentre as práticas conservacionistas recomendadas para culturas perenes em ambientes declivosos, preconiza-se aquelas que vão garantir a cobertura do solo de maneira mais eficiente. O plantio em faixas, ou curva de nível, a utilização de culturas anuais nas entrelinhas durante o estabelecimento das culturas perenes, plantas de cobertura, ou adubação verde nas entrelinhas, e a adoção de sistemas agroflorestais, são alternativas para promover diversificação produtiva, e garantir que o solo fique protegido por uma cobertura vegetal variada, evitando erosão e perda de água por evaporação. E, de maneira complementar, a escolha de variedades adaptadas localmente, que permitam plantio adensado, também deve ser observada, para garantir o melhor aproveitamento da área e maior cobertura do solo.

Adicionalmente destaca-se também a manutenção de fragmentos florestais, e a ampliação desses, garantindo que outros serviços ecossistêmicos venham a ser realizados nesses ambientes, com destaque para a ciclagem de nutrientes, manutenção do ciclo hidrológico, sequestro de carbono e preservação da biodiversidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ASSIS, R. D.; ANTONIO, G.; AQUINO, A. D. Ambientes de montanha: experiência de desenvolvimento endógeno e agricultura na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Cultura Científica**, 17, 10-17, 2019.

AUN, N. J.; ASSIS, R. L. Redes rurais e agricultura orgânica: estratégia para o desenvolvimento territorial endógeno em ambientes de montanha. **Boletín de Estudios Geográficos, Mendoza**, v. 113, p. 91-109, 2020. Disponível em: <http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/beg/article/view/3864/2800>. Acesso em: 30 mai. 2023.

AZEVEDO, J. C.; CADAVEZ, V.; ARROBAS, M.; PIRES, J. M. Sustentabilidade da montanha portuguesa: realidades. In: AZEVEDO, J. C.; CADAVEZ, V.; ARROBAS, M.; PIRES, J. M. (eds) **Sustentabilidade da montanha portuguesa: realidades e desafios**. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, pp 9-38. <http://hdl.handle.net/10198/15034>. 2016.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 565-573. 2006.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DE MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233. 2015.

DIÁRIO DE PETRÓPOLIS. **Mountains 2018 vai debater o desenvolvimento sustentável em ambientes de montanha**. Diário de Petrópolis, 05 de dezembro de 2018. Ed. 1486. Disponível em: <https://www.diariodepetropolis.com.br/integra/mountains-2018-vai-debater-o-desenvolvimento-sustentavel-em-ambientes-de-montanha-159202>. 2018. Acesso em: 14 de março de 2023.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (eds). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 35, p. 3-22. 1994.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds). **Methods for assesing soil quality**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 49, p. 25-37, 1996.

EES. Estado do Espírito Santo – Ex-colônia Santa Leopoldina. **Memorial da medição e demarcação de um lote colonial concedido a Zandoná Giuseppe, nas margens esquerda do Rio Piraquê-Açu, ex-Colônia de Santa Leopoldina. Fundo Agricultura**. Série Memoriais de Terras (MT). Caixa 16. 6p. 1892.

EMBRAPA. **Oportunidades em ambientes de montanha são foco de Mountains 2018**. Embrapa 50 anos, 27 de dezembro de 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/40328676/oportunidades-em-ambientes-de-montanha-sao-foco-de-mountains-2018>. 2018. Acesso em: 14 de março de 2023.

FAO. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **Dia Internacional da Montanha**. FAO. <http://www.fao.org/3/CA2244ES/ca2244es.pdf>. 2018.

FONSECA, F.; FIGUEIREDO, T.; NOGUEIRA, C.; QUEIRÓS, A. Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area. **Geoderma**, vol. 307, p. 172-180. 2017.

FONSECA, F.; SILVA, D.; BUENO, P.; HERNÁNDEZ, Z.; ROYER, A. C.; FIGUEIREDO, T. Temporal dynamics of carbon storage in mountains shrub areas managed by prescribed fire. **Catena**, vol. 212, art. 106107. 2022.

GOMES, M. F.; FERREIRA, L. J. Políticas públicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável. **Direito e Desenvolvimento**, v. 9, n. 2, p. 155-178. 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário Estatístico do Brasil 2011**, Rio de Janeiro, v. 71, p. 1-1 – 8-74. 2011.

