



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

KALLIL CHAVES CASTRO

**CICLAGEM DE NUTRIENTES EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS EM TRECHO DE FLORESTA OMBRÓFILA DENSA**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

KALLIL CHAVES CASTRO

**CICLAGEM DE NUTRIENTES EM DIFERENTES CONDIÇÕES
EDAFOCLIMÁTICAS EM TRECHO DE FLORESTA OMBRÓFILA DENSA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Ciências Florestais.

Orientador: Prof. D.Sc. Marcos Vinicius W.
Caldeira

Coorientadores: Prof. D.Sc. Eduardo de Sá
Mendonça

Prof. D.Sc. José Eduardo
Macedo Pezzopane

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C719c Castro, Kallil Chaves, 1988-
Ciclagem de nutrientes em diferentes condições edafoclimáticas em
trecho de Floresta Ombrófila Densa. – 2018.
165 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Winckler Caldeira.
Coorientadores: Eduardo de Sá Mendonça ; José Eduardo Macedo
Pezzopane.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Biomassa florestal. 2. Biodegradação. 3. Carbono. 4. Solos -
Classificação. 5. Solos florestais. 6. Microorganismos do solo. I. Caldeira,
Marcos Vinícius Winckler. II. Mendonça, Eduardo de Sá. III. Pezzopane,
José Eduardo Macedo. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

**CICLAGEM DE NUTRIENTES EM DIFERENTES CONDIÇÕES EDAFOCLÍMICAS
EM TRECHO DE FLORESTA OMBRÓFILA DENSA**

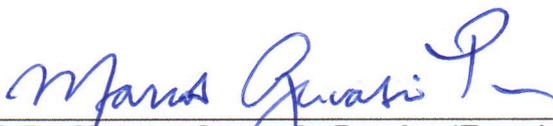
Kallil Chaves Castro

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 22 de agosto de 2018.



Dr. Tiago de Oliveira Godinho (Examinador externo)
INCAPER



Prof. Dr. Marcos Gervasio Pereira (Examinador externo)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Diego Lang Burak (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Henrique Machado Dias (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família. Ao meu pai, Adilson, por me mostrar sempre o exemplo a ser seguido. A minha mãe, Edma, exemplo de amor e dedicação à família. A minha irmã Karen, pelo apoio e suporte, sempre presente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o meu refúgio nas horas de incerteza, a minha inspiração e força.

Agradeço a minha família, pela compreensão, pelos ensinamentos, pelo apoio incondicional, e pelo incentivo a seguir sempre em frente de cabeça erguida, sendo sempre uma pessoa melhor.

Agradeço ao Prof. D.Sc. Marcos Vinicius Winckler Caldeira pela orientação, pelas palavras e conselhos e pelo suporte para levar a pesquisa sempre adiante.

Agradeço aos meus coorientadores, os professores D.Sc. Eduardo de Sá Mendonça, e o D.Sc. José Eduardo Macedo Pezzopane, pelos auxílios nas horas certas e comprometimento com a pesquisa. Agradeço também aos professores Adriano Ribeiro de Mendonça e Adair José Regazzi principalmente pelo interesse em ajudar mesmo não sendo responsáveis pelo trabalho.

Agradeço aos funcionários do DCFM, em especial aos técnicos Alexandro, Damieli, Luciano, e Lenita, pois foram fundamentais no andamento das análises.

Em especial gostaria de fazer um agradecimento a todos do NUPEMASE, pois são tanto amigos quanto companheiros de trabalho e pesquisa, apoiando e perturbando uns aos outros, mas sempre com bom humor e tranquilidade.

Agradeço em memória de Letícia Célia Heitor, por ser companheira, por compartilhar o mesmo sonho e, mesmo por um breve ter sido parte desse trabalho e da vida de tantas pessoas como eu.

Agradeço ao Parque Nacional do Caparaó, na pessoa do Waldomiro por permitir que a pesquisa fosse realizada na área do parque, e nos auxiliando sempre que preciso.

Agradeço ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira o qual forneceu a estrutura e o local para a elaboração da pesquisa, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pela oportunidade de realização do Mestrado, e a FAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos vocês, muito obrigado!

*“Nosso mundo é um lugar desconcertante.
Queremos extrair um sentido do que
vemos à nossa volta e perguntar:
Qual a natureza do universo?
Qual é nosso lugar nele e de onde ele e nós viemos?
Por que ele é do jeito que é?”*

Stephen Hawking

RESUMO GERAL

CASTRO, Kallil Chaves. Ciclagem de nutrientes em diferentes condições edafoclimáticas em trecho de Floresta Ombrófila Densa. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. D.Sc. Marcos Vinicius Winckler Caldeira. Coorientadores: Prof. D.Sc. Eduardo de Sá Mendonça, Prof. D.Sc. José Eduardo Macedo Pezzopane.

Em geral, o solo recebe diversas influências durante o processo de intemperismo: clima, organismos, relevo e material de origem, que ao longo do tempo constituem fatores marcantes na formação. Sua interação com a vegetação e com o clima, e como esses fatores contribuem para a ciclagem de nutrientes dão margem para pesquisas ainda mais elucidativas. Desta forma, este trabalho teve como objetivos investigar a formação dos solos, a dinâmica da ciclagem de nutrientes e a relação no sistema solo planta, por meio da atividade microbiana. O estudo foi realizado em um trecho de Floresta Ombrófila Densa Montada localizada no Parque Nacional do Caparaó, ES. Para a classificação dos solos, foi realizada abertura de trincheiras em sete parcelas implantadas na área de estudos, e para cada trincheira foram realizadas análises morfológicas, físicas e químicas, com descrição dos perfis e posterior classificação dos mesmos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Também foi estudada a atividade microbiológica na camada superficial dos solos, por meio da atividade enzimática (Urease, β -glucosidade e da Fosfatase), da biomassa microbiana, e dos teores de carbono e nitrogênio total da camada superficial dos solos. O estudo da ciclagem de nutrientes foi feito via serapilheira e decomposição foliar. A coleta de serapilheira foi realizada mensalmente entre janeiro de 2013 e dezembro de 2016 e a serapilheira depositada foi separada em fração folhas e fração outros materiais. As frações da serapilheira depositada e a serapilheira acumulada foram levadas a laboratório e as análises químicas de macronutrientes e de fibras em detergente ácido foram realizadas por estação. A serapilheira e a constante de decomposição foram correlacionadas com os dados ambientais para a área de estudos. Foram classificados seis tipos de solos diferentes, distribuídos em três classes distintas: Latossolos, Cambissolos e Organossolos. Os solos foram em sua maioria pouco profundos, de baixa fertilidade e com elevado teor de Matéria Orgânica. A produção de serapilheira se mostrou

semelhante ao logo dos quatro anos de estudos, porém, o acúmulo de serapilheira reduziu a partir do segundo ano. Houve redução do aporte das frações durante o outono e o inverno, e não existiu diferença sazonal para o acúmulo de biomassa. Em relação aos teores de C, N e P, os mesmos não tem uma sazonalidade marcantes para a fração folhas e a fração outros materiais. Maiores teores de P foram observados para a fração outros materiais. O teor de C variou na serapilheira acumulada, principalmente no inverno. O teor de polifenóis totais foram variáveis principalmente na fração folhas e as relações C:N, Polifenóis:N, Lignina:N e Lignina+Celulose:N se mostraram positivamente correlacionadas com a variação altitudinal. A atividade microbiológica nos solos se mostrou sazonal, e influenciada pela alteração altitudinal, se correlacionando fortemente com o carbono e o nitrogênio no verão e no inverno da camada superficial dos solos. Tanto a atividade microbiológica quando os teores de carbono e nitrogênio foram correlacionados principalmente com as características químicas do material vegetal aportado e acumulado na área de estudo, indicando uma relação forte entre a vegetação e a comunidade microbiológica.

Palavras-chave: Classificação dos solos, Serapilheira, Decomposição.

GENERAL ABSTRACT

CASTRO, Kallil Chaves. Nutrient cycling in different edaphoclimatic conditions in Tropical Montane Rain Forest. 2018. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: D.Sc. Marcos Vinicius Winckler Caldeira. Co-advisors: D.Sc. Eduardo de Sá Mendonça, Prof. D.Sc. José Eduardo Macedo Pezzopane.

In general, the soil receives several influences during the processes of weathering: climate, organisms, landscape and material of origin, that over the time are important factors in its formation. Their interaction with vegetation and climate, and how these factors contribute to the nutrients cycling, give scope for even more elucidative research. In this way, this study aimed to investigate soil formation, nutrient cycling dynamics and the relation in the plant-soil system through microbial activity. The study was carried out in a section of Tropical Montane Rain Forest located in the Caparaó National Park, where seven plots were implanted. For the classification of soils, trenches were opened in seven plots implanted in the study area, and morphological, physical and chemical analyzes were performed for each profile and later classified according to the Brazilian Soil Classification System. Microbiological activity in the surface layer of soils was also studied by enzymatic activity (Urease, β -Glucosidase and Phosphatase), microbial biomass, and soil carbon and nitrogen. The study of nutrient cycling was carried out with litterfall and leaf decomposition. The collection and litter were carried out monthly during January 2013 and December 2016. The deposited litter was separated into fraction: Leaves and Other Materials. The deposited litter fractions and the accumulated litter were taken to the laboratory and the chemical analyzes of macronutrients, lignin, cellulose and total polyphenols were performed by season. The litter and the constant and decomposition were correlated with the environmental data. Six different types of soils were classified, distributed in three distinct classes: Latosols, Cambisols and Organosols. The soils were mostly shallow, low fertility and high organic matter content. The production of litter showed to be like the one of the four years of studies, however, the accumulation of litter reduced to the second year. There was a reduction in the contribution of the fractions during autumn and winter, and there was no seasonal difference for the accumulation of biomass. In relation to the contents of C, N, and P, they did not present a marked seasonality for the leaves fraction and the Other

Materials Fraction. Higher P contents were observed for the Other Materials Fraction. The content of C varied in accumulated litter, mainly in winter. The total polyphenols content was mainly in the leaves fraction and the C:N, Polyphenols:N, Lignin:N and Lignin + Cellulose:N ratio were positively correlated with the altitudinal gradient. Microbiological activity in the soils was seasonal and influenced by the altitudinal alteration, correlating strongly with carbon and nitrogen in the summer and winter of the superficial layer of the soils. Both the microbiological activity when the carbon and nitrogen contents were correlated mainly with the chemical characteristics of the plant material deposited and accumulated in the study area, indicating a strong relationship between the vegetation and the microbiological community.

Keywords: Soil Classification, Litter, Decomposition.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Componentes da Produção Primária Líquida (PPL) (a) e da PPL Mensurável (PPL*) (b) de uma floresta, onde a soma de todos os materiais juntos representa: (1) a quantidade de matéria orgânica nova que é fixado pela vegetação em um intervalo; e (2) a quantidade de matéria orgânica que foi produzida e perdida pela vegetação em algum intervalo. 30
- Figura 2 - Limites do Parque Nacional do Caparaó na divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo; delimitação da microbacia, hidrografia, altimetria e distribuição das unidades amostrais na microbacia. 32
- Figura 3 – Precipitação média histórica (1986 – 2016) e do período de estudo (2013 – 2016) para a microbacia do Vale de Santa Marta (Latitude: 20°32'26" S, Longitude: -41:39:56 W; Altitude: 794 m). Barras verticais = desvio padrão. 33
- Figura 4 – Perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó. 48
- Figura 5 – Esquema representativo da variação altitudinal e topográfico das classes de solo identificados para as oito parcelas sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 49
- Figura 6 –Produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e do acúmulo médio de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão. 89
- Figura 7 –Produção mensal média de folhas (A), outros materiais (B) e total (C) da serapilheira depositada e mensal média do acúmulo (D) de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão. 91
- Figura 8 – Biomassa média da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e acúmulo médio para as estações entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão. 92
- Figura 9 – Produção de folhas (A), outros materiais (B) e total (C) da serapilheira depositada entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão. 93
- Figura 10 – Dinâmica do acúmulo médio de serapilheira sobre o solo entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão. 94
- Figura 11 – Massa foliar remanescente em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio-padrão. 104

Figura 12 – Liberação de nutrientes das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 105

Figura 13 – Liberação polifenóis totais e de fibras (lignina e celulose) das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 106

Figura 14 – Relação C:N, lignina:N e celulose:N das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 106

Figura 15 – Presença de densa neblina na Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 109

Figura 16 – Variação sazonal da precipitação e da temperatura (média, máxima, mínima) para a região da área de estudo. 133

Figura 17 – Sazonalidade média da atividade biológica no solo para a camada superficial do solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES. (A) Carbono total do solo; (B) Nitrogênio Total do solo; (C) Carbono da Biomassa Microbiano; (D) Nitrogênio da Biomassa Microbiana; (E) Nitrogênio mineralizável; (F) Atividade da Urease; (G) Atividade da Fosfatase Ácida; (H) Atividade da β – glucosidase; Barras verticais = desvio padrão. 139

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Estimativa da Produção Primária Líquida (PPL) e biomassa vegetal nos principais ecossistemas. 29
- Tabela 2 – Total de precipitação anual e dos dias de chuva para o período de estudos 2013 – 2016 e médias históricas (MH) (1986 – 2016) para a microbacia do Vale de Santa Marta e para o período de estudo (Latitude: 20°32'26" S, Longitude: 41:39:56 W; Altitude: 794 m). 34
- Tabela 3 – Valores médios mensais para a Temperatura média do ar (T_m), Temperatura máxima do ar e Temperatura mínima do ar (T_{min}) para o período de 2013 - 2016 para a região do Vale de Santa Marta (Latitude: 20°27'57" S, Longitude: 41:42:26 W; Altitude: 857 m). 34
- Tabela 4 – Área Basal da vegetação e índice de Cobertura de Copa (ICC), para as parcelas distribuídas no Parque Nacional do Caparaó, ES. 35
- Tabela 5 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 45
- Tabela 6 – Atributos Morfológicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 50
- Tabela 7 – Atributos Físicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 52
- Tabela 8 – Distribuição das frações granulométricas nos horizontes dos solos dos perfis abertos sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 53
- Tabela 9 – Atributos Químicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 54
- Tabela 10 – Teores de Carbono Total (C_{org}) e Nitrogênio Total (NT) do solo ao longo dos horizontes dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 56
- Tabela 11 – Coeficiente de Correlação de Spearman (ρ - rho) com os Atributos Físicos e Químicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 57
- Tabela 12 – Classificação dos perfis de solos sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 62
- Tabela 13 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó. 81
- Tabela 14 – Teste de significância entre as médias anuais de aporte das frações e total e da média de acúmulo da serapilheira entre os anos de 2013 e 2016 em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 90

Tabela 15 – Constante de decomposição anual (k) e meia vida ($t_{50\%}$ e $t_{95\%}$) da biomassa de serapilheira das parcelas entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	94
Tabela 16 – Coeficiente de correlação de Spearman entre a serapilheira depositada (Fração Folhas, Fração Outros Materiais e o Total depositado), a serapilheira acumulada, a constante de decomposição (k) da biomassa de serapilheira e as variáveis ambientais e da fitofisionomia para o período de estudos.	95
Tabela 17 – Variação sazonal do teor médio de carbono das frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	96
Tabela 18 – Variação sazonal do teor médio de nitrogênio das frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	97
Tabela 19 – Variação sazonal do teor médio de Fósforo das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. (A) Verão, (B) outono, (C) inverno, e (D) Primavera; Barras na vertical representam o desvio-padrão.	98
Tabela 20 – Variação sazonal do teor médio de Polifenóis Totais das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	99
Tabela 21 – Variação sazonal do teor médio de lignina das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	100
Tabela 22 – Variação sazonal do teor médio de celulose das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	100
Tabela 23 – Variação sazonal da relação C:N das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	102
Tabela 24 – Variação sazonal da relação Lignina:N das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	103
Tabela 25 – Massa remanescente, constante de decomposição e meia vida das folhas dos litterbags em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.	105
Tabela 26 – Teor médio de Carbono, Lignina, Celulose e Relações C:N e Lignina:N para a serapilheira e diferentes Florestas Tropicais	113
Tabela 27 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.	133

Tabela 28 – Coeficiente de Variação (CV%) para os atributos biológicos da camada superficial dos solos sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES. 140

Tabela 29 – Análise descritiva dos atributos biológicos dos solos em função da variação altitudinal dos solos sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES. 141

Tabela 30 – Relação C:N, Relação CBM:C, Relação NBM:NT relativas à camada superficial de oitos perfis de solos em diferentes posições da paisagem no Parque Nacional do Caparaó. 142

Tabela 31 – Coeficiente de Correlação de Spearman entre a atividade microbiana da camada superficial dos solos e as características químicas da serapilheira aportada e acumulada sob o solo nas parcelas Parque Nacional do Caparaó, ES. 143

Tabela 32 – sumo dos modelos de Regressão Linear Stepwise para os teores de C_{org} e NT da camada superficial do solo sob floresta ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES. 144

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1 – Coeficiente de variação da dinâmica da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e do acúmulo médio de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 159
- Apêndice 2 – Coeficiente de Variação da biomassa média da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada para as estações entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. para Barras na vertical representam o desvio padrão. 159
- Apêndice 3 – Coeficiente de variação (%) para a produção média (2013 – 2016) de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada para o acúmulo de serapilheira das parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. 159
- Apêndice 4 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg^{-1}) para a fração folhas da serapilheira depositada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 160
- Apêndice 5 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg^{-1}) para a fração outros materiais da serapilheira depositada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 161
- Apêndice 6 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg^{-1}) para a serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 162
- Apêndice 7 – Coeficiente de Variação para o teor médio de polifenóis totais para a serapilheira entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 163
- Apêndice 8 – Coeficiente de Variação para o teor médio de lignina para a serapilheira entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 163
- Apêndice 9 – Coeficiente de Variação para o teor médio de celulose para a serapilheira entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 164
- Apêndice 10 – Coeficiente de Correlação de correlação de Spearman entre os atributos microbiológicos da camada superficial do solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES 165

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	6
GENERAL ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO GERAL	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	21
2.2 ESCALA CLIMÁTICA.....	23
2.3 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA.....	28
3 ÁREA DE ESTUDO	31
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
CAPÍTULO I: FORMAÇÃO DOS SOLOS SOB FLORESTA OMBRÓFILA Densa, NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES	40
RESUMO	41
ABSTRACT	42
1 INTRODUÇÃO	43
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	45
2.1.1 Análises Morfológicas.....	45
2.1.2 Análises Físicas.....	46
2.1.3 Análises Químicas de Rotina do solo.....	47
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	47
3 RESULTADOS	48
3.1 ASPECTOS GERAIS DOS SOLOS.....	48
3.2 DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS NA PAISAGEM.....	57
3.2.1 Latossolos.....	57
3.2.3 Cambissolo.....	58
3.2.4 Organossolos.....	60
4 DISCUSSÃO	63
4.1 FORMAÇÃO DO SOLOS.....	63
4.2 ATRIBUTOS DOS SOLOS.....	65
5 CONCLUSÕES	69
6 REFERÊNCIAS	70
CAPÍTULO II: DINÂMICA DA SERAPILHEIRA E NUTRIENTES SOB FLORESTA OMBRÓFILA Densa NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES	73
RESUMO	74
ABSTRACT	76
1 INTRODUÇÃO	78
2 MATERIAL E MÉTODOS	81
2.1 APORTE E ACÚMULO DE SERAPILHEIRA E TEORES DE NUTRIENTES E SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS.....	81
2.1.1 Aporte de serapilheira.....	81
2.1.2 Acúmulo de serapilheira.....	82
2.1.3 Decomposição Foliar.....	83
2.1.4 Quantificação e Análises químicas dos nutrientes.....	83
2.2 ANÁLISE DOS DADOS.....	88
3 RESULTADOS	89
3.1 DINÂMICA DA BIOMASSA DE SERAPILHEIRA.....	89
3.2 CARACTERÍSTICA QUÍMICA DA SERAPILHEIRA.....	95
3.2.1 Variação sazonal dos nutrientes.....	95
3.2.1 Variação sazonal das fibras.....	98

3.3 DECOMPOSIÇÃO FOLIAR.....	103
4 DISCUSSÃO	107
4.1 CICLAGEM DE BIOMASSA.....	107
4.1.1 Produção de biomassa	107
4.1.2 Sazonalidade e teor dos nutrientes e das fibras	110
4.1.3 Acúmulo, decomposição e liberação de nutrientes	114
5 CONCLUSÕES	119
6 REFERÊNCIAS.....	120
CAPÍTULO III: SAZONALIDADE DA ATIVIDADE MICROBIANA EM FLORESTA	
OMBRÓFILA DENSA, NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES.....	
RESUMO.....	126
ABSTRACT.....	128
1 INTRODUÇÃO	130
2 MATERIAL E MÉTODOS	133
2.1 ATIVIDADE MICROBIANA E ENZIMÁTICA NO SOLO.....	134
2.2.1 Biomassa microbiana	134
2.2.2 Atividade enzimática	135
2.2.2.1 Urease.....	135
2.2.2.2 Fosfatase.....	135
2.2.2.3 β -glucosidase	136
2.2.3 Nitrogênio mineralizável	136
2.3 ANÁLISE DOS DADOS.....	137
3 RESULTADOS.....	139
3.1 SAZONALIDADE DA ATIVIDADE BIOLÓGICA	139
3.2 CARBONO E NITROGÊNIO TOTAL.....	144
4 DISCUSSÃO	145
4.1 ATIVIDADE BIOLÓGICA DO SOLO	145
5 CONCLUSÕES	153
6 REFERÊNCIAS.....	154
CONSIDERAÇÕES GERAIS	157
APÊNDICE.....	158

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), regulamentado pela Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000, institui os critérios de criação, implantação e gestão de Unidades de Conservação no Brasil. Dentre os objetivos deste sistema estão a proteção e a conservação de ambientes com beleza cênica, de espécies da fauna e flora, bem como promover o desenvolvimento sustentável, a pesquisa científica e a recreação, garantindo a proteção dos recursos naturais e a subsistência de comunidades tradicionais (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

As Unidades de Conservação (UCs) presentes nesse sistema dividem-se em unidades de uso sustentável e de proteção de integral. As UCs de uso sustentável visam o uso dos recursos naturais de forma sustentável, garantindo a sua perenidade. Nas UCs de proteção integral, o principal objetivo é a conservação da natureza, cuja única permissão consiste no uso indireto de seus recursos, sendo vedada ou restringida a intervenção antrópica (ICMBio, 2013).

Dentre as UCs de proteção integral, a modalidade Parque Nacional (PARNA) é a mais antiga e popular. O primeiro PARNA criado oficialmente no mundo foi o Parque Nacional de Yellowstone nos EUA, em 1872, entretanto no Brasil, o primeiro PARNA só veio a ser criado em 1937, sendo o Parque Nacional do Itatiaia, no estado do Rio de Janeiro (VIVEKANANDA, 2001).

Em âmbito nacional, o PARNA do Caparaó, localizado entre os estados do Espírito Santo e de Minas Gerais e criado pelo decreto 50.646 de 24 de maio de 1961 pelo então presidente da República Jânio Quadros, destaca-se pela beleza cênica e pelo elevado nível de endemismo, sendo dotado de grande diversidade (ICMBIO, 2015). Além disso, o PARNA do Caparaó possui grande potencial turístico, contendo inúmeros pontos de visitação, incluindo o Pico da Bandeira, seu ponto culminante com 2.890 m de altitude. Ainda nos limites do PARNA do Caparaó há uma vasta área florestada pouco alterada, que possivelmente abriga uma gama de informação científica pouco explorada.

Há pouca ou quase nenhuma alteração das florestas existentes na porção do parque localizada no Estado do Espírito Santo se deve principalmente à dificuldade no acesso de algumas de suas áreas, fator que restringe a pesquisa às áreas de mais fácil acesso, sendo pequeno o número de trabalhos realizados no parque.

Assim, dentre as poucas pesquisas realizadas no PARNA do Caparaó pode-se citar o estudo realizado por Cunha (2014), no qual este autor estudou o banco de sementes no solo para a regeneração de áreas ocupadas por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn e o trabalho realizado por Rodrigues (2011) que descreve os diferentes geoambientes existentes na vertente mineira do parque. Recentemente, a Universidade Federal do Espírito Santo, tem realizado por meio do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais trabalhos no referido PARNA destacando-se estudos relacionados com a florística, fitossociologia, chuva, banco de sementes e regeneração (ABREU, 2017; ARAÚJO, 2016; PERINI, 2016). Estes trabalhos foram realizados em uma área do Vale de Santa Marta, no estado do Espírito Santo. Além dos trabalhos já citados, destaca-se o trabalho realizado por Castro (2014) que caracterizou quimicamente os solos e quantificou o aporte, o acúmulo e a decomposição de serapilheira na área em questão.

De forma geral, o solo recebe diversas influências nos processos de intemperismos. O clima, organismos, relevo e material de origem são fatores que ao longo do tempo constituem marcante influência no processo de formação, onde a expressão climática fica evidente no sentido dos trópicos para o Equador (LALIBERTÉ et al., 2013). Todavia, em região como a do PARNA Caparaó, devido à amplitude das cotas altimétricas e a variação climática, os processos de formação de solo descritos por Laliberté et al. (2013) ocorrem em uma escala muito menor. Deste modo, a variação climática associada as características edáficas e a comunidade biológica, geram sítios com características únicas e difíceis de serem preditas. Dentre os processos ecológicos atuantes nos diferentes microssítios, a ciclagem de nutrientes é o resultado da interação entre solo – clima – vegetação, que acaba por ser uma relação de coevolução, na qual o meio físico e o meio biológico modificam e são modificados um pelo outro (ODUM, 2007).

Diversos estudos afirmam que as florestas tropicas são, em sua maioria, superiores em produção primária em relação a florestas temperadas. Entretanto, esta premissa se torna verdadeira se: uma maior quantidade de carbono for fixada por unidade de nutrientes; se a maior fração dos nutrientes for redistribuída durante a senescência de tecidos; e se os nutrientes que retornam ao solo via aporte de serapilheira forem rapidamente reabsorvidos pelas raízes das plantas, micorrizas ou decompositores, acarretando em uma baixa perda de nutrientes pelo sistema (AERTS, 1990; VITOUSEK, 1984).

Haja visto que a ciclagem de nutrientes é fundamental para a manutenção e perpetuação de ecossistemas, faz-se o seguinte questionamento: “Como mudanças nas características edafoclimáticas e biológicas provocadas pela variação altitudinal e sazonal influenciam a ciclagem de nutrientes na região do PARNA do Caparaó?”. Entretanto, como mencionado anteriormente, devido a quantidade de estudos realizados no PARNA citado, ainda existem muitos questionamentos a serem respondidos. As pesquisas sobre a formação dos solos, sua interação com a vegetação e com o clima, e como esses fatores contribuem para a ciclagem de nutrientes dão margem para pesquisas ainda mais elucidativas.

Assim, além da geração de conhecimento científico, a continuidade desses estudos e a elaboração de novos, contribuirão com a criação de mecanismos de gestão mais eficazes e que promovam a conservação dos recursos do próprio parque. Com base nesses pressupostos, foi testada a hipótese de que “O ambiente limita o desenvolvimento dos solos e por consequência, maior deve ser a especialização e a eficiência da vegetação na ciclagem de nutrientes”.

Para isso, em um primeiro momento, foi realizado um estudo sobre a formação dos solos em função da variação altitudinal, culminando com a identificação das classes de solos distribuídas entre as parcelas. A segunda parte do trabalho, foi relacionada a dinâmica da ciclagem de nutrientes com base na ciclagem biogeoquímica via aporte, acúmulo e decomposição da serapilheira, sua relação com a variação climática e as suas características químicas. Por fim, a terceira parte deste trabalho visou estudar o comportamento da atividade biológica, principalmente relacionada a interface solo-serapilheira tanto em variação altitudinal, quanto sazonal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FORMAÇÃO DOS SOLOS

As alterações na crosta terrestre pela ação de processos químicos, físicos e biológicos, cujo grau varia em função das condições ambientais é chamado intemperismo (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009). Em geral, o processo de evolução na formação dos solos, intemperismo, é caracterizado pela constante perda de Si e cátions básico e pelo acúmulo de outros elementos como Fe e Al, além da formação de caulinita (MUGGLER; BUURMAN; VAN DOESBURG, 2007). O processo de intemperismo é fundamental para a formação da paisagem e o desenvolvimento topográfico, liberar nutrientes inorgânicos principalmente fósforo, tornando-os disponíveis para absorção por organismos, e juntamente com a matéria orgânica humificada e não humificada formar o solo e criar o habitat para o desenvolvimento biológico (JACKSON, 2015; TURKINGTON; PHILLIPS; CAMPBELL, 2005a).

Em termos médios, a formação de solos é de 0,1 mm por ano com maiores ou menores velocidades de formação por modificações nas condições climáticas e de outras intempéries. Uma vez que os fragmentos iniciais são produzidos, eles seguem dois caminhos que de certa forma competem entre si no processo de formação, podendo: se acumularem e formarem o solo ou serem removidos via fluxo de material sólido ou via lixiviação de compostos (PHILLIPS, 2005; SANTOS et al., 2017; TURKINGTON; PHILLIPS; CAMPBELL, 2005a).

Os processos erosivos têm efeito inverso ao de formação dos solos, pois retira o material já formado expondo novas camadas ainda em formação, impedido o aprofundamento do solo. Por outro lado, o intemperismo químico está ligado a perda compostos solúveis, resultantes da dissolução de minerais. Esse processo favorece a quebra da rocha e favorecem a formação do solo (PHILLIPS, 2005). Durante o intemperismo químico a água tem papel fundamental para acessar microfissuras na borda de minerais, favorecendo a abertura de maiores poros pela dissolução do mineral nessas regiões que apresentam interações atômicas mais fracas (SANTOS et al., 2017).

A formação de minerais secundários é uma resposta das variações ambientais que influenciam o processo de pedogênese, não necessariamente refletida nos minerais formados, mais sim na sua estrutura, morfologia e composição, sendo o material parental o principal fator que direciona o tipo de

mineral secundário formado mesmo em microescala, sendo a geologia o link entre o saprólito e o tipo de mineral formado (MUGGLER; BUURMAN; VAN DOESBURG, 2007; TURKINGTON; PHILLIPS; CAMPBELL, 2005a). A exemplo disso, o clima, especialmente a disponibilidade de umidade propicia a formação de argilas do tipo 1:1 quando há livre drenagem, e do tipo 2:1 quando a drenagem não é livre, controlando assim o grau de dissolução e a neoformação dos minerais secundários (SANTOS et al., 2017).

Entretanto, segundo Egli et al. (2008), os estudos que demonstraram a interação entre os fatores de formação são um tanto contraditórios quanto a participação do clima no processo de formação, como por exemplo, a umidade e temperatura tanto favorecem quanto diminuem as taxas de formação dos solos. Ainda segundo estes autores, é documentado que o clima tem influências nas mudanças do solo relativas à matéria orgânica no solo, ao teor de argila, na acidez e na presença de íons trocáveis. Essa influência fica mais evidente quando observado o gradiente de desenvolvimento dos solos em função das latitudes, onde solos mais desenvolvidos e fortemente intemperizados são observados nas menores latitudes em comparação com as maiores latitudes (LALIBERTÉ et al., 2013). Além disso, a participação da comunidade biológica na formação dos solos se dá pela absorção de compostos químicos que tendem a ficar na área onde foram produzidos (PHILLIPS, 2005), ou pela presença de hifas de fungo mesmo em estágios iniciais do processo de intemperismo, onde as hifas penetram nas microfissuras aumentando a massa orgânica nessas regiões e produzindo ácidos orgânicos que favorecem a dissociação dos íons, gerando desequilíbrio químico e favorecendo o processo de pedogênese (JACKSON, 2015; SANTOS et al., 2017).

As mudanças climáticas tem sido um gatilho para o estudo das interações entre clima, paisagem e formação dos solos. Uma vez que estudo de sequências de formação de solos podem ser importantes a o entendimento de fatores que determinam as taxas de intemperismo em diferentes ambientes (TURKINGTON; PHILLIPS; CAMPBELL, 2005b). Dessa forma, o conhecimento das relações entre o clima, a biota, o tempo de exposição, os processos e produtos do intemperismo podem gerar um panorama de mudanças de paisagem e gradientes ambientais (TURKINGTON; PHILLIPS; CAMPBELL, 2005a).

2.2 ESCALA CLIMÁTICA

A condição energética que a atmosfera se encontra, pode ser descrita de forma instantânea ou como uma característica média ao longo de um período. Para o momento, ou instante, comumente referido como *Tempo*, e a descrição média do tempo é conhecido como *Clima*, (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Em geral, os fenômenos climáticos perduram por longos períodos de tempo, enquanto o *Tempo* são em escalas de dias ou semanas (COLEMAN; LAW, 2015).

Entretanto, as pesquisas meteorológicas ainda dependem de estudos de caso, e funcionam basicamente por meio de observações pontuais, ou seja, o *Tempo*. Posteriormente, com o acúmulo de dados do tempo em diversos locais, esforços foram feitos para reunir estes dados e por meio deles gerar o conceito de Normais Climatológicas, que é a média de um período de pelo menos 30 anos e caracteriza o *Clima* de uma região (BUDIKOVA, 2013; SCHOOF, 2013). A primeira obra completa que caracterizou e classificou as zonas climáticas da Terra, foi publicada há mais de 100 anos, pelo pesquisador Wladimir Köppen (1900; 1901), sendo o sistema ainda em uso, servido como referência para diversos outros estudos temáticos (ALVARES et al., 2013).

Por outro lado, eventos climáticos são observados em diferentes escalas espaciais e de tempo, sem necessariamente ser cíclicos, ou relacionados com o *Clima* de um dado local. Desta forma, em uma outra definição, o *Clima* é considerado o resultado da composição e dinâmica de interações entre a atmosferas, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera, que podem ser ainda perturbadas por fatores externos como a atividade solar, atividade vulcânica, órbita terrestre e atividade antrópica (BRYSON, 1997).

A escala espacial desses fenômenos atmosféricos pode ser dividida em macro, meso e microescala (BUDIKOVA, 2013; COLEMAN; LAW, 2015; HOLMES; NELSON DINGLE, 1965; NUNES, 1998; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

- Macroescala: refere-se macroclimas são caracterizados por fenômenos de escala que variam de global a até extensas regiões (regional), sendo relacionada a circulação da atmosfera de forma ampla, latitude e altitude, cuja variação é em milhões de km²;

- Mesoescala: relacionado a fenômenos em escala local, em geral, inferiores às áreas continentais, não possuindo regiões precisas, são resultados de padrões de circulação regional, mas que não são influenciados pela rotação da terra, sendo dividido em:
 - Clima Local: Caracterizado por estarem associados à gradientes de pressão e temperatura, com ilhas de calor, alteração da cobertura do solo e da atmosfera, como extensas áreas agrícolas ou de floresta, uma cidade e ou um litoral;
 - Topoclima: fenômenos influenciados pela configuração e exposição do terreno, como as variações de orientação (norte, sul, leste e oeste) e relevo; e
- Microescala: está relacionada a fenômenos de superfície, dependendo do tipo de cobertura do terreno, e está relacionada ao balanço local de energia e conseqüentemente na circulação do ar na superfície.

A escala temporal das variações meteorológicas pode ser dividida em anual e diária (BUDIKOVA, 2013; LAMB, 1972; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

- Escala anual: relativa ao movimento de translação da Terra, sendo responsável pelas estações do ano, cujo as variações são mais acentuadas quanto maior for a latitude; e,
- Escala diária: relativo às variações impostas principalmente pelo ciclo de rotação da terra, ou seja, variações entre dia e noite.

Nesse sentido, os atuais esforços com estudos climáticos são relacionados a sensibilidades das florestas as mudanças climáticas. Estes estudos investigam se áreas específicas ainda serão favoráveis ao crescimento da floresta independente da composição de espécies, focando na produtividade das árvores maduras (VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012).

A exemplo disso, em estudos de macroescala, as alterações antropogênicas geradas pelas emissões de CO₂ e suas conseqüências (feedbacks), são os principais objetivos de estudo na atualidade (CLARK; CLARK; OBERBAUER, 2010). Como exemplo desta linha de trabalho pode-se citar o estudo realizado por Brando

et al. (2008) com eventos de estiagem e precipitação interna que ocorrem em grandes áreas na floresta Amazônica; o estudo realizado por Norby et al. (2002) que apesar de utilizar pequenas áreas para estudos de FACE (Free-Air CO₂-Enrichment), utilizou projeções globais das emissões para calibrar seus experimentos.

Outra vertente dos estudos macroclimáticos é relacionada à modelagem climática com previsões de mudanças globais futuras, com base no aumento da temperatura terrestre pela influência dos gases de efeito estufa, como observado nos estudos realizados por Baker et al. (2010). Estes autores realizaram projeções de alterações climáticas na China, observando que em um cenário futuro para os próximos 50 anos, as mudanças climáticas globais irão alterar parte dos climas existentes no país. Neste estudo, a modelagem incluiu as variáveis edáficas, topografia e as Normais Climatológicas atuais e as futuras, e mostrou uma elevação das temperaturas e da umidade em certas áreas e climas mais secos em outras, que acarretará em uma possível alteração da vegetação.

Também são observados alguns trabalhos relacionados à zoneamentos climáticos como o trabalho realizado por Araújo, Matricardi e Nappo (2012). Estes autores elaboraram um Zoneamento Econômico Climático (ZEE) no Distrito Federal para onze espécies florestais diferentes entre nativas e exóticas, com base em banco de dados climáticos e edáficos da região. Como resultado, dentre as onze espécies estudadas, apenas oito tinham potencial para cultivo, as demais teriam alguma restrição climática e altimétrica.

Entretanto, nos estudos citados anteriormente (ARAÚJO; MATRICARDI; NAPPO, 2012; BAKER et al., 2010; BRANDO et al., 2008), a escala espacial utilizada abrange extensas áreas com observações menos precisas, e com uma resolução espacial que pode omitir situações intrínsecas que só podem ser visualizados em estudos climáticos de pequena escala, sendo assim necessário estudos em microclimas. O microclima influencia uma gama de processos ecológicos em ambientes florestais e é uma alteração do clima local resultado de uma complexa interação entre as diversas características do povoamento ou floresta e das características fisiográficas, sendo o dossel, o principal agente que controla os parâmetros meteorológicos, além de ser responsável por criar um microclima específico e diferente dos locais vizinhos (HARDWICK et al., 2015; VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012).

A radiação solar é o principal fator que desencadeia o processo de aquecimento do solo e do ar, e o dossel tem papel fundamental ao atenuar essa radiação e reduzir o aquecimento do sub-bosque criando um microclima mais propício (RAMBO; NORTH, 2009). A densidade do dossel é quem determina pela quantidade e qualidade de radiação solar que penetra para o sub-bosque, direcionando a regeneração da floresta (BAKER et al., 2014; HARDWICK et al., 2015). Quanto mais denso o dossel, ou seja, maior Índice de Área Foliar (IAF), menor a diferença entre dias ensolarados e dias nublados. Conseqüentemente a quantidade de radiação que chega ao solo, pode ser atenuada em até 95% de luz visível em dosséis muito densos (HARDWICK et al., 2015).

Os componentes do dossel responsáveis por atenuar a radiação solar para o sub-bosque são: os ramos, as folhas e ou acículas, e troco. Estes, absorvem e refletem a energia do sol (ondas curtas) durante o dia, e no período da noite, emitem a energia absorvida na forma de ondas longa, conseqüentemente reduzem a amplitude térmica do ecossistema (VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012). O controle térmico exercido pelo dossel beneficia as formas de vida sob ele, como por exemplo a comunidade de epífitas como líquens e briófitas que são extremamente sensíveis às alterações dos microclimas principalmente com relação às alterações nos níveis de radiação, regime de umidade e temperatura (RAMBO; NORTH, 2009).

Em geral, as variações na cobertura do dossel estão relacionadas a variação na composição de espécies e por pequenos distúrbios causados pela queda de árvores e conseqüente aberturas de clareiras, conseqüentemente pode ser observada uma pequena variação espacial dos microclimas no interior das florestas. Por outro lado, a medida que se afasta do interior da floresta em direção as bordas, há uma tendência do microclima ser alterado, em conseqüência das alterações na estrutura da floresta, com natural modificação da cobertura do dossel e o IAF.

Vários estudos vêm relatando como o microclima pode ser modificado pela arquitetura das copas, Wright et al. (2010) e Baker et al.(2014) com efeito de borda. Von Arx, Dobbertin e Rebetez (2012) estudaram a variação diária da temperatura sob diferentes dosséis, Rambo e North (2009) estudaram o efeito do desbaste no microclima em florestas nativas. Em geral, estes trabalhos mostram que quanto maior a abertura o dossel, maior a perda de radiação de ondas longas do sub-bosque para a atmosfera acima do dossel, assim como o dossel pouco denso deixa de emitir radiação de ondas longas durante a noite, reduzindo assim a temperatura

de áreas com essas características (RAMBO; NORTH, 2009; VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012).

Com isso, as alterações na magnitude e na dinâmica temporal do microclima causadas por uma clareira por exemplo, podem causar alterações nos processos fisiológicos das comunidades de fauna e flora, onde estas alterações, podem ser suficientes para desenvolver uma variedade de habitats (BAKER et al., 2014; RAMBO; NORTH, 2009). Dessa forma, uma plena compreensão das relações entre a vegetação e o clima não existe, sendo crucial o desenvolvimento de pesquisas em microclima em meio a heterogeneidade de ambientes (HARDWICK et al., 2015).

Neste contexto, as florestas em maiores altitudes são mais susceptíveis as influências atmosféricas, uma vez que o dossel nem sempre é contínuo como as florestas de terras baixas. Durante o dia, nas áreas de encosta, as partes mais baixas são mais quentes do que os cumes que recebem influência direta dos ventos, entretanto, durante a noite há inversão térmica, uma vez que as massas de ar frio tendem a descer, e a topografia pode condicionar o aumento ou reduzir a radiação solar direta dependendo da sua orientação e da inclinação (HARDWICK et al., 2015; RAMBO; NORTH, 2009; VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012). Por outro lado, os efeitos da vegetação sobre o microclima variam ao longo do dia, entre os dias, sazonalmente e interanual, de forma que a compreensão a análise desses períodos distintos permitem entender como o microclima influencia as condições ecológicas (BAKER et al., 2014; RAMBO; NORTH, 2009)

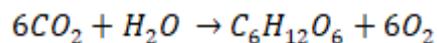
A exemplo disso, alguns estudos foram realizados com microclima em diferentes escalas de tempo como: Wright et al. (2010), Rambo e North (2009) e Baker et al. (2014), com período de estudo de pelo menos um ano, incluindo coletas de dados diárias; Von Arx, Dobbertin e Rebetez (2012) trabalharam com dados diários, durante 17 anos; Brando et al. (2008) estudaram a precipitação e a transprecipitação na Floresta Amazônica em um período de cinco anos com mensurações mensais; Norby et al. (2002) estudaram durante três anos o incremento de biomassa da vegetação com exposição da mesma a três horas diárias de fertilização por CO₂; e Clark, Clark e Oberbauer (2010) utilizaram dados diários de temperatura coletados durante 10 anos e médias históricas de precipitação e dados mensais de CO₂ atmosférico. Nesse sentido, a resolução de tempo de cada estudo, está relacionada com o interesse nas potenciais variações climáticas que ocorrem (VON ARX; DOBBERTIN; REBETEZ, 2012), que podem tanto variar diariamente, como entre dias ou ao logo de um ano.

2.3 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA

O processo fotossintético realizado pelos autótrofos utiliza a energia luminosa proveniente do sol, o CO₂ atmosférico e H₂O para produzir as cadeias de carbono orgânico. A incorporação dessas cadeias na matéria viva dos produtores (autótrofos) é conhecida como produtividade primária (ODUM, 2007; POGGIANI, 2012).

A energia luminosa limita de forma crítica o crescimento de plantas e, conseqüentemente, sua produtividade (TAIZ; ZEIGER, 2002). Entretanto, somente uma pequena fração da energia solar que atinge a superfície terrestre é convertida em biomassa, onde a grande maioria dessa energia é refletida pela superfície de volta ao espaço (RICKLEFS, 2010) e, mesmo durante o ano, esta energia não é constante para as mesmas regiões (ODUM, 2007; SALISBURY; ROSS, 1992).

A reação básica da fotossíntese das plantas que ocorrem no tecido do mesófilo pode ser escrita da seguinte maneira (TAIZ; ZEIGER, 2002):



Apesar do mesmo princípio, a produção fotossintética das espécies vivendo nas mais diversas condições - desertos, montanhas, florestas tropicais, e etc. - difere muito entre elas e a capacidade fotossintética foliar, definida pela taxa fotossintética por unidade de área, pode variar mesmo quando todos os requisitos básicos são fornecidos na condição ótima (Tabela 1) (SALISBURY; ROSS, 1992).

A produtividade de um ecossistema pode ser subdividida em níveis (CLARK et al., 2001b; ODUM, 2007; OLSON, 1963), sendo:

- Produtividade primária bruta (PPB): é toda a fotossíntese produzida durante um período;
- Produção primária líquida (PPL): é a fotossíntese líquida, ou seja, a fotossíntese menos a respiração da planta, durante o período de medição. Também chamada de taxa de assimilação; e
- Produtividade líquida da comunidade: é a taxa de armazenamento da matéria orgânica menos o consumo dos heterótrofos.

Tabela 1. Estimativa da Produção Primária Líquida (PPL) e biomassa vegetal nos principais ecossistemas.

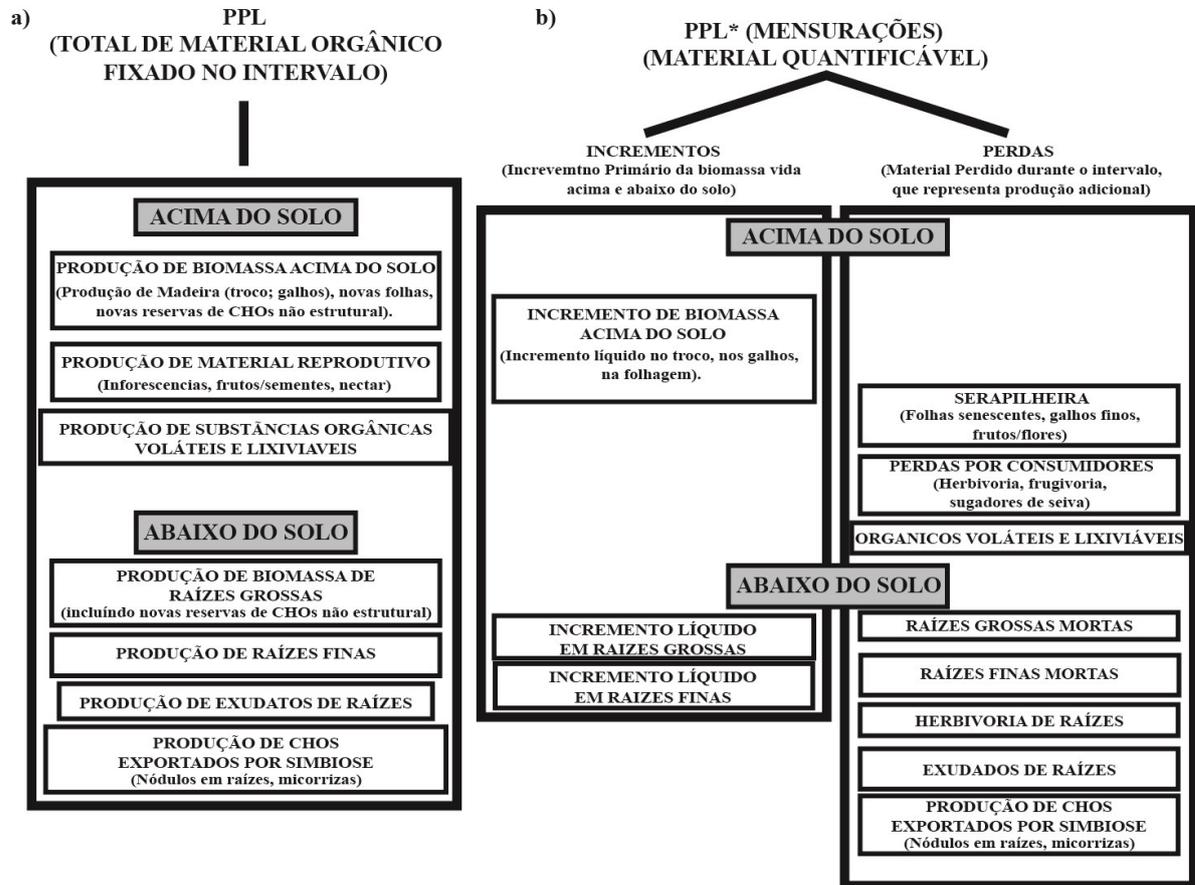
Tipo de ecossistema	Produtividade primária líquida por unidade de área ($\text{g m}^{-2} \text{ano}^{-1}$)			Biomassa por unidade de área (kg m^{-2})	
	Área (10^6 km^2)	Amplitude normal	Média	Amplitude normal	Média
Floresta úmida tropical	17	1.000-3.500	2.200	6-80	45
Floresta tropical estacional	7,5	1.00-2.500	1.600	6-60	35
Floresta Temperada sempre-verde	5	600-2.500	1.300	6-200	35
Floresta temperada decídua	7	600-2.501	1.200	6-60	30
Floresta boreal	12	400-2.000	800	6-40	20
Arbóreo e arbustivo	8,5	250-1.200	700	2-20	6
Savana	15	200-2.000	900	0,2-15	4
Pradaria temperada	9	200-1.500	600	0,2-5	1,6
Tundra e alpino	8	10-400	140	0,1-3	0,6
Arbustivo de deserto e de semideserto	18	10-250	90	0,1-4	0,7
Deserto extremo, rocha, areia e gelo	24	0-10	3	0-0,02	0,02
Terra cultivada	14	100-3.500	650	0,4-12	1

Fonte: adaptado (ODUM, 2007);

Em geral, as Florestas Tropicais Sempre Verde e as Florestas Decíduas cobrem entre 7 e 10% da superfície terrestre, acumulam entre 40 e 50% do estoque de carbono da vegetação terrestre e são responsáveis por entre 32 e 43% da Produção Primária Líquida (PPL), processando anualmente seis vezes mais carbono via fotossíntese e respiração que emissões antrópicas por combustíveis fósseis. Porém, as mudanças climáticas estão transformando estas florestas de sumidouros em fontes de carbono (CLARK et al., 2001b; CLEVELAND; TOWNSEND, 2006; LEWIS et al., 2009).

A avaliação da produção primária é estimada pelas mensurações das taxas fotossintéticas e da respiração, entretanto, há uma dificuldade de mensurações em ambientes florestais, ou de grande biomassa, uma vez que não é possível medir a PPB e a respiração de toda uma vegetação diretamente (CLARK et al., 2001b; ODUM, 2007). Por outro lado, a PPL pode ser considerada o total de biomassa produzida ou estocada durante um período, onde o incremento dos compartimentos da vegetação (folhas, ramos, tronco e raiz) pode ser medido. Todavia, deve-se levar em consideração que uma parte deste material é perdido entre o período mensurado, não podendo ser quantificado como os demais materiais (CLARK et al., 2001b; ODUM, 2007) (Figura 1).

Figura 1 - Componentes da Produção Primária Líquida (PPL) (a) e da PPL Mensurável (PPL*) (b) de uma floresta, onde a soma de todos os materiais juntos representa: (1) a quantidade de matéria orgânica nova que é fixado pela vegetação em um intervalo; e (2) a quantidade de matéria orgânica que foi produzida e perdida pela vegetação em algum intervalo.



Fonte: Adaptado de CLARK et al. (2001a).

Em relação a PPL produzida abaixo do solo, pouco se sabe sobre a dinâmica, taxas de acúmulo e de transformação, uma vez que diversos constituintes fazem parte deste compartimento (raízes finas e grossas, exsudatos de raízes, carboidratos depositados por hifas e nódulos de raízes) (CLARK et al., 2001a). Por outro lado, trabalhos de quantificação da PPL acima do solo em florestas maduras entre trópicos concentram-se na mensuração de alguns poucos componentes desta, onde o método principal tem sido a produção serapilheira por determinados períodos de tempo, uma vez que este componente é relativamente simples de medir diretamente (CLARK et al., 2001a; EWEL, 1976; TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998).

A quantificação da biomassa de folhas senescentes que caem sobre o piso florestal, torna-se representativa da PPL uma vez que ao longo de um período, a massa de folhas que caem é o resultado da produção de novas folhas para esse

período (CLARK et al., 2001a; ODUM, 2007). Esse componente age como um sistema mediador das entradas e saídas, onde a vegetação por meio da produção de biomassa, aporta serapilheira (entradas) e sobre o solo esta é decomposta (saída), se tornando um suprimento de energia e matéria para os microrganismos do solo e para as raízes, caracterizando-se de suma importância em florestas tropicais de terras baixas onde a produção e decomposição da serapilheira é elevada (EWEL, 1976; NORBY et al., 2002).

O aporte contínuo de serapilheira propicia a estocagem de carbono e demais nutrientes sobre o solo, sendo a sua decomposição, responsável por manter a fertilidade dos solos sobre vegetação nativa (CALVI; PEREIRA; JÚNIOR, 2009; CIANCIARUSO et al., 2006; EWEL, 1976). A decomposição da serapilheira regula a ciclagem de nutrientes por meio da mineralização dos componentes orgânicos que consequentemente afeta a PPL, principalmente onde limitações na produção estão relacionadas a baixa disponibilidade de nutrientes no solo, que em geral evolui com o grau de intemperismo (HOBBIE; VITOUSEK, 2000).

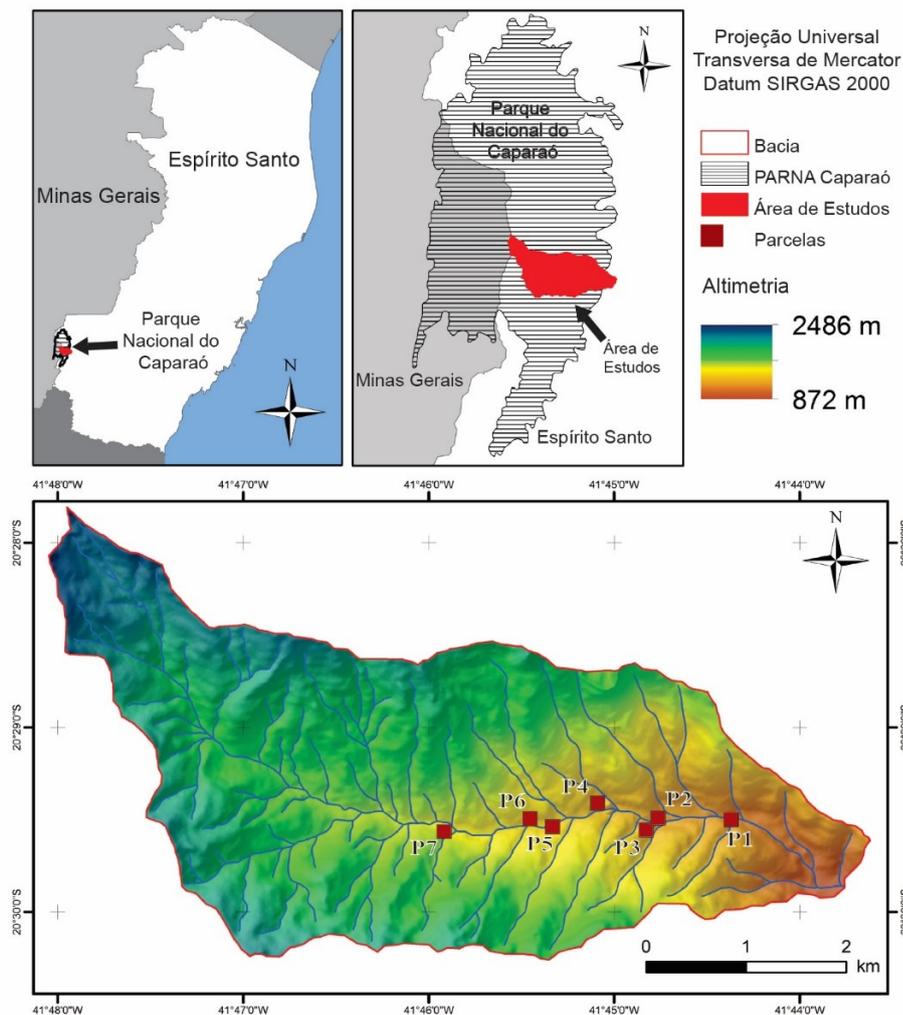
Em geral, nas florestas tropicais de terras baixas o solo é rico em N, sendo a PPL limitada pela disponibilidade de minerais de origem intempérica como o P. Por consequência, os teores de P nas folhas são elevados, há elevada a relação N:P da serapilheira e a concentração desses elementos é baixa no solo (CLEVELAND; TOWNSEND, 2006). Dessa forma, nesse tipo de floresta o P-orgânico oriundo da serapilheira é a principal fonte de P para a vegetação.

Nos diferentes estágios de desenvolvimento, a vegetação acaba por demonstrar formas distintas de controle das demandas de nutrientes, por meio do armazenamento e distribuição pela biomassa (LEITE et al., 2011). As espécies de plantas com folhas com a maior vida útil, tendem a ter menores teores de nutrientes nas folhas senescentes, sendo assumidamente mais eficientes na redistribuição de nutrientes reduzindo a perda de nutrientes, porém a serapilheira destas espécies tem qualidade e taxa de decomposição menor (HUANG; WANG; YAN, 2007). Assim, a retranslocação de nutrientes e o maior tempo médio de resistência foliar é uma adaptação das plantas a habitats de baixa fertilidade que favorece a competição, eleva a produtividade e promove a economia de nutrientes. Embora o N e P serem os principais elementos retranslocados, estes processos também é importante para outros elementos (Mg e consequentemente para a ciclagem de nutrientes em ecossistemas (COVELO; DURÁN; GALLARDO, 2008; HAGEN-THORN et al., 2006; KILLINGBECK, 1996; YUAN et al., 2005a, 2005b).

3 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi conduzido no Parque Nacional do Caparaó (PARNA Caparaó), localizado na região Sudeste do Brasil, entre os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo ($20^{\circ}19' - 20^{\circ}37' S$ e $41^{\circ}43' - 41^{\circ}53' W$). Com uma área de aproximadamente 32.000 ha, encontra-se em cotas elevadas que variam entre 630 e 2892 m de altitude em relação ao nível do mar, sendo seu ponto mais elevado o Pico da Bandeira (MAZINE; SOUZA, 2008). Localizada na face leste do Parque Nacional do Caparaó, a microbacia do Ribeirão Santa Marta tem aproximadamente 1.775,86 ha, com altitude variando em 872 e 2486 metros e declividades acentuadas variando entre relevo ondulado a escapado (FIGURA 1).

Figura 2 - Limites do Parque Nacional do Caparaó na divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo; delimitação da microbacia, hidrografia, altimetria e distribuição das unidades amostrais na microbacia.

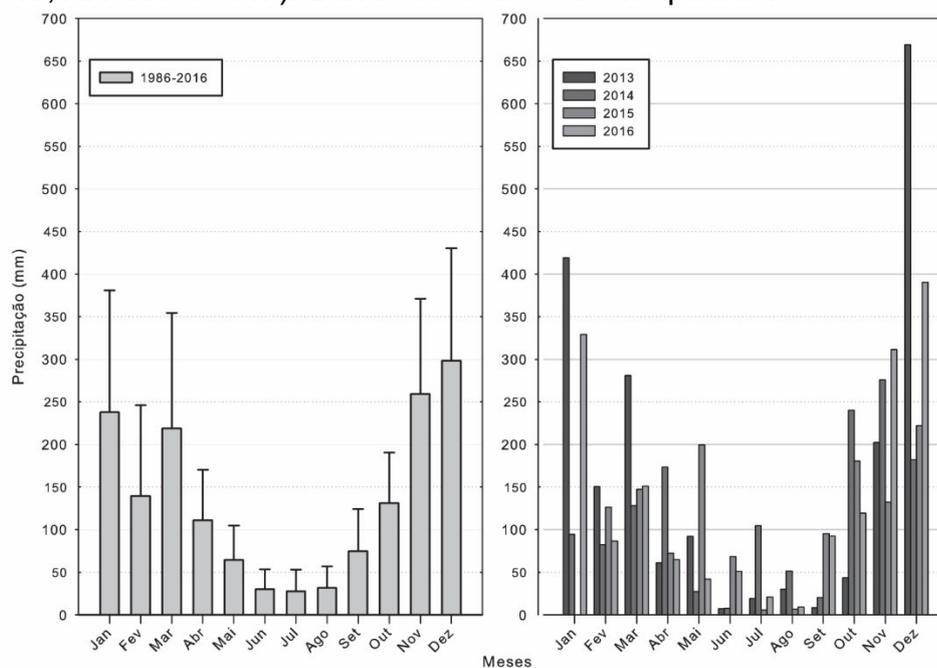


FONTE: O autor.

Pela classificação de Koppen, revisada para o Brasil por Alvares et al. (2013), o clima predominante no parque é do tipo Cwb, sendo um clima tropical de altitude/subtropical. No PARNA as temperaturas anuais variam entre 19 °C e 22 °C, com temperaturas mínimas podendo atingir -4°C em cotas acima de 2.000 m. A pluviosidade varia entre 1.000 a 1.500 mm anuais, atingindo até 1.750 mm (ICMBIO, 2015).

A área de estudo não dispõe de estações meteorológicas. Dessa forma, para este estudo os dados de precipitação foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram utilizados dados de precipitação de 1986 a 2016 para compor a precipitação média histórica da região, e do período de estudo (Figura 2 – Tabela 1). O posto de coleta da ANA fica distante 8,5 k da borda da área de estudos.

Figura 3 – Precipitação média histórica (1986 – 2016) e do período de estudo (2013 – 2016) para a microbacia do Vale de Santa Marta (Latitude: 20°32'26" S, Longitude: -41:39:56 W; Altitude: 794 m). Barras verticais = desvio padrão.



FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA).

Tabela 2 – Total de precipitação anual e dos dias de chuva para o período de estudos (2013 – 2016) e médias históricas (MH) (1986 – 2016) para a microbacia do Vale de Santa Marta e para o período de estudo (Latitude: 20°32'26" S, Longitude: 41:39:56 W; Altitude: 794 m).

	2013	2014	2015	2016	MH
Total de precipitação (mm)	1983,2	1387,6	1257,5	1667,8	1572
Precipitação mínima/mensal (mm)	7,1	7,4	0,2	9,3	27,6
Precipitação máxima/mensal (mm)	669,1	275,6	222	390,3	298,3
Número de meses secos	4	3*	3*	2	3
Período seco	junho - setembro	Maio - setembro	julho - agosto	julho - agosto	junho - agosto
Total de dias de chuva	126	105	98	114	119

FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA). *Precipitação < 40 mm (ALVARES et al., 2013); ² Meses não consecutivos

Os dados de temperatura do ar foram disponibilizados pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). A estação fica distante 9,5 km da área de estudo e dispõe de dados de temperatura média, máxima e mínima a partir de outubro de 2012, não sendo assim possível a elaboração de uma média histórica tão abrangente quanto a precipitação (Tabela 2).

Tabela 3 – Valores médios mensais para a Temperatura média (Tm), Temperatura máxima (Tmáx) e Temperatura mínima do ar (Tmin) para o período de 2013 - 2016 para a região do Vale de Santa Marta (Latitude: 20°27'57" S, Longitude: 41:42:26 W; Altitude: 857 m).

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Tm	23,6	23,0	23,5	22,2	20,3	18,8	18,0	18,1	18,9	20,7	21,8	22,2
Tmáx	29,8	29,0	29,4	27,9	26,4	24,4	23,5	24,5	24,9	27,0	27,5	27,4
Tmin	18,7	18,4	19,4	18,3	15,5	14,5	13,7	13,0	14,3	15,7	17,7	18,5
n	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(3)	(3)	(3)	(3)	(4)

FONTE: INCAPER. ¹Precipitação < 100 mm; ² Meses não consecutivos

O relevo no Parque varia entre fortemente ondulado a montanhoso. Pertencente a cadeia de dobramentos da Província da Mantiqueira, é constituído de rochas metamorfasadas sendo formadas entre 2 bilhões e 100 milhões de anos atrás (ICMBIO, 2015). Os solos são, em sua maioria, de baixa e média fertilidade, sendo observadas as classes: Latossolos, Argissolos, Neossolos, Organossolo e Cambissolos (RODRIGUES, 2011; SANTOS et al., 2014).

Pertencente ao Domínio Atlântico, são encontradas as formações vegetais de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Semidecidual, Matas Ciliares e Campos de Altitude (ICMBIO, 2015). De acordo com o levantamento florístico realizado por Araújo (2016), a formação vegetacional da microbacia em estudo é constituída por uma Floresta Ombrófila Densa que varia de uma Floresta Montana até uma Floresta Altimontana. Este autor observou para a floresta em questão um

valor estimado de 5.029 ind. ha⁻¹, distribuídos em 455 espécies, 136 gêneros e 63 famílias. As famílias mais abundantes são Melastomataceae, Myrtaceae, Cyatheaceae, Rubiaceae, Lauraceae e Arecaceae, onde Myrtaceae é a família com o maior número de espécies catalogadas, seguidas por Melastomataceae e Lauraceae. Destacam-se como espécies com maior Valor de Importância para a área: *Euterpe edulis* Mart., *Psychotria vellosiana* Benth., *Clethra scabra* Pers., *Vochysia cf. santaluciae* M.C.Vianna & Fontella, *Alsophila cf. capensis* (L.f.) J.Sm., *Hedyosmum brasiliense* Mart. ex Miq. e *Guatteria cf. pohliana* Schlttdl.

As sete unidades amostrais utilizadas no presente estudo, com dimensões de 20x50m e distribuídas nas duas vertentes do Ribeirão Santa Marta em diferentes altitudes, foram implantadas para estudos realizados pelo projeto Universal CNPq nº 475471/2011-3, intitulado Diversidade Biológica e Funcional da Floresta Ombrófila Densa do Parque Nacional do Caparaó, Espírito Santo. Estas parcelas apresentam baixa área basal e elevado Índice de cobertura de Copa (Tabela4).

Tabela 4 – Área Basal da vegetação e índice de Cobertura de Copa (ICC), para as parcelas distribuídas no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcelas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
ICC (%) ¹	86,51	88,4	92,43	70,7	79,024	80,164	73,01
Área basal (m ² ha)	6,91	2,86	3,78	3,61	4,65	3,8	3,87

¹Adaptado de: Abreu, (2017)

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, V. D. S. **Regeneração natural e banco de sementes do solo em um gradiente altitudinal de Floresta Ombrófila Densa.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- AERTS, R. Nutrient use efficiency in evergreen and deciduous species from heathlands. **Oecologia**, v. 84, p. 391–397, 1990.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, R. F. DE; MATRICARDI, E. A. T.; NAPPO, M. E. Zoneamento ecológico de pequena escala para espécies florestais tradicionais no distrito federal. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 421–430, 2012.
- ARAÚJO, E. A. **Estrutura, composição florística e relação vegetação-ambiente em floresta ombrófila densa no Parque Nacional do Caparaó, Espírito Santo.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- BAKER, B. et al. Use of the Köppen–Trewartha climate classification to evaluate climatic refugia in statistically derived ecoregions for the People's Republic of China. **Climatic Change**, v. 98, n. 1–2, p. 113–131, 2010.
- BAKER, T. P. et al. Microclimate through space and time: Microclimatic variation at the edge of regeneration forests over daily, yearly and decadal time scales. **Forest Ecology and Management**, v. 334, p. 174–184, 2014.
- BRANDO, P. M. et al. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1839–1848, 2008.
- BRYSON, R. A. The Paradigm of Climatology: An Essay. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 3, p. 449–455, 1997.
- BUDIKOVA, D. Climatology. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, p. 1–3, 2013.
- CALVI, G. P.; PEREIRA, M. G.; JÚNIOR, A. E. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes em áreas de Floresta Atlântica em Santa Maria de Jetibá, ES. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 1–30, 30 jun. 2009.
- CASTRO, K. C. **Serapilheira e estoque de carbono ao longo de um gradiente altitudinal na Floresta Ombrófila Densa, no parque Nacional do Caparaó, ES.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- CIANCIARUSO, M. V. et al. Produção de serapilheira e decomposição do material foliar em um cerradão na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 49–59, mar. 2006.
- CLARK, D. A. et al. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 356–370, 2001a.
- CLARK, D. A. et al. Net primary production in tropical forests: An evaluation and

synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 371–384, 2001b.

CLARK, D. B.; CLARK, D. A.; OBERBAUER, S. F. Annual wood production in a tropical rain forest in NE Costa Rica linked to climatic variation but not to increasing CO₂. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 747–759, 2010.

CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 27, p. 10316–10321, 2006.

COLEMAN, J. S. M.; LAW, K. T. Meteorology. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, v. 1450, n. 1687, p. 1–7, 2015.

COVELO, F.; DURÁN, J.; GALLARDO, A. Leaf resorption efficiency and proficiency in a *Quercus robur* population following forest harvest. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2264–2271, 2008.

CUNHA, J. DE F. **O banco de sementes do solo e a restauração ecológica de uma área dominada por *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn no Parque Nacional do Caparaó**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2014.

EGLI, M. et al. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence developed on carbonate-rich materials. **Geomorphology**, v. 97, n. 3–4, p. 675–696, 2008.

EWEL, J. J. Litter fall and leaf decomposition in a tropical forest succession in Eastern Guatemala. **Journal of Ecology**, v. 64, n. 1, p. 293–308, 1976.

HAGEN-THORN, A. et al. Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 228, n. 1–3, p. 33–39, 2006.

HARDWICK, S. R. et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 187–195, 2015.

HOBBIE, S. E.; VITOUSEK, P. M. Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests. **Ecology**, v. 81, n. 7, p. 1867–1877, 2000.

HOLMES, R. M.; NELSON DINGLE, A. The relationship between the macro- and microclimate. **Agricultural Meteorology**, v. 2, n. 2, p. 127–133, 1965.

HUANG, J.; WANG, X.; YAN, E. Leaf nutrient concentration, nutrient resorption and litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in eastern China. **Forest Ecology and Management**, v. 239, n. 1–3, p. 150–158, 2007.

ICMBio Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Unidades de conservação**. 2013. Brasília: MMA. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/>. Acesso em: 12 de novembro de 2014.

ICMBIO, I. C. M. DE C. DA B. **Plano de Manejo para Parque Nacional do Caparaó**. Brasília, DF: ICMBIO, 2015.

JACKSON, T. A. Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. **Geoderma**, v. 251–252, p. 78–91, 2015.

- KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo - Parte I - Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: [s.n.]. p. 333–380.
- KILLINGBECK, K. T. Nutrients in Senesced Leaves: Keys to the Search for Potential Resorption and Resorption Proficiency. **Ecology**, v. 77, n. 6, p. 1716, set. 1996.
- LALIBERTÉ, E. et al. How does pedogenesis drive plant diversity? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 28, n. 6, p. 331–340, 2013.
- LAMB, H. H. **Climate: Present, Past and Future (Routledge Revivals): Volume 1: Fundamentals and Climate Now**. [s.l.] Routledge, 1972.
- LEITE, F. P. et al. Nutrient Relations During an Eucalyptus Cycle At Different Population Densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 949–959, 2011.
- LEWIS, S. L. et al. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. **Nature**, v. 457, n. 7232, p. 1003–1006, 2009.
- MAZINE, F. F.; SOUZA, V. C. Myrtaceae dos campos de altitude do Parque Nacional do Caparaó - Espírito Santo/Minas Gerais, Brasil. **Rodriguésia**, v. 59, n. 1, p. 57–74, 2008.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). O sistema nacional de Unidades de conservação Da natureza. Brasília, 2011. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf2008_dap/_publicacao/149_publicacao05072011052951.pdf. Acesso em: 20 de novembro de 2014
- MUGGLER, C. C.; BUURMAN, P.; VAN DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, v. 138, n. 1–2, p. 39–48, fev. 2007.
- NORBY, R. et al. Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. **Ecological Applications**, v. 12, n. 5, p. 1261–1266, 2002.
- NUNES, L. H. A escala nas ciências atmosféricas. **Revista do Instituto Geológico**, v. 19, n. 1–2, p. 71–73, 1998.
- ODUM, E. P. **Fundamentos de Ecologia**. São Paulo: [s.n.]. v. 4
- OLSON, J. S. Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in Ecological Systems. **Ecology**, v. 44, n. 2, p. 322–331, abr. 1963.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicação prática**. Guaíba: Agropecuária, 2002.
- PERINI, M. **Chuva de sementes e sistemas sexuais de espécies lenhosas em um trecho de Floresta Ombrófila Densa, Espírito Santo**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- PHILLIPS, J. D. Weathering instability and landscape evolution. **Geomorphology**, v. 67, n. 1–2, p. 255–272, abr. 2005.
- POGGIANI, F. Ciclagem de Nutrientes em Florestas do Brasil. In: MARTINS, S. V. (Ed.). **Ecologia de Florestas Tropicais do Brasil**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. p. 175–251.

- RAMBO, T. R.; NORTH, M. P. Canopy microclimate response to pattern and density of thinning in a Sierra Nevada forest. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 2, p. 435–442, 2009.
- RICKLEFS, R. E. **Economia da Natureza**. 6 ed. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.
- RODRIGUES, K. R. **Geoambientes e solos em ambientes altimontanos nos Parques Nacionais de Itatiaia e Caparaó-Mg**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. . **Plant Physiology**. 4 ed. ed. Universidade da Califórnia: Wadsworth Publishing Company, 1992.
- SANTOS, J. C. B. DOS et al. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east-west regolith sequence (NE Brazil). **Catena**, v. 150, p. 279–290, 2017.
- SANTOS, H. G. DOS; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. ed. Brasília, DF: EMBRAPA 2013, 2014.
- SCHOOFF, J. T. **Atmospheric Sciences**. [s.l.] Elsevier Inc., 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. [s.l.: s.n.].
- TANNER, E. V. J.; VITOUSEK, P. M.; CUEVAS, E. Experimental Investigation of Nutrient Limitation of Forest Growth on Wet Tropical Mountains. **Ecology**, v. 79, n. 1, p. 10, jan. 1998.
- TURKINGTON, A. V.; PHILLIPS, J. D.; CAMPBELL, S. W. Weathering and landscape evolution. **Geomorphology**, v. 67, n. 1–2 SPEC. ISS., p. 1–6, 2005.
- VITOUSEK, P. M. Litterfall, Nutrient Cycling, and Nutrient Limitation in Tropical Forests. **Ecology**, v. 65, n. 1, p. 285–298, fev. 1984.
- VIVEKANANDA, G. **Parque Nacional Do Superagüi** : [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2001.
- VON ARX, G.; DOBBERTIN, M.; REBETEZ, M. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 166–167, p. 144–155, 2012.
- WRIGHT, T. E. et al. Edge microclimate of temperate woodlands as affected by adjoining land use. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 7–8, p. 1138–1146, 2010.
- YUAN, Z. Y. et al. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China. **Journal of Arid Environments**, v. 63, p. 191–202, 2005a.
- YUAN, Z. Y. et al. Soil characteristics and nitrogen resorption in *Stipa krylovii* native to northern China. **Plant Soil**, v. 273, n. 1–2, p. 257–268, 2005b.