KIPPER, A. L.; FIGUEIREDO T.; ROYER A. C.; NÓVOA-MUÑOZ, J. C.; MÉNDEZ-LÓPEZ, M.; FONSECA, F. Erosão do Solo em Áreas de Matos de Montanha: Efeito Do Fogo Controlado. **Revista de Ciências Agrárias** 45.4: 821-30. 2022.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOEDD, W. B.; GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, pp. 194-200. 2013.

LÓPEZ NETTO, A. **Políticas públicas para o desenvolvimento rural sustentável em ambientes de montanha no Brasil e na Argentina**. Seropédica, Tese, UFRRJ: 23-27. 2013.

LÓPEZ NETTO, A.; AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. **Agricultura de montanha: uma prioridade latente na agenda da pesquisa brasileira**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, v. 41, p. 15-16. 2011.

MAOP. Ministério da Agricultura e Obras Públicas. **Relação dos imigrantes compreendidos na autorização de rendas de lotes no núcleo colonial Accioli de Vasconcelos**. APEES - Arquivo público do Estado do Espírito Santo - Fundo Agricultura - Série Navegação e Povoamento – Dossiê nº 56. 1p. 1981.

MARTINELLI, G. Mountain biodiversity in Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 4, p. 587-597, 2007.

MURPHY, C. A.; FOSTER, B. L.; RAMSPOTT, M. E.; PRICE, K. P. Effects of cultivation history and current grassland management on soil quality in northeastern Kansas. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 61, p. 75-89, 2006.

NETTO, A. L.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. Ações públicas para o desenvolvimento rural sustentável dos ambientes de montanha brasileiros. **Desenvolvimento em Questão**, v. 15, n. 39, p. 141-170, 2017.

NETTO, L. A. **Políticas públicas para o desenvolvimento rural sustentável em ambientes de montanha no Brasil e na Argentina.** Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação Pecuária) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2013.

ONU. Organização das Nações Unidas. Anónimo. **Desarrollo sostenible de las regiones montañosas.** Disponível em: www.yachaywasi-ngo.org/SG_MTN11s.pdf. 2018. Acesso em: 22 de julho de 2018.

TEIXEIRA, P. C.; MISRA, R. K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. **Catena**. v.30, p. 199-134. 1997.

TOVAR, C.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Y.; DUIVENVOORDEN, J. F. Landscape and Urban Planning Monitoring land use and land cover change in mountain regions : An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. **Landscape and Urban Planning**, 112, 40-49. 2013.

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, vol. 137, p. 256-268. 2016.

9. ANEXOS

8.1. Descrição, Caracterização Morfológica, Física e Química e Classificação dos Solos

PERFIL: P1 (Figura 12 e Tabela 18)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 04/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Café Rep 01

PEDREGOSIDADE: Ligeiramente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Forte Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0–10 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 3/4, úmido), bruno (10YR 5/3, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, pequena e média, moderada e fraca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AB 10–19 cm, bruno (10YR 4/3, úmido), bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, pequena e média, moderada e fraca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- BA 19–32 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e grande, moderada; dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Bi1 32–55 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, média e grande, moderada; dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Bi2 55–100 cm⁺, bruno-forte (7,5YR 5/6); argila; blocos angulares, média e grande, moderada; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Comuns finas nos horizontes 01, 02 e 03 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 12. Perfil coletado na primeira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 18. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹							cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–10	526	135	338	22,93	5,74	4,20	-1,54	2,75	1,50
AB	10–19	509	167	324	16,85	6,10	4,17	-1,93	1,45	1,20
BA	19–32	454	155	391	9,39	5,55	4,12	-1,43	1,45	0,95
Bi1	32–55	427	111	462	9,67	5,60	4,17	-1,43	0,95	1,25
Bi2	55–100 ⁺	429	91	480	7,18	5,42	4,33	-1,09	1,15	1,15
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–10	0,25	4,13	0,08	0,24	4,57	8,69	53	95	5,33
AB	10–19	0,40	4,13	0,06	0,17	2,89	7,01	41	67	0,67
BA	19–32	0,75	2,97	0,07	0,11	2,58	5,55	47	43	0,67
Bi1	32–55	1,00	3,30	0,09	0,22	2,51	5,81	43	86	0,67
Bi2	55–100 ⁺	0,40	3,14	0,11	0,10	2,51	5,64	44	38	1,76