CAPÍTULO I

FORMAÇÃO DOS SOLOS SOB FLORESTA OMBRÓFILA DENSA, NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES

RESUMO

A distribuição dos solos nas regiões montanhosas é resultado de uma intensa combinação de fatores: clima, vegetação, topografia, material de origem e tempo, tornando regiões montanhosas áreas de grande interesse para estudos que visam o entendimento dos efeitos climáticos na diferenciação do ambiente natural. O presente capítulo teve como objetivo compreender os processos de formação dos solos no PARNA do Caparaó, bem como descrever, caracterizar e classificar os solos na área de estudo. O estudo foi realizado no PARNA do Caparaó, em uma Floresta Ombrófila Densa Montana, no Espírito Santo. Na área de estudo encontram-se instaladas sete parcelas permanentes distribuídas em diferentes altitudes (de 1112 à 1550 m acima do nível do mar), onde foram abertos oito perfis para classificação dos solos. Foram realizadas análises morfológicas, físicas e químicas dos horizontes além da descrição em campo. Os solos variaram entre mais desenvolvidos e profundos (Latosolos) à solos pouco profundos, pouco evoluídos e com características semelhantes a rocha matriz (Cambissolos). Em sua maioria são solos com baixo grau de desenvolvimento, com textura média a argilosa, e de baixa fertilidade natural, com elevados teores de matéria orgânica na camada superficial, e com valores extremos de 682,5 e 42,51 g kg⁻¹ de carbono e nitrogênio, respectivamente. Os solos com maior grau de desenvolvimento foram observados nas parcelas de menor altitude, enquanto solos menos desenvolvidos foram observados nas parcelas de maiores altitudes, com expressão marcante da matéria orgânica como fator de formação.

Palavras-chave: Intemperismo; Fertilidade; Matéria orgânica.

ABSTRACT

The distribution of soils in mountainous regions is the result of an intense combination of factors: climate, vegetation, topography, source material and time. What gives mountainous regions of greater interest to studies that aim at climate change. The objective of the chapter was to study soil formation in the study area, to describe and characterize them and to classify the soils of the study area. The study was carried out in the Caparaó National Park, in a Tropical Montane Rain Forest, In the Southeastern in Brazil. In the study area seven permanent plots distributed at different altitudes (from 1112 to 1550 m above sea level) were installed, where eight profiles were opened to classify soils. Morphological, physical and chemical analyzes of the horizons were performed in addition to the field description. The soils varied between more developed and deeper (Latosols) to the shallow soils, little evolved and with characteristics like matrix rock (Cambisols). They are soils with low degree of development, mostly with medium texture, and of low fertility, with high organic matter contents in the superficial layer, and with extreme values of 682.5 and 42.51 g kg⁻¹ of carbon and nitrogen respectively. Soils with a higher degree of development were observed in the lower altitude plots, whereas less developed soils were observed in the plots of higher altitudes, with marked expression of the organic matter as a formation factor.

Keywords: Weathering; Fertility; Organic matter.

1 INTRODUÇÃO

A distribuição dos solos nas regiões montanhosas é resultado de intensa combinação de fatores: material de origem, topografia, tempo de formação, clima e vegetação. Estes fatores regem o processo de formação e a atividade microbiológica no solo existente (BIRKELAND et al., 2003; LALIBERTÉ et al., 2013; MARGESIN et al., 2009), de forma que a melhor compreensão dos processos de formação do solo pode ser obtida por meio do estudo das interações do solo com a paisagem (DERESSA et al., 2018).

Em regiões montanhosas em uma mesma condição climática, a distribuição altitudinal da formação dos solos revela como é o impacto das variáveis meteorológicas e da vegetação em uma escala espacial reduzida, sendo este efeito a reprodução do observado nos sentidos das menores para maiores latitudes (BANGROO; NAJAR; RASOOL, 2017; LALIBERTÉ et al., 2013; MARGESIN et al., 2009). Nesse contexto, a vegetação tem importante papel como fonte de carbono que é estocado, influenciando tanto as características físicas quanto químicas do solo (SAHA; RAJWAR; KUMAR, 2018).

Os solos de regiões montanhosas em climas subtropicais são ambientes frágeis com elevado endemismo sendo refúgio para a vegetação e a vida animal (PINTO et al., 2015). Entretanto, estes ambientes podem ser drasticamente alterados pelas mudanças climáticas, tendendo a liberar as reservas de carbono estocadas nos solos. Alguns trabalhos demonstram a importância dos solos montanos para a manutenção dessas reservas (BANGROO; NAJAR; RASOOL, 2017; DYMOV; ZHANGUROV; HAGEDORN, 2015; SCHAWÉ; GLATZEL; GEROLD, 2007).

Em condições climáticas favoráveis há uma acelerada decomposição da matéria orgânica e mineralização dos nutrientes, enquanto que temperaturas mais baixas, umidade excessiva e/ou déficit hídrico, limitam a atividade microbiana que conseqüentemente, reduzem as taxas de decomposição (O'CONNELL; SANKARAN, 1997; PANDEY et al., 2007). Além disso, a vegetação recebe influência dos fatores climáticos e por meio da composição química da serapilheira aportada também influencia na decomposição da MO (APONTE; GARCÍA; MARAÑÓN, 2012; DENG; ZANG; CHEN, 2008; DOUGHTY; GOULDEN, 2008). Dessa forma, estudos em gradientes podem subsidiar informações sobre as mudanças climáticas e como

estas favorecem a decomposição da MO e liberação de carbono dos solos (SIMON et al., 2018), a comunidade decompositora, atividade enzimática e consequentemente nos processos de pedogênese.

Apesar da importância das áreas montanas, poucos foram os trabalhos que buscaram elucidar mais sobre a formação e as características dos solos no PARNA do Caparaó, sendo o trabalho de Rodrigues (2011), o mais completo sobre solos até então, incluindo a identificação das classes de solo, suas características químicas, físicas, morfológicas, mineralógicas, e as zonas ecológicas onde cada classe é mais evidenciada. Além do trabalho citado, destaca-se também o estudo realizado por Castro (2014), que mensurou o estoque de carbono em função da variação altitudinal e estudou a produção primária por meio da serapilheira e seu acúmulo sobre o solo, e o estudo de Araújo (2016), que evidenciou a relação entre o solo e a vegetação e como estes se distribuem, influenciando um ao outro.

A descrição das características do solo e sua interpretação deve ser realizada buscando perceber a geologia e a geomorfologia de onde está inserido, que favorece a compreensão de como são distribuídos em relação a paisagem (PINTO et al., 2015). Dessa forma, testando a hipótese de que a variação altitudinal é o principal fator de formação dos solos na área do PARNA Caparaó, este estudo tem como objetivos evidenciar os padrões de formação dos solos em função da posição da paisagem e da formação de microclimas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A descrição e a caracterização da área e das parcelas encontram-se no tópico “ÁREA DE ESTUDO”, anterior aos capítulos. Estão instaladas na área de estudo sete unidades amostrais com dimensões de 20x50m distribuídas em duas vertentes do Ribeirão Santa Marta em diferentes altitudes (Tabela 5).

Tabela 5 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Parcela	Altitude (m)	Declividade média (%)	Declividade média (°)	Posição no relevo	Face de exposição
P1	1.112	69,55	34,82	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste/Leste
P2	1.219	58,29	30,24	Terço inferior - ombro de encosta côncava	Leste/Sudeste
P3	1.302	75	36,87	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste
P4	1.319	75	36,87	ombro de encosta de côncavo-convexa	Leste
P5	1.391	48,24	25,75	meio de encosta/ transporte de massa	Norte
P6	1.420	73,39	36,27	meio de encosta convexo-côncavas	Sul/Sudeste
P7	1.550	58	30,11	ombro de encostas convexas	Nordeste

Fonte: O autor.

Inicialmente em cada uma das sete parcelas da área de estudo, foi feita a observação dos fatores físicos e de paisagem (relevo, vegetação e drenagem) que poderiam subsidiar a estratificação da área. Posteriormente foram feitas as tradagens em diferentes pontos da paisagem para identificar possíveis variações dos solos. Dessa forma, foram identificadas oito possíveis variações de classe de solo nas sete parcelas existentes, onde foram abertos os perfis de solo para caracterização química, física e morfológica dos solos.

2.1.1 Análises Morfológicas

A descrição morfológica dos solos foi realizada ainda em campo de acordo com Santos et al. (2005). Foi feita a identificação e caracterização do arranjo e a transição dos horizontes com base na cor dos solos ainda úmidos seguindo o Sistema Munsell de Cores, a estrutura (forma, tamanho e grau de desenvolvimento), bem como a consistência e textura.

Posteriormente a identificação dos horizontes, amostras indeformadas e deformadas de solo foram coletadas e encaminhadas para o Laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE/UFES). As amostras deformadas foram destorroadas com posterior determinação da consistência e da cor seca (SANTOS et al., 2005).

2.1.2 Análises Físicas

Para caracterizar fisicamente os perfis estudados, foram determinadas a Densidade do Solo pelo método do anel volumétrico; a Porosidade Total foi obtida pela massa de água necessária para saturar o solo; a microporosidade realiza pelo método da mesa de tensão; e a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A análise granulométrica foi realizada pelo método da dispersão de acordo metodologia proposta para solos com teor de matéria orgânica acima de 5% com pré-tratamento com H₂O₂ (TEIXEIRA et al., 2017).

A determinação da densidade do solo (kg m⁻³), foi realizada com as amostras indeformadas coletadas nos horizontes com auxílio de anéis volumétricos e um amostrador Uhland. As amostras foram transferidas para latas de alumínio devidamente identificadas e de peso conhecido, secas em estufa a 105 °C por 24 horas e posteriormente, após esfriarem, foram pesadas em balança analítica de precisão.

A densidade do solo foi calculada segundo a expressão:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

Em que:

D_s: densidade do solo (g cm⁻³);

M_s: massa da amostra anidra a 105 °C (g); e

V: volume do anel ou cilindro (cm³).

2.1.3 Análises Químicas de Rotina do solo

Nas amostras deformadas de cada horizonte coletado dos perfis foram realizadas as análises químicas segundo Teixeira et al. (2017). O pH pelo método do pH em H₂O 1:2,5; o alumínio, cálcio e magnésio trocáveis extraídos com solução KCl (1 mol L⁻¹), sendo o alumínio determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, enquanto cálcio e magnésio determinados por espectrofotômetro de absorção atômica. O potássio e sódio foram extraídos com solução de Mehlich 1 e determinados por espectrofotometria de chama. O fósforo foi extraído com solução de Mehlich 1, e lido por espectrofotômetro. A acidez potencial foi extraída por solução tamponada de acetato de cálcio a pH 7 e titulação volumétrica em solução de NaOH (1 mol L⁻¹), utilizando fenolftaleína como indicador. Com os valores obtidos nas análises químicas foi calculada a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica efetiva (t), a capacidade de troca catiônica potencial (T), e a saturação por bases (V).

A determinação do carbono orgânico total (C_{org}) foi adaptada da metodologia proposta por Yeomans e Bremner (1988), por meio da oxidação da matéria orgânica por via úmida, com solução de K₂Cr₂O₇ em meio ácido e aquecimento externo. A determinação do nitrogênio total do solo foi realizada por digestão sulfúrica, seguida por destilação Kjeldahl e titulação com HCl 0,02 mol L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

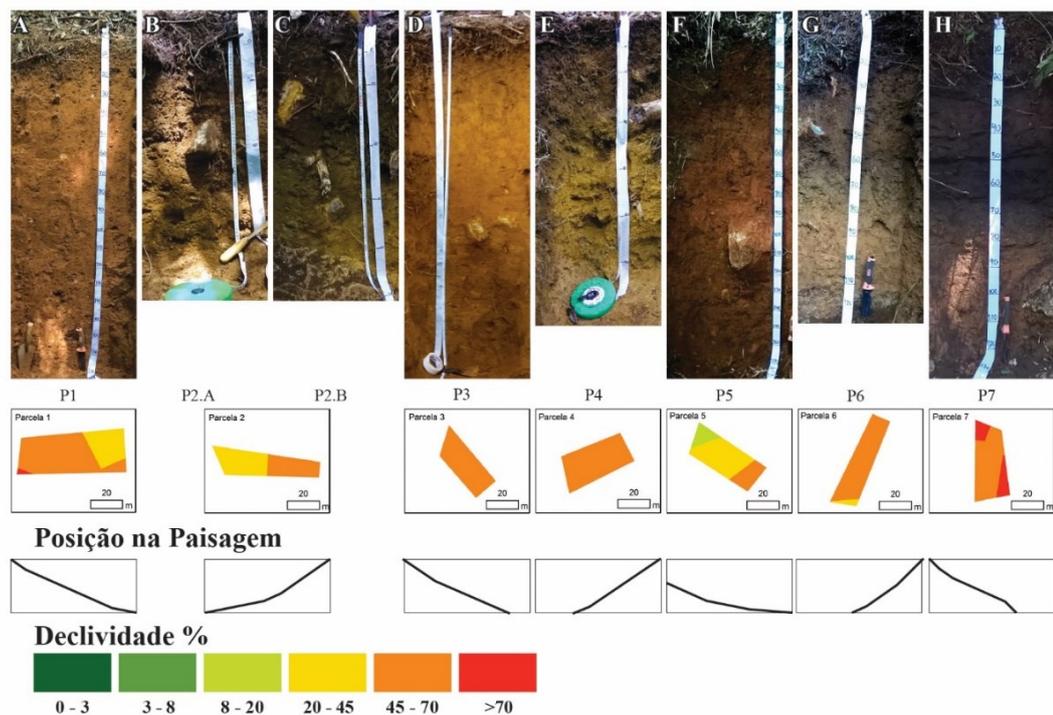
A partir dos atributos morfológicos, físicos e químicos os solos foram analisados pelas suas características e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2018)

3 RESULTADOS

3.1 ASPECTOS GERAIS DOS SOLOS

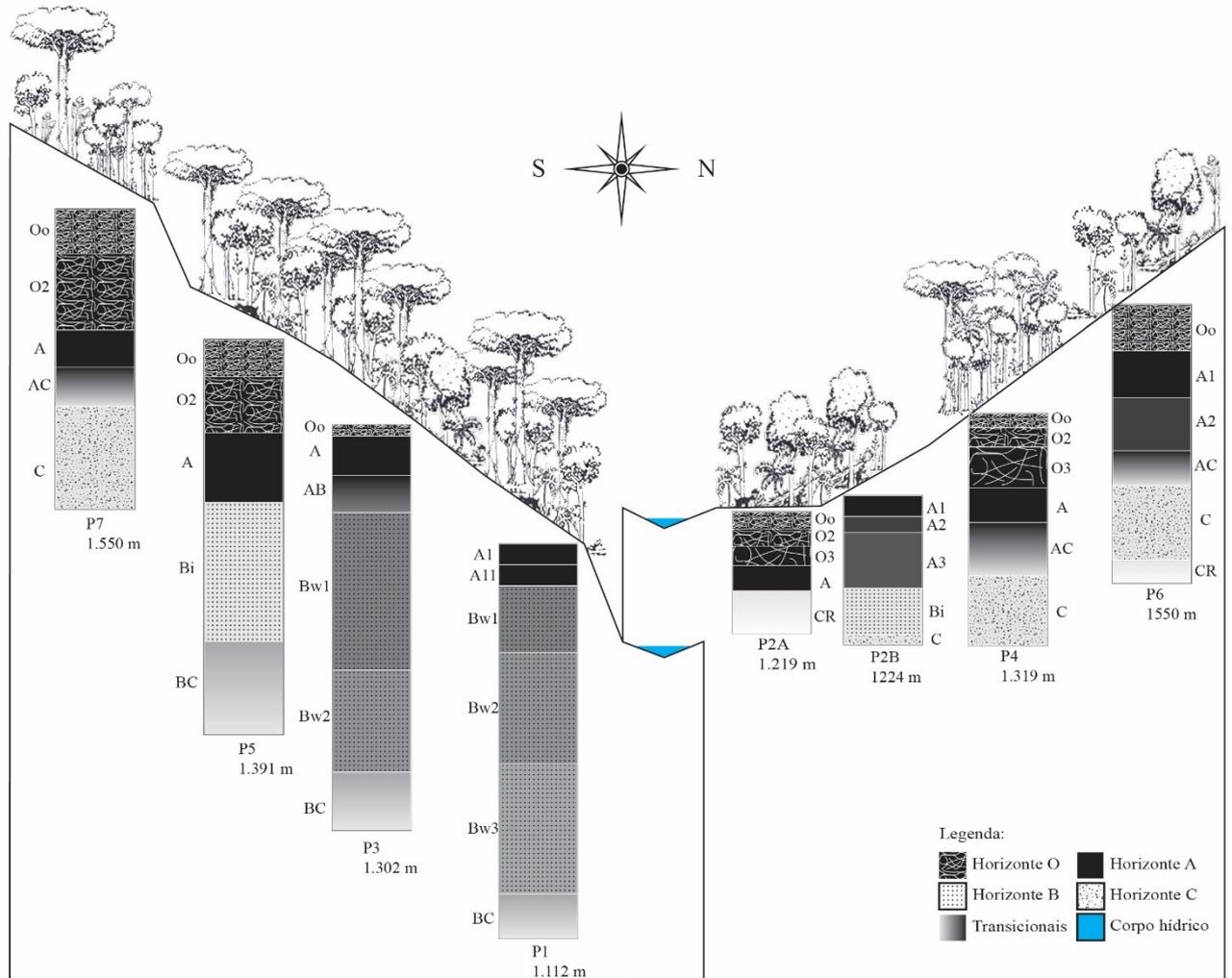
Os solos variaram entre mais desenvolvidos e profundos aos solos pouco profundos, pouco evoluídos e com características semelhantes a rocha matriz, sendo todos bem drenados e com pedogênese relacionada ao relevo, principalmente a declividade e posição na paisagem. O aporte contínuo de serapilheira pela vegetação propicia camadas contínuas que variam em espessura com o aumento da altitude e com a umidade condicionada pela topografia, participando da morfogênese de horizontes orgânicos e húmicos (Figura 4 e 5).

Figura 4 – Perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó.



FONTE: O autor.

Figura 5 – Esquema representativo do gradiente altitudinal e topográfico das classes de solo identificados para as sete parcelas sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.



FONTE: O autor.

Em geral, a variação entre os horizontes foi gradativa, sendo observado na maioria dos horizontes dos oito perfis Matizes 10YR e 7,5YR. Os solos têm expressão de cores mais voltadas para o vermelho-amarelo, com menor Valor e menor Cromo principalmente naqueles com elevados teores de matéria orgânica (MO) na camada superficial. Consequentemente, observa-se maior Valor e maior Cromo para os horizontes mais profundos onde a Matiz pode ser melhor expressa (Tabela 6; Figura 1).

Tabela 6 – Atributos Morfológicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor Munsell		Estrutura ¹		
		Úmida	Seca	Tipo ¹	Tamanho ²	Grau de Desen. ³
----- Perfil P1 -----						
A1	0 - 9	7,5YR/4/6	10YR/4/6	BS+ G	MP - P	Fraco
A11	9 - 18	7,5YR/4/6	10YR/5/8	BS+ G	MP - P	Fraco
Bw1	18 - 47	7,5YR/4/6	10YR/6/8	BS	MP - P	Fraco
Bw2	47 - 95	7,5YR/4/6	10YR/6/8	BS	MP	Fraco
Bw3	95 - 151	7,5YR/4/6	10YR/6/9	BS	MP - P	Fraco
BC	151 +	7,5YR/4/6	10YR/7/6	BS	P	Fraco
----- Perfil P2.A -----						
Oo	0-5	10YR 3/2	10YR 3/2	-	-	-
O2	5-15	10YR 3/2	10YR 3/3	BS	MP - P	Fraco
O3	15-23	10YR 3/2	10YR 3/3	BS	MP - P	Fraco
A	23-34	7,5YR/3/3	10YR 5/4	BS	P	Fraco
CR	34+	7,5YR/2/3	10YR 5/6	BS	M	Fraco
----- Perfil P2.B -----						
A1	0 - 9	10YR/2/2	10YR/4/2	BS	P	Fraco
A2	9 - 16	10YR/3/2	10YR/4/3	BS	P	Fraco
A3	16 - 40	10YR/2/2	10YR/4/4	BS	M	Fraco
Bi	40 - 60	10YR/3/4	10YR/7/6	BS	G	Fraco
C	60 +	7,5YR/4/6	10YR/8/6	GS	-	-
----- Perfil P3 -----						
Oo	5-0	10YR/2/2	7,5YR/3/4	G	P	Fraco
A	0-17	7,5YR/3/4	7,5YR/4/6	BS	M	Moderado
AB	17-33	7,5YR/3/4	7,5YR/4/6	BS	M	Moderado
Bw1	33-101	5YR/3/4	7,5YR/5/8	BS	M	Moderado
Bw2	101-145	5YR/4/6	7,5YR/6/8	BS	M	Moderado
BC	145+	5YR/4/6	7,5YR/6/8	BS	M	Moderado
----- Perfil P4 -----						
Oo	0-6	10YR/2/2	10YR3/3	-	-	-
O2	6-14	10YR/2/2	10YR4/3	BS	MP	Fraco
O3	14-32	10YR/2/2	10YR4/2	BS	MP	Fraco
A	32-47	2,5YR/3/3	2,5YR/6/4	BS	MP	Fraco
AC	47-70	10YR/4/6	2,5YR/6/6	GS	-	-
C	70+	nc	nc	nc	nc	nc
----- Perfil P5 -----						
Oo	0 - 16	10YR/2/2	10YR2/2	G + BS	G - M	Fraco
O2	16 - 40	10YR/4/6	10YR/4/6	G	M	Fraco
A	40 - 70	7,5YR/3/4	7,5YR/4/6	BS	P	Fraco
Bi	70 - 130	5YR/5/6	7,5YR/4/6	BS	M	Fraco
BC	130+	5YR/4/6	7,5YR/5/8	BS	M-G	Fraco
----- Perfil P6 -----						
Oo	0-20	7,5YR/3/4	10YR/3/4	-	-	-
A1	20-40	10YR/3/5	10YR/4/3	G	P - G	Fraco
A2	40-64	10YR/3/6	10YR/4/4	BS	MP - P	Fraco
AC	63-78	10YR/4/6	10YR/5/6	BS	MP	Fraco
C	78-110	7,5YR/5/8	10YR/6/6	BS	P- M	Moderado
CR	110+	nc	nc	nc	nc	nc
----- Perfil P7 -----						
Oo	0-19	10YR/3/4	10YR/3/4	-	-	-
O2	19-52	7,5YR/3/2	10YR/2/1	BS	P - M	Fraco
A	52-68	10YR/2/1	2,5YR/3/2	BS	P	Fraco
AC	68-85	10YR/6/4	10YR/5/6	GS	-	-
C	85+	10YR/6/6	10YR/6/8	BS	P	Fraco

¹Tipo: Bloco Subangulares (BS), Granular (G), Grão Simples (GS); ²Tamanho: Muito Pequeno (MP), Pequeno (P), Médio (M), Grande (G); ³Grau de Desenvolvimento: Moderado; Fraco. *nc: Não Coletado

A estrutura predominantemente foi de blocos subangulares, com a presença de estrutura granular na camada superficial dos solos mais desenvolvidos. Entretanto, a estrutura se mostrou na maior parte dos horizontes dos perfis com grau

de desenvolvimento fraco. No horizonte Oo superficiais dos perfis P2.A, P4, P6 e P7 é constituído basicamente de material vegetal em estados diversos de decomposição e menor expressão da fração mineral, não apresentando estrutura (Tabela 6).

Em relação aos atributos físicos dos solos, a densidade do solo foi inferior para os horizontes superficiais aumentando em profundidade. Entretanto, em relação à porosidade (total, micro e macro), esse comportamento não foi marcante em todas as parcelas, sendo que a micro porosidade compõe a maior parte da porosidade total dos solos (Tabela 7).

Os solos tiveram em sua maioria textura média, contendo maior expressão da fração areia, com acréscimo da fração argila em profundidade. Os perfis P1 e P3 foram exceção com a textura argilosa ao logo dos horizontes e relação silte/argila abaixo de 0,6 (Tabela 8).

Tabela 7 – Atributos Físicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Horizonte	Profundidade (cm)	Ds Mg m ³	Porosidade			Horizonte	Profundidade (cm)	Ds Mg m ³	Porosidade		
			Total	Microp ²	Macro ³				Total	Microp	Macro
Perfil P4											
A1	0 - 9	nc*	nc	nc	Oo	0-6	nc	nc	nc	nc	nc
A11	9 - 18	0,97	0,593	0,318	O2	6-14	0,58	0,696	0,393	0,304	nc
Bw1	18 - 47	0,98	0,580	0,336	O3	14-32	0,62	0,730	0,396	0,333	nc
Bw2	47 - 95	1,14	0,546	0,345	A	32-47	0,67	0,755	0,408	0,347	nc
Bw3	95 - 151	1,41	0,465	0,344	AC	47-70	0,86	0,669	0,359	0,310	nc
BC	151 +	1,46	0,447	0,332	C	70+	nc	nc	nc	nc	nc
Perfil P5											
Oo	0-5	nc	nc	nc	Oo	0 - 16	nc	nc	nc	nc	nc
O2	5-15	0,64	0,659	0,416	O2	16 - 40	0,56	0,779	0,478	0,301	nc
O3	15-23	0,72	0,713	0,516	A	40 - 70	0,67	0,730	0,499	0,231	nc
A	23-34	0,74	0,723	0,536	Bi	70 - 130	1,05	0,630	0,440	0,190	nc
CR	34+	nc	nc	nc	BC	130+	1,24	0,650	0,355	0,296	nc
Perfil P6											
A1	0 - 9	0,71	0,605	0,326	Oo	0-20	ns	nc	nc	nc	nc
A2	9 - 16	0,69	0,732	0,468	A1	20-40	0,60	0,62	0,40	0,22	nc
A3	16 - 40	0,77	0,92	0,534	A2	40-64	0,84	0,64	0,38	0,27	nc
Bi	40 - 60	1,03	0,647	0,514	AC	63-78	1,19	0,58	0,40	0,18	nc
C	60 +	1,31	0,546	0,449	C	78-110	1,19	0,57	0,47	0,11	nc
Perfil P7											
Oo	5-0	0,63	0,75	0,446	CR	110+	nc	nc	nc	nc	nc
A	0-17	0,73	0,72	0,487	Oo	0-19	ns	ns	ns	ns	ns
AB	17-33	1,00	0,657	0,547	O2	19-52	0,60	0,74	0,56	0,18	nc
Bw1	33-101	1,16	0,593	0,49	A	52-68	0,98	0,63	0,41	0,23	nc
Bw2	101-145	1,35	0,529	0,333	AC	68-85	1,37	0,52	0,36	0,15	nc
BC	145+	nc	nc	nc	C	85+	1,56	0,43	0,33	0,11	nc

¹Ds: Densidade do solo; ²Microporosidade (Microp); ³Macroporosidade (Macro); *nc: Não Coletado

Tabela 8 – Distribuição das frações granulométricas nos horizontes dos solos dos perfis abertos sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Horizonte	Profundidade (cm)			Profundidade (cm)			Horizonte	Profundidade (cm)			Textura				
	Areia T	Silte	Argila	Areia T	Silte	Argila		Sill/Arg	Ativ. Argila	Textura	Areia T	Silte	Argila	Sill/Arg	Ativ. Argila
	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻³	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻³		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻³	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻³	cmol _c kg ⁻³	
----- Perfil P1 -----															
A1	400	210	390	0,54	-	ARGILOSA	Oo	670	140	190	0,74	-	MÉDIA		
A11	360	230	410	0,56	-	ARGILOSA	O2	630	220	150	1,47	-	MÉDIA		
Bw1	280	240	480	0,50	18,71	ARGILOSA	O3	510	290	200	1,45	-	MÉDIA		
Bw2	290	240	470	0,51	12,94	ARGILOSA	A	400	320	280	1,14	-	MÉDIA		
Bw3	300	260	440	0,59	11,61	ARGILOSA	AC	420	300	280	1,07	33,71	MÉDIA		
BC	350	240	410	0,59	35,22	ARGILOSA	C	nc	nc	nc	nc	nc	nc		
----- Perfil P2.A -----															
Oo	0-5						Oo	0-16	620	230	150	1,53	-	MÉDIA	
O2	5-15	550	280	170	1,65	MÉDIA	O2	16-40	390	300	310	0,97	-	MÉDIA	
O3	15-23	430	330	240	1,38	MÉDIA	A	40-70	290	380	330	1,15	-	MÉDIA	
A	23-34	440	330	230	1,43	MÉDIA	Bi	70-130	250	310	440	0,70	17,68	ARGILOSA	
CR	34+	400	370	230	1,61	MÉDIA	BC	130+	430	340	230	1,48	9,65	MÉDIA	
----- Perfil P2.B -----															
A1	0-9	520	180	300	0,60	MÉDIA	Oo	0-20	650	160	190	0,84	-	MÉDIA	
A2	9-16	450	250	300	0,83	MÉDIA	A1	20-40	450	280	270	1,04	-	MÉDIA	
A3	16-40	410	300	290	1,03	MÉDIA	A2	40-64	440	270	290	0,93	-	MÉDIA	
Bi	40-60	390	240	370	0,65	ARGILOSA	AC	63-78	420	280	300	0,93	-	MÉDIA	
C	60+	390	270	340	0,79	MÉDIA	C	78-110	320	280	400	0,70	28,95	ARGILOSA	
----- Perfil P3 -----															
Oo	5-0	nc	nc	nc	nc	nc	CR	110+	nc	nc	nc	nc	nc	nc	
A	0-17	260	270	470	0,57	ARGILOSA	Oo	0-19	840	80	80	1,00	-	ARENOSA	
AB	17-33	240	260	500	0,52	ARGILOSA	O2	19-52	680	180	140	1,29	-	MÉDIA	
Bw1	33-101	220	260	520	0,50	ARGILOSA	A	52-68	700	190	110	1,73	-	MÉDIA	
Bw2	101-145	230	250	520	0,48	ARGILOSA	AC	68-85	480	190	330	0,58	29,76	MÉDIA	
BC	145+	220	290	490	0,59	ARGILOSA	C	85+	520	200	280	0,71	nc	MÉDIA	

*nc: Não Coletado

Em geral, os solos dos perfis são ácidos com pH variando entre 3,8 e 5,7. Os teores de Al^{3+} variaram entre 0 e 3,7, e em sua maioria, decrescendo em profundidade até aos horizontes mais profundos onde se eleva novamente. O mesmo comportamento também foi observado para a acidez potencial (H+Al) que teve sua maior expressão nas camadas superficiais dos solos (Tabela 9).

Tabela 9 – Atributos Químicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Horizonte	Profundidade	pH	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	t	T	S.B.	V	m	ISNa
		H ₂ O	mg dm ⁻³						cmol _c dm ⁻³				%		
----- Perfil P1 -----															
A1	0 - 9	4,4	2	40	5	0,1	0,3	2,1	19,5	2,64	20,03	0,54	2,7	79,6	0,11
A11	9 - 18	4,6	1	25	5	0,0	0,2	1,1	13,7	1,36	13,93	0,26	1,9	80,6	0,16
Bw1	18 - 47	4,9	0	10	3	0,0	0,0	0,1	8,9	0,12	8,98	0,07	0,8	41,6	0,15
Bw2	47 - 95	5,0	0	6	0	0,0	0,1	0,0	6,0	0,08	6,08	0,08	1,3	0,0	0,0
Bw3	95 - 151	4,9	0	5	0	0,0	0,1	0,0	5,0	0,11	5,11	0,11	2,1	0,0	0,0
BC	151 +	5,0	0	4	3	7,2	2,4	0,1	4,8	9,66	14,44	9,61	66,5	0,5	0,09
----- Perfil P2.A -----															
Oo	0-5	5,1	14	140	12	2,4	1,3	1,3	36,7	5,42	40,77	4,12	10,1	24,0	0,13
O2	5-15	4,6	4	12	7	0,5	0,5	2,1	25,7	3,18	26,73	1,08	4,0	66,1	0,11
O3	15-23	4,3	4	57	12	0,2	0,2	0,9	24,2	1,45	24,71	0,55	2,2	62,1	0,21
A	23-34	4,4	1	21	5	0,1	0,1	0,7	19,5	0,95	19,74	0,25	1,3	73,9	0,11
CR	34+	4,8	2	8	4	1,0	0,4	1,8	13,5	3,2	14,9	1,4	9,4	56,2	0,12
----- Perfil P2.B -----															
A1	0 - 9	4,7	3	55	13	0,3	0,2	2,1	23,3	2,88	24,1	0,78	3,2	73	0,23
A2	9 - 16	4,0	2	44	7	0,2	0,1	1,0	24,8	1,44	25,26	0,44	1,7	69,4	0,12
A3	16 - 40	4,3	1	19	4	0,1	0,1	0,2	19,2	0,49	19,45	0,29	1,5	40,8	0,09
Bi	40 - 60	4,9	0	16	4	0,3	0,1	0,2	11,2	0,64	11,61	0,44	3,8	31,1	0,15
C	60 +	5,0	0	5	5	3,4	1,8	0,5	6,7	5,73	11,9	5,23	44	8,7	0,18
----- Perfil P3 -----															
Oo	5-0	4,8	15	76	11	0,2	0,3	1,8	35,7	2,56	36,41	0,76	2,1	70,4	0,13
A	0-17	3,8	1	37	8	0,2	0,2	0,5	21,5	1,04	22,03	0,54	2,5	48	0,16
AB	17-33	4,1	1	23	6	0,1	0,1	0,1	15,2	0,33	15,45	0,28	1,8	14,9	0,17
Bw1	33-101	4,9	0	7	3	0,2	0,1	0,0	8,7	0,25	8,92	0,25	2,8	0,0	0,15
Bw2	101-145	5,3	1	7	4	0,1	0,1	0,0	5,3	0,19	5,52	0,19	3,4	0,0	0,32
BC	145+	5,5	0	5	4	1,0	0,7	2,8	4,2	4,45	5,90	1,65	28	62,9	0,29
----- Perfil P4 -----															
Oo	0-6	4,9	9	71	19	0,2	0,2	3,0	48,5	3,7	49,18	0,7	1,4	81,1	0,17
O2	6-14	4,5	6	54	10	0,1	1,5	2,2	52,6	3,99	54,43	1,79	3,3	55,2	0,08
O3	14-32	4,2	5	46	11	0,1	0,1	0,3	29,7	0,72	30,07	0,42	1,4	41,8	0,16
A	32-47	4,4	2	15	8	0,1	0,1	0,4	12	0,68	12,28	0,28	2,3	58,4	0,28
AC	47-70	4,6	2	9	5	0,2	0,2	3,4	9	3,85	9,44	0,45	4,7	88,4	0,23
C	70+	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
----- Perfil P5 -----															
Oo	0 - 16	4,6	4	29	8	0,1	0,1	0,8	41,5	1,12	41,81	0,32	0,8	71,1	0,08
O2	16 - 40	5,3	2	14	7	0,1	0,1	0,3	19,8	0,49	20,06	0,24	1,2	51,2	0,15
A	40 - 70	5,4	1	12	6	0,1	0,1	0,1	13,2	0,3	13,41	0,25	1,9	16,6	0,19
Bi	70 - 130	5,6	0	9	4	0,2	0,0	0,0	7,5	0,28	7,78	0,28	3,6	0,0	0,22
BC	130+	5,7	1	5	0	0,3	0,0	0,0	1,8	0,39	2,22	0,39	17,4	0,0	0,00
----- Perfil P6 -----															
Oo	0-20	4,3	8	32	13	0,1	0,1	3,7	73,0	4,05	73,32	0,35	0,5	91,4	0,08
A1	20-40	4,8	2	32	16	0,1	0,0	3,0	26,8	3,28	27,1	0,28	1,0	91,5	0,26
A2	40-64	4,6	2	9	4	0,1	0,0	1,8	20,5	1,98	20,67	0,18	0,9	90,8	0,08
AC	63-78	4,9	1	9	4	0,1	0,0	1,3	14,7	1,46	14,82	0,16	1,1	89,1	0,12
C	78-110	5,2	0	6	4	0,3	0,3	0,7	11,0	1,29	11,58	0,59	5,1	54,3	0,15
CR	110+	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
----- Perfil P7 -----															
Oo	0-19	4,2	3,0	38,0	25,0	0,2	0,1	2,3	34,8	2,8	35,3	0,5	1,4	82,4	0,3
O2	19-52	4,6	4,0	32,0	15,0	0,1	0,0	3,2	42,2	3,5	42,5	0,3	0,8	91,5	0,2
A	52-68	5,0	2,0	9,0	5,0	0,1	0,0	2,1	25,2	2,3	25,3	0,2	0,7	91,8	0,1
AC	68-85	5,2	1,0	6,0	3,0	0,1	0,0	0,9	9,7	1,1	9,8	0,2	1,6	85,4	0,1
C	85+	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc

*nc: Não Coletado

Oligotróficos, os solos têm baixos teores de P, Ca e Mg, com valores superiores na camada superficial, reduzindo em profundidade. Da mesma forma, os teores de K^+ e Na^+ também são maiores na camada superficial, entretanto há um decréscimo acentuado ao longo dos perfis. Em termos gerais, o perfil P2.A possui maiores teores de nutrientes em relação aos demais perfis, mesmo quanto aos horizontes subsuperficiais. Os baixos teores de nutrientes disponíveis nos perfis avaliados refletem diretamente na baixa saturação por bases indicando que os solos são distróficos (Tabela 9).