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P2 (Figura 13 e Tabela 19)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 04/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Cacau Rep 01

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa
RELEVO LOCAL: Ondulado
RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.
EROSÃO: Não aparente
DRENAGEM: Bem drenado
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0–6 cm, bruno (7,5YR 4/3, úmido), bruno (7,5YR 5/3, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, forte; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AB 06–14 cm, bruno (7,5YR 4/4, úmido), bruno (7,5YR 5/3, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, pequena e média, forte; dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- BA 14–21 cm, bruno (7,5YR 5/4, úmido), bruno-forte (7,5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e difusa.
- Bi1 21–35 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6); franco-argilo-arenosa; argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, forte; dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e difusa.
- Bi2 35–100 cm⁺, bruno-amarelado-claro (10YR 6/4); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, não-plástica, ligeiramente pegajosa.
- RAÍZES: Comuns finas nos horizontes 01 e 02; ausentes nos demais horizontes.



Figura 13. Perfil coletado na primeira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 19. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³
Ap	00–06	556	146	298	46,14	5,93	4,72	-1,21	2,75	2,95
AB	06–14	512	177	310	20,44	5,79	4,14	-1,65	1,40	2,20
BA	14–21	502	113	385	14,92	5,16	4,02	-1,14	0,60	1,25
Bi1	21–35	489	101	410	6,08	6,02	3,93	-2,09	0,40	0,50
Bi2	35–100 ⁺	547	142	311	10,77	5,71	3,88	-1,83	0,40	0,60
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
				cmol _c dm ⁻³				%	mg dm ⁻³	
Ap	00–06	0,00	3,96	0,08	0,25	6,03	9,99	60	97	4,02
AB	06–14	0,45	3,96	0,06	0,12	3,78	7,74	49	45	1,91
BA	14–21	1,25	5,12	0,06	0,12	2,03	7,14	28	46	3,00
Bi1	21–35	1,75	4,13	0,04	0,10	1,05	5,17	20	40	0,96
Bi2	35–100 ⁺	1,50	4,13	0,07	0,18	1,26	5,38	23	72	1,25

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação de bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P3 (Figura 14 e Tabela 20)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 04/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Ditrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Cacau Rep 03

PEDREGOSIDADE: Ligeiramente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0–8 cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmido), bruno (7.5YR 4/3, seco); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, forte; dura, firme, não-plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AB 08–16 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- BA 16–27 cm, bruno-forte (7.5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, grande e média, moderada; dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Bi1 27–49 cm, bruno-forte (7.5YR 5/8); argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, grande e média, fraca; ligeiramente dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Bi2 49–100 cm⁺, amarelo-avermelhado (7.5YR 6/8); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.
- RAÍZES: Comuns grossas nos horizontes 01 e 02 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 14. Perfil coletado na terceira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 20. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹				H ₂ O	KCl		cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–08	618	23	359	29,28	6,61	5,95	-0,66	4,60	3,55
AB	08–16	593	10	398	19,06	6,32	4,83	-1,49	2,00	1,95
BA	16–27	540	42	418	8,84	5,60	3,92	-1,68	0,70	0,85
Bi1	27–49	483	81	437	10,50	5,05	4,00	-1,05	0,45	0,35
Bi2	49–100 ⁺	500	54	446	6,08	5,83	4,07	-1,76	0,40	0,30
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–08	0,00	1,32	0,05	1,37	9,57	10,89	88	537	7,73
AB	08–16	0,00	2,15	0,04	0,96	4,96	7,10	70	377	5,62
BA	16–27	1,00	3,30	0,03	0,52	2,10	5,40	39	202	6,35
Bi1	27–49	1,25	4,29	0,03	0,13	0,96	5,25	18	52	1,55
Bi2	49–100 ⁺	0,85	3,47	0,06	0,10	0,86	4,33	20	39	3,87

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P4 (Figura 15 e Tabela 21)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 04/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Café Rep 02