Para ambos os solos, a CTC efetiva (t) decresceu em relação a profundidade. Entretanto, no horizonte A dos solos, ocorreu decréscimo em relação à altitude para os perfis P1, P3 e P5, e o comportamento oposto, aumentando a CTC efetiva com a altitude, para os perfis P2.A, P2.B, P4, P6 e P7 (Tabela 9).

A CTC potencial (T) também decresce em relação a profundidade, com valores elevados na camada superficial. Entretanto, para esta camada, os valores são crescentes com a altitude até o perfil P6, para o perfil P7 o valor deste atributo é menos da metade do valor no perfil P6 para o horizonte Oo (Tabela 9).

Os valores mais elevados da saturação por alumínio (m) ocorreram nos horizontes superficiais dos solos mais desenvolvidos (P1, P3 e P5). Contudo, nos solos dos perfis P2.A, P2.B, P4, P6 e P7 a saturação de Al foi elevada e distribuída ao longo das profundidades, e chegando a mais de 90% nos perfis P6 e P7, na maioria de seus horizontes (Tabela 9).

Os teores de carbono e nitrogênio nos horizontes superficiais foram mais elevados, com gradual decréscimo ao longo dos perfis. Considerando os horizontes superficiais, os perfis 6 e 7 obtiveram os maiores valores de carbono (466,3 e 682,5 $g\ kg^{-1}$) e nitrogênio (22,6 e 42,5 $g\ kg^{-1}$), respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10 – Teores de Carbono Total (C_{org}) e Nitrogênio Total (NT) do solo ao logo dos horizontes dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Horizonte	Profundidade (cm)	C_{org} g kg ⁻¹	NT.	C/N	Horizonte	Profundidade (cm)	C_{org} g kg ⁻¹	NT.	C/N
					Perfil P4				
A1	0 - 9	56,5	3,5	16,1	Oo	0-6	379,2	15,6	24,3
A11	9 - 18	33,4	2,3	14,5	O2	6-14	106,5	5,9	18,0
Bw1	18 - 47	13,7	1,5	8,8	O3	14-32	101,2	5,7	17,7
Bw2	47 - 95	10,4	1,0	10,5	A	32-47	55,2	2,7	20,7
Bw3	95 - 151	7,6	0,3	23,8	AC	47-70	28,8	1,4	20,1
BC	151 +	5,1	0,3	16,0	C	70+	nc	nc	nc
					Perfil P5				
					Perfil P2.				
Oo	0-5	337,1	14,8	22,8	Oo	0 - 16	138,1	9,5	14,5
O2	5-15	90,7	5,8	15,6	O2	16 - 40	92,7	4,1	22,8
O3	15-23	82,2	4,6	17,7	A	40 - 70	65,7	3,5	19,0
A	23-34	59,1	3,6	16,6	Bi	70 - 130	10,5	2,1	5,1
CR	34+	47,9	2,5	19,4	BC	130+	7,0	1,4	4,9
					Perfil P6				
					Perfil P2.B -				
A1	0 - 9	72,3	4,9	14,7	Oo	0-20	466,3	22,6	20,7
A2	9 - 16	72,9	4,5	16,1	A1	20-40	72,9	7,4	9,8
A3	16 - 40	63,1	3,3	19,2	A2	40-64	48,6	1,4	35,2
Bi	40 - 60	35,9	1,7	21,2	AC	63-78	32,8	0,4	41,9
C	60 +	20,9	0,9	23,9	C	78-110	15,7	0,9	37,4
					Perfil P7				
					Perfil P3				
Oo	5-0	331,5	14,2	23,3	Oo	0-19	682,5	42,5	16,1
A	0-17	69,0	4,0	17,2	O2	19-52	85,2	3,7	22,8
AB	17-33	27,4	1,0	27,6	A	52-68	27,5	2,6	10,8
Bw1	33-101	18,2	0,7	25,6	AC	68-85	13,7	0,9	15,6
Bw2	101-145	11,2	3,3	3,3	C	85+	5,8	0,7	8,9
BC	145+	12,6	1,7	7,2					

As correlações entre os teores de C_{org} e NT com os atributos físicos e químicos dos solos são apresentadas na Tabela 11. Em relação aos atributos físicos, há correlações negativas do C_{org} com a densidade do solo (D_s) e positivas com a Porosidade Total (P_{Total}), e com a textura do solo (areia e argila). Entre os atributos químicos, foram observadas correlações significativas entre os teores de C_{org} e NT com P, K, Na, H+Al, e T. Além disso, C_{org} se correlacionou com os teores de NT (Tabela 11).

Tabela 11 – Coeficiente de Correlação de Spearman (ρ - rho) com os Atributos Físicos e Químicos dos perfis de solo sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Atributos Físicos	NT		Atributos Químicos	NT	
	Corg	ρ		Corg	ρ
DS	-0,93***	-0,87***	pH	-0,54***	0,42**
PTotal	0,78***	0,68***	P	0,84***	0,83***
Microp	0,46**	0,27	K	0,85***	0,84***
Macro	0,52**	0,60***	Na	0,88***	0,87***
Areia	0,63***	0,57***	Ca	0,03	0,05
Silte	-0,18	-0,18	Mg	0,15	0,15
Argila	-0,66***	-0,60***	Al	0,59***	0,526***
			H+Al	0,93***	0,85***
			t	0,41**	0,34*
			T	0,91***	0,82***
			SB	0,32*	0,35*
			V	-0,37*	-0,27
			m	0,49**	0,39*
			ISNa	0,05	0,15
			Corg		0,90***

*, **, *** significativo a $P < 0,05$, $P < 0,01$ e $P < 0,001$, respectivamente.

3.2 DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS NA PAISAGEM

3.2.1 Latossolos

Dois perfis localizados a esquerda do Ribeirão Santa Marta no sentido da menor para a maior altitude, encontram-se entre 1.112 e 1302 m de altitude acima do nível do mar e com amplitude de declividade variando entre 20 e 70% (P1) e 20 e 45% (P3), ocorrem entre o terço inferior e o terço médio de uma encosta côncava com tendência a suavização da declividade em situação de transporte médio de massa. Essa característica de relevo indica que ambos os perfis se encontram nos limites inferiores das classes de declividade, favorecendo o aprofundamento destes solos pela redução da velocidade do fluxo lateral, a transformação dos constituintes minerais e o processo de latossolização pelo intemperismo químico.

Dessa forma, os perfis P1 e P3 foram classificados em primeira ordem como Latossolos com desenvolvimento de horizonte Bw, favorecido pela condição do relevo. Com o acréscimo da altitude, o horizonte Bw reduziu em espessura, contendo três e duas subdivisões com 133 e 92 cm de espessura respectivamente (Figura 4: A, D).

O Perfil P1, foi classificado como Latossolo Amarelo em Subordem por ter Matiz 7,5YR e 10YR, úmida e seca, respectivamente, em toda a extensão dos seus horizontes, não sendo possível uma diferenciação dos horizontes unicamente pela cor. Em contrapartida, o perfil P3, com Matiz 5 YR no horizonte Bw quando úmido, não sendo classificado nem como Latossolo Amarelo, tampouco como Latossolo Vermelho, sendo assim classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo em Subordem (Tabela 6).

Devido principalmente ao elevado grau de intemperismo, há lixiviação das bases dos solos e por consequência, baixos são os valores de soma de bases (SB) e saturação por bases (V) no horizonte B latossólico (Bw), atrelado a baixos valores de CTC potencial (T) que podem indicar maior participação de minerais 1:1. Nos perfis P1 e P3, os valores de CTC T para o horizonte Bw variaram entre 5,11 e 8,98 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Saturação por bases (V) variaram entre 0,8 no 3,4 no perfil Bw. Esses baixos valores associados à baixa atividade da fração argilas ($<17 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$) dá a esses solos no terceiro nível categórico (Grandes Grupos), a denominação Distróficos (Tabela 8 e 9).

O perfil P1 foi classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, por não ter nenhuma outra característica que o enquadrasse em um quarto nível categórico (Subgrupos) distinto. Entretanto, o perfil P3 foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico, sendo o último nível categórico atribuído a presença de horizonte A húmico, com teor de carbono $69,0 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 10).

A melhor estruturação e maior profundidade destes solos permite a formação e a sustentação de uma vegetação de maior estatura. Em contrapartida, a redução da temperatura com o acréscimo da altitude e o aporte constante e em grande quantidade de serapilheira permitiu o acúmulo de MO e a formação de horizontes superficiais com elevado teor de carbono (Oo e A húmico).

3.2.3 Cambissolo

Observado na área de estudo a 1225 m de altitude próximo ao perfil P2. A, o perfil P2.B é localizado no relevo entre a meia encosta e o terço superior. A encosta

tem inclinação convexa variando de 45 e 70% de declividade, que permite fluxo lateral intenso de sedimentos para áreas mais baixas (Figura 4: C). Este perfil possui horizonte A com elevado teor de carbono, sendo considerado um horizonte A húmico, seguido por um horizonte com 20 cm de espessura e grau de desenvolvimento suficiente para a formação de estrutura fraca em blocos subangulares grandes e com Matiz 10YR, não apresentando espessura suficiente para ser classificado como Bw ou teor de argila para ser classificado como Bt (Tabela 6). Desta forma, o horizonte identificado abaixo do horizonte A atende os requisitos em profundidade, estrutura, cor e textura para ser considerado como um horizonte B incipiente (Bi), sendo este perfil classificado em primeira ordem como CAMBISSOLO (Tabela 2).

O horizonte A deste solo tem teores de C_{org} de 72,3, 72,9 e 63,1 g kg⁻¹ (A1, A2 e A3 respectivamente), sendo considerado A húmico e com base nesse atributo, o perfil foi classificado em segundo nível como CAMBISSOLO HÚMICO. Por apresentar valores de saturação por bases (V%) do complexo sortivo entre 1,5 e 3,8 cmol_c dm⁻³, foi considerado distrófico, e classificado como CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico em nível de Grandes Grupos.

O Horizonte C deste solo, que ocorre a partir dos 60 cm de profundidade, tem transição difusa em relação ao seu contato com a rocha (horizonte R), de forma que há contato lítico antes de 100 cm de profundidade em alguns pontos da área e do perfil. Portanto, o quarto nível categórico (Subgrupos), foi considerado como sendo léptico, e esse perfil sendo classificado como CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico léptico.

A pouca profundidade não permite maior desenvolvimento da vegetação em diâmetro e alturas. A posição de fundo de vale, próxima a calha do rio torna o ambiente úmido, mas com drenagem livre. A umidade constante e o aporte contínuo de material vegetal permitiram a formação de horizonte A húmico, mas sem camada espessa de material orgânico sobre ele.

3.2.4 Organossolos

É a classe de solos que incidiu em maior variedade de situações de relevo e altitude, ocorrendo entre 1219 e 1550 m acima do nível do mar, em ambos os lados do vale, sendo três localizados na face mais a sul (perfis P2.A, P4 e P6), e dois localizado na face mais a norte (perfil P5 e P7) (Figura 4: B, E, F, G e H). São solos que estão posicionados em região de fundo de vale entre o dique aluvial e a região de coluvionamento de pé de vertente (P2.A), região ombro de encosta côncavo-convexa com infiltração e fluxo superficial intenso (P4), região de meio de encosta convexo-côncavas com fluxo superficial (P6), meio de encostas côncavas de coluvionamento de pé de vertente (P5), e ombro de encostas convexas (P7) (Figura 4).

Estes solos têm horizonte hístico (O) com teores de carbono que variaram entre 85 a 682,5 g kg⁻¹ e espessura variando entre 20 cm (perfil P6) a 52 cm (perfil P7). Os sub-horizontes são constituídos tanto de material mais fibroso e menos decomposto superficialmente (perfil P6) a sáprico e totalmente decomposto mesclado com a fração mineral em profundidade (Perfis P5 e P7). Dessa forma por não terem horizonte diagnóstico em subsuperfície, por terem teor de C_{org} superior a 80 g gk⁻¹ e espessura mínima de 20 cm em seus horizontes hísticos, os perfis foram classificados em primeiro nível categórico como ORGANOSSOLOS (Tabela 10).

Ambos os perfis de solos que se enquadram como Organossolos, estão situados em posições na paisagem e em faixas de altitude onde as condições climáticas, com temperaturas baixas e umidade constante ao longo do ano, propiciam solos úmidos e acúmulo de matéria orgânica, mesmo em condição de livre drenagem. Por essas condições ambientais serem o principal fator pedogênico, esses perfis foram classificados em segundo nível categórico como FÓLICOS.

O terceiro nível categórico, Grandes Grupos está relacionada ao estado de decomposição da matéria orgânica presente em cada sub-horizonte. Ambos os solos apresentam mais de um sub-horizonte orgânico com diferente estado de decomposição da MO para cada um deles. Os Perfis P2.A e P4 têm o horizonte Oo (Fíbrico) e dois horizontes sápricos mais expressivos em espessura. O perfil P6 possui apenas um horizonte hístico Oo, com material orgânico fracamente decomposto. Os perfis P5 e P7 possuem um sub-horizonte hístico Oo fracamente decomposto e um sub-horizonte com matéria orgânica quase completamente

decomposta a completamente decomposta, sendo estes mais espessos. Desta forma, no terceiro nível categórico, o perfil P6 foi classificado como ORGANOSSOLO FÓLICO Fíbrico e os perfis P2.A, P4, P5 e P7 como ORGANOSSOLO FÓLICO Sápricos.

Por não haver características excepcionais para sua distinção no quarto nível categórico, o perfil P6 foi denominado como ORGANOSSOLO FÓLICO Fíbrico típico. Da mesma forma, os perfis P2, P4 e P7 não apresentam nenhuma característica que os distingui, sendo denominados ORGANOSSOLO FÓLICO Sáprico típico.

Por fim, o perfil P5, apresentou um horizonte B incipiente (Bi), logo abaixo do horizonte A húmico, com Matiz 5YR mais avermelhada, textura argilosa e relação silte argila maior que 0,7 (Tabelas 6 e 8). Desta forma, este perfil foi denominado ORGANOSSOLO FÓLICO Sáprico cambissólico.

Desse modo, foram observadas para a área de estudo três classes de solo com maior expressão dos Organossolos entre os oito perfis abertos. A classificação completa dos solos, e as informações referentes a localização, posição na paisagem e da vegetação, podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação dos perfis de solos sob Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Perfil	Classificação	Simbologia	Altitude (m)	Coordenadas		Declividade (°)	Relevo	Vegetação
				Lat.	Long.			
P1	LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico	LAd	1.112	-20,492	-41,739	45 - 70	RM	FODM
P2.A	ORGANOSSOLO FÓLICO Fíbrico	Oos	1.219	-20,492	-41,746	20 - 45	RM	FODM
P2.B	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico léptico	CHd	1.224	-20,492	-41,746	45 - 70	RM	FODM
P3	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico	LVAd	1.302	-20,493	-41,747	45 - 70	RM	FODM
P4	ORGANOSSOLO FÓLICO Sáprico típico	Oos	1.319	-20,49	-41,751	45 - 70	RM	FODM
P5	ORGANOSSOLO FÓLICO Sáprico cambissólico	Oos	1.391	-20,492	-41,755	20 - 45	RM	FODM
P6	ORGANOSSOLO FÓLICO Fíbrico típico	Oofi	1.420	-20,492	-41,758	45 - 70	RM	FODM
P7	ORGANOSSOLO FÓLICO Sáprico típico	Oos	1.550	-20,492	-41,765	45 - 70	RM	FODAM

¹RM: Relevo Montanhoso; ²FODM: Floresta Ombrófila Densa Montana; ³FODAM: Floresta Ombrófila Densa Alto Montana

4 DISCUSSÃO

4.1 FORMAÇÃO DO SOLOS

Inicialmente, este trabalho buscou corroborar a hipótese de que somente a variação altitudinal, era responsável por direcionar a formação dos solos com padrão semelhante ao que ocorre nas latitudes e que fatores ambientais e a vegetação contribuíam no processo. Entretanto, esta hipótese não se mostrou válida uma vez que o desenvolvimento dos solos não foi diretamente ligado a variação altitudinal. Este resultado também foi observado no trabalho realizado por Krasilnikov et al. (2011) na Serra Madre Del Sur no México, na costa do Pacífico. Segundo estes autores, a distribuição vertical dos solos é direcionada pela posição na paisagem e processos relacionados a declividade e não a variação vertical. Nas parcelas instaladas no Vale de Santa Marta, os perfis mais intemperizados estão localizados nas menores cotas altimétricas (P1 e P3). Entretanto, solos mais desenvolvidos podem ser observados em maiores altitudes que os demais, como é o caso do P5 em relação ao P2.A, P2.B e P4.

Alguns trabalhos vêm demonstrando que a posição na paisagem e os processos relativos a ela são os principais agentes de formação de solos quando o material de origem é considerado relativamente homogêneo em regiões montanas, com por exemplo: a formação de horizontes hidromórficos e orgânicos relativos ao fluxo subsuperficial (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011), e processos de coluvionamento, escoamento superficial e acúmulo de sedimentos (DIAS et al., 2003; PEREIRA et al., 2013). Dessa forma, os principais processos de pedogênese que atuam na área do presente estudo são os erosivos, o fluxo superficial e a lixiviação, ambos relacionados as características de declividade e posição da paisagem dos perfis. Associados a esses processos, a formação de zonas climáticas distintas ao longo das parcelas demonstra ter complexa interação, contribuindo de forma expressiva a partir de determinada altitude.

O processo erosivo e de movimentação afeta de forma negativa o desenvolvimento de horizontes, favorecendo ciclos de renovação do solo, reduzindo o aprofundamento e a formação de horizontes mais intemperizados (PHILLIPS, 2005). Esse efeito é observado principalmente no CAMBISSOLO HÚMICO (Perfil

P2.B), que é localizando no fundo de vale, no ombro de encosta com fluxo lateral intenso de sedimentos para áreas adjacentes. Entretanto esse processo também é observado em menor intensidade para os demais perfis. Em contrapartida, a formação do perfil P2.A é favorecida pela deposição dos sedimentos oriundos do perfil P2.B, que se acumulam no fundo do vale.

A presença do Latossolos profundos na região do Bloco tectônico da Mantiqueira a qual o PARNA do Caparaó faz parte, pode estar relacionado em menores altitudes com clima mais quente e maior atividade biológica em ciclos geológicos passados. Além disso, a posição da paisagem com elevada precipitação, associada ao relevo montanhoso e a natureza fraturada da rocha, promove intensa lixiviação dos produtos do intemperismo, incluindo a forte remoção de sílica pela decomposição de minerais 1:1, favorecendo inclusive a formação de gibbsita (SIMAS et al., 2005). A formação dos Latossolos nos perfis P1, P3 é resultante principalmente da infiltração e um menor fluxo lateral consequente da posição na paisagem, tendo o intemperismo químico como principal formador dos solos favorecido pela elevada pluviosidade. No trabalho realizado por Krasilnikov et al. (2011), também foi observado que em encostas úmidas florestadas é comum o aprofundamento dos solos em relação as áreas mais áridas.

A presença de um solo com Bi e adiantado processo de evolução no perfil P5 é exemplo da associação entre a posição da paisagem, declividade reduzida e a condição climática propícia. O intemperismo de minerais primários e a neoformação de minerais secundários é esperada em uma intensidade maior para áreas em condição de umidade constante (PHILLIPS, 2005; SANTOS et al., 2017) que é favorecida pela altitude e pelo relevo.

A formação dos Organossolos na área de estudos não está relacionada ao hidromorfismo como relatado por Scheer, Curcio e Roderjan (2011) e Álvarez Arteaga et al. (2008), uma vez que ambas as parcelas têm drenagem livre relativa à inclinação da rampa, incluindo o perfil P2.A. O aporte constante de material vegetal associado as baixas temperaturas dificulta a decomposição e favorece o acúmulo de matéria orgânica sobre o solo. Deste modo, o clima (temperatura e umidade) e a vegetação (aporte vegetal) atuam em conjunto com os processos de pedogênese de erosão e intemperismo químico para formar os horizontes (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008).

4.2 ATRIBUTOS DOS SOLOS

Os resultados das características do solo indicam que quanto maior a inclinação rampa e maior a altitude, menor a profundidade, menos intemperizados e mais semelhante à rocha matriz tendem a ser os solos. Alguns resultados corroboram esta hipótese, onde os valores crescentes da relação silte/argila e do teor de areia total em relação à altitude (Perfis P6, P7) e de intenso movimento de massa (P4 e P2.B) são indicativos de menor intemperismo (ARAUJO et al., 2015; SANTOS et al., 2014).

A tendência na redução dos teores de argila com o acréscimo da altitude na camada superficial do solo, não é característico de movimento de translocação, mas pode estar associada a elevada umidade que contribui na dissolução das argilas pela rápida dessilicificação, favorecendo sua lixiviação (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008; SIMAS et al., 2005) com apenas quartzo dominando a fração <2mm do solo (MARTINS et al., 2015). O mesmo comportamento não acontece nos perfis de menor altitude (P1, P2.A. P2.B, e P3), onde a variação dos teores nas transições de horizontes é mínima, possivelmente pela flocculação das partículas coloidais em pH muito baixos (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008). Além disso, a redução dos teores de argila em altitude pode estar relacionada a maior presença de MO nos horizontes superficiais e a melhor cristalização dos minerais em profundidade. (SIMAS et al., 2005). Gibbsita e caulinita são os minerais dominantes na fração argila dos solos mais lixiviados e intemperizados (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008), onde a formação de gibbsita pode ocorrer pela elevada lixiviação da sílica e pela destruição de minerais 1:1 como relatado por Benites et al. (2007). Entretanto, como relatado por Simas et al. (2005), a formação de horizontes hísticos característico dos perfis de altitude na área de estudo, pode dificultar a cristalização da Al/(IH)3-gibbsita pelo baixo valor de pH e elevado teor de MO.

A baixa fertilidade dos solos observada para todos os perfis pode estar relacionada a perda de nutrientes por lixiviação devida a elevada pluviosidade e drenagem desses ecossistemas de altitude (BENITES et al., 2003, 2007; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011). Essa combinação de fatores propicia a formação de minerais do tipo 1:1 de natureza oxídico-gibbsítico. Por outro lado, os teores dos nutrientes disponíveis em subsuperfície é um indicativo da natureza pobre do material parental (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008; SIMAS et al., 2005), principalmente pela natureza das rochas predominante no complexo, constituídas

principalmente de migmatitos e gnaisses granitizados com diques de anfibolitos, dioritos e grabos que segundo (Rodrigues, 2011). Semelhante litologia foi observada por Martins et al. (2015) estudando os solos em um gradiente altitudinal na Serra da Mantiqueira, onde o material parental é dominado principalmente por granito, gnaisses e xistos.

Entretanto, no perfil P2.A (OOs) localizado em uma região entre a calha do rio e uma encosta leve no fundo de vale e em área de menor declividade comparado a média da parcela (30,24°), recebe a influência direta da posição topográfica. Essa hipótese pode ser corroborada pelo maior teor areia e silte (Tabela 8) e de Ca, Mg K, e P (Tabela 9) nos horizontes deste perfil em comparação aos demais, que é consequência da movimentação dos solos e de nutrientes das áreas adjacentes (PEREIRA et al., 2013; VASHCHENKO et al., 2007) que são mais elevadas.

Este perfil se assemelha ao relatado por Vashchenko et al. (2007) na Serra Ibitiraquire sob Floresta Ombrófila Densa Montana. Esses autores observaram Neossolo Litólico Húmico típico de fundo de vale ou margem de rio e, segundo os mesmos, a declividade da encosta propicia a perda de sedimentos para as áreas mais baixas que se acumulam, dando origem a solos um pouco mais profundos. Um bom indício do arraste de sedimentos e de nutrientes para o perfil P2.A (OOs) é a presença do perfil P2.b (CHd), localizado entre a meia encosta e o terço superior ao lado da área onde foi observado o perfil P2.A. Neste Cambissolo (P2.b), os valores de bases são inferiores ao Organossolo (P2.A), com maiores teores de Al^{3+} . Esses valores também são inferiores aos encontrados por Vashchenko et al. (2007) para um Cambissolo localizado no terço inferior da encosta.

Os valores de Na^+ e K^+ encontrados nos solos neste estudo foram superiores aos obtidos por Simas et al. (2005) em levantamento de solo realizado na Serra da Mantiqueira. Esses autores justificam uma possível contribuição da orografia para os maiores teores desses dois nutrientes nos solos. Como não participam na estrutura da vegetação, são constantemente lavados das copas, bem como carregados por nuvens de chuva.

Em relação a CTC efetiva dos solos, o decréscimo em seus valores segundo Reynders (1964) citado por Schawe, Glatzel e Gerold (2007), está relacionado a destruição das argilas pelo rápido intemperismo e pela lixiviação de ambientes muito úmidos. Entretanto, apesar da água ser fundamental para o intemperismo químico, seja como solvente ou meio transportador, o tipo e o grau de degradação do mineral também é controlado por outros fatores como: a composição da solução do solo, a

interação com o ambiente e a presença de microrganismos (JACKSON, 2015; KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009), onde a abundância de determinados íons ou ácidos de origem orgânica pode propiciar ou impedir a neoformação de minerais.

Desta forma, acredita-se que o padrão de CTC efetiva (t) que os perfis P2.B, P4, P6 e P7 possuem, se diferencia dos perfis P1, P3 e P5 não somente pelo fato dos primeiros estarem em áreas mais úmidas que os demais, mas também pela participação dos fatores biológicos dos solos. Nesse sentido, os ácidos orgânicos provenientes da decomposição da serapilheira e da exsudação biológica, contribuem principalmente na neogênese de minerais secundários do tipo 1:1, ou óxidos-hidróxidos de Fe e Al, característicos de intemperismo mais acentuado, resultando em uma menor capacidade de troca catiônica (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009).

A elevada CTC potencial (T) associada aos horizontes com elevado teor de MO, também foram observadas em outros estudos (DIAS et al., 2003; MARTINS et al., 2015; SIMAS et al., 2005; SKORUPA et al., 2012) A CTC (T) está relacionada principalmente com as cargas negativas da própria MO coloidal (substâncias húmicas), uma vez que essas substâncias têm grande quantidade de cargas negativas, em oposição a fração argila quando do tipo 1:1 em solos tropicais (BENITES et al., 2003). Corroborando com esses resultados, foram obtidas correlações positivas entre a CTC potencial (T) e o C_{org} e NT do solo ($p < 0,001$).

Assim, como o valor T, os valores de H+Al tiveram elevada correlação com os teores de C_{org} e NT. Essa forte relação indica que a maior parte da acidez potencial do solo está relacionada a MO, complexando e evitando valores elevados de Al^{3+} , reduzindo sua toxicidade para a vegetação (BENITES et al., 2007; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011), pela presença de ácidos orgânicos no solo provenientes da decomposição. Além da forma coloidal da MO já humificada, as plantas também secretam compostos na rizosfera que também complexam o Al^{3+} , principalmente na camada superficial do solo onde a quantidade de raízes finas é maior (BENITES et al., 2003).

Por outro lado, existe tendência a uma maior acidificação do ambiente por parte da hidrólise e liberação de H^+ dos compostos orgânicos e de outros compostos como de enxofre, pela formação de ácidos orgânicos fúlvico e húmicos (EBELING et al., 2008; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011; SIMAS et al., 2005). Ainda segundo Ebeling et al. (2008), quanto mais baixo o valor da relação $Al/H+Al$, maior é a participação dos íons H^+ na acidez do solo, como consequentemente na ocupação dos sítios de carga da CTC do solo. Não somente ocorrem valores baixos de Al^{3+} ao

longo dos perfis, mais também elevados valores H+Al e de T nos horizontes superficiais, e as fortes correlações do carbono com estes dois últimos atributos corroboram essa hipótese.

Apesar o perfil P1 não ter horizonte húmico na sua descrição, isso se deve pela pouca espessura e baixo teor de C_{org} do horizonte A deste solo. Com menos de 20 cm de espessura e teor de carbono entre 33,4 e 56,5 g gk^{-1} , estes valores estão dentre os valores citados por diferentes autores para solos com elevado teor de C_{org} (ÁLVAREZ ARTEAGA et al., 2008; DIAS et al., 2003; EBELING et al., 2008; FONTANA et al., 2010; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011), mas não caracterizam um horizonte A húmico.

O horizonte Oo observado em alguns perfis (P2.A, P3, P4, P5, P6 e P7), é constituído de folhas, galhos e outros materiais fragmentados e parcialmente decompostos entrelaçados a uma quantidade elevada de raízes, principalmente raízes finas. Essa composição de horizonte Oo, também foi observada por Vashchenko et al. (2007) na Serra Ibitiraquire e por Simas et al. (2005) na Serra da Mantiqueira. Esse mecanismo evita a perda de nutrientes e torna a ciclagem de nutrientes mais eficientes, uma vez que as raízes entrelaçadas no horizonte Oo favorece a absorção de hidrossolúveis (SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011; SIMAS et al., 2005) e evita que pela declividade do terreno, frações como o Carbono solúvel sejam perdidas por transporte lateral (erosão superficial) (CHEN; CHIU, 2000). Além disso, o aporte orgânico constante, associado com a disponibilidade hídrica, as baixas temperaturas e o acúmulo de húmus, favorecem o processo de melanização, que propicia a coloração escura para os horizontes superficiais e subsuperficiais (DERESSA et al., 2018). Similarmente ao observado por Simon et al. (2018), a espessura do horizonte orgânico tende a ser maior, com o aumento da altitude, mesmo que a produção primária não seja elevada, sendo compensada pelas taxas de decomposição mais baixas.

Assim como observado por Bangroo, Najar e Rasool (2017), há um aumento dos teores de C_{org} com a variação altitudinal, porém não existe uma clara influência da face de exposição como relatado por estes autores. Segundo estes autores, as principais influências da face de exposição voltada para o norte estão relacionadas à influência na umidade e na radiação recebida pela vegetação, que é condicionada a produzir material com menores taxas de decomposição e as condições ambientais menos propícias a atividade microbiana (BANGROO; NAJAR; RASOOL, 2017).

5 CONCLUSÕES

O processo de pedogênese foi marcadamente controlado pela posição da paisagem e pelos fluxos horizontais e verticais controlados pela declividade do terreno e associados as condições climáticas. Esses fatores indicaram a formação de três classes de solo na área de estudo, variando de solos mais profundos como os Latossolos a solos com constante renovação como os Cambissolos.

Em sua maioria, os solos apresentaram horizonte hístico sobre horizonte A húmico, ou horizonte A húmico, sobre outros horizontes. Isso indica que há marcante influência do aporte de matéria orgânica em associação com a condição climática que é consequência da posição do relevo e da altitude contribuindo para o acúmulo de matéria orgânica e sua participação na morfogênese dos solos formando assim os Organossolos.

6 REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ ARTEAGA, G. et al. Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juárez, Southern Mexico. **Geoderma**, v. 144, n. 3–4, p. 593–612, 2008.
- APONTE, C.; GARCÍA, L. V.; MARAÑÓN, T. Tree Species Effect on Litter Decomposition and Nutrient Release in Mediterranean Oak Forests Changes Over Time. **Ecosystems**, v. 15, n. 7, p. 1204–1218, 2012.
- ARAÚJO, E. A. **Estrutura, composição florística e relação vegetação-ambiente em floresta ombrófila densa no Parque Nacional do Caparaó, Espírito Santo.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- ARAUJO, J. K. S. et al. Caracterização de latossolos amarelos húmicos em um ambiente altimontano na região agreste do estado de Pernambuco, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 1, p. 146–160, 2015.
- BANGROO, S. A.; NAJAR, G. R.; RASOOL, A. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. **Catena**, v. 158, n. June, p. 63–68, 2017.
- BENITES, V. DE M. et al. **Caracterização dos Solos em Duas Toposequências sobre Diferentes Litologias em Áreas Altimontanas na Serra da Mantiqueira.** Rio de Janeiro: [s.n.].
- BENITES, V. M. et al. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 4, p. 569–577, 2007.
- BIRKELAND, P. W. et al. Integrating soils and geomorphology in mountains - An example from the Front Range of Colorado. **Geomorphology**, v. 55, n. 1–4, p. 329–344, 2003.
- CASTRO, K. C. **Serapilheira e estoque de carbono ao longo de um gradiente altitudinal na Floresta Ombrófila Densa, no parque Nacional do Caparaó, ES.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- CHEN, J. S.; CHIU, C. Y. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. **Geoderma**, v. 96, n. 1–2, p. 19–30, 2000.
- DENG, F.; ZANG, R.; CHEN, B. Identification of functional groups in an old-growth tropical montane rain forest on Hainan Island, China. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 5–6, p. 1820–1830, 2008.
- DERESSA, A. et al. Soil classification of humid Western Ethiopia: A transect study along a toposequence in Didessa watershed. **Catena**, v. 163, n. December 2017, p. 184–195, 2018.
- DIAS, H. C. T. et al. Caracterização de solos altimontanos em dois transectos no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 469–481, jun. 2003.

DOUGHTY, C. E.; GOULDEN, M. L. Are tropical forests near a high temperature threshold? **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. October 2007, p. G00B07, 2008.

DYMOV, A. A.; ZHANGUROV, E. V.; HAGEDORN, F. Soil organic matter composition along altitudinal gradients in permafrost affected soils of the Subpolar Ural Mountains. **Catena**, v. 131, p. 140–148, 2015.

EBELING, A. G. et al. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 429–439, 2008.

FONTANA, A. et al. Quantificação e utilização das frações húmicas como característica diferencial em horizontes diagnósticos de solos Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1241–1257, ago. 2010.

JACKSON, T. A. Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. **Geoderma**, v. 251–252, p. 78–91, 2015.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do Solo - Parte I - Conceitos Básicos**. Viçosa, MG: [s.n.]. p. 333–380.

KRASILNIKOV, P. V. et al. Soils in the dynamic tropical environments: The case of Sierra Madre del Sur. **Geomorphology**, v. 135, n. 3–4, p. 262–270, 2011.

LALIBERTÉ, E. et al. How does pedogenesis drive plant diversity? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 28, n. 6, p. 331–340, 2013.

MARGESIN, R. et al. Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 67, n. 2, p. 208–218, 2009.

MARTINS, S. C. et al. Soil texture and chemical characteristics along an elevation range in the coastal Atlantic Forest of Southeast Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 106–116, 2015.

O'CONNELL, A. M. ; SANKARAN, K. V. Organic Matter Accretion, Decomposition and Mineralisation. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (Eds.). **Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests**. Australia: Canberra: ACIAR, 1997. p. 443–480.

PANDEY, R. R. R. et al. Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in northeastern India. **Forest Ecology and Management**, v. 240, n. 1–3, p. 96–104, 2007.

PEREIRA, M. G. et al. Caracterização e classificação de solos em uma topossequência sobre calcário na Serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 25–36, 2013.

PHILLIPS, J. D. Weathering instability and landscape evolution. **Geomorphology**, v. 67, n. 1–2, p. 255–272, abr. 2005.

PINTO, L. C. et al. Micromorphology and Pedogenesis of Mountainous Inceptisols in the Mantiqueira Range (Mg). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, n. 5, p. 455–462, 2015.

- RODRIGUES, K. R. **Geoambientes e solos em ambientes altimontanos nos Parques Nacionais de Itatiaia e Caparaó-Mg**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- SAHA, S.; RAJWAR, G. S.; KUMAR, M. Soil properties along altitudinal gradient in Himalayan temperate forest of Garhwal region. **Acta Ecologica Sinica**, v. 38, n. 1, p. 1–8, 2018.
- SANTOS, J. C. B. DOS et al. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east-west regolith sequence (NE Brazil). **Catena**, v. 150, p. 279–290, 2017.
- SANTOS, R. D. DOS et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 2005.
- SANTOS, H. G. DOS; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. ed. Brasília, DF: EMBRAPA 2013, 2014.
- SANTOS, H. G. DOS; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., re ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.
- SCHAWWE, M.; GLATZEL, S.; GEROLD, G. Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: Podzolization vs. hydromorphy. **Catena**, v. 69, n. 2, p. 83–90, 2007.
- SCHEER, M. B.; CURCIO, G. R.; RODERJAN, C. V. Funcionalidades ambientais de solos altomontanos na Serra da Igreja, Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1013–1026, ago. 2011.
- SIMAS, F. N. B. et al. Chemistry, mineralogy and micropedology of highland soils on crystalline rocks of Serra da Mantiqueira, southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 125, n. 3–4, p. 187–201, abr. 2005.
- SIMON, A. et al. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan mountain forests. **Geoderma Regional**, v. 12, n. December 2017, p. 28–38, 2018.
- SKORUPA, A. L. A. et al. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 11–22, fev. 2012.
- TEDESCO, M. J. et al. **ABNT**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de solos, UFRGS, 1995.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l: s.n.].
- VASHCHENKO, Y. et al. SOLOS E VEGETAÇÃO DOS PICOS CAMACUÃ, CAMAPUÃ E TUCUM – CAMPINA GRANDE DO SUL - PR. **Scientia Agraria**, v. 8, n. 4, p. 411, 6 dez. 2007.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467–1476, out. 1988.

CAPÍTULO II

DINÂMICA DA SERAPILHEIRA E NUTRIENTES SOB FLORESTA OMBRÓFILA DENSA NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES

RESUMO

A complexidade das florestas úmidas é um reflexo da variação espacial e temporal das condições ambientais. As mudanças climáticas podem influenciar a produtividade e a distribuição das espécies causando impacto na dinâmica do carbono e nutrientes no ecossistema. O objetivo do estudo foi avaliar a dinâmica da serapilheira e dos nutrientes ao longo de quatro anos em um trecho de Floresta Ombrófila Densa Montana localizado no Parque Nacional do Caparaó. Foram instaladas sete parcelas de 1000 m² em diferentes cotas altitudinais (1112 m a 1550 m acima do nível do mar) para o estudo. A produção de serapilheira foi mensurada mensalmente entre janeiro de 2013 e dezembro de 2016, usando oito coletores com área igual 0,5225 m² por parcela. A serapilheira acumulada sobre o solo de cada parcela foi mensurada mensalmente durante quatro anos sendo amostrado o material vegetal em 12 pontos por parcela. Foram instalados 24 Litterbag por parcela em dezembro de 2014 e o material remanescente foi avaliado nos intervalos de 30, 60 90 120, 150, 180, 270 e 360 dias após instalação. O material vegetal da serapilheira depositada e acumulada foi analisado quimicamente com determinações de nutrientes, lignina, celulose e polifenóis totais realizadas para cada estação do ano de 2016. A quantidade média de serapilheira produzida no trecho de floresta em estudo foi estimada em 6.859,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e a biomassa de serapilheira acumulada sobre o solo foi estimada em 6.256,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹. A serapilheira produzida anualmente não variou significativamente entre os anos de 2013, 2014, 2015 e 2016. Entretanto, no ano de 2013 a biomassa de serapilheira acumulada sobre o solo foi superior aos demais. A Serapilheira depositada demonstrou um padrão sazonal para todas as frações, com maiores aportes no verão e na primavera, e menores no outono e no inverno. A constante de decomposição (k) média para a área de estudo foi de 1,1 e o tempo médio para decomposição de 50% do material (t_{50%}) 227,6 dias. Não foi observado variação sazonal marcante nos teores de C, N e P nas serapilheiras. Maiores teores de polifenóis totais foram observados nas folhas durante o inverno, e os teores de lignina e celulose foram constantes durante o ano. Após 360 dias, a biomassa remanescente nos litterbags foi pouco inferior a 50% da massa inicial. Tanto o P quando Ca foram imobilizados durante o processo de decomposição. Lignina e celulose foram liberados a partir dos 180 e 90 dias de decomposição respectivamente. Por meio deste estudo, pode-se concluir que a floresta em questão se encontra em equilíbrio dinâmico. A produção

de serapilheira é fortemente adaptada ao regime hídrico histórico da região. Pode-se supor que na área de estudo a produção primária líquida não tem limitação de N mas tem limitação de P.

Palavras-chave: Biomassa; Decomposição; Ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

The complexity of rain forests reflects the spatial and temporal variation of environmental conditions. Climate changes influences productivity in these forests and the distribution of species, causing an impact on the carbon stock set in biomass. This study aimed to test the production and the interannual accumulation of litter, its seasonality and chemical characteristics, relating to decomposition patterns and nutrient flow to the soil. The study was carried out in a section Tropical Montane Rain Forest located in the Caparaó National Park. Seven plots of 1000 m² were installed in different altitudes (1112 m to 1550 m above sea level) for the study. The litter study was carried out with monthly collections between January 2013 and December 2016. Eight litter traps with 0.75 x 0.75 m of area were distributed in each plot, and were collected and separated into two fractions: Leaves and Other Materials. The accumulation of litter was carried out with the random collection of 12 samples of material deposited on the soil. Twenty-four Litterbag per plot was installed in December 2014 and the remaining material was evaluated at intervals of 30, 60, 90, 120, 150, 180, 270 and 360 days after installation. The litterfall and accumulated litter was chemically analyzed for macronutrients, lignin, cellulose, and total polyphenol determinations performed for each season of 2016, as well as the material remaining in the litterbags. The average annual contribution to the study area was 6,859.3 kg ha⁻¹ year⁻¹ and the average accumulation of 6,256.9 kg ha⁻¹ year⁻¹. There was no difference for the total annual production. However, in 2013 the biomass of accumulated litter on the soil was higher than 2014, 2015, and 2016. The deposited litter showed a seasonal pattern for all fractions, with higher contributions in summer and spring, and lower in autumn and winter. The mean decomposition constant (k) for the study area was 1.1 and the mean time for decomposition of 50% of the material ($t_{50\%}$) was 227.6 days. The study does not show marked seasonal variation in the contents of C, N and P for Leaf and Other Matters Fractions. The highest levels of total polyphenols were observed for the leaves fraction in winter, and the lignin and cellulose contents were contrasting during the year. After 360 days, a biomass remaining in the litterbags was slightly less than 50% of the starting mass. Both P and Ca were immobilized during the decomposition process. Lignin and cellulose were released from 180 and 90 days of decomposition, respectively. By means of this study, it can be concluded that the forest in question is in dynamic equilibrium. The production of litter is strongly adapted to the historical water regime

of the region. It can be assumed that in the study area the net primary production has no limitation of N but has a limitation of P.

Keywords: Biomass; Decomposition; Nutrient cycling

1 INTRODUÇÃO

As florestas correspondem a aproximadamente 20% do estoque de C e 35% da produção primária terrestre. Muitos são os fatores que controlam a distribuição de Florestas Tropicais Montanas, dentre os quais pode-se citar a redução da temperatura do ar, o aumento da nebulosidade, disponibilidade de nutrientes e saturação do solo (CUNHA et al., 2009; DENG et al., 2018; TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998). De muitas formas, a complexidade das florestas úmidas é um reflexo da variação espacial e temporal das condições ambientais (SILVER et al., 1994). Nas regiões tropicais e subtropicais, as variações interanuais do clima ocorrem com frequência. Por consequência, elas acabam alterando a fenologia das árvores, causando irregularidades na produção de flores, e no aporte de biomassa (PAUDEL et al., 2015).

A maior parte da produção primária em ambientes terrestres é expressa pela produção de biomassa da serapilheira, que posteriormente é em parte decomposta para reabastecimento das reservas de nutrientes no solo (XU; HIRATA, 2005). Uma vez que a produção de serapilheira é um reflexo da interação entre as características específicas das árvores com as mudanças ambientais, ela pode ser utilizada como indicador de mudanças ambientais e perturbações ecológicas (ZHOU et al., 2006). Nesse sentido, as mudanças climáticas provavelmente influenciam a produtividade nessas florestas e a distribuição das espécies, causando impacto no estoque de carbono fixado na biomassa, bem como nos ciclos hidrológicos (HILTNER et al., 2016).

Numerosos estudos têm demonstrado os padrões sazonais de produção de serapilheira para Florestas Tropicais (PAUDEL et al., 2015; RÖDERSTEIN; HERTEL; LEUSCHNER, 2005; YAMASHITA et al., 2010; ZHOU et al., 2006). Porém, pouco se sabe sobre a dinâmica interanual, e poucos estudos se dedicaram a elucidar as variações na disponibilidade de nutrientes e a seu teor na serapilheira sazonais, mesmo sendo crítico para o entendimento das taxas de decomposição e disponibilização de nutrientes nas florestas (PAUDEL et al., 2015). Por outro lado, a riqueza de plantas e a diversidade funcional tem sido utilizado para explicar a maior parte da decomposição onde umidade e temperatura não restringe esse processo (CIZUNGU et al., 2014),

A decomposição da serapilheira regula a ciclagem de nutrientes por meio da mineralização dos componentes orgânicos que consequentemente afeta a Produção Primária Líquida (PPL), principalmente onde limitações na produção estão relacionadas a baixa disponibilidade de nutrientes no solo, que em geral evolui com o grau de intemperismo (HOBBIE; VITOUSEK, 2000). Em geral, nas Florestas Tropicais de Terras Baixas o solo é rico em N, sendo a PPL limitada pela disponibilidade de minerais de origem intempérica como o P. Por consequência, os teores deste elemento nas folhas são elevados, bem como é elevada a relação N:P da serapilheira, entretanto o teor deste elemento é baixo no solo (CLEVELAND; TOWNSEND, 2006; LALIBERTÉ et al., 2013). Nessas florestas o P-orgânico oriundo da serapilheira é a principal fonte de P para a vegetação.

A qualidade e a quantidade do material depositado sobre o solo são fatores que mais influenciam a decomposição da serapilheira, a ciclagem de nutrientes, e o estoque de carbono nos solos. Entretanto a decomposição também é regulada por alterações no microclima onde a mesma acontece (FUJII; TAKEDA, 2010; GE et al., 2013). Temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e umidade dos solos, são os principais fatores que influenciam a decomposição nas diferentes altitudes onde as florestas se encontram (PRESCOTT, 2002; SINSABAUGH; MOORHEAD; LINKINS, 1994; YAMASHITA et al., 2010). Por exemplo, variações do fluxo de CO₂ quase sempre são controlados por mudanças na temperatura do solo durante o dia, tendo a serapilheira importante contribuição para esse fluxo (ZHANG et al., 2016; ZIMMERMANN et al., 2009). O crescimento em diâmetro de florestas primárias está associado a períodos mais úmidos (VASCONCELOS et al., 2012).

Em escala microclimática, o dossel é responsável por alterações na temperatura, o sombreamento e o efeito tampão da temperatura existente no dossel também afeta o sub-bosque abaixo dele, redireciona a precipitação, retira água do solo pela evapotranspiração, muda a composição da precipitação que passa por ela. Não o bastante, apesar de ser uma menor proporção da biomassa toda da floresta, folhas e ramos que compõe o dossel, tem maior teor de nutrientes e é a principal via de retorno ao solo (PRESCOTT, 2002), e alguns estudos procuraram relacionar a influência do dossel na formação de microclimas tão distintos (GHUMAN; LAL, 1987; HOLWERDA; ALVARADO-BARRIENTOS; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, 2016; LANDSBERG; GOWER, 1997; ZHANG et al., 2016; ZIMMERMANN et al., 2009).

Mesmo com ampla gama de trabalhos relativos à interações entre vegetação, solo, e comunidade decompositora, modelos explicativos dos processos relativos à

decomposição e a ciclagem do carbono e de nutrientes são difíceis de se elaborar, por serem compostos por muitos fatores bióticos e abióticos que interagem entre si (SCHIMMEL; WEINTRAUB, 2003; SINSABAUGH; MOORHEAD; LINKINS, 1994). O entendimento do processo de decomposição que governa o processo de ciclagem de C e dos demais nutrientes, ajuda a entender a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (XU; HIRATA, 2005). Além disso, estudar o estoque de carbono e as variáveis que influenciam o sistema Solo-Planta pode indicar o potencial da cobertura florestal para sequestrar C da atmosfera, sendo considerado um serviço ambiental que reduz o impacto das mudanças climáticas (CUNHA et al., 2009; DENG et al., 2018).

Este estudo teve por objetivo quantificar a produção e o acúmulo interanual de serapilheira, sua sazonalidade e suas características químicas, relacionando com os padrões de decomposição e o fluxo de nutrientes para o solo. As hipóteses foram: (1) A variação climática interanual e sazonal podem se correlacionar com as variáveis de biomassa e modificar o padrão de aporte e acúmulo de serapilheira; (2) O padrão de decomposição pode ser um processo único para cada parcela e se correlacionaria com as variáveis ambientais individuais das mesmas; e, (3) A sazonalidade do fluxo de nutrientes bem como substâncias orgânicas podem direcionar a decomposição e o acúmulo de serapilheira.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição e a caracterização da área e das parcelas encontram-se no tópico “ÁREA DE ESTUDO”, anterior aos capítulos desta publicação. Estão instaladas na área de estudo sete unidades amostrais com dimensões de 20x50m distribuídas em duas vertentes do Ribeirão Santa Marta em diferentes altitudes (Tabela 13).

Tabela 13 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Parcela	Altitude (m)	Declividade média (%)	Declividade média (°)	Posição no relevo	Face de exposição
P1	1.112	69,55	34,82	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste/Leste
P2	1.219	58,29	30,24	Terço inferior - ombro de encosta côncava	Leste/Sudeste
P3	1.302	75	36,87	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste
P4	1.319	75	36,87	ombro de encosta de côncavo-convexa	Leste
P5	1.391	48,24	25,75	meio de encosta/ transporte de massa	Norte
P6	1.420	73,39	36,27	meio de encosta convexo-côncavas	Sul/Sudeste
P7	1.550	58	30,11	ombro de encostas convexas	Nordeste

Fonte: O autor.

2.1 APORTE E ACÚMULO DE SERAPILHEIRA E TEORES DE NUTRIENTES E SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS

Para o estudo da dinâmica de ciclagem de nutrientes via serapilheira, foi utilizada a base de aporte e acúmulo de serapilheira coletados oriundos do trabalho de Castro (2014) janeiro de 2013 a outubro de 2013, uma nova base de dados foi obtida por meio da coleta mensal conforme estudos de Freire, Scoriza, Piña-Rodrigues (2014) e Pitman (2013), entre novembro de 2013 e dezembro de 2016 (38 meses), totalizando quatro anos de coleta contínua (48 meses).

2.1.1 Aporte de serapilheira

O estudo do aporte de serapilheira foi realizado por meio da coleta de material senescente em oito coletores de serapilheira depositada preexistentes em cada parcela na área de estudo, e que foram sistematicamente distribuídos no interior de cada uma das sete unidades amostrais, sendo um coletor para cada 250 m², segundo recomendação de Pitman (2013). Os coletores de serapilheira foram feitos com estrutura composta por canos de PVC, com telas de nylon, em malha de 4 mm x 2 mm e dimensões de 0,75 x 0,75 m (0,5625 m²) e 0,75 m de altura do solo (CABIANCHI, 2010). A coleta de serapilheira foi realizada por meio de extração manual e posteriormente, o material de cada coletor foi transferido para sacos plásticos individuais, devidamente identificados com o número da unidade experimental e a data de coleta.

Foi observando que para a área de estudo, a produção de folhas foi superior a soma dos demais materiais (CASTRO, 2014). Posteriormente a coleta em campo, as amostras de serapilheira foram previamente secas ao ar livre e optou-se por separar nas frações:

- Folhas: fração constituída por folhas verdes, secas, predadas e em estado de decomposição; e
- Outros Materiais: fração constituída por galhos de diferentes diâmetros, sendo excluídos galhos com diâmetro superior a 2 cm (ARATO; MARTINS; FERRARI, 2003; CLARK et al., 2001b), cascas, material reprodutivo vegetal (flor, fruto e sementes), restos de animais ou suas fezes e materiais não identificados (material muito fragmentado ou de origem desconhecida).

2.1.2 Acúmulo de serapilheira

A quantificação do acúmulo de serapilheira sobre o solo foi realizada por meio da coleta da camada de material vegetal até o nível do solo, ou até a camada de raízes absorventes entrelaçados aos estágios mais avançados de decomposição da serapilheira. Foram realizadas 12 coletas com o auxílio de um gabarito de 0,25 m x 0,25 m (0,0625 m²) em um caminhar em ziguezague, com distância mínima

entre os pontos de 4 m, evitando-se a coleta sobre trilha e afloramentos (AVERTI; DOMINIQUE, 2011; CALDEIRA et al., 2008; KAVVADIAS et al., 2001).

2.1.3 Decomposição Foliar

O ensaio de decomposição foliar foi feito pela metodologia do “Litterbag”, ou bolsas de decomposição adaptada do trabalho realizado por Bockock e Gilbert (1957). Foram confeccionadas bolsas de decomposição com dimensões de 25x25 cm, em malha de nylon (2x4 mm).

Cada bolsa de decomposição foi preenchida com 10g de tecido foliar previamente seco a 65 °C, proveniente do estudo da dinâmica de serapilheira. A fração folhas coletada durante os meses de junho, julho e agosto de 2014 (inverno/2014) em cada uma das sete parcelas deste estudo, foi homogeneizada, respeitando-se a origem (parcela) de cada material. Os litterbags preenchidos com as folhas foram depositados no campo respeitando as mesmas parcelas de origem para decomposição em dezembro de 2014.

Para estimativa da taxa de decomposição da fração foliar os litterbags levados a campo foram recolhidos nos intervalos de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 270 e 360 dias. Em cada um dos intervalos de tempo, foram recolhidos três litterbags (repetições) por parcela.

As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira/CCAUE-UFES, foram secas previamente ao ar livre. Posteriormente, os litterbags foram limpos com auxílio de pincel e pinça, para retirada de raízes, insetos e solo aderido no material remanescente.

2.1.4 Quantificação e Análises químicas dos nutrientes

As amostras das frações da serapilheira depositada, da serapilheira acumulada e da decomposição foram devidamente secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, até atingir massa constante, sendo assim determinada a sua

massa seca em balança de precisão. A quantificação das frações da serapilheira depositada e da acumulada foi estimada para kg ha⁻¹.

Após aferida a biomassa das amostras mensais de cada fração da serapilheira depositada e a serapilheira acumulada foram unidas por estação, respeitando os devidos anos de coleta (2013, 2014, 2015 e 2016), sendo:

- Verão: material proveniente da deposição e acúmulo entre os meses de janeiro e março;
- Outono: material proveniente da deposição e acúmulo entre os meses de abril e junho;
- Inverno: material proveniente da deposição e acúmulo entre os meses de julho e setembro; e
- Primavera: material proveniente da deposição e acúmulo entre os meses de outubro e dezembro.

Para a análise química das frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada foram utilizadas as amostras relativas as estações do ano de 2016. As amostras foram moídas em moinho do tipo Wiley com peneiras de malha 1,0 mm (20 mesh) e armazenadas para subsequente análise química de carbono orgânico, macronutrientes, lignina, celulose e polifenóis

O teor de carbono do material vegetal foi quantificado por meio do método da perda de massa por ignição (KIEHL, 1985) onde inicialmente foi determinada a umidade da amostra após a secagem em estufa de circulação formada a 65 °C (U₆₅ °C) e a 105 °C (U₁₀₅ °C). A massa seca foi levada a mufla e aquecida lentamente para evitar a formação de labaredas até atingir a temperatura de 550 °C correndo a incineração do material. O teor de carbono total da amostra foi calculado com base na porcentagem de MO, multiplicado pelo fator 0,555.

A matéria orgânica total foi calculada com bases nas seguintes equações:

$$MO = \frac{(p2 - p3) * 100}{p1} \quad (1)$$

Em que:

MO= Matéria orgânica total (%);

P1= Peso da amostra seca a 65 °C(g);

P2= Peso da amostra seca a 105 °C (g); e

p3 = Peso da amostra incinerada na mufla a 550°C (g);

O teor de nitrogênio do tecido vegetal foi realizado por meio da conversão do N orgânico em amônio (NH^+). A amostra de tecido vegetal foi pré-digerida por 12 horas com 1 ml de H_2SO_4 (96%), e posteriormente adicionado 1 ml de H_2O_2 (30%) e levada ao bloco digestor, a temperatura foi elevada gradativamente até chegar em $300\text{ }^\circ\text{C}$, onde permaneceu por 30 min. Após esfriar fora do bloco, foi adicionado 1 ml de H_2O_2 (30%) e mantido em temperatura de $200\text{ }^\circ\text{C}$ por 15 minutos. O extrato foi lido em espectrofotômetro (480 nm) com adição água destilada, 0,5 de Tartarato de Sódio (10% ou $0,3545\text{ mol L}^{-1}$) e 0,5 de Reagente de Nessler (LINDNER, 1944).

O teor de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) foram determinados pela extração ácido nítrico (HNO_3 65%) e perclórico (HClO_4 70%) segundo Carmo et al., (2000). Inicialmente foi realizada uma digestão prévia das amostras, com a adição de 1 ml de HNO_3 e repouso de aproximadamente 12 horas. Posteriormente, foi adicionado 3 ml HNO_3 e a amostra foi aquecida gradativamente a $120\text{ }^\circ\text{C}$. Após a redução do volume, foi adicionado 2 ml de HClO_4 (70%) e a amostra foi gradativamente aquecida a $150\text{ }^\circ\text{C}$. Após a digestão, foi adicionada 22 ml de água pura. A partir deste extrato, o teor de P do extrato foi lido em espectrofotômetro (725 nm), na presença da solução de 725, e solução de Ácido Ascórbico 2%. O Teor K foi determinado em fotômetro de chama, Ca e Mg foram determinados em espectrometria de absorção atômica, e S foi lido em espectrofotômetro (420nm) em meio a Solução Tampão de Trabalho e Solução de Reagente de Trabalho.

Os teores de lignina e celulose foram obtidos por meio da determinação das Fibras em Detergente Ácido (FDA) (VAN SOEST, 1967) e da lignina pelo método do Permanganato (VAN SOEST; WINE, 1968) adaptados por Rodrigues (2010). Inicialmente, o material foi colocado em bloco digestor com 35 ml de solução de detergente ácido a $120\text{ }^\circ\text{C}$, durante uma hora. Posteriormente, o material foi filtrado em cadinho de vidro (gooch), utilizando uma bomba de vácuo, sendo realizada duas lavagens com água quente ($90 - 100\text{ }^\circ\text{C}$) e outra duas lavagens com acetona. O material foi seco em estufa $105\text{ }^\circ\text{C}$, e pesado.

A FDA foi calculada com base na expressão:

$$\%FDA = \frac{Pf - (P_{g\text{ooch}})}{Pi (\text{Amostra})} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$\%FDA$ = Fibras em Detergente ácido (%);

P_f = Peso do Cadinho + mais fibras (g);

P_{gooch} = Peso do cadinho; e,

P_i = peso inicial da amostra.

Após a terminação da FDA, a determinação da lignina foi realizada pelo método do Permanganato de Potássio com material resultante da quantificação da FDA presente no interior dos cadinhos. Os cadinhos foram colocados em bandejas sobre uma camada de água, sendo adicionada a solução de $KMnO_4$, mantendo o contato da solução com as partículas por 15 min, com posterior filtração. O processo foi repetido, com duração de 90 minutos, e nova sucção. Posteriormente a isto, os cadinhos com o material resultante foram digeridos com uma solução desmineralizante durante 10 min, sendo o processo realizado duas vezes, a fim de que a cor amarelada fosse observada nas fibras. Foram realizadas duas lavagens com etanol (80%) e outras duas lavagens com Acetona. O material foi seco em estufa a 105 °C pesado.

A porcentagem de lignina foi calculada com base na equação:

$$\%LIG = \frac{P_f - (P_{cc})}{P_i(amostra)} \times 100 \quad (3)$$

$\%LIG$ = Teor de Lignina (%);

P_f = Peso do Cadinho + mais fibras (g);

P_{cc} = Peso do cadinho – menos lignina (g); e,

P_i = peso inicial da amostra.

A determinação da celulose foi feita por meio da incineração dos cadinhos durante 2 horas a 500 °C, e posterior pesagem do material resultante (cinzas).

A porcentagem de celulose foi calculada com base na equação:

$$\%CEL = \frac{P_{cc} - (P_{cz})}{P_i(amostra)} \times 100 \quad (4)$$

$\%CEL$ = Teor de celulose (%);

P_{cz} = Peso do cadinho + Cinza (g);

Pcc = Peso do cadinho – lignina (g); e,

Pi = peso inicial da amostra.

O teor de polifenóis do tecido vegetal foi obtido por meio do método adaptado de King e Heath (1974) (ROBINSON, 1994). A digestão do material foi realizada, inicialmente com álcool metílico (50%), e mantido em banho maria por cerca de uma hora entre 77 - 80 °C. O extrato foi filtrado utilizando álcool metílico (50%). Posteriormente, uma alíquota do extrato foi transferida para balão volumétrico, e adicionada a solução *Folin-Denis* e a solução de Carbonato de sódio (17%), ficando em repouso por 20 min. A leitura da absorbância foi em 760 nm.

O total de polifenóis foi calculado com base na seguinte equação:

$$\%Pol\ i = \frac{C * \%}{W} \quad (5)$$

$\%Pol\ i$ = Teor de Polifenóis (%);

C = Teor obtida pela absorbância (nm); e

W = Peso da Amostra (g).

A taxa de mineralização dos nutrientes em função do tempo de decomposição será calculada por meio da equação proposta por Guo e Sims (1999)

$$R\% = \frac{W_0 C_0 - W_t C_t}{W_0 C_0} \quad (6)$$

Onde:

R% = taxa de mineralização de nutrientes (%);

W₀ = massa inicial do material vegetal foliar (g);

C₀ = teor inicial do nutriente (g kg⁻¹);

W_t = massa seca do material vegetal no tempo de (g); e

C_t = teor do nutriente do material vegetal foliar remanescente no tempo coleta (g kg⁻¹).

2.2 ANÁLISE DOS DADOS

Para a análise da biomassa da serapilheira, os dados foram submetidos ao teste F , para verificar a homogeneidade das variâncias e de normalidade de resíduos de Shapiro-wilk. Por não se enquadrar em um modelo padrão de delineamento, posteriormente, foi aplicado o teste t pareado de Student para a comparação entre as médias dos anos. A observação das variações sazonais de biomassa e do teor de nutrientes, foi feita por meio de estatística descritiva com (médias, desvio padrão e coeficiente de variação).

Os valores de perda de massa e de nutrientes do ensaio de decomposição foram ajustados pelos modelos propostos por Olson (1963):

$$X_t/X_0 = e^{-kt} \quad (7)$$

Em que:

X_t = é o peso seco do material remanescente em cada período de coleta;

X_0 = é peso seco inicial do material;

t = é o intervalo de tempo de decomposição;

e = é a base dos logaritmos naturais;

k = é a constante de decomposição.

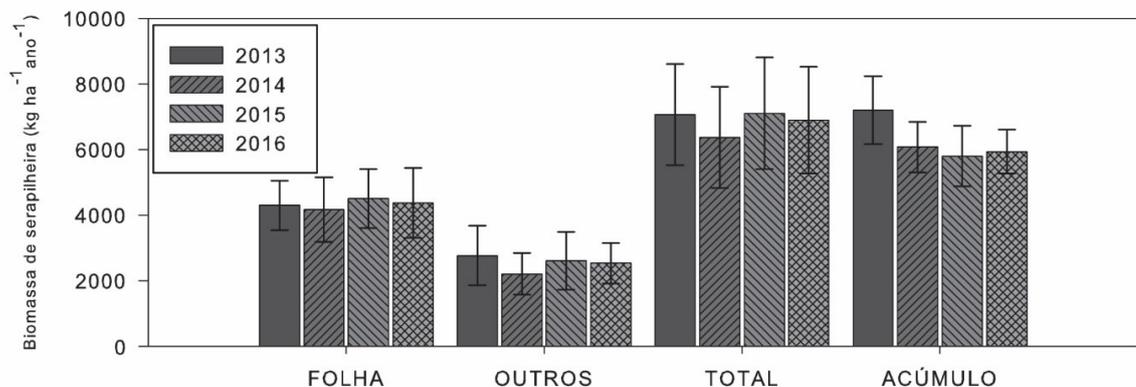
O tempo necessário para que 50% ($t_{50\%}$) e 95% ($t_{95\%}$) do material seja degradado, foi estimado pelas equações propostas por Shanks e Olson (1961):
 $t_{50\%}=0,693/k$ e $t_{95\%}=3/k$

3 RESULTADOS

3.1 DINÂMICA DA BIOMASSA DE SERAPILHEIRA

O aporte de serapilheira se mostrou contínuo não existindo diferença entre os totais anuais aportados ($p > 0,05$). O aporte anual médio para a área de estudo foi de $6.859,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Deste total, a fração folhas contribuiu em média com $4.336,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (63,2%), e a fração outros materiais com $2.530,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (36,8%). Em relação à média de acúmulo anual para o período de estudo, foi observado que apenas o ano de 2013 se diferiu dos demais anos ($p < 0,05$) (Tabela 1), sendo observada uma redução no acúmulo de serapilheira do primeiro para os demais anos de estudos. O acúmulo médio de serapilheira sobre o solo foi de $6.256,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figura 6 e Tabela 14).

Figura 6 – Produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e do acúmulo médio de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão.



FONTE: O autor.

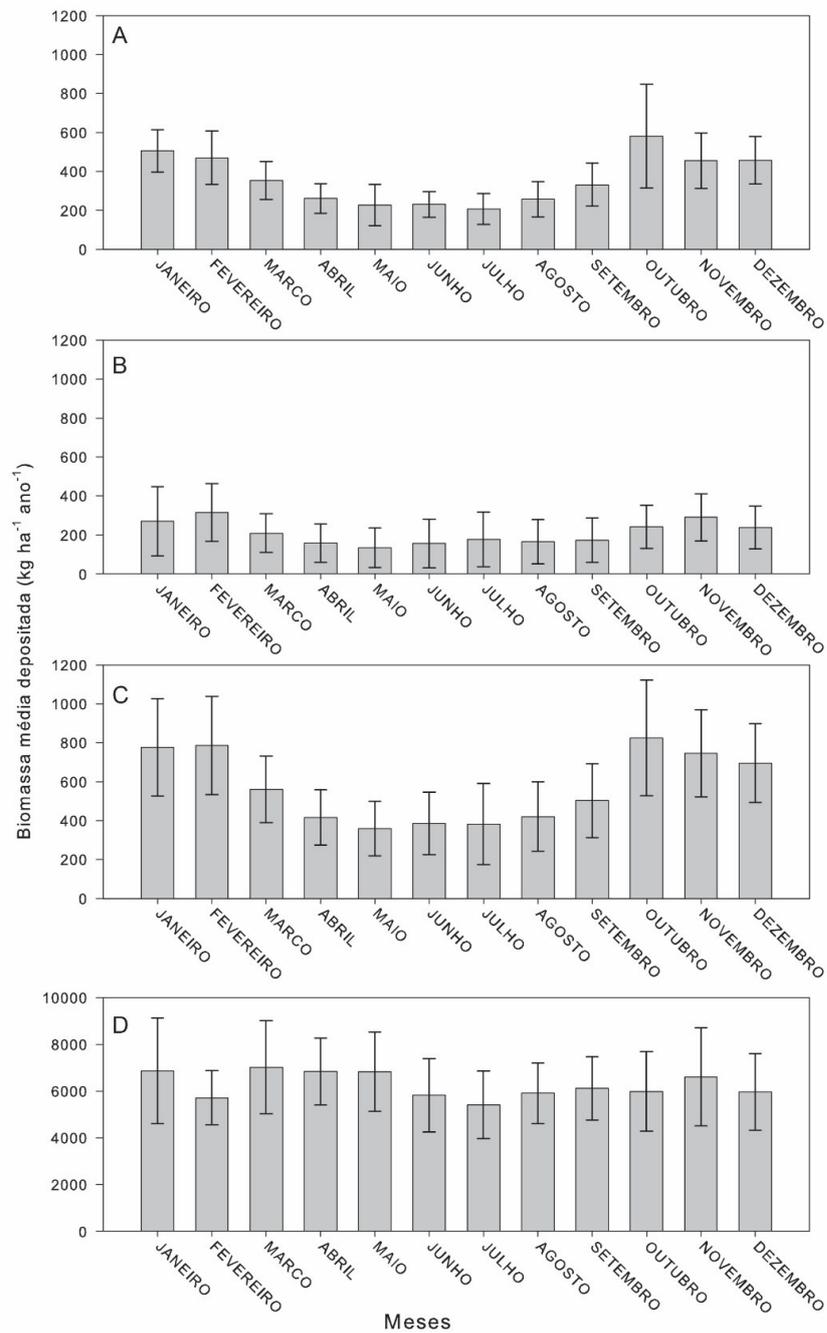
Tabela 14 –. Teste de significância entre as médias anuais de aporte das frações e total e da média de acúmulo da serapilheira entre os anos de 2013 e 2016 em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Folhas ¹				Total ¹			
Ano	2014	2015	2016	Ano	2014	2015	2016
2013	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	2013	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
2014		<i>ns</i>	<i>ns</i>	2014		<i>ns</i>	<i>ns</i>
2015			<i>ns</i>	2015			<i>ns</i>
Outros ¹				Acúmulo ²			
Ano	2014	2015	2016	Ano	2014	2015	2016
2013	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	2013	*	*	*
2014		<i>ns</i>	<i>ns</i>	2014		<i>ns</i>	<i>ns</i>
2015			<i>ns</i>	2015			<i>ns</i>

¹Comparação realizada pelo Teste t; ² Comparação realizada pelo teste *U* de Mann-Whintney; *ns*: Não significativo; *significativo ($p < 0,005$).

Ao longo do ano, a variação mensal do aporte de serapilheira teve maior variação na fração folhas em relação a fração outros materiais. O aporte médio indica uma menor deposição de serapilheira entre os meses de abril e agosto, enquanto que o acúmulo médio exibe uma maior homogeneidade ao longo do ano (Figura 7).

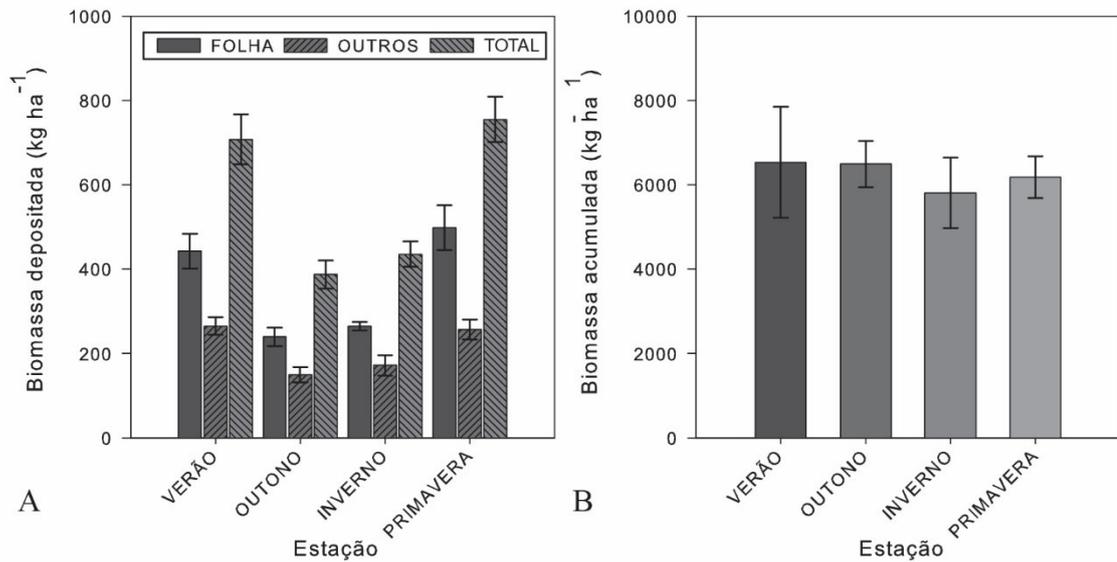
Figura 7 – Produção mensal média de folhas (A), outros materiais (B) e total (C) da serapilheira depositada e mensal média do acúmulo (D) de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão.



FONTE: O autor.

Em termos médios, a variação sazonal indica que os maiores aportes de serapilheira total e suas frações ocorrem no verão e na primavera, e com valores semelhantes entre o outono e o inverno. Já em relação ao acúmulo, observa-se pouca variação sazonal, com um pequeno decréscimo na biomassa do inverno (Figura 8).