PEDREGOSIDADE: Ligeiramente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa
RELEVO LOCAL: Ondulado
RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.
EROSÃO: Não aparente
DRENAGEM: Bem drenado
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–10 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 3/4, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Ap
- 10–16 cm, bruno (7,5YR 4/4, úmido), bruno (7,5YR 5/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AB
- 16–30 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, fraca; ligeiramente dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BA
- 30–100 cm⁺, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e média, fraca; ligeiramente dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa.
- Bi
- RAÍZES: Comuns finas nos horizontes 01 e 02 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 15. Perfil coletado na segunda área de cultivo de café no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 21. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹				H ₂ O	KCl		cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–10	581	100	319	23,76	6,27	5,63	-0,64	4,40	1,45
AB	10–16	596	95	309	15,47	6,40	5,10	-1,30	2,90	1,15
BA	16–30	500	96	404	15,47	5,62	4,22	-1,40	1,85	0,70
Bi	30–100 ⁺	480	92	429	11,33	5,21	4,00	-1,21	0,95	0,50
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–10	0,00	2,15	0,07	0,17	6,08	8,23	74	65	4,60
AB	10–16	0,00	1,82	0,08	0,33	4,46	6,28	71	130	0,31
BA	16–30	0,15	2,64	0,06	0,09	2,69	5,33	51	35	1,18
Bi	30–100 ⁺	0,75	2,48	0,06	0,13	1,64	4,12	40	52	0,74

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P5 (Figura 16 e Tabela 22)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 05/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Mata Rep 03

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado.

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–8 cm, bruno-forte (7,5YR 3/4, úmido), bruno (7,5YR 4/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e muito pequena, forte; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Ap1 08–18 cm, bruno (7,5YR 3/4, úmido), bruno (7,5YR 4/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e muito pequena, forte; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Ap2 18–30 cm, bruno-avermelhado (5YR 5/4, seco); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena e muito pequena, moderada; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- AB 30–55 cm, vermelho-amarelado (5YR 5/6); argila; blocos angulares, pequena e média, moderada; ligeiramente dura, firme, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- BA 55–80 cm, amarelo-avermelhado (5YR 6/6); argila; blocos angulares, pequena e média, fraca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- Bi1 80–100 cm⁺, amarelo-avermelhado (5YR 6/6); argila; blocos angulares, pequena e média, fraca; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.
- Bi2
- RAÍZES: Comuns grossas e finas em todos os horizontes.



Figura 16. Perfil coletado na terceira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 22. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³
Ap1	00–08	642	88	269	30,67	4,55	3,85	-0,70	0,70	0,60
Ap2	08–18	539	131	330	25,97	5,40	3,92	-1,48	0,35	0,60
AB	18–30	489	119	392	19,06	4,96	4,03	-0,93	0,35	0,25
BA	30–55	423	82	495	17,41	4,92	4,17	-0,75	0,20	0,15
Bi1	55–80	358	102	540	9,39	5,63	4,21	-1,42	0,15	0,15
Bi2	80–100 ⁺	371	125	504	10,77	5,65	4,31	-1,34	0,00	0,25
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap1	00–08	0,65	4,95	0,06	0,14	1,51	6,46	23	55	3,95
Ap2	08–18	1,00	4,79	0,08	0,27	1,30	6,08	21	107	3,51
AB	18–30	0,90	4,46	0,09	0,14	0,82	5,28	16	53	2,42
BA	30–55	0,90	3,47	0,06	0,06	0,48	3,94	12	25	1,04
Bi1	55–80	0,75	2,97	0,07	0,04	0,41	3,38	12	16	1,25
Bi2	80–100 ⁺	0,60	2,15	0,08	0,04	0,37	2,51	15	14	0,38

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P6 (Figura 17 e Tabela 23)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 05/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Mata Rep 02

PEDREGOSIDADE: Pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Forte ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Ap 0–10 cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmido), bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, forte; dura, firme, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

AB 10–23 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, moderada; ligeiramente dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

BA 23–36 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, forte; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.

Bi1 36–100 cm⁺, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4); argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, moderada; dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Comuns grossas e finas em todos os horizontes.