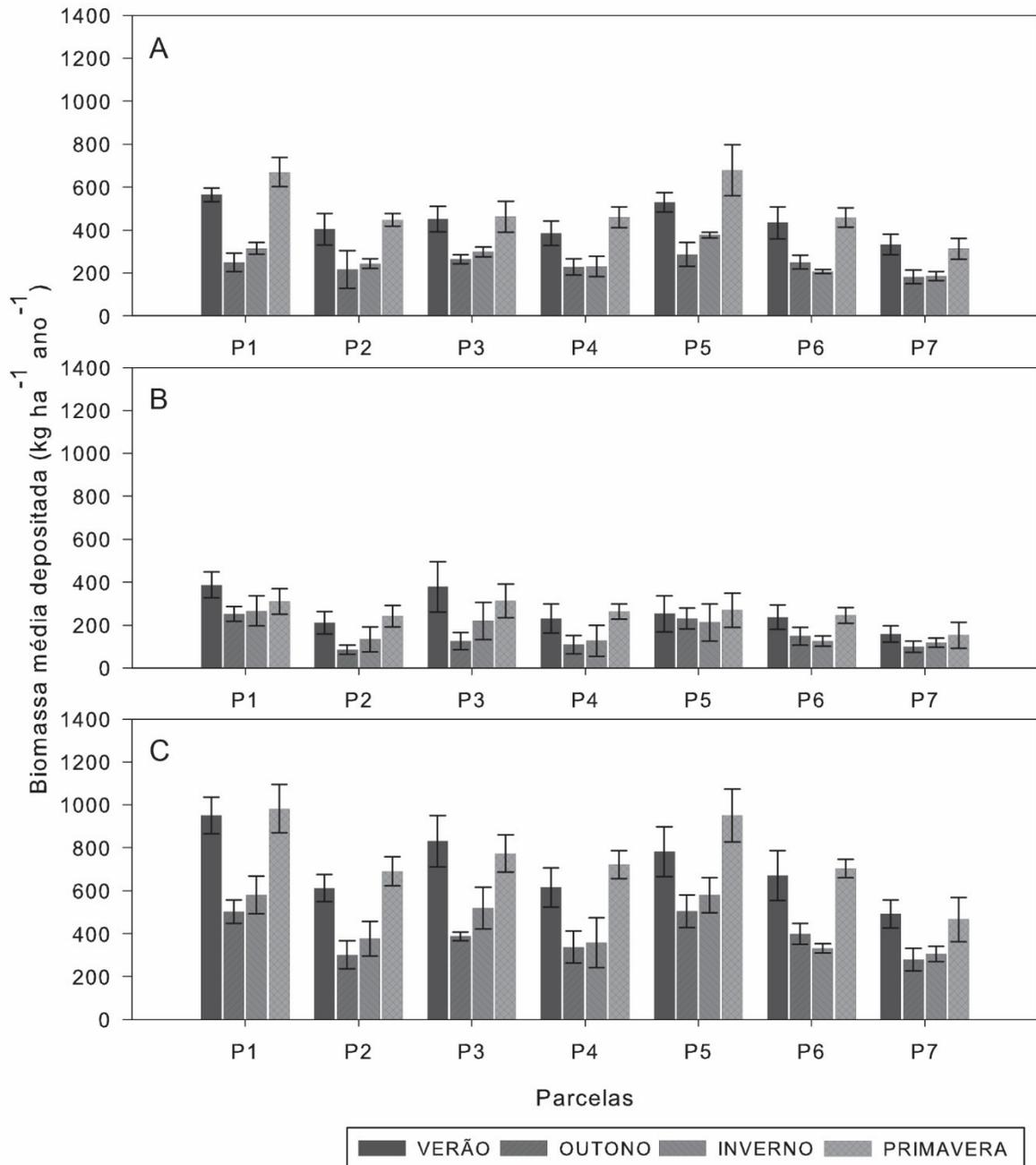
Figura 8 – Biomassa média da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e acúmulo médio para as estações entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão.



FONTE: O autor.

Cada parcela respondeu com intensidade variada a mudança sazonal. É observável que para ambas existiu uma tendência de maior aporte da fração folhas no verão e na primavera bem como para o total aportado (Figura 9 – A e C). Nestas estações, as parcelas P1 e P5 foram em média mais produtivas que as demais. Esse mesmo padrão de aporte para a fração outros materiais é observável nas parcelas P5 e P7, que tiveram uma tendência e uma distribuição homogênea dessa fração ao longo do ano (Figura 9 - B).

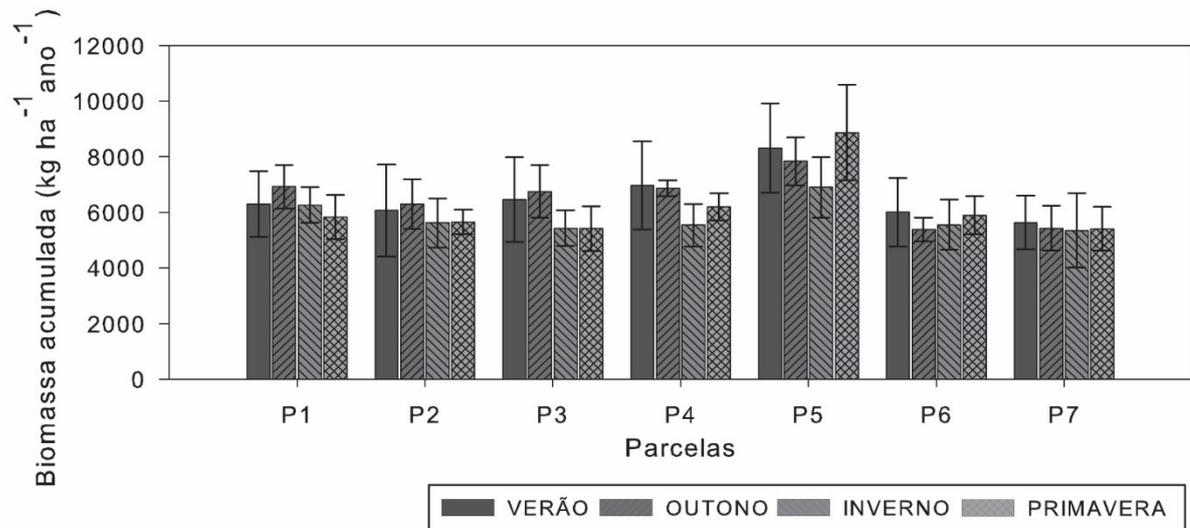
Figura 9 – Produção de folhas (A), outros materiais (B) e total (C) da serapilheira depositada entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão.



FONTE: O autor.

O acúmulo médio de serapilheira ao longo da distribuição altitudinal das parcelas se mostrou semelhante ao logo do ano com exceção das parcelas P3 e P5. A parcela P3, teve maiores acúmulos no verão e do outono, por outro lado, a P5 teve um decréscimo no acúmulo no sentido do verão para o inverno e posterior ascensão na primavera (Figura 10).

Figura 10 – Dinâmica do acúmulo médio de serapilheira sobre o solo entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio padrão.



FONTE: O autor.

A constante de decomposição (k) relativa a relação entre o aporte total anual e ao acúmulo médio anual indicam que durante os quatro anos de estudo existiu um aumento na constante de decomposição da serapilheira, e há tendências de redução no valor de k em função da variação de altitude (Tabela 15).

Tabela 15 – Constante de decomposição anual (k) e meia vida ($t_{50\%}$ e $t_{95\%}$) da biomassa de serapilheira das parcelas entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	2013			2014			2015			2016			Médio		
	k	$t_{50\%}$	$t_{95\%}$	k	$t_{50\%}$	$t_{95\%}$									
P1	1,2	202,2	875,4	1,4	178,9	774,5	1,6	154,3	668,1	1,5	165,7	717,2	1,4	174,5	755,5
P2	1,0	261,2	1130,6	0,9	264,6	1145,3	1,1	235,1	1017,7	1,1	231,3	1001,3	1,0	248,0	1073,6
P3	1,1	217,9	943,4	1,1	222,1	961,4	1,5	164,7	712,8	1,3	196,5	850,5	1,3	199,3	862,6
P4	0,9	276,4	1196,7	1,0	248,2	1074,6	1,0	249,4	1079,6	0,9	272,4	1179,4	1,0	261,6	1132,3
P5	0,9	267,8	1159,2	1,0	258,6	1119,6	1,1	217,3	940,6	1,2	202,5	876,8	1,1	235,6	1019,8
P6	1,0	244,2	1057,0	1,1	221,4	958,3	1,2	208,2	901,3	1,1	229,6	993,9	1,1	225,8	977,3
P7	0,7	369,5	1599,5	0,7	333,4	1443,4	1,0	239,0	1034,8	1,0	251,8	1089,9	0,8	294,1	1273,3
ÁREA ³	1,0	254,6	1102,0	1,0	238,0	1030,1	1,2	203,7	881,7	1,2	215,0	930,5	1,1	227,6	985,2

¹Constante de decomposição; ²Tempo:dias; ³Valor médio das sete parcelas.

As correlações entre as variáveis ambientais e fitofisionômicas com as variáveis relativas a biomassa são observadas na Tabela 3. Correlações significativas são observadas entre a temperatura média do ar, o total de biomassa aportado, as frações e a serapilheira acumulada. A radiação solar correlacionou-se com a biomassa aportada. A pesar de não significativo (p -value 0,0545), a constante de decomposição (k) teve forte correlação positiva com o índice de cobertura de copa (ICC). A biomassa produzida se correlacionou fortemente com a precipitação

história para a região, e moderadamente com a precipitação do período de estudo, para a fração folhas e o total aportado (Tabela 16).

Tabela 16 – Coeficiente de correlação de Spearman entre a serapilheira depositada (Fração Folhas, Fração Outros Materiais e o Total depositado), a serapilheira acumulada, a constante de decomposição (k) da biomassa de serapilheira e as variáveis ambientais e da fitofisionomia para o período de estudos.

	Folhas	Outros	Total	Acumulada	k		Folhas	Outros	Total	Acumulada
Temperatura média	0,63 (84)*	0,5 (84)	0,62 (84)	0,34 (84)	0,57 (7)	H ¹	0,79 (12)	0,71 (12)	0,73 (12)	0,47 (12)
Índice de Cobertura de Copa	0,46 (7)	0,54 (7)	0,39 (7)	0,04 (7)	0,71 (7)	M ²	0,47 (48)	0,27 (48)	0,41 (48)	0,1 (48)
Área Basal	0,54 (7)	0,5 (7)	0,61 (7)	0,18 (7)	0,39 (7)	MI ³	0,34 (48)	0,36 (48)	0,38 (48)	0,07 (48)
						MII ⁴	0,08 (48)	0,1 (48)	0,08 (48)	0,08 (48)

*Número de amostras (n); ¹ Média Histórica da precipitação; ²Precipitação mensal (2013-2016); ³Precipitação mensal (2013-2016) com um mês de atraso; ⁴Precipitação mensal (2013-2016) com dois meses de atraso.

3.2 CARACTERÍSTICA QUÍMICA DA SERAPILHEIRA

3.2.1 Variação sazonal dos nutrientes

Foi observado que o teor de C da serapilheira depositada em ambas as frações diferiu pouco em função da variação altitudinal e sazonalmente. Para a fração folhas, o teor foi ligeiramente maior para a P6 em relação as demais parcelas. O mesmo padrão não pode ser observado para fração outros materiais. Na serapilheira acumulada, os teores de C foram superiores para as parcelas P6 e P7, em todas as estações, sendo observável um acréscimo com o a altitude. Existiu uma redução nos teores de C, durante o outono, principalmente para as parcelas localizadas nas partes mais baixas, e durante o inverno os teores se elevaram novamente (Tabela 17).

Tabela 17 – Variação sazonal do teor médio de carbono das frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
	g kg ⁻¹			
P1	512,7 (±3,8) ¹	523,8 (±2,9)	517,6 (±1,6)	515,6 (±2,1)
P2	510,8 (±9,6)	515,7 (±2,2)	515,1 (±1,5)	505,3 (±10,6)
P3	511,9 (±0,7)	513,5 (±2,6)	506,5 (±3,0)	503,1 (±5,0)
P4	510,4 (±0,9)	520,5 (±4,5)	517,1 (±1,4)	507,7 (±3,7)
P5	510,3 (±3,1)	516,6 (±7,4)	508,8 (±1,7)	510,9 (±6,9)
P6	525,1 (±1,4)	536,7 (±1,2)	531,0 (±2,2)	526,2 (±3,6)
P7	521,3 (±3,6)	528,5 (±1,0)	523,8 (±1,5)	512,9 (±1,2)
	Outros Materiais			
P1	519,0 (±1,3)	531,0 (±2,4)	526,5 (±5,8)	522,4 (±3,2)
P2	517,5 (±3,1)	524,0 (±2,5)	514,8 (±2,4)	517,5 (±1,6)
P3	518,3 (±4,1)	523,2 (±4,1)	521,7 (±5,4)	520,7 (±0,3)
P4	524,0 (±3,2)	524,6 (±8,4)	520,3 (±2,1)	519,7 (±8,1)
P5	518,0 (±1,8)	520,0 (±2,3)	518,3 (±4,5)	515,3 (±2,9)
P6	530,4 (±1,4)	530,0 (±3,8)	525,1 (±2,3)	524,7 (±1,6)
P7	526,3 (±2,1)	526,7 (±2,4)	520,2 (±3,0)	521,7 (±7,9)
	Acúmulo			
P1	504,2 (±12,0)	485,6 (±20,9)	477,5 (±44,3)	482,4 (±17,8)
P2	497,8 (±3,3)	452,3 (±31,8)	469,7 (±40,2)	471,5 (±3,1)
P3	490,4 (±14,9)	433,0 (±13,4)	464,5 (±16,9)	466,9 (±17,2)
P4	506,5 (±6,3)	475,3 (±5,7)	490,5 (±16,5)	476,6 (±8,3)
P5	491,6 (±9,7)	490,5 (±2,4)	474,6 (±24,8)	483,7 (±6,6)
P6	523,6 (±5,1)	522,0 (±2,4)	508,7 (±14,8)	513,2 (±5,3)
P7	518,2 (±1,4)	515,3 (±1,6)	515,3 (±2,9)	512,0 (±3,9)

¹Desvio Padrão

O teor de nitrogênio da fração folhas e da fração outros materiais foi inferior a serapilheira acumulada. Na fração folhas, o teor foi superior na parcela P1 em relação as demais parcelas no verão, outono e no inverno. Existiu uma redução dos teores de N para esta fração durante o inverno, sendo mais acentuados para as parcelas mais elevadas. Na fração outros materiais, existiu uma tendência de redução com o acréscimo da altitude. Os maiores teores de N observados na serapilheira acumulada apresentaram uma leve tendência de redução com a altitude, que ficou evidente no outono, com a redução de boa parte dos teores, principalmente nas parcelas localizadas nas áreas mais elevadas (Tabela 18).

Tabela 18 – Variação sazonal do teor médio de nitrogênio das frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
	g kg^{-1}			
P1	16,2 ($\pm 2,4$) ¹	19,6 ($\pm 6,7$)	17,7 ($\pm 4,2$)	14,9 ($\pm 0,9$)
P2	12,0 ($\pm 1,2$)	13,1 ($\pm 0,5$)	9,7 ($\pm 1,3$)	12,8 ($\pm 0,5$)
P3	12,8 ($\pm 1,0$)	13,7 ($\pm 2,5$)	10,8 ($\pm 1,2$)	12,5 ($\pm 2,4$)
P4	14,1 ($\pm 0,9$)	11,9 ($\pm 1,8$)	13,9 ($\pm 4,4$)	15,5 ($\pm 3,5$)
P5	10,0 ($\pm 0,8$)	12,7 ($\pm 0,4$)	8,3 ($\pm 2,0$)	10,3 ($\pm 2,0$)
P6	13,2 ($\pm 1,7$)	12,5 ($\pm 0,8$)	8,8 ($\pm 4,7$)	13,0 ($\pm 0,7$)
P7	11,5 ($\pm 1,6$)	12,2 ($\pm 0,6$)	7,0 ($\pm 0,5$)	15,2 ($\pm 7,3$)
	Outros Materiais			
P1	12,7 ($\pm 2,1$)	15,0 ($\pm 3,8$)	14,3 ($\pm 1,4$)	15,3 ($\pm 1,0$)
P2	10,1 ($\pm 1,3$)	14,1 ($\pm 0,4$)	13,7 ($\pm 0,4$)	13,0 ($\pm 0,2$)
P3	9,5 ($\pm 0,7$)	11,7 ($\pm 1,7$)	11,7 ($\pm 3,2$)	13,6 ($\pm 0,8$)
P4	8,6 ($\pm 2,6$)	11,1 ($\pm 2,7$)	12,1 ($\pm 0,9$)	11,2 ($\pm 2,9$)
P5	10,5 ($\pm 0,8$)	10,1 ($\pm 1,4$)	11,0 ($\pm 0,5$)	9,4 ($\pm 0,4$)
P6	12,2 ($\pm 1,3$)	11,4 ($\pm 1,3$)	12,9 ($\pm 0,9$)	12,4 ($\pm 0,1$)
P7	10,1 ($\pm 0,9$)	10,3 ($\pm 1,6$)	11,3 ($\pm 1,3$)	11,2 ($\pm 1,6$)
	Acúmulo			
P1	17,6 ($\pm 0,4$)	23,1 ($\pm 4,7$)	20,6 ($\pm 2,0$)	21,3 ($\pm 1,3$)
P2	15,2 ($\pm 1,8$)	21,4 ($\pm 2,4$)	19,2 ($\pm 0,8$)	18,9 ($\pm 1,4$)
P3	16,5 ($\pm 0,6$)	19,8 ($\pm 1,4$)	20,0 ($\pm 0,0$)	18,9 ($\pm 1,4$)
P4	14,3 ($\pm 1,0$)	16,1 ($\pm 1,3$)	18,2 ($\pm 1,0$)	15,9 ($\pm 1,5$)
P5	13,0 ($\pm 0,4$)	16,8 ($\pm 0,7$)	14,7 ($\pm 0,4$)	15,9 ($\pm 1,7$)
P6	15,9 ($\pm 1,4$)	20,1 ($\pm 1,5$)	18,2 ($\pm 0,7$)	18,1 ($\pm 1,7$)
P7	14,7 ($\pm 0,5$)	17,3 ($\pm 1,3$)	17,9 ($\pm 2,1$)	17,6 ($\pm 2,7$)

¹Desvio Padrão

Os teores de P foram superiores para a Fração Outros Materiais em relação à Fração Folhas da serapilheira depositada, e foram superiores a serapilheira acumulada. Na fração folhas, os teores foram ligeiramente superiores para as parcelas de menor altitude. Uma tendência a redução com o acréscimo da altitude foi observada em todas as estações na Fração Outro Materiais, entretanto, a parcela P6 apresentou valores superiores apenas em relação a parcela P1 mesmo sendo a segunda mais elevada. Não foi observada nenhuma tendência marcante para os teores de P ao longo das parcelas e durante as estações (Tabela 19).

Tabela 19 – Variação sazonal do teor médio de Fósforo das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
	g kg^{-1}			
P1	0,5 ($\pm 0,0$) ¹	0,4 ($\pm 0,0$)	0,3 ($\pm 0,1$)	0,6 ($\pm 0,2$)
P2	0,3 ($\pm 0,1$)	0,3 ($\pm 0,1$)	0,3 ($\pm 0,0$)	0,3 ($\pm 0,1$)
P3	0,5 ($\pm 0,0$)	0,2 ($\pm 0,1$)	0,3 ($\pm 0,1$)	0,4 ($\pm 0,1$)
P4	0,2 ($\pm 0,1$)	0,2 ($\pm 0,1$)	0,1 ($\pm 0,1$)	0,2 ($\pm 0,1$)
P5	0,1 ($\pm 0,0$)	0,0 ($\pm 0,0$)	0,0 ($\pm 0,0$)	0,2 ($\pm 0,1$)
P6	0,4 ($\pm 0,0$)	0,1 ($\pm 0,1$)	0,3 ($\pm 0,1$)	0,4 ($\pm 0,1$)
P7	0,2 ($\pm 0,1$)	0,1 ($\pm 0,0$)	0,1 ($\pm 0,0$)	0,3 ($\pm 0,1$)
	Outros Materiais			
P1	2,5 ($\pm 0,4$)	3,2 ($\pm 1,6$)	2,5 ($\pm 0,2$)	2,1 ($\pm 0,9$)
P2	1,7 ($\pm 0,7$)	2,2 ($\pm 0,6$)	1,9 ($\pm 0,1$)	1,6 ($\pm 0,4$)
P3	1,3 ($\pm 0,3$)	2,2 ($\pm 0,1$)	1,5 ($\pm 0,6$)	1,5 ($\pm 0,4$)
P4	1,3 ($\pm 0,8$)	1,8 ($\pm 0,3$)	1,1 ($\pm 0,2$)	1,4 ($\pm 0,2$)
P5	1,5 ($\pm 0,2$)	1,5 ($\pm 0,8$)	1,3 ($\pm 0,1$)	1,2 ($\pm 0,1$)
P6	1,6 ($\pm 0,4$)	2,1 ($\pm 0,3$)	2,1 ($\pm 0,1$)	1,7 ($\pm 0,3$)
P7	1,4 ($\pm 0,0$)	1,5 ($\pm 0,3$)	1,2 ($\pm 0,3$)	1,4 ($\pm 0,5$)
	Acúmulo			
P1	0,5 ($\pm 0,0$)	0,7 ($\pm 0,1$)	0,7 ($\pm 0,1$)	0,6 ($\pm 0,0$)
P2	0,4 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,6 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,0$)
P3	0,5 ($\pm 0,0$)	0,6 ($\pm 0,0$)	0,6 ($\pm 0,1$)	0,6 ($\pm 0,0$)
P4	0,4 ($\pm 0,0$)	0,4 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,4 ($\pm 0,0$)
P5	0,5 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)
P6	0,5 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,6 ($\pm 0,0$)	0,6 ($\pm 0,0$)
P7	0,4 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,1$)	0,5 ($\pm 0,0$)	0,5 ($\pm 0,0$)

¹Desvio Padrão

3.2.1 Variação sazonal das fibras

Os teores de polifenóis totais, foram superiores na fração folhas com exceção da primavera, onde a fração outros materiais foi ligeiramente superior. Para a fração folhas, os maiores teores foram observados para as parcelas P4 e P6 no verão, P1, P4 e P6 no outono, P4, P6 e P7 no inverno, e uma tendência de acréscimo com a altitude durante a primavera. Na fração outros materiais, os teores de polifenóis totais foram semelhantes entre as parcelas, independente da estação observada. Entretanto, é observável que durante o inverno, os teores são suavemente superiores às outras estações para ambas as parcelas. Na serapilheira acumulada, os maiores teores foram observados par as parcelas de maior altitude P5, P6 e P7,

em todas as estações. Nesse material, os teores variaram pouco em relação as outras frações (Tabela 20).

Tabela 20 – Variação sazonal do teor médio de Polifenóis Totais das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
	%			
P1	0,035 (±0,009) ¹	0,083 (±0,015)	0,051 (±0,008)	0,019 (±0,009)
P2	0,033 (±0,011)	0,041 (±0,014)	0,051 (±0,005)	0,025 (±0,024)
P3	0,020 (±0,009)	0,053 (±0,014)	0,016 (±0,004)	0,008 (±0,003)
P4	0,071 (±0,016)	0,099 (±0,019)	0,089 (±0,026)	0,017 (±0,000)
P5	0,053 (±0,008)	0,063 (±0,017)	0,045 (±0,009)	0,029 (±0,014)
P6	0,076 (±0,004)	0,106 (±0,017)	0,094 (±0,006)	0,040 (±0,017)
P7	0,054 (±0,001)	0,073 (±0,006)	0,079 (±0,024)	0,036 (±0,004)
Outros Materiais				
P1	0,016 (±0,006)	0,013 (±0,000)	0,049 (±0,025)	0,023 (±0,003)
P2	0,009 (±0,002)	0,015 (±0,002)	0,034 (±0,009)	0,018 (±0,005)
P3	0,008 (±0,000)	0,011 (±0,001)	0,028 (±0,003)	0,018 (±0,001)
P4	0,016 (±0,004)	0,021 (±0,005)	0,029 (±0,007)	0,020 (±0,002)
P5	0,017 (±0,005)	0,024 (±0,006)	0,032 (±0,006)	0,026 (±0,006)
P6	0,014 (±0,004)	0,018 (±0,003)	0,034 (±0,002)	0,026 (±0,005)
P7	0,011 (±0,002)	0,015 (±0,001)	0,029 (±0,003)	0,039 (±0,009)
Acúmulo				
P1	0,017 (±0,003)	0,009 (±0,001)	0,013 (±0,003)	0,010 (±0,001)
P2	0,009 (±0,001)	0,007 (±0,001)	0,010 (±0,003)	0,010 (±0,000)
P3	0,008 (±0,001)	0,006 (±0,002)	0,007 (±0,001)	0,011 (±0,001)
P4	0,015 (±0,003)	0,007 (±0,002)	0,010 (±0,002)	0,012 (±0,004)
P5	0,028 (±0,003)	0,011 (±0,002)	0,019 (±0,001)	0,013 (±0,001)
P6	0,018 (±0,002)	0,015 (±0,003)	0,017 (±0,003)	0,017 (±0,003)
P7	0,012 (±0,000)	0,010 (±0,003)	0,015 (±0,000)	0,015 (±0,001)

¹Desvio Padrão

Os teores de lignina observado entre os materiais, entre as parcelas e entre as estações são semelhantes, indicando uma homogeneidade na constituição estrutural do material decíduo. A parcela P5 teve os menores valores para fração folhas, em todas as estações. No inverno a parcela P4 se destacou em relação as demais, entretanto, a variação dos dados foi elevada. Na serapilheira acumulada, os teores das parcelas P3 e P5 foram inferiores em relação às demais parcela no verão. Durante o inverno uma ligeira tendência a acréscimo dos teores com a altitude (Tabela 21).

Tabela 21 – Variação sazonal do teor médio de lignina das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
P1	29,2 ($\pm 0,7$) ¹	23,5 ($\pm 1,3$)	26,8 ($\pm 0,6$)	29,3 ($\pm 1,5$)
P2	24,8 ($\pm 2,9$)	27,5 ($\pm 2,7$)	31,8 ($\pm 1,1$)	30,2 ($\pm 3,1$)
P3	27,4 ($\pm 3,4$)	27,0 ($\pm 1,1$)	29,0 ($\pm 1,4$)	30,4 ($\pm 2,0$)
P4	26,1 ($\pm 0,5$)	27,7 ($\pm 0,8$)	39,4 ($\pm 16,3$)	30,4 ($\pm 0,7$)
P5	21,0 ($\pm 0,4$)	24,1 ($\pm 0,9$)	21,5 ($\pm 1,0$)	26,9 ($\pm 1,8$)
P6	23,8 ($\pm 0,8$)	29,4 ($\pm 0,4$)	23,6 ($\pm 2,4$)	28,8 ($\pm 1,2$)
P7	25,5 ($\pm 1,5$)	26,3 ($\pm 3,8$)	27,8 ($\pm 1,2$)	29,5 ($\pm 1,4$)
	Outros Materiais			
P1	32,0 ($\pm 2,2$)	27,1 ($\pm 5,0$)	23,8 ($\pm 4,8$)	28,5 ($\pm 3,2$)
P2	29,6 ($\pm 2,0$)	31,1 ($\pm 1,4$)	25,3 ($\pm 2,0$)	25,9 ($\pm 5,4$)
P3	28,1 ($\pm 0,2$)	28,5 ($\pm 4,2$)	26,9 ($\pm 2,0$)	28,6 ($\pm 2,1$)
P4	29,1 ($\pm 1,6$)	23,3 ($\pm 1,0$)	28,5 ($\pm 1,9$)	26,9 ($\pm 3,7$)
P5	26,8 ($\pm 2,9$)	24,1 ($\pm 2,4$)	26,0 ($\pm 1,3$)	24,2 ($\pm 0,7$)
P6	27,3 ($\pm 2,7$)	27,5 ($\pm 1,3$)	26,2 ($\pm 3,1$)	26,5 ($\pm 1,6$)
P7	26,2 ($\pm 1,3$)	25,3 ($\pm 0,9$)	25,7 ($\pm 2,2$)	24,2 ($\pm 0,9$)
	Acúmulo			
P1	30,3 ($\pm 0,6$)	27,7 ($\pm 1,5$)	24,4 ($\pm 2,2$)	33,4 ($\pm 3,0$)
P2	33,6 ($\pm 1,8$)	25,8 ($\pm 1,9$)	29,0 ($\pm 3,5$)	36,2 ($\pm 1,9$)
P3	25,8 ($\pm 2,7$)	24,5 ($\pm 3,4$)	26,7 ($\pm 2,1$)	30,0 ($\pm 0,7$)
P4	32,7 ($\pm 2,0$)	31,4 ($\pm 2,1$)	30,0 ($\pm 1,9$)	33,9 ($\pm 2,8$)
P5	24,8 ($\pm 0,3$)	27,4 ($\pm 2,2$)	22,8 ($\pm 2,6$)	33,2 ($\pm 5,4$)
P6	29,7 ($\pm 2,6$)	28,1 ($\pm 1,8$)	32,3 ($\pm 7,1$)	34,2 ($\pm 2,2$)
P7	27,3 ($\pm 2,7$)	29,0 ($\pm 1,6$)	36,5 ($\pm 6,6$)	34,2 ($\pm 1,0$)

¹Desvio Padrão

Assim como o teor de lignina, os teores de celulose foram similares em entre os diferentes materiais, as parcelas e entre as estações. A parcela P5 apresentou valores menores para a fração Folhas em todas as estações. Na serapilheira acumulada, houve redução dos valores das P1 a P5 durante o outono (Tabela 22).

Tabela 22 – Variação sazonal do teor médio de celulose das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
P1	40,2 (±3,4) ¹	38,8 (±1,2)	35,7 (±2,2)	41,9 (±4,4)
P2	37,5 (±1,9)	41,3 (±3,4)	40,0 (±2,1)	40,6 (±3,5)
P3	45,6 (±2,3)	36,7 (±3,4)	34,4 (±1,8)	37,1 (±0,9)
P4	42,2 (±2,1)	38,7 (±0,9)	35,4 (±3,2)	40,0 (±0,2)
P5	36,2 (±1,7)	29,7 (±1,5)	28,0 (±0,8)	30,0 (±1,9)
P6	40,6 (±2,2)	36,4 (±1,4)	35,1 (±0,6)	38,0 (±2,3)
P7	38,4 (±0,6)	36,2 (±4,3)	32,5 (±1,3)	33,2 (±0,7)
Outros Materiais				
P1	37,3 (±2,1)	35,8 (±0,7)	39,4 (±4,1)	40,6 (±3,4)
P2	39,4 (±2,9)	35,5 (±1,7)	45,2 (±2,8)	42,9 (±3,5)
P3	39,0 (±1,4)	35,3 (±1,9)	40,8 (±4,7)	40,6 (±2,0)
P4	37,2 (±2,2)	39,1 (±1,0)	40,9 (±2,9)	35,0 (±3,1)
P5	31,4 (±0,5)	36,7 (±1,9)	36,9 (±2,4)	35,1 (±2,8)
P6	41,2 (±2,7)	42,8 (±4,1)	39,9 (±4,5)	40,6 (±4,3)
P7	35,7 (±5,5)	37,5 (±1,6)	35,8 (±3,9)	39,6 (±8,3)
Acúmulo				
P1	35,0 (±0,8)	33,3 (±4,1)	36,8 (±3,6)	39,8 (±0,4)
P2	37,5 (±1,3)	29,2 (±11,2)	36,1 (±4,4)	37,7 (±5,1)
P3	33,6 (±2,9)	29,5 (±3,2)	35,5 (±5,3)	33,1 (±2,2)
P4	37,8 (±2,2)	33,1 (±2,0)	38,5 (±3,4)	41,5 (±5,0)
P5	30,3 (±1,2)	28,8 (±2,2)	31,3 (±2,5)	29,5 (±1,4)
P6	41,8 (±1,3)	44,1 (±2,1)	39,3 (±2,4)	38,8 (±2,8)
P7	37,3 (±2,3)	42,5 (±1,2)	37,1 (±3,6)	39,3 (±1,7)

¹Desvio Padrão

A relações C:N dos diferentes materiais, mostrou uma tendência de acréscimo com a altitude. Na fração Folhas, durante o inverno essa tendência ficou mais expressiva, mas com maiores desvios. Para a Fração Outros Materiais, no verão, existiu uma tendência de acréscimo somente até parcela P4, nas demais parcelas, os valores reduziram (Tabela 23).

Tabela 23 – Variação sazonal da relação C:N das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Folhas				
Parcela	Verão	Outono	Inverno	Primavera
P1	32,19 (±5,33) ¹	28,65 (±8,19)	30,63 (±8,50)	34,72 (±2,13)
P2	42,93 (±4,10)	39,43 (±1,43)	53,61 (±6,85)	39,45 (±0,67)
P3	40,14 (±3,10)	38,16 (±6,36)	47,46 (±5,68)	41,12 (±8,14)
P4	36,42 (±2,27)	44,64 (±7,73)	39,68 (±11,19)	33,68 (±6,65)
P5	51,45 (±4,18)	40,74 (±1,59)	63,97 (±17,68)	50,89 (±10,55)
P6	40,37 (±5,39)	43,14 (±3,10)	70,38 (±29,77)	40,53 (±1,85)
P7	46,04 (±6,31)	43,44 (±2,08)	74,79 (±5,05)	38,39 (±14,54)
Outros Materiais				
P1	41,79 (±7,45)	36,73 (±8,28)	36,93 (±3,61)	34,24 (±2,37)
P2	51,84 (±7,20)	37,26 (±1,00)	37,54 (±0,96)	39,85 (±0,55)
P3	54,94 (±4,04)	45,35 (±7,02)	46,62 (±11,26)	38,27 (±2,26)
P4	64,23 (±17,53)	49,55 (±13,91)	43,02 (±3,38)	49,21 (±15,72)
P5	49,34 (±3,62)	52,18 (±7,42)	47,34 (±1,68)	54,85 (±2,41)
P6	43,7 (±4,33)	47,09 (±5,75)	40,83 (±3,07)	42,46 (±0,26)
P7	52,21 (±4,82)	52,06 (±8,58)	46,31 (±5,40)	48,42 (±8,41)
Acúmulo				
P1	28,67 (±1,26)	21,69 (±4,57)	23,24 (±1,41)	22,69 (±1,38)
P2	33,05 (±3,58)	19,77 (±1,56)	24,55 (±2,34)	25 (±1,77)
P3	29,77 (±1,87)	21,93 (±2,10)	23,26 (±0,87)	24,74 (±2,21)
P4	35,57 (±2,11)	29,56 (±2,26)	27,08 (±2,49)	30,2 (±2,47)
P5	37,85 (±1,17)	29,31 (±1,04)	32,29 (±1,36)	30,66 (±3,11)
P6	33,13 (±3,03)	26,08 (±1,94)	27,99 (±1,78)	28,53 (±2,56)
P7	35,34 (±1,33)	29,85 (±2,38)	28,97 (±3,31)	29,68 (±5,23)

¹Desvio Padrão

A relação Lignina:N para a Fração Folhas teve uma tendência no outono e no inverno de maiores valores com a altitude e maiores valores para o período do inverno. Na fração Outros Materiais a tendência de acréscimo ocorreu até a parcela P4 em todas as estações e os maiores teores foram observado no verão. Na serapilheira acumulada há tendência de maiores valores com a altitude observada no inverno (Tabela 24).

Tabela 24 – Variação sazonal da relação Lignina:N das Frações da serapilheira depositada e da serapilheira acumulada entre as parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela	Folhas			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
P1	18,36 ($\pm 2,99$) ¹	13,01 ($\pm 4,28$)	15,87 ($\pm 4,61$)	19,71 ($\pm 0,94$)
P2	20,80 ($\pm 2,68$)	20,99 ($\pm 1,60$)	32,99 ($\pm 3,54$)	23,53 ($\pm 1,68$)
P3	21,33 ($\pm 1,41$)	20,12 ($\pm 3,64$)	27,07 ($\pm 1,93$)	24,98 ($\pm 6,36$)
P4	18,65 ($\pm 1,55$)	23,79 ($\pm 4,64$)	27,95 ($\pm 2,77$)	20,15 ($\pm 3,73$)
P5	21,22 ($\pm 1,88$)	18,97 ($\pm 1,04$)	27,22 ($\pm 8,57$)	26,67 ($\pm 4,41$)
P6	18,24 ($\pm 1,95$)	23,60 ($\pm 1,52$)	30,63 ($\pm 11,95$)	22,18 ($\pm 0,47$)
P7	22,55 ($\pm 3,63$)	21,69 ($\pm 3,72$)	39,83 ($\pm 4,52$)	22,09 ($\pm 8,65$)
Outros Materiais				
P1	25,84 ($\pm 5,65$)	19,19 ($\pm 6,95$)	16,48 ($\pm 1,69$)	18,76 ($\pm 3,10$)
P2	29,84 ($\pm 5,88$)	22,10 ($\pm 1,46$)	18,50 ($\pm 1,92$)	19,92 ($\pm 3,84$)
P3	29,75 ($\pm 2,32$)	24,77 ($\pm 5,92$)	24,10 ($\pm 6,63$)	20,99 ($\pm 1,59$)
P4	35,57 ($\pm 8,99$)	22,07 ($\pm 6,83$)	23,46 ($\pm 0,78$)	25,50 ($\pm 8,92$)
P5	25,69 ($\pm 4,61$)	24,05 ($\pm 3,10$)	23,75 ($\pm 1,57$)	25,71 ($\pm 0,80$)
P6	22,62 ($\pm 4,38$)	24,49 ($\pm 3,74$)	20,49 ($\pm 3,87$)	21,43 ($\pm 1,42$)
P7	26,00 ($\pm 2,60$)	24,95 ($\pm 3,19$)	22,85 ($\pm 3,05$)	21,97 ($\pm 3,45$)
Acúmulo				
P1	17,21 ($\pm 0,70$)	12,32 ($\pm 2,39$)	11,93 ($\pm 1,18$)	15,72 ($\pm 2,01$)
P2	22,41 ($\pm 3,68$)	12,11 ($\pm 0,68$)	15,18 ($\pm 2,12$)	19,16 ($\pm 0,64$)
P3	15,68 ($\pm 2,29$)	12,40 ($\pm 1,71$)	13,37 ($\pm 1,00$)	15,88 ($\pm 0,80$)
P4	22,93 ($\pm 1,46$)	19,47 ($\pm 1,35$)	16,57 ($\pm 1,67$)	21,58 ($\pm 3,87$)
P5	19,10 ($\pm 0,59$)	16,37 ($\pm 1,51$)	15,50 ($\pm 1,75$)	20,85 ($\pm 2,22$)
P6	18,84 ($\pm 2,74$)	14,07 ($\pm 1,68$)	17,84 ($\pm 4,49$)	19,09 ($\pm 2,67$)
P7	18,64 ($\pm 2,39$)	16,83 ($\pm 1,77$)	20,22 ($\pm 1,35$)	19,90 ($\pm 3,94$)

¹Desvio Padrão

3.3 DECOMPOSIÇÃO FOLIAR

O percentual de massa remanescente das folhas pode ser observado na Tabela 4. A decomposição da fração folhas foi lenta. Foram necessários aproximadamente 270 para que 50% do material fosse decomposto (Tabela 25). A decomposição em cada uma das parcelas se mostrou contínua com uma tendência a estabilização aos 360 dias (Figura 11).