Figura 17. Perfil coletado na segunda área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 23. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹				H ₂ O	KCl		cmolc dm ⁻³	
Ap	00–10	606	95	299	35,64	4,99	4,49	-0,50	2,80	2,25
AB	10–23	499	95	406	18,79	4,73	4,06	-0,67	0,45	0,65
BA	23–36	626	79	295	23,48	5,11	4,06	-1,05	0,45	0,85
Bi1	36–100 ⁺	506	103	391	19,34	5,51	4,08	-1,43	0,35	0,75
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmolc dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–10	0,15	5,12	0,06	0,89	6,00	11,12	54	346	5,04
AB	10–23	1,25	4,62	0,05	0,36	1,51	6,13	25	140	0,45
BA	23–36	0,85	5,12	0,04	0,28	1,62	6,73	24	109	2,78
Bi1	36–100 ⁺	1,10	4,79	0,05	0,26	1,41	6,20	23	103	0,96

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P7 (Figura 18 e Tabela 24)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 05/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Mata Rep 01

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Forte ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–10 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmido), bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- Ap 10–27 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, úmido), amarelo-brunado (10YR 6/6, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, forte; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- AB 27–53 cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, moderada; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e difusa.
- BA 53–100 cm⁺, bruno-amarelado (10YR 5/4); argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, forte; muito dura, muito firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.
- Bi
- RAÍZES: Comuns grossas e finas em todos os horizontes.



Figura 18. Perfil coletado na primeira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 24. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de vegetação de Mata atlântica no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³
Ap	00–10	548	117	335	39,78	4,77	4,33	-0,44	3,95	1,85
AB	10–27	505	155	340	20,44	4,78	4,00	-0,78	1,05	1,15
BA	27–53	585	140	275	13,54	5,47	3,98	-1,49	0,15	0,45
Bi	53–100 ⁺	445	132	423	14,64	5,31	3,78	-1,53	0,00	0,40
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–10	0,15	4,46	0,08	0,76	6,64	11,09	60	298	4,02
AB	10–27	0,80	3,47	0,06	0,76	3,02	6,49	47	296	2,05
BA	27–53	1,35	2,48	0,06	0,30	0,96	3,43	28	119	2,13
Bi	53–100 ⁺	2,25	3,96	0,08	0,11	0,59	4,55	13	44	0,96

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P8 (Figura 19 e Tabela 25)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 05/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Ditrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Banana Rep 01

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–10 cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); franco-argilo-arenosa; Ap blocos angulares, grande e média, forte; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- 10–24 cm, bruno (10YR 4/3, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos AB angulares, média e grande, forte; dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- 24–40 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e BA pequena, forte; muito dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- 40–60 cm, bruno-amarelado-claro (10YR 6/4); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, média e Bi1 pequena, forte; dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- 60–100 cm⁺, amarelo-brunado (10YR 6/6); argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, Bi2 moderada; muito dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa.
- RAÍZES: Comuns grossas nos horizontes 01 e 02 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 19. Perfil coletado na primeira área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 25. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na primeira área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹				H ₂ O	KCl		cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–10	600	178	222	27,63	6,23	5,45	-0,78	5,50	2,35
AB	10–24	558	217	225	14,37	6,47	5,53	-0,94	4,25	1,65
BA	24–40	606	191	202	13,26	6,33	5,00	-1,33	3,25	1,25
Bi1	40–60	567	153	280	10,77	5,34	3,98	-1,36	1,40	0,65
Bi2	60–100 ⁺	477	155	367	6,08	5,48	4,05	-1,43	1,30	0,55

Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³					%	mg dm ⁻³		
Ap	00–10	0,00	1,65	0,03	0,60	8,48	10,13	84	235	4,67
AB	10–24	0,00	1,32	0,05	0,32	6,27	7,59	83	124	3,00
BA	24–40	0,00	1,82	0,06	0,16	4,72	6,54	72	62	2,35
Bi1	40–60	0,90	2,64	0,06	0,11	2,21	4,85	46	42	3,80
Bi2	60–100 ⁺	1,00	2,81	0,09	0,10	2,04	4,84	42	39	2,20

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P9 (Figura 20 e Tabela 26)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 06/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Café Rep 03

PEDREGOSIDADE: Ligeiramente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Forte ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–05 cm, bruno (7,5YR 4/4, úmido), bruno-forte (7,5YR 5/6, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, pequena, fraca; ligeiramente dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e abrupta.
- Ap
- 05–13 cm, bruno-forte (7,5YR 4/6, úmido), bruno-forte (7,5YR 5/6, seco); argilo-arenosa; blocos angulares e subangulares, pequena, fraca; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- AB
- 13–28 cm, bruno-forte (7,5YR 4/6, úmido), bruno-forte (7,5YR 5/6, seco); argilo-arenosa; blocos angulares, média e pequena, forte; dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BA
- 28–53 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, pequena, fraca; ligeiramente dura, friável, muito plástica, pegajosa; transição plana e gradual.
- Bi1
- 53–100 cm⁺, bruno-amarelado (10YR 5/8); argila; blocos angulares, pequena, fraca; ligeiramente dura, muito friável, muito plástica, ligeiramente pegajosa.
- Bi2
- RAÍZES: Comuns finas no horizonte 01 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 20. Perfil coletado na terceira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 26. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de café no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³
Ap	00–05	566	144	291	19,62	7,41	6,71	-0,70	5,60	1,20
AB	05–13	512	115	373	22,38	6,16	5,20	-0,96	3,60	1,05
BA	13–28	453	122	425	14,92	5,50	4,27	-1,23	0,85	0,55
Bi1	28–53	472	90	438	14,64	5,37	4,11	-1,26	0,25	0,25
Bi2	53–100 ⁺	415	85	500	13,54	5,00	4,09	-0,91	0,00	0,20

Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–05	0,00	0,83	0,04	0,24	7,08	7,90	90	94	8,90
AB	05–13	0,00	2,48	0,02	0,18	4,86	7,33	66	72	2,49
BA	13–28	0,50	3,63	0,03	0,07	1,51	5,14	29	29	0,82
Bi1	28–53	1,10	4,13	0,03	0,05	0,58	4,70	12	20	0,74
Bi2	53–100 ⁺	1,25	4,13	0,03	0,04	0,26	4,39	6	14	1,40

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P10 (Figura 21 e Tabela 27)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 06/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Banana Rep 03

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–11 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), bruno (10YR 5/3, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- 11–23 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), bruno (10YR 5/3, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; dura, friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- 23–35 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, forte; dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- 35–100 cm⁺, bruno-amarelado (10YR 5/8); franco-argilo-siltosa; blocos angulares, grande e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Comuns grossas nos horizontes 01 e 02 e ausentes nos demais horizontes.

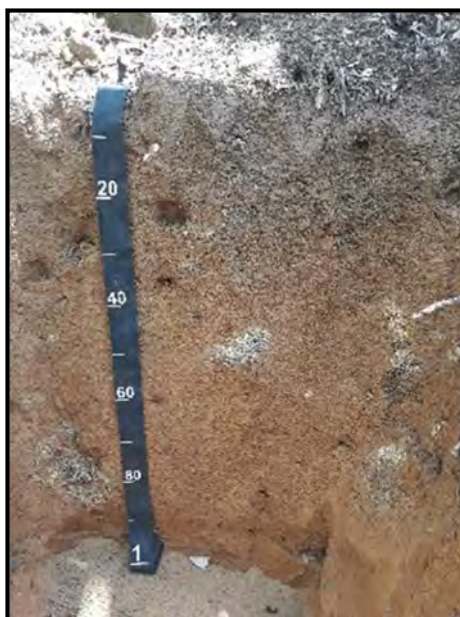


Figura 21. Perfil coletado na terceira área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 27. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na terceira área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹				H ₂ O	KCl		cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–11	648	142	210	22,38	5,34	4,24	-1,10	2,40	1,30
AB	11–23	584	170	246	17,13	5,54	4,15	-1,39	2,40	1,45
BA	23–35	646	100	254	7,46	6,04	4,05	-1,99	0,65	0,40
Bi	35–100 ⁺	206	407	387	6,63	5,69	4,06	-1,63	0,50	0,60
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–11	0,35	3,96	0,04	0,20	3,94	7,90	50	78	2,42
AB	11–23	0,75	3,63	0,05	0,19	4,09	7,72	53	74	2,93
BA	23–35	1,50	3,30	0,03	0,06	1,14	4,44	26	24	2,93
Bi	35–100 ⁺	1,60	2,97	0,04	0,07	1,20	4,17	29	27	0,38