Figura 11 – Massa foliar remanescente em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. Barras na vertical representam o desvio-padrão.

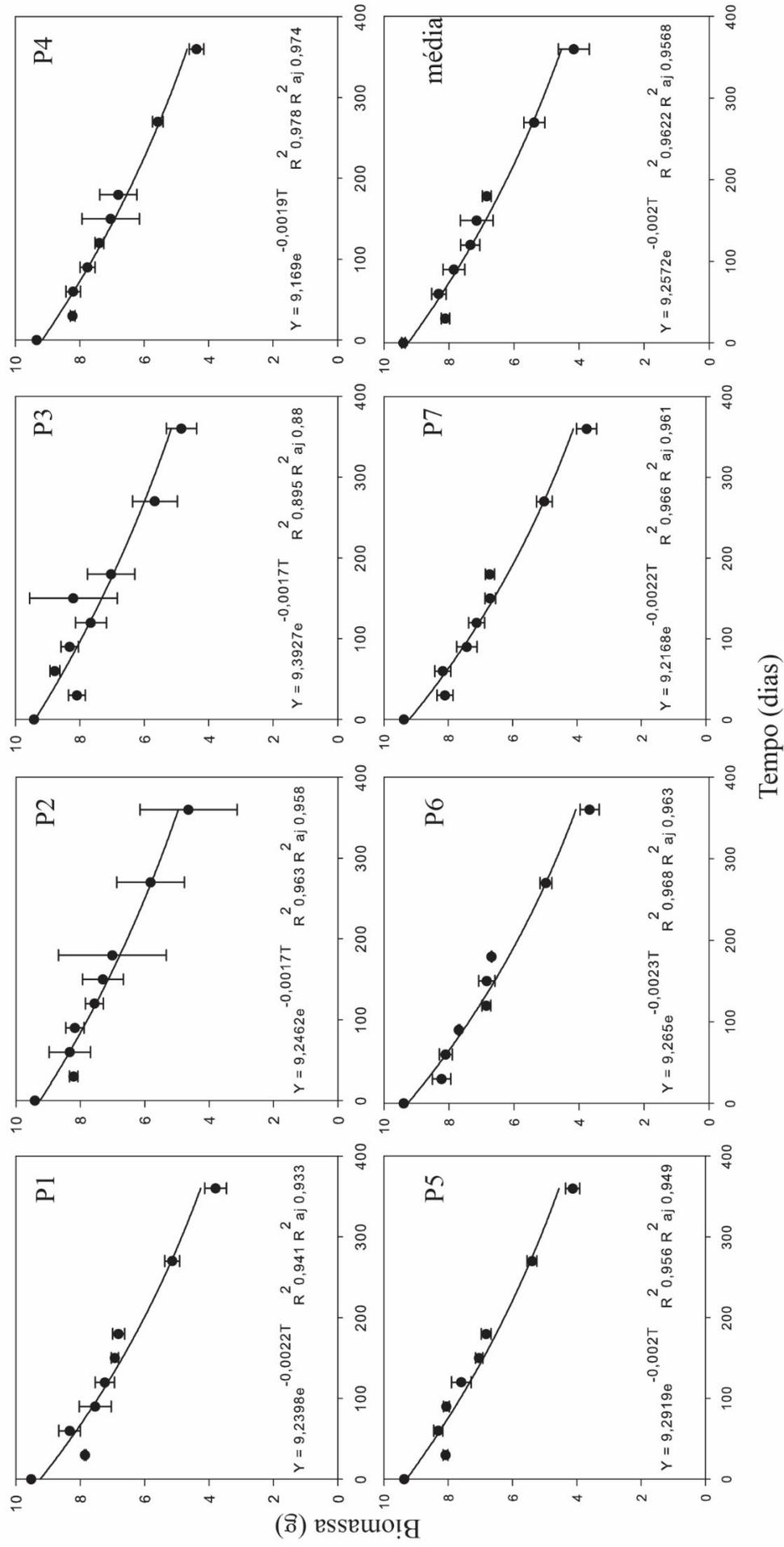


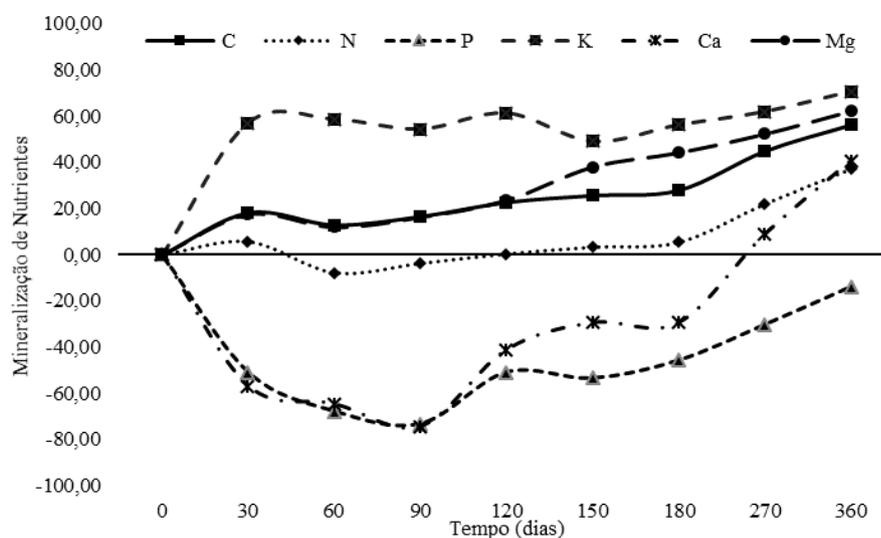
Tabela 25 – Massa remanescente, constante de decomposição e meia vida das folhas dos litterbags em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Tempo (dias)	Massa remanescente (%)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
30	82,46	87,25	85,87	88,09	86,28	87,59	86,45
60	87,50	88,50	93,16	87,85	88,67	86,24	87,14
90	79,13	86,86	88,25	83,10	86,00	81,91	79,24
120	76,00	80,39	81,28	79,14	81,02	72,96	75,92
150	72,76	77,60	87,04	75,42	75,14	72,81	71,47
180	71,49	74,47	74,65	72,87	72,77	71,22	71,59
270	54,03	61,88	60,23	59,72	57,57	53,46	53,51
360	39,87	49,31	51,47	46,87	44,06	39,14	39,48
<i>k</i>	1,02	0,78	0,71	0,82	0,84	0,94	0,96
T _{50%}	0,68	0,89	0,97	0,84	0,83	0,74	0,72
T _{95%}	2,94	3,86	4,20	3,64	3,58	3,18	3,13

A taxa de decomposição média do período de estudos exibiu uma tendência a acréscimo com a altitude, porém a parcela mais baixa, P1, foi a com maior valor médio de *k*. O menor valor observado de *k* foi para a parcela P3, a parcela em que a maior massa remanescente também foi observada e a maior meia vida (Tabela 25).

Durante o período de decomposição o P e Ca foram imobilizados nos primeiros 90 dias, por outro lado, K foi rapidamente mineralizado nos mesmo 90 dias. Durante a liberação do C, os teores de N se mantiveram constantes em relação aos de carbono (Figura 12), A partir dos 270 dias, Ca passou a ser mineralizado.

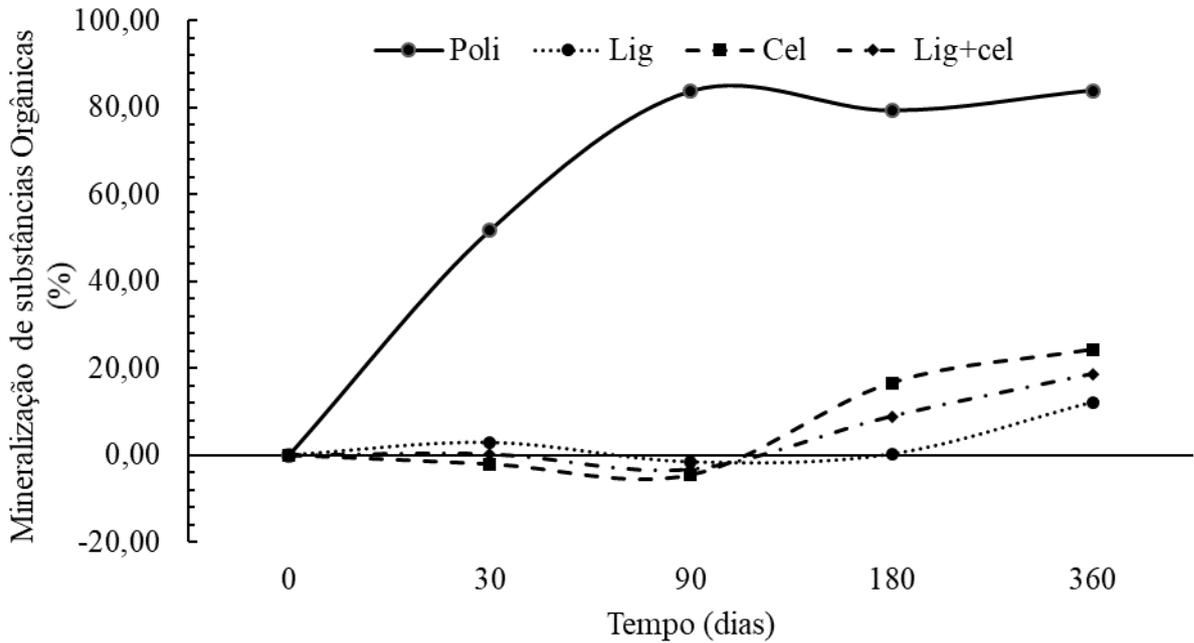
Figura 12 – Liberação de nutrientes das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.



FONTE: O autor.

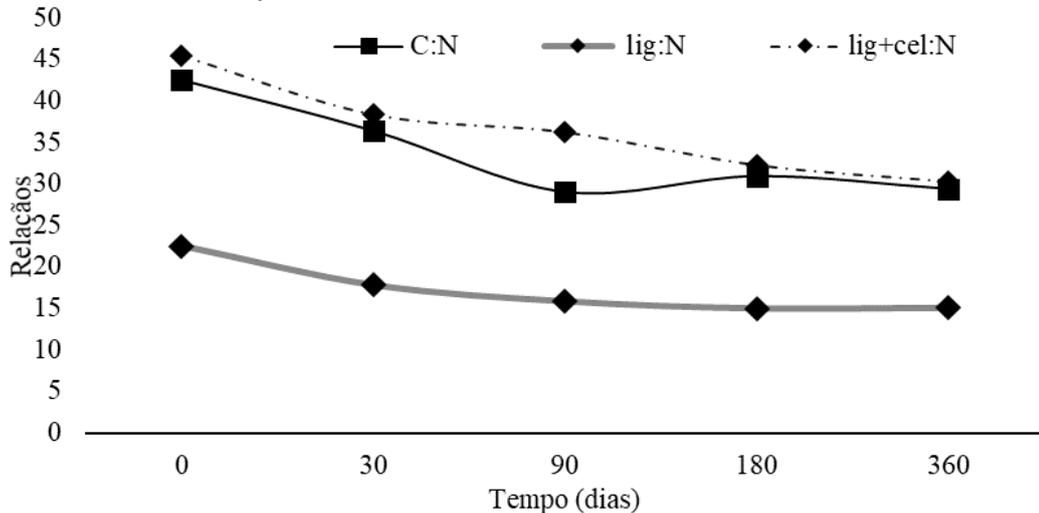
Em relação aos constituintes das folhas, 80% dos polifenóis totais foram liberados, a celulose passou a ser expressivamente decomposta a partir dos 90 dias de decomposição, enquanto a Lignina passou a ser decomposta aos 180 dias (Figura 13). A relação C:N começou a se estabilizar a partir dos 90 dias, enquanto que a relação lignina+Celulose:N manteve um ritmo de redução até os 360 dias (Figura 14).

Figura 13 – Liberação polifenóis totais e de fibras (lignina e celulose) das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.



FONTE: O autor.

Figura 14 – Relação C:N, lignina:N e celulose:N das folhas em processo de decomposição em função do tempo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.



FONTE: O autor.

4 DISCUSSÃO

4.1 CICLAGEM DE BIOMASSA

4.1.1 Produção de biomassa

A produção de biomassa para a floresta de estudos foi média em relação a outras formações florestais em regiões montanas ao redor do mundo. Cizungu et al., (2014) estudando a dinâmica de aporte na Floresta Ombrófila Montana de Nyungwe observaram uma produção média de $4.114 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; Köhler; Hölscher; Leuschner, (2008) estudando estágios sucessionais, observaram um aporte de $12.880 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o estágio sucessional primário de uma Floresta Montana na Costa Rica; Paudel et al., (2015) estudando um gradiente de distúrbio em uma Floresta Estacional Montana na China, observam para a floresta primária um aporte de $11.510 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; e um valor próximo a esse estudo foi observado por Zhou et al., (2006) em uma Floresta Tropical de Monção na Reserva da Biosfera Dinghushan na China, onde o aporte foi de $8.490 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a floresta clímax, em estudo realizado com 105 formações vegetais na Floresta Atlântica, Martinelli, Lins e Dos Santos-Silva (2017) observam para as 33 florestas Tropicais Ombrófilas Maduras incluídas no estudo, o aporte médio anual de $7900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

O aporte da fração folhas foi próximo do valor médio para Floresta Tropicais Montanas de $5.380 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ proposto por Röderstein; Hertel; Leuschner (2005), com base em vinte e um trabalhos anteriormente realizados, sendo uma porcentagem semelhante a observada por Freire, Scoriza e Piña-Rodrigues (2014), Gomes et al. (2010) e Paudel et al. (2015), que foram de 60,9%, 69,3% e 63% respectivamente, todos em Florestas Ombrófilas Montanas.

Por não haver diferença no aporte entre os anos (Figura 6; Tabela 14), há um indicativo de que a floresta em estudo está em uma situação de equilíbrio dinâmico em relação a produção de biomassa, característica de floresta em estágios sucessionais primários pouco perturbados, como observado nos trabalhos de dinâmica realizados em florestas primárias por Zhou et al. (2006) com coletas mensais por seis anos, Cizungu et al. (2014) com coletas mensais por dois anos; e Paudel et al. (2015a) com coleta mensal por dois anos.

Além da produção entre os anos, outras indicações dessa estabilidade são vistas no padrão sazonal bem definido observado para a área de estudo e para as parcelas (Figura 7, 8 e 9). Com maiores aportes nas estações de primavera e verão,

há correlações fortes e positivas com a temperatura e a precipitação tanto do período quando a histórica (Tabela 16). Esses resultados diferem do observado por Köhler, Hölscher e Leuschner, (2008) que encontraram relações negativas entre os elementos climáticos (precipitação, temperatura média e mínima absoluta).

Deve se notar que a correlação da biomassa foi maior com a média história do que com a precipitação relativa ao período de estudo (Tabela 16), indicando uma adaptação às condições climáticas médias. Os maiores aportes foram observados no verão e na primavera. Nestas estações ocorrem aproximadamente 80% da precipitação anual (Figura, 3 7 e 8), podendo ter relação direta com o impacto mecânico das pesadas chuvas que ocorrem nessa estação e provocam a abscisão física das folhas (DAWOE; ISAAC; QUASHIE-SAM, 2010). Entretanto, apesar de em menores proporções, a produção de serapilheira é contínua e ocorre no período seco (outono e inverno). Segundo Martinelli; Lins; Dos Santos-Silva (2017), quando há relação entre o aporte e os elementos meteorológicos é um indicativo do controle individual de cada espécie em manter ou perder folhas, mas que em geral, Floretas Ombrófilas tem boa relação entre o aporte e o clima, principalmente temperatura.

De acordo Zhou et al. (2006) a chuva não é fator limitante para a produção de serapilheira em florestas montanas, uma vez que não há escassez no suprimento de água, uma vez que a transpiração da vegetação reduz durante a estação seca, como observado por Holwerda, Alvarado-Barrientos e González-Martínez (2016). Estes últimos autores sugerem que a baixa umidade do solo é desfavorável, entretanto, como há espécies realizando renovação foliar durante a estação seca (aporte contínuo ao longo do ano), não há limitação hídrica para estas formações, pois o crescimento é estagnado quando há déficit hídrico (HILTNER et al., 2016).

Similarmente como ocorreu no estudo realizado por Paudel et al. (2015), durante o período de menor precipitação que ocorre no inverno, há a formação de neveiros. Associado a formação do neveiro, todas as parcelas têm seu potencial energético reduzido nessa época de ano com exceção da parcela P5 que tem face voltada completamente para o norte (Tabela 13), e conseqüentemente reduzem a demanda por água da vegetação (Figura 15).

Figura 15 – Presença de densa neblina na Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.



FONTE: O autor.

Dessa forma, o padrão sazonal de produtividade da floresta está relacionado ao elevado rendimento de água, resultante da abundante chuva na estação de verão e primavera, em combinação com a baixa demanda atmosférica (evapotranspiração) e a umidade originária da neblina no outono e no inverno (HOLWERDA; ALVARADO-BARRIENTOS; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, 2016), permitindo a produção contínua de biomassa durante todo o ano.

Em relação a variação altitudinal (Figura 9), como mencionado foi possível observar que em termos gerais, tanto as frações quando o aporte total de cada parcela foi semelhante, com exceções das parcelas P1 e P5 que tiveram produção relativamente superior as demais parcelas. Entretanto, a parcela P7, tem valores inferiores as demais principalmente nas estações do inverno e do outono, que pode indicar uma redução do aporte a partir dessa cota, assim como foi observado por Zhou et al. (2006) em um gradiente que variou entre 50 e 800 m de altitude; Röderstein, Hertel e Leuschner (2005) com variação altimétrica entre 890 e 3060 m, e Bellingham et al. (2013) com parcelas variando entre 320 e 780 m em uma Floresta Temperada Montana na Nova Zelândia.

Uma vez que a parcela P7 tem a vegetação visualmente diferente das demais parcelas, a redução no total de serapilheira com a altitude está associada a mudanças tanto na estrutura (menor estatura) quando na composição das espécies, que por consequência direciona a menor altura das árvores, produção de biomassa e consequentemente menor produção primária (KITAYAMA; AIBA, 2002; RÖDERSTEIN; HERTEL; LEUSCHNER, 2005; ZHOU et al., 2006).

4.1.2 Sazonalidade e teor dos nutrientes e das fibras

O estudo não mostra variação sazonal marcante nos teores de C, N e P para as Frações Folhas e Outros Matérias (Tabela 17, 18 e 19). Em relação ao N os valores médios foram semelhantes a média das diversas espécies estudadas por Keller et al. (2013), com valores de N das folhas senescentes de 13,64 g kg⁻¹. Wullaert et al. (2010) observam valores médios para tratamentos com fertilização de N e P e controle sem fertilização para Florestal Montana no Equador valores de N para a serapilheira de 12 g kg⁻¹ sendo semelhantes aos observados neste estudo. Yamashita et al. (2010) estudando a dinâmica sazonal e espacial de N para uma Floresta Sempre Verde na China, também observa teores inferiores oscilaram entre 2,00 e 9,36 g kg⁻¹.

Assim como este estudo, também não foi observado sazonalidade marcante para o teor de N no estudo de Paudel et al. (2015) em Floresta Tropical Montada na China. Entretanto apesar de não existir variação sazonal clara, os menores teores de N na Fração Folhas foram observados durante o inverno, são contrários ao relatado por Yamashita et al. (2010) em uma Floresta Montana na Tailândia. Estes autores observaram que valores de N foram quase duas vezes maiores no período seco em relação ao restante do ano.

Apesar dos valores semelhantes entre as estações no teor de N, observa-se principalmente para as folhas que o desvio em relação à média foi mais pronunciado que para as demais frações em ambas as estações. Esse resultado pode indicar variação espacial nos teores desse nutriente.

Essa variação espacial do material recém caído pode ser determinada pelo estado nutricional das folhas verdes, e de outras partes das plantas ainda vivas durante a estação chuvosa. Nesse período, pesadas chuvas e ventos fortes podem realizar a abscisão prematura de tecidos vegetais ricos em nutrientes (PAUDEL et al., 2015). Além disso, outra possibilidade para a maior variação espacial é referente ao fato de que as folhas coletadas foram um misto de todas as espécies que compõem o dossel. Essa maior variabilidade espacial nos teores de N, podem estar associados a diferentes teores desse nutriente para cada espécie que compõe o dossel, como observado por Bellingham et al. (2013) em Floresta Montana na Nova Zelândia, e Keller et al. (2013) em uma Floresta Tropical na Costa Rica. Todavia Keller et al. (2013) observa em seu estudo que mesmo que haja diferença no teor

quando comparam espécies, não houve diferenças significativas entre grupos funcionais.

Segundo Prescott (2002) as diferenças entre a composição do dossel e conseqüentemente no teor de nutriente das folhas senescentes de cada espécie que compõe o mesmo, podem explicar a variação dos dados (desvio padrão) de N das folhas, variação esta que não foi observada para P ou C na Fração Folhas.

Os baixos teores de P para a Fração Folhas segundo Tanner, Vitousek e Cuevas (1998), estão associadas a elevadas taxas de retranslocação das folhas senescentes. Em geral, há redução dos teores de N do tecido foliar vivo e de P e K do material senescente enquanto que para Ca e Mg não há um padrão claro. O baixo teor de P nas folhas senescentes é resultante do processo de retranslocação, implica em eficiência em ambientes onde há deficiência de P no solo, uma vez que este é limitante ao desenvolvimento da vegetação (VITOUSEK, 1984).

Os valores de P, são abaixo dos observados por Paudel et al. (2015) 1,09 g kg⁻¹ na floresta primária, próximo ao observado por Keller et al. (2013) para nove espécies que compõe o dossel estudado por estes autores, sendo valor médio 0,39 g kg⁻¹, e dentro do intervalo observado na revisão para quatro Florestas Tropicais Montanas em gradiente altitudinal feita por Tanner, Vitousek e Cuevas (1998) que variam aproximadamente entre 0,1 a 0,75 g kg⁻¹.

Os teores de P foram relativamente maiores na Fração Outros materiais em relação a Fração Folhas (Tabela 19), com leve decréscimo em relação à altitude. Os resultados corroboram com o observado por Paudel et al. (2015). Estes autores notaram que o maior teor de P está relacionada ao material reprodutivo e os maiores teores de N são observados para a fração Folhas.

Isso se explica pelo fato de neste estudo, as partes reprodutivas da serapilheira depositada foram unidas com demais matérias na Fração Outros Materiais. No trabalho realizado por Castro (2014) na mesma área de estudo, o aporte total da fração miscelânea, composta apenas por material reprodutivo senescente e material não identificado, correlacionou-se com a altitude ($r = -0,72$), indicando que esta fração reduz com a variação altitudinal (dados não publicados). Assim, associando os maiores teores P da fração Outros Materiais, que contém as miscelâneas, com o observado por Paudel et al. (2015) e Castro (2014), pode-se inferir que tanto o maior teor quando o decréscimo com a variação de altitude é diretamente relacionado a presença de material reprodutivo na Fração Outros Materiais.

A relação com o gradiente altitudinal não foi observada no estudo realizado por Bellingham et al. (2013), tanto para os teores de N quanto de P. Além disso, na revisão realizado por Tanner, Vitousek e Cuevas (1998), os teores de N tende a reduzir do tecido foliar senescente com o aumento da altitude, em contra partida, os teores de P, não tem um padrão definido. Em altitudes intermediárias é praticamente constante, e somente após 3.000 m de altitude que tendem a decrescer no tecido senescente. Porém, segundo Kitayama e Aiba, (2002) com o gradiente altitudinal o teor de N e P aumentam para folhas maduras e decrescem na serapilheira.

Esses resultados controversos indicam que não há um padrão definido para o uso e ciclagem tanto de N quando de P e como mencionado por Kitayama e Aiba (2002), esse padrão está relacionado a maior eficiência na produção de biomassa por unidade de nutriente, de forma que Florestas Montanas reduzem a ciclagem de N e P e seu teor na fração folhas da serapilheira para aumentar essa eficiência em ambientes limitados por esses nutrientes (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998).

Em relação à alocação do carbono no tecido senescente, foi observado que os teores de carbono foram constantes tanto em relação a sazonalidade, quando em função da variação de altitude, para ambas as frações e mesmo em relação aos constituintes do tecido, lignina e celulose (Tabela 21 e 22). Esse resultado também foi observado por Paudel et al. (2015). Apesar da variação dos teores médios para diferentes espécies que compõem a comunidade vegetal, a composição química média e marcadamente homogênea, independente da composição da comunidade (OSTERTAG et al., 2008).

As maiores diferenças observadas entre estações e entre frações é observada para os Polifenóis Totais, sendo superiores para a Fração Folhas, principalmente no outono e no inverno (Tabela 20). Os maiores teores desses compostos para esta fração estão relacionados a função dos mesmos, sendo a proteção conta patógenos e herbívora desses tecidos (FACELLI; PICKETT, 1991; HÄTTENSCHWILER; HAGERMAN; VITOUSEK, 2003).

Os teores de polifenóis totais observados nesse estudo, são inferiores aos observados para a fração folhas de *Metrosideros polymorpha* por (Hättenschwiler, Hagerman e Vitousek (2003) que variaram entre 11 e 19,2 % em uma cronosseqüências no Havai; Cizungu et al. (2014) também observaram valores superiores para diferentes espécies do dossel com valores variando entre 2,11 a 16,78%, sendo os maiores valores observado para plantios homogêneos do gênero *Eucalyptus*.

Segundo Hättenschwiler, Hagerman e Vitousek (2003), os teores de polifenóis aparentemente estão relacionadas com a limitação de P para o crescimento, sendo estimulada a produção destes compostos em ambientes mais limitados por P. Porém, ainda segundo estes autores, essa suposição não pode ser inferida para N, uma vez que teores baixos de polifenóis foram observadas em diferentes partes do vegetal.

Mesmo com baixa variação para ambas as frações e estações (Tabela 17), o teor de carbono foi pouco superior ao observado em outros estudos com Florestas Tropicais que variaram entre 426,4 e 521,80 g kg⁻¹ (Tabela 26).

Tabela 26 – Teor médio de Carbono, Lignina, Celulose e Relações C:N e Lignina:N para a serapilheira e diferentes Florestas Tropicais.

Fisionomia	Referência	Tecido vegetal	C g kg ⁻¹	Lignina %	Celulose %	C:N	Lignina:N
Floresta Tropical Montana	Paudel et al. (2015)	Folhas senescentes	443,1				
Floresta Tropical Montana	Jeyanny. et al. (2015)	Folhas senescentes	435,9	35,4	35,1	24,7	21
Floresta Tropical Terras Baixas		Folhas senescentes	426,4	41,6	33,2	56,2	57
Floresta Tropical Semidecidual	Godinho et al. (2014)	Necromassa	505,8			30	
Floresta Tropical Montana	Cizungu et al. (2014)	Folhas senescentes	441,3	25	20,9	23,2	14,3
<i>Eucalyptus</i> spp		Folhas senescentes	500,5	14	15,6	45,7	13,3
Floresta Tropical de Terras Baixas	Dent et al. (2006)	Folhas senescentes		60			8
Floresta Subtropical	Xu e Hirata, (2005)	Folhas senescentes	521,1	22,8	59,7	63,4	27,7
Floresta Tropical de Terras Baixas	Ostertag et al., (2008)	Folhas senescentes	471	25		41,7	22,1

Entretanto, quando observada a alocação deste carbono no material aportado, C:N e Lignina:N, a Fração Folhas mostra uma clara variação destas relações durante o inverno, sendo superior as demais estações e com variação em relação a altitude (Tabelas 23 e 24), indicando que durante esta estação, há uma tendência do material aportado, se tornar mais recalcitrante. Assim formas mais lábeis, relativas ao carbono solúvel dominam em áreas mais baixas, sendo a principal fonte de substrato para a comunidade microbiana, e gradativamente vai sendo substituído por formas mais recalcitrantes e mais humificadas com a altitude (BARDGETT et al., 2005; VAN DER HEIJDEN; BARDGETT; VAN STRAALLEN, 2008).

4.1.3 Acúmulo, decomposição e liberação de nutrientes

Apesar do acúmulo de serapilheira ser significativamente maior no primeiro ano de estudo (Figura 6), o mesmo foi relativamente constante ao longo dos quatro anos de estudo, isso fica claro quando observados os valores médios da constante de decomposição para a área de estudo que se mostraram próximo a estabilidade, variando entre 1 e 1,2 com maiores variações entre 0,7 e 1,6 para as parcelas (Tabela 15).

Os valores médios de acúmulo foram superiores aos observados por (CALDEIRA et al., 2008) para um estágio avançado em Floresta Ombrófila Densa Submontana, $5.280 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Entretanto, foram inferiores a maioria dos estudos em outras formações florestais. Em floresta de encosta e de galeria na África Central foi observado um acúmulo médio de 17.300 e $24.700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente (AVERTI; DOMINIQUE, 2011); em florestas de coníferas na Grécia o acúmulo médio foi de $14.420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (KAVVADIAS et al., 2001). Em Porto Rico, na Floresta Ombrófila Submontana em estágio sucessional primário o acúmulo foi de $15.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (OSTERTAG et al., 2008). Na Jamaica, em uma Floresta Tropical Montana o acúmulo variou entre 8.060 e $11.700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (TANNER, 1981).

A constante de decomposição e mineralização de nutrientes e conseqüentemente o acúmulo de serapilheira sobre o solo, são controladas por condições microclimáticas como temperatura, umidade e pelas características químicas e a natureza do material em decomposição e por fim, pelos organismos no solo (GE et al., 2013; PRESCOTT, 2002).

Em um estudo em uma cronosseqüências na regeneração de Florestas Tropicais de Terras Baixas em Porto Rico, Ostertag et al. (2008) demonstram que as características do sítio têm mais efeito do que as características do material senescente no controle das taxas de decomposição.

Dessa forma, esperava-se que o acúmulo de serapilheira exibisse uma sazonalidade clara (Figuras 7, 8 e 19). Todavia, quando correlacionado com as variáveis ambientais, o mesmo correlacionou-se fracamente com a temperatura média ($p = 0,34$). Somente a constante de decomposição foi fortemente correlacionada com o Índice de Cobertura de Copa (ICC) ($p = 0,71$).

A relação entre k e o ICC, é influenciada principalmente pela disponibilidade de energia que é determinada por: total de radiação solar, a quantidade de que

refletida e o balanço de ondas longas. Um menor ICC propicia a transmissão de uma maior quantidade de energia ao solo e conseqüentemente eleva a temperatura a baixo do dossel (LANDSBERG; GOWER, 1997; PRESCOTT, 2002). Por conseqüência, uma maior abertura no dossel eleva a temperatura, e esta eleva a respiração na camada de serapilheira e no solo, acelerando o processo de decomposição (ZIMMERMANN et al., 2009). Nesse sentido, Zimmermann et al. (2009) observam que aproximadamente 40% da respiração diária do solo tem origem na própria serapilheira, sendo principalmente relacionada a temperatura do ar nos primeiros centímetros acima do solo.

A influência da temperatura na respiração do solo é relativa ao fluxo de CO₂ que tende a um aumento gradativo com a elevação da temperatura. Em menores temperaturas, a principal fonte de C são formas lábeis e por conseqüência a decomposição é mais acelerada. Com o aumento gradativo da temperatura, outras fontes mais recalcitrantes tornam-se mais disponíveis (ZHANG et al., 2016). No sentido oposto, além da menor temperatura já característico das Florestas Montanas, a maior cobertura implica em maior umidade na camada de serapilheira e no solo (PRESCOTT, 2002), e a elevada umidade diminui a difusão de oxigênio, que associada a menor temperatura, reduz a decomposição e a ciclagem de nutrientes (KELLER et al., 2013). Portanto, a relação entre o elevado ICC do dossel e a constante de decomposição (Tabela 16), as menores temperaturas características da elevação, e a maior precipitação durante o ano de 2013 (Tabela 2 e 3), pode explicar o maior acúmulo de serapilheira do mesmo ano (Tabela 14; Figura 6).

Os teores médios de C foram superiores ao observados para alguns estudos em Florestas Tropicais (Tabela 26). Observa-se que os maiores teores de C são nas parcelas de maior altitude em todas as estações em relação as frações aportadas, e em relação a sazonalidade há uma mudança no inverno, principalmente nas parcelas de menor altitude.

A sazonalidade climática nos teores de carbono é um indicativo da mudança da estrutura da comunidade microbológica decompositora (BARDGETT et al., 2005). No verão, a estrutura da comunidade é composta principalmente por bactérias, que utilizam principalmente fontes solúveis de carbono. A serapilheira fresca é fonte de formas solúveis de carbono, que são solubilizados com o início das chuvas (YAMASHITA et al., 2010). No outono essa comunidade começa a ser substituída, e no inverno a estrutura da comunidade é constituída principalmente por fungos que são mais hábeis em decompor as fontes de carbono mais complexas e

recalcitrantes ricas em fenóis e lignina (BARDGETT et al., 2005). Corroborando com estes autores, os resultados na decomposição do tecido foliar, demonstram que tanto a lignina quanto a celulose, começaram a ser decompostos no inverno aos 180 dias do início do processo de decomposição (Figura 13).

Durante o começo da estação chuvosa o N é lixiviado da serapilheira para as primeiras camadas do solo e no meio da estação chuvosa ocorre o auge da mineralização, e parte do total de N que entra no sistema via serapilheira é lixiviado e abastece o pool de N no solo (YAMASHITA et al., 2010). No outono há a redução da intensidade e quantidade de chuvas que diminui a lixiviação de N e eleva as quantidades de N solúvel (NEMERGUT et al., 2010).

Em geral, a liberação de nutrientes e de compostos orgânicos da fração folhas mostra que inicialmente durante o processo de decomposição, há liberação das formas solúveis de carbono que são suficientes para suprir a comunidade microbológica na fase inicial de decomposição (ZHANG et al., 2016). Isso corrobora com os teores constantes de N que se mantem estáveis até os 120 dias, quando é lentamente liberado e acompanha a liberação do C (Figura 12). A lignina, por outro lado, tem redução dos seus teores apenas a partir dos 180 dias do início do processo de decomposição. (Figura 13)

Além dos teores elevados e constantes teores de N (Tabela 18), as baixas relações C:N e Lignina:N, são um indicativo de que N não é limitante para a decomposição. Os maiores teores de N inibem o desenvolvimento de espécies de fungos de podridão branca, mais hábeis em decompor frações mais recalcitrantes do material como a lignina, de forma que a comunidade decompositora é composta por espécies de fungos de podridão marrom, que não consegue decompor totalmente a lignina (GE et al., 2013; JEYANNY, V. et al., 2015) e conseqüentemente mantem seus teores desta, constantes ao longo do ano (Tabela 21).

Da mesma forma, a lignina é responsável por inibir o ataque de microrganismos a holocelulose da qual a celulose faz parte, protegendo-a fisicamente ou por compor em conjunto uma matriz recalcitrante (FUJII; TAKEDA, 2010), uma vez que não há degradação da lignina, a celulose também mantem seus teores constantes (Tabela 22) até começar a ser liberada em maiores proporções juntamente com a lignina (Figura 13). A baixa decomposição da lignina está relacionada com a disponibilidade de N, a elevada disponibilidade de N na serapilheira pode inibir a decomposição da serapilheira por suprimir a síntese de

enzimas lignocelulolíticas, principalmente quando a lignina representa elevada porcentagem no material (GE et al., 2013)

Toda via, aparentemente não é o que acontece com o P. pois, durante o processo de decomposição o P é imobilizado (Figura 12), e seus teores se mantem constante ao longo do ano em todas as parcelas (Tabela 19). Segundo Tanner; Vitousek; Cuevas (1998) as florestas montanas e de altitudes podem ser limitadas tanto por N quando por P. Entretanto, segundo Laliberté et al. (2013), apesar destes nutrientes serem os que mais limitam a produção primária, N é mais limitante em ambientes com solos novos, e P mais limitantes em solos muito intemperizados.