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

PERFIL: P11 (Figura 22 e Tabela 28)

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 06/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: ARGISSOLO AMARELO Distrófico cambissólico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Banana Rep 02

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–12 cm, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido), bruno (10YR 5/3, seco); franco-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Ap 12–24 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 3/6, úmido), bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, forte; dura, firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BA 24–42 cm, bruno-forte (7.5YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Bt1 42–100 cm⁺, bruno-forte (7.5 YR 5/6); argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.
- Bt2
- RAÍZES: Comuns finas no horizonte 01e ausentes nos demais horizontes.



Figura 22. Perfil coletado na segunda área de cultivo de banana no município de Ibiraçu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 28. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de banana no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹							cmolc dm ⁻³	
Ap	00–12	656	167	177	23,76	6,38	5,56	-0,82	4,20	2,35
BA	12–24	466	190	345	14,37	5,87	4,69	-1,18	3,05	1,90
Bt1	24–42	453	96	451	11,88	5,88	4,19	-1,69	1,55	1,30
Bt2	42–100+	441	105	454	6,35	5,94	4,17	-1,77	1,10	1,05
Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na+	K+	S	T	V	K+	P
		cmolc dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–12	0,00	1,49	0,05	0,36	6,96	8,44	82	141	14,50
BA	12–24	0,25	2,97	0,06	0,14	5,15	8,12	63	55	0,74
Bt1	24–42	0,60	2,97	0,06	0,09	3,00	5,97	50	34	0,38
Bt2	42–100+	0,85	2,64	0,07	0,22	2,44	5,08	48	84	0,74

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na+: Sódio trocável; K+: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e P: Fósforo disponível.

DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL

DATA: 06/12/2020

CLASSIFICAÇÃO SiBCS: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS:

USO ATUAL: Cacau Rep 02

PEDREGOSIDADE: Moderadamente pedregosa

ROCHOSIDADE: Moderadamente rochosa

RELEVO LOCAL: Ondulado

RELEVO REGIONAL: Forte ondulado

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Ombrófila Densa

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- 0–09 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena, forte; dura, firme, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- AB 09–17 cm, bruno (10YR 4/3, úmido), bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, pequena, forte; dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- BA 17–30 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, forte; dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa; transição ondulada e gradual.
- Bi 30–100 cm[†], bruno-amarelado-claro (10YR 6/4); franco-argilo-arenosa; blocos angulares, grande e média, moderada; dura, muito friável, plástica, ligeiramente pegajosa.

RAÍZES: Comuns finas nos horizontes 01 e 02 e ausentes nos demais horizontes.



Figura 23. Perfil coletado na segunda área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Tabela 29. Caracterização física e química das amostras de terra do perfil coletado na segunda área de cultivo de cacau no município de Ibirapu (ES), região Sudeste do Brasil.

Amostra	Prof. cm	Areia	Silte	Argila	COT	pH H ₂ O	pH KCl	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		g kg ⁻¹							cmol _c dm ⁻³	
Ap	00–09	597	167	236	26,80	6,72	6,02	-0,70	4,30	4,10
AB	09–17	564	177	259	15,19	6,46	5,15	-1,31	3,45	1,90
BA	17–30	552	148	300	10,50	5,47	4,06	-1,41	1,70	0,90
Bi	30–100 ⁺	610	146	244	5,80	6,20	4,47	-1,73	1,30	1,25

Amostra	Prof. cm	Al ³⁺	H+Al	Na ⁺	K ⁺	S	T	V	K ⁺	P
		cmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³	
Ap	00–09	0,00	1,82	0,12	2,14	10,66	12,47	85	837	3,00
AB	09–17	0,15	1,98	0,06	2,07	7,48	9,46	79	811	0,74
BA	17–30	0,90	2,15	0,05	0,26	2,90	5,05	58	100	0,53
Bi	30–100 ⁺	0,45	1,82	0,08	0,10	2,72	4,54	60	38	3,00

COT: Carbono orgânico total; pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases e e P: Fósforo disponível.