Em experimento de enriquecimento dos solos com N e P em floresta montana no Equador, Wullaert et al. (2010) observaram maior retenção de N e P na camada orgânica dos solos com rápida imobilização, nas parcelas que foram enriquecidas. Segundo esses autores, esse comportamento é um indicativo que N e P são limitantes nesses ambientes, sendo rapidamente absorvidos pela biomassa microbiana durante o processo de decomposição.

Em termos gerais, com exceção de N e P, o mesmo padrão de liberação de nutrientes foi observado no estudo de decomposição relacionada com composição química da serapilheira, Fujii e Takeda (2010). Esses autores observam rápida mineralização de K das folhas em decomposição, justificando a não participação de K em estruturas. O Mg também foi liberado rapidamente, mas em menor proporção do que K. O Ca teve liberação lenta por fazer parte de estruturas. Contudo, P e N foram vagarosamente liberados, sendo P liberado mais rapidamente. Wullaert et al. (2010) demonstraram que quando há maior disponibilidade de N e P, tanto o teor quanto o fluxo desses nutrientes via serapilheira se elevam. Na área de estudos, esse comportamento foi observado para N que teve elevados teores e foi liberado mais rapidamente, mas foi o oposto do que ocorreu com P, que teve menores teores no tecido foliar e foi imobilizado durante o processo de decomposição. Por outro lado, limitação do crescimento por nutrientes é correlacionado com o baixo teor do nutriente, a limitante nas folhas senescentes, que pode ser tanto resultado do baixo teor nas folhas maduras, ou pela eficiência na retranslocação (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998).

Os elevados teores de lignina influenciam negativamente na perda de massa durante o processo de decomposição. A decomposição de formas mais recalcitrantes de C, e a elevada relação C:N propicia que o N lixiviado da

serapilheira aportada seja imobilizado para favorecer a decomposição quando há limitação de N (CIZUNGU et al., 2014; FUJII; TAKEDA, 2010)

Corroborando esta afirmação, Xu e Hirata (2005) observaram que na fase inicial da decomposição, há correlação positiva entre maiores taxas de perda de massa com o teor de N e negativas com as relações Lignina:N e C:N. Na fase final, as correlações foram positivas com teor inicial de N, e negativa com o Teor de Lignina, e as relações Lignina:N, C:N, C:P. Estes autores indicam que o teor de N e as relações C:N e Lignina:N, são os parâmetros que mais influenciam a decomposição, pois são relativos a degradabilidade do material. Entretanto, Ostertag et al. (2008) estudando as diferentes composições de folhas de espécies no processo de decomposição e sua relação com o teor de C no solo, nota que quanto maior a presença de metabólitos secundários, o teor de C tende a ser maior nos solos, uma vez que além da recalcitrância natural desses compostos, há também formação de novos compostos no solo e a inibição da atividade microbiana (TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998).

Dentre os metabólitos secundários, as substâncias fenólicas podem reduzir tanto a decomposição quanto o crescimento de plantas e microrganismos decompositores (GE et al., 2013; TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998). Apesar disso, a porcentagem de polifenóis no tecido foliar recém caído foi baixa, sendo mais expressivos na fração Folhas (Tabela 20). Durante o processo de decomposição, aproximadamente 20% ainda resistem após 90 dias do início da decomposição (Figura 13).

A serapilheira rica em polifenóis complexados com proteínas pode ser uma adaptação da vegetação para solos limitados por N, nos quais as micorrizas associadas as raízes de plantas podem quebrar ligações polifenol-proteína para liberar o N inacessível da serapilheira, transferindo para a planta e aumentando assim, as taxas de absorção de N (HÄTTENSCHWILER; HAGERMAN; VITOUSEK, 2003). Entretanto, a serapilheira foliar tem elevados teores de N, podendo-se supor que os polifenóis sendo liberados rapidamente e no início do processo de decomposição foliar (Figura 13), não fazem parte de ligações proteicas e não participam diretamente da ciclagem de N. Conseqüentemente, a abundância de N, minimiza a decomposição da lignina.

5 CONCLUSÕES

A floresta em questão se encontra em equilíbrio dinâmico. A produção de serapilheira é fortemente adaptada ao regime hídrico histórico da região, com elevado aporte durante as estações de maior precipitação, não respondendo a variações interanuais da precipitação.

Na área de estudo a produção primária líquida não tem limitação de N, uma vez que há elevados teores desse nutriente na serapilheira aportada e acumulada, e que sua liberação ao longo do processo de decomposição é constante não havendo imobilização. Por outro lado, com base nos mesmos requisitos, a área de estudos tem limitação de P.

As características químicas da serapilheira aportada e acumulada governam o processo de decomposição, impedindo que frações mais recalcitrantes sejam decompostas em grandes proporções, e devido ao aporte constante, a ciclagem de formas mais lábeis de C, mantem a comunidade abastecida, e permite a ciclagem dos demais nutrientes, abastecendo o pool do solo, e satisfazendo a demanda da vegetação, tornando o ambiente eficiente.

6 REFERÊNCIAS

- ARATO, H. D.; MARTINS, S. V.; FERRARI, S. H. D. S. Produção e decomposição de serapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 715–721, 2003.
- AVERTI, I.; DOMINIQUE, N. Litterfall, accumulation and decomposition in forest groves established on savannah in the plateau teke, Central Africa. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 6, p. 601–610, 2011.
- BARDGETT, R. D. et al. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 11, p. 634–641, 2005.
- BELLINGHAM, P. J. et al. Litterfall, nutrient concentrations and decomposability of litter in a New Zealand temperate montane rain forest. **New Zealand Journal of Ecology**, v. 37, n. 2, p. 162–171, 2013.
- BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. J. W. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. **Plant and Soil**, v. 9, n. 2, p. 179–185, 1957.
- CABIANCHI, G. M. **Ciclagem de nutrientes via serapilheira em um fragmento ciliar do rio Urupá , Rondônia Ciclagem de nutrientes via serapilheira em um fragmento ciliar do rio Urupá , Rondônia**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. **Ciências Agrárias**, v. 29, n. 1, p. 53–68, 2008.
- CARMO, C. A. F. DE S. DO et al. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- CASTRO, K. C. **Serapilheira e estoque de carbono ao longo de um gradiente altitudinal na Floresta Ombrófila Densa, no parque Nacional do Caparaó, ES**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- CIZUNGU, L. et al. Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and Eucalyptus plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 326, p. 109–116, 2014.
- CLARK, D. A et al. Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 371–384, 2001.
- CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 27, p. 10316–10321, 2006.
- CUNHA, G. D. M. et al. Biomassa E Estoque De Carbono E Nutrientes Em Florestas Montanas Da Mata Atlântica Na Região Norte Do Estado Do Rio De Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1175–1185, 2009.

DAWOE, E. K.; ISAAC, M. E.; QUASHIE-SAM, J. Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. **Plant and Soil**, v. 330, n. 1, p. 55–64, 2010.

DENG, Q. et al. Changing rainfall frequency rather than drought rapidly alters annual soil respiration in a tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 121, n. December 2016, p. 8–15, 2018.

FACELLI, J. M.; PICKETT, S. T. A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure. **The Botanical Review**, v. 57, n. 1, p. 1–32, jan. 1991.

FREIRE, M.; SCORIZA, R. N.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. Influência do clima no aporte de serrapilheira em uma floresta ombrófila densa montana. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 9, n. 3, p. 427–431, 2014.

FUJII, S.; TAKEDA, H. Dominant effects of litter substrate quality on the difference between leaf and root decomposition process above- and belowground. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2224–2230, 2010.

GE, X. et al. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 33, n. 2, p. 102–108, 2013.

GHUMAN, B.; LAL, R. Effects of partial clearing on microclimate in a humid tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 40, p. 17–29, 1987.

GOMES, J. M. et al. Aporte de serrapilheira e de nutrientes em fragmentos florestais da Mata Atlântica, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 5, n. 3, p. 383–391, 9 set. 2010.

GUO, L. B.; SIMS, R. E. H. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 75, n. 1–2, p. 133–140, ago. 1999.

HÄTTENSCHWILER, S.; HAGERMAN, A. E.; VITOUSEK, P. M. Polyphenols in litter from tropical montane forests across a wide range in soil fertility. **Biogeochemistry**, v. 64, n. 1, p. 129–148, 2003.

HILTNER, U. et al. Impacts of precipitation variability on the dynamics of a dry tropical montane forest. **Ecological Modelling**, v. 320, p. 92–101, jan. 2016.

HOLWERDA, F.; ALVARADO-BARRIENTOS, M. S.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, T. M. Surface energy exchange in a tropical montane cloud forest environment: Flux partitioning, and seasonal and land cover-related variations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228–229, p. 13–28, 2016.

JEYANNY, V. et al. Leaf Litter Decomposition and Soil Carbon Dioxide Fluxes Across Climatic Gradient in Tropical Montane and Lowland Forests. v. 27, n. 4, p. 472–487, 2015.

KAVVADIAS, V. A. et al. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern greece. **Forest Ecology and Management**, v. 144, n. 1–3, p. 113–127, 2001.

KELLER, A. B. et al. Effects of canopy tree species on belowground biogeochemistry in a lowland wet tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 61–69, 2013.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985.

KITAYAMA, K.; AIBA, S.-I. I. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. **Journal of Ecology**, v. 90, n. 1, p. 37–51, fev. 2002.

KÖHLER, L.; HÖLSCHER, D.; LEUSCHNER, C. High litterfall in old-growth and secondary upper montane forest of Costa Rica. **Plant Ecology**, v. 199, n. 2, p. 163–173, 31 dez. 2008.

LALIBERTÉ, E. et al. How does pedogenesis drive plant diversity? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 28, n. 6, p. 331–340, 2013.

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. Canopy Architecture and Microclimate. **Applications of Physiological Ecology to Forest Management**, p. 51–88, 1997.

LINDNER, R. C. Rapid Analytical Methods for Some of the More Common Inorganic Constituents of Plant Tissues. **Plant Physiology**, v. 19, n. 1, p. 76–89, 1944.

MARTINELLI, L. A.; LINS, S. R. M.; DOS SANTOS-SILVA, J. C. Fine litterfall in the Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 49, n. 4, p. 443–451, 2017.

NEMERGUT, D. R. et al. Plot-scale manipulations of organic matter inputs to soils correlate with shifts in microbial community composition in a lowland tropical rain forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2153–2160, 2010.

OLSON, J. S. Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in Ecological Systems. **Ecology**, v. 44, n. 2, p. 322–331, abr. 1963.

OSTERTAG, R. et al. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico. **Ecosystems**, v. 11, n. 5, p. 701–714, 2008.

PAUDEL, E. et al. Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. **Forest Ecology and Management**, v. 353, p. 97–106, 2015.

PITMAN, R. M. Litterfall—Biomass, Chemistry, Leaf Area, and Links with Wider Ecosystem Functioning. In: [s.l.: s.n.]. p. 251–264.

PRESCOTT, C. E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. **Tree Physiology**, v. 22, n. 15–16, p. 1193–1200, 2002.

ROBINSON, J. B. D. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods (Second Edition). Edited By J. M. Anderson and J. S. I. Ingram, with 13 appendices by various authors. Wallingford, Oxfordshire: CAB International (1993), pp. 221, £19.95. ISBN 0-85198-821-0. **Experimental Agriculture**, v. 30, n. 04, p. 487, 3 out. 1994.

RÖDERSTEIN, M.; HERTEL, D.; LEUSCHNER, C. Above- and below-ground litter production in three tropical montane forests in southern Ecuador. **Journal of**

Tropical Ecology, v. 21, n. 5, p. 483–492, 2005.

RODRIGUES, R. C. **Métodos de análises bromatológicas de alimentos: métodos físicos, químicos e bromatológicos**. Pelotas: [s.n.].

SCHIMEL, J. P.; WEINTRAUB, M. N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: A theoretical model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 4, p. 549–563, 2003.

SILVER, W. L. et al. Nutrient availability in a montane wet tropical forest: Spatial patterns and methodological considerations. **Plant and Soil**, v. 164, n. 1, p. 129–145, jul. 1994.

SINSABAUGH, R. L.; MOORHEAD, D. L.; LINKINS, A. E. The enzymic basis of plant litter decomposition: emergence of an ecological process. **Applied Soil Ecology**, v. 1, n. 2, p. 97–111, 1994.

TANNER, E. V. J. The Decomposition of Leaf Litter in Jamaican Montane Rain Forests. **The Journal of Ecology**, v. 69, n. 1, p. 263, mar. 1981.

TANNER, E. V. J.; VITOUSEK, P. M.; CUEVAS, E. Experimental Investigation of Nutrient Limitation of Forest Growth on Wet Tropical Mountains. **Ecology**, v. 79, n. 1, p. 10, jan. 1998.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; VAN STRAALLEN, N. M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v. 11, n. 3, p. 296–310, 2008.

VAN SOEST, P. J. Development of a Comprehensive System of Feed Analyses and its Application to Forages. **Journal of Animal Science**, v. 26, n. 1, p. 119–128, 1 jan. 1967.

VAN SOEST, P. J.; WINE, R. H. Determination of lignin and cellulose in acid-detergent fiber with permanganate. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**, v. 51, p. 780–785, 1968.

VASCONCELOS, S. S. et al. Aboveground net primary productivity in tropical forest regrowth increases following wetter dry-seasons. **Forest Ecology and Management**, v. 276, p. 82–87, 2012.

VITOUSEK, P. M. Litterfall, Nutrient Cycling, and Nutrient Limitation in Tropical Forests. **Ecology**, v. 65, n. 1, p. 285–298, fev. 1984.

WULLAERT, H. et al. Response of the N and P cycles of an old-growth montane forest in Ecuador to experimental low-level N and P amendments. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 9, p. 1434–1445, 2010.

XU, X.; HIRATA, E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: N and P dynamics. **Plant and Soil**, v. 273, n. 1–2, p. 279–289, jun. 2005.

YAMASHITA, N. et al. Seasonal and spatial variation of nitrogen dynamics in the litter and surface soil layers on a tropical dry evergreen forest slope. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 8, p. 1502–1512, 2010.

ZHANG, J. et al. Temperature sensitivity of soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions in mountain forest and meadow ecosystems in China. **Atmospheric Environment**, v. 142, p. 340–350, 2016.

ZHOU, G. et al. Litterfall Production Along Successional and Altitudinal Gradients of Subtropical Monsoon Evergreen Broadleaved Forests in Guangdong, China. **Plant Ecology**, v. 188, n. 1, p. 77–89, 11 dez. 2006.

ZIMMERMANN, M. et al. Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 6, p. 1338–1340, 2009.

CAPÍTULO III

SAZONALIDADE DA ATIVIDADE MICROBIANA EM FLORESTA OMBRÓFILA DENSE, NO PARQUE NACIONAL DO CAPARAÓ, ES

RESUMO

Os microrganismos do solo exercem um importante papel na dinâmica do carbono e de nutrientes. A atividade biológica desses organismos é influenciada pelas alterações edafoclimáticas e de composição de espécies vegetais, mas poucos estudos foram feitos em regiões montanhosas onde as diferenças no relevo e altitude são grandes. O objetivo deste trabalho foi investigar 1) a sazonalidade da atividade microbiana ao longo de um trecho de Floresta Ombrófila Densa Montana; 2) e a relação desses microrganismos com o carbono e o nitrogênio do solo. O estudo foi realizado em um trecho de Floresta Ombrófila Densa Montana localizada no Parque Nacional do Caparaó. Foram instaladas sete parcelas de 1000 m² em diferentes cotas altitudinais (1112 m a 1550 m acima do nível do mar) para o estudo. Na camada superficial do solo dos distintos solos observados na área de estudo para cada parcela, foram coletadas amostras entre 0-10 cm para realização das análises microbiológicas e enzimáticas. Foram analisados o carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana, N-mineralizável, Fosfatase ácida, β -glucosidase, urease e os teores totais de carbono (C_{org}) e de nitrogênio (NT). As coletas e as análises foram realizadas por estação. Foi realizada a Análise de Regressão múltipla Stepwise entre os teores de C_{org} e NT em função do N-mineralizável, da atividade enzimática e da biomassa microbiana. Os teores médios de carbono (C_{org}) observados para a camada superficial do solo da área de estudo, foram mais elevados durante o Inverno (238,7 g kg⁻¹), assim como o carbono da biomassa microbiana (CBM) (1476,5 mg kg⁻¹ de C no solo), e o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) (55,4 mg kg⁻¹ de N no solo), e o nitrogênio mineralizável (N-min) (0,06 mg kg⁻¹). Em contrapartida, o teor total de nitrogênio (NT) foi mais elevado durante o outono (8,9 g kg⁻¹). A atividade da urease variou entre 36,3 e 54,1 (μ g N-NH₄⁺ 2h⁻¹ g⁻¹) ao longo do ano. A atividade da β -glucosidase (β G) teve sua maior atividade no verão (306,9 μ g p-nitrofenol h⁻¹ g⁻¹) e a fosfatase ácida (Fosf. A.) teve menor atividade no inverno (292,1 μ g p-nitrofenol h⁻¹ g⁻¹). Os teores de C_{org} da camada superficial do solo se correlacionaram negativamente com o conteúdo de fósforo aportado e acumulado sobre o solo (ρ -0,75), e a relação Lignina+celulose:N da serapilheira acumulada sobre o solo (ρ 0,75). Em relação ao teor de nitrogênio total (NT) dos solos, ele se correlacionou negativamente com o conteúdo de N (ρ -0,75 e ρ -0,75), P (ρ -0,82 e ρ -0,82) e lignina (ρ -0,75 e ρ -0,75) aportado pela serapilheira e acumulado sobre os solos respectivamente. O ajuste dos teores de

Corg e NT foi melhor explicado durante o verão e o inverno, com coeficientes de ajustamento acima de 80%. A atividade microbiológica foi caracterizada por uma mudança gradativa ao longo da variação altitudinal. Esta mudança está associada a modificações nas quantidades de compostos recalcitrantes aportados pela biomassa e pela mudança microclimática. onde a biomassa microbiana foi o principal atributo biológico relacionado aos teores de Corg e NT da camada superficial dos solos.

Palavras-chave: Gradiente altitudinal; Mineralização; Matéria orgânica.

ABSTRACT

Soil microorganisms play an important role in the dynamics of carbon and nutrients. The biological activity of these organisms is influenced by edaphoclimatic and plant species composition, but few studies have been done in mountainous regions where differences in relief and altitude are great. The objective of this work was to investigate 1) the seasonality of the microbial activity along a stretch Tropical Montane Rain Forest; 2) and the relationship of these microorganisms with the soil carbon and nitrogen. The study was carried out in a section of Tropical Montane Rain Forest located in the Caparaó National Park. Seven plots of 1000 m² were installed in different altitudes (1112 m to 1550 m above sea level) for the study. In the soil surface layer of the different soils observed in the study area for each plot, samples were collected between 0-10 cm for the accomplishment of the microbiological and enzymatic analyzes. The carbon and nitrogen of the microbial biomass, N-mineralizable, acid phosphatase, β -glucosidase, urease and the total carbon (C_{org}), and nitrogen (NT) contents were analyzed. The collections and the analyzes were carried out by season. A Stepwise Multiple Regression Analysis was performed between the C_{org} and NT contents as a function of N-mineralizable, enzymatic activity and microbial biomass. The average carbon content (C_{org}) observed for the topsoil of the study area was higher during winter (238.7 g kg⁻¹), as well as the carbon of the microbial biomass (CBM) (1476.5 mg kg⁻¹ of soil C), and nitrogen microbial biomass (NBM) (55.4 mg kg⁻¹ of N in the soil), and mineralized nitrogen (N min) (0.06 mg kg⁻¹). On the other hand, the total nitrogen content (NT) was higher during autumn (8.9 g kg⁻¹). Urease activity ranged from 36.3 to 54.1 ($\mu\text{g NH}_4^+$ 2h⁻¹ g⁻¹) throughout the year. The activity of β - glucosidase (βG) had its highest activity in the summer (306.9 $\mu\text{g p-nitrophenol h}^{-1}$ g⁻¹) and acid phosphatase (Fosf.A) had lower activity in winter (292.1 $\mu\text{g p-nitrophenol h}^{-1}$ g⁻¹). The C_{org} content of the soil surface layer correlated negatively with the soil content (ρ -0.75) and the Lignin + cellulose:N ratio of the litter accumulated on the soil (ρ 0.75). In relation to the total nitrogen content (NT) of the soils, it correlated negatively with the content of N (ρ -0.75 and ρ -0.75), P (ρ -0.82 and ρ -0.82) and lignin (ρ -0.75 and ρ -0.75) contributed by the litter and accumulated on the soils respectively. The adjustment of the C_{org} and NT contents was better explained during summer and winter, with adjustment coefficients above 80%. The microbiological activity was characterized by a gradual change along the altitudinal variation. This change is associated with changes in the

amounts of recalcitrant compounds contributed by biomass and by microclimatic change. where microbial biomass was the main biological attribute related to C_{org} and NT levels of the soil surface layer.

Keywords: Altitudinal gradient; Mineralization; Organic matter.

1 INTRODUÇÃO

Os microrganismos do solo participam de diversos processos biológicos e de interações com a vegetação nos mais diversos ecossistemas. São responsáveis pela ciclagem de nitrogênio e carbono e pela disponibilidade de nutrientes, principalmente a solubilização do fósforo, participando do próprio processo de formação dos solos (BARDGETT et al., 2005; MARGESIN et al., 2009; (VAN DER HEIJDEN; BARDGETT; VAN STRAALLEN, 2008).

A atividade dos microrganismos é sensível a alterações tanto climáticas quanto da composição de espécies vegetais, e dos atributos dos solos. De forma que a grande variação de ambientes nas regiões montanhosas, tornam-nas propícias a estudos sobre mudanças climáticas (BIRKELAND et al., 2003; LALIBERTÉ et al., 2013; MARGESIN et al., 2009). Entretanto, poucos são os estudos que buscaram investigar a atividade biológica no solo em função da altitude em condições tropicais.

Os principais agentes modificadores dos padrões de alocação de enzimas pelos microrganismos do solo para a aquisição de C, N e P são distintos em florestas tropicais. Destacando-se os relativos a latitudes, a altitude, ao tipo de matéria orgânica que entra no sistema, e o balanço da disponibilidade ou limitação de N e P (WEINTRAUB et al., 2012). Solos em regiões de encosta se diferem morfologicamente por fatores relacionados declividade, altitude, microclima e vegetação, de forma que a topografia afeta diretamente a atividade microbiana no solo e a ciclagem da matéria orgânica (MO) (CHEN; CHIU, 2000). Apesar do conhecimento sobre a relação entre os microrganismos do solo e a fertilidade, poucos são os estudos que relatam a funcionalidade para as comunidades vegetais instaladas nos ecossistemas, e pouco se sabe sobre as variação espacial e temporal dos mesmos (BARDGETT et al., 2005), principalmente em regiões de elevada altitude.

Os fatores climáticos, principalmente temperatura e umidade, atuam na regulação da população da comunidade decompositora, principalmente bactérias e fungos, e conseqüentemente na atividade enzimática. Este fato pode ser observado quando comparamos florestas tropicais com florestas temperadas, onde na primeira, as condições favoráveis propiciam uma acelerada decomposição e mineralização, enquanto que em florestas temperadas a temperatura limita a atividade microbiana

quando as condições não são adequadas e conseqüentemente, reduzem as taxas de decomposição (O'CONNELL; SANKARAN, 1997; PANDEY et al., 2007). A constante de decomposição (k) é o valor indicativo da velocidade da perda de massa do material vegetal em decomposição em função da quantidade de material adicionado. Assim, os valores para taxas de decomposição para o material sobre o solo variam entre 4 e 0,01 entre florestas perenes e subalpinas respectivamente, porém para o k no interior de solos minerais, esses valores são entre 0,01 à 0,001(OLSON, 1963).

Portanto, questiona-se como as alterações das condições climáticas, na composição da vegetação e nas condições edáficas resultam em mudanças na qualidade e quantidade das fontes de carbono aportados sobre o solo. Bem com, se a combinação desses fatores altera os padrões de utilização do carbono e nutrientes pela comunidade microbológica e pela própria vegetação. Entender as mudanças na composição e na atividade de comunidades microbiana dos solos com a variação altitudinal ou sazonal, podem subsidiar informações sobre como estes ecossistemas respondem sob mudanças climáticas (MARGESIN et al., 2009; NEMERGUT et al., 2010; XU et al., 2014).

A biomassa microbiana, principalmente o carbono da biomassa microbiana (CBM), é um indicador de qualidade do solo. O CBM é sensível a mudanças ambientais bem como das variações sazonais e no clima, mais rapidamente do que atributos químicos e físicos como os teores totais de carbono e nitrogênio do solo (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Entretanto, poucos são os estudos relacionados à atividade microbiana nos solos em função de variações de relevo, altitude e climáticas (MARGESIN et al., 2009). Segundo Xu et al. (2014), eles se resumem às atividades de algumas poucas enzimas, geralmente hidrolases, e respiração basal.

A atividade enzimática dos solos está associada à atividade celular, células mortas ou resto de células, bem como a fração argila e as substâncias húmicas do solo (BURNS, 1982; TIWARI; TIWARI; MISHRA, 1988). Enzimas como a β -Glucosidase, urease e fosfatase são responsáveis pela hidrólise e ciclagem biogeoquímica dos elementos C, N e P, de forma que a atividade microbiana no solo bem como a mineralização e decomposição da MO podem ser analisadas via atividade destas enzimas (BARDGETT et al., 2005; TAYLOR et al., 2002; USHIO; KITAYAMA; BALSER, 2010).

A produção de enzimas depende do balanço entre disponibilidade do nutriente e gasto de energia dos microrganismos decompositores para adquiri-lo. Quando os nutrientes são abundantes, mais energia é investida na produção de exoenzimas, que disponibilizam nutrientes via decomposição e sustentam o crescimento microbiano. Quando há uma baixa disponibilidade de nutrientes, os microrganismos investem pouco carbono na produção de exoenzimas, direcionando mais energia para a manutenção celular (SCHIMMEL; WEINTRAUB, 2003).

Sendo uma das tipologias vegetais presentes no domínio Atlântico, as Florestas Ombrófilas Densas de altitude são importantes ecossistemas responsáveis por diversos serviços ambientais. A capacidade de absorver e estocar carbono no solo e na biomassa das árvores nessas florestas está relacionada a própria relação da vegetação com o solo e com a atividade dos microrganismos e a disponibilização de nutriente do solo. Dessa forma, com intuito de elucidar alguns pontos relativos a atividade microbiológica nos solos do Parque Nacional do Caparaó, tem por objetivos investigar a atividade microbiana e relacioná-la com a formação de matéria orgânica a ciclagem de carbono orgânico (C_{org}) e nitrogênio total (NT) dos solos em função da sazonalidade anual e da variação altitudinal.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição e a caracterização da área e das parcelas encontram-se no tópico “ÁREA DE ESTUDO”, desse documento. Estão instaladas na área de estudo sete unidades amostrais com dimensões de 20x50m distribuídas em duas vertentes do Ribeirão Santa Marta em diferentes altitudes (Tabela 27).

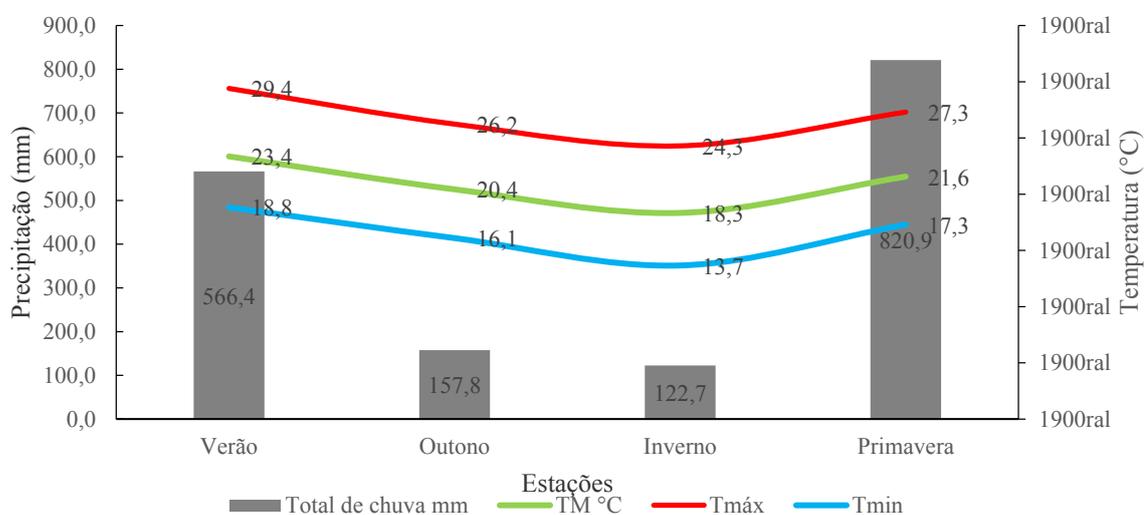
Tabela 27 – Distribuição altitudinal, declividade, posição topográfica e face de exposição das parcelas implantadas na Floresta Ombrófila Densa no Parque Nacional do Caparaó.

Parcela	Altitude (m)	Declividade média (%)	Declividade média (°)	Posição no relevo	Face de exposição
P1	1.112	69,55	34,82	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste/Leste
P2	1.219	58,29	30,24	Terço inferior - ombro de encosta côncava	Leste/Sudeste
P3	1.302	75	36,87	Terço inferior - médio de encosta côncava	Nordeste
P4	1.319	75	36,87	ombro de encosta de côncavo-convexa	Leste
P5	1.391	48,24	25,75	meio de encosta/ transporte de massa	Norte
P6	1.420	73,39	36,27	meio de encosta convexo-côncavas	Sul/Sudeste
P7	1.550	58	30,11	ombro de encostas convexas	Nordeste

Fonte: O autor;

A caracterização climática, precipitação e temperaturas, são apresentada no tópico Área de Estudo, anterior aos capítulos desta publicação. Com bases nesses dados, foram quantificados os dados sazonais para precipitação acumulada por estação para 2016, e temperatura (média, máxima e mínima) entre 2013 e 2016 (Figura 16).

Figura 16 – Variação sazonal da precipitação e da temperatura do ar (média, máxima, mínima) para a região da área de estudo.



FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA); INCAPER.

2.1 ATIVIDADE MICROBIANA E ENZIMÁTICA NO SOLO

As análises microbiológicas do solo bem como as análises da atividade enzimáticas foram realizadas na camada superficial dos solos referentes aos perfis descritos no Capítulo 1 deste documento. As amostras foram coletadas na camada 0-10 cm de profundidade em quatro estações sendo, verão/2016, outono/2016, inverno/2016 e primavera/2016 nas sete parcelas experimentais. Foram coletadas oito amostras simples por parcela, homogeneizadas e extraídas três amostras por parcela. Todavia, a parcelas P2, por possuir 2 perfis e duas condições distintas teve seis amostras compostas, sendo três P2.A e três P2.B, referente às condições de declividade de cada tipo de solo,

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES). Posteriormente as amostras foram passadas em peneira com malha de 2 mm e armazenadas em sacos plásticos em geladeira a 4°C até o momento das análises. Uma porcentagem do material proveniente de cada amostra foi destorroada e seca ao ar para aquisição da terra fina seca ao ar (TFSA) para as análises dos teores de carbono orgânico total do solo (C_{org}), nitrogênio total do solo (NT) e nitrogênio mineralizável (N-min) do solo.

2.2.1 Biomassa microbiana

O carbono da biomassa microbiana (CBM) e o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foram determinados pelo método de irradiação-extração proposto por Islam e Weil (1998), onde a morte dos microrganismos e liberação do conteúdo celular é feita em um forno de micro-ondas e a extração do CBM e do NBM foi realizada com solução de K_2SO_4 0,5 mol L. Posteriormente a extração, a determinação do CBM extraído foi via oxidação úmida com solução de $K_2Cr_2O_7$ 0,066 mol L⁻¹ e titulação com sulfato de ferroso amoniacal 0,03 mol L⁻¹, e o NBM foi determinado por digestão sulfúrica, seguida por destilação Kjeldahl e titulação com HCl 0,005 mol L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995). Para cada amostra de solo de

aproximadamente 10 g de solo foi levada a estufa a 105°C por 24 horas para determinação da umidade residual da amostra.

2.2.2 Atividade enzimática

2.2.2.1 Urease

A atividade da enzima Urease foi determinada pelo método proposto por Tabatabai e Bremner (1972). Foram adicionados 5 g de solo em frasco volumétrico e adicionados 200 µL de Tolueno, 4,0 mL de solução de THAM pH 9 e 1,0 mL da solução de ureia 0,2 M (exceto no controle). Após a vedação dos recipientes, os mesmos foram incubados a 37 °C por duas horas. Após a incubação foram adicionados 35 mL de solução de KCl–Ag₂SO₄ resfriada. No controle também foi adicionado 1,0 mL da solução de ureia 0,2 M misturando por alguns segundos, sendo o volume ajustado para 50 mL com adição de KCl–Ag₂SO₄, com nova agitação para uniformização.

A determinação do N-NH₄⁺ da suspensão foi feita por meio da pipetagem de 20 mL da suspensão em frasco de destilação de 100 mL, e posterior destilação a vapor, com 0,2 g de MgO por 4 min, e titulação com solução de H₂SO₄ 0,0025 mol L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995). A atividade enzimática da N-NH₄⁺ foi expressa em µg N-NH₄⁺ 2h⁻¹ g⁻¹.

2.2.2.2 Fosfatase

Atividade da fosfatase ácida foi determinada pelo método proposto por Tabatabai e Bremner (1969). A análise foi realizada utilizando o p-nitrofenil fosfato 0,05 mol L⁻¹ (PNF 0,05 mol L⁻¹) como substrato. Foi pesada 1,0 g de solo e deposita em tubo de 50 mL, sendo adicionados 200 µL de tolueno, 4,0 mL de solução de MUB pH 6,5 e 1,0 mL de PNF 0,5 mol L⁻¹ (exceto no controle). Após a vedação dos recipientes com o solo e as soluções, os mesmos foram incubados a 37 °C por uma hora. Após a incubação foi adicionado 1,0 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹, 4,0 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ e 1,0 mL de PNF 0,05 mol L⁻¹, (somente no controle), prosseguindo-se com a filtragem em filtros quantitativos de filtragem lenta. A intensidade da coloração

do filtrado foi determinada em espectrofotômetro a 410 nm, e a quantidade de p-nitrofenol formada em cada amostra foi determinada com base em concentrações conhecidas geradas por uma curva padrão.

A atividade enzimática da fosfatase do solo foi expressa em μg de p-nitrofenol liberado por hora por grama de solo ($\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$)

2.2.2.3 β -glucosidase

A atividade da β -glucosidase foi determinada por meio da metodologia proposta por Eivazi e Tabatabai (1988). Foi depositado 1 g de solo em tubos de 50 mL, sendo adicionados 250 μL de Tolueno, 4,0 mL de solução de MUB pH 6 e 1,0 mL de p-nitrofenil- β -D-Glucopyranosídeo 0,5 mol L⁻¹ (PNG, exceto o controle). Após a vedação dos recipientes com o solo e as soluções, os mesmos foram incubados a 37 °C por uma hora. Posteriormente a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹, 4,0 mL de 0,5 mol L⁻¹ Tris-Hydroxymetyl-Amino-Metano (THAM a pH 12) e 1,0 mL de PNF 0,05 mol L⁻¹, (somente no controle), procedeu-se com a filtragem em filtro quantitativo de filtragem lenta.

A intensidade da coloração do filtrado foi determinada em espectrofotômetro a 410 nm, e a quantidade de p-nitrofenol formada em cada amostra foi determinada com base em concentrações conhecidas. A atividade enzimática foi expressa em μg de p-nitrofenol liberado por hora por grama de solo ($\mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$).

2.2.3 Nitrogênio mineralizável

O nitrogênio mineralizável foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Keeney e Nelson (1982), sendo a amostra de solo incubada anaerobicamente. As amostras de solo foram pesadas e trituradas em almofariz e posteriormente foram passadas em peneira de malha 0,210 mm. As amostras foram depositadas em tubos de centrifuga tipo falcon foi adicionado 12,5 de água deionizada por tubo. O tubo foi levado a incubadora vedado a 40 °C e mantido por sete dias.

Após o período de incubação, o conteúdo foi transferido para frascos de destilação de 150 ml, com a lavagem do tubo falcon para extração de todo o conteúdo com 13,5 de solução de KCl 1 mol L^{-1} . O conteúdo foi levado à destilação na presença de MgO em meio alcalino. O NH_4^+ foi determinado pela titulação com solução de ácido bórico e titulado com solução de H_2SO_4 $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$. Para cada amostra foi feita a destilação sem a realização da incubação e os teores de NH_4^+ foram calculados pela expressão:

:

$$NH_4^+ = \frac{(V_a - V_b)M14}{M_s} \quad (8)$$

em que:

NH_4^+ : teor de amônio (mg kg^{-1})

V_a : volume de H_2SO_4 gasto na titulação da amostra (L);

V_b : volume de H_2SO_4 gasto na titulação do branco (L);

M : concentração de H_2SO_4 (m mol L^{-1});

14: massa de nitrogênio (mg mmol^{-1}); e,

M_s : massa da amostra de agregados de solo (kg).

A diferença entre os teores de NH_4^+ das amostras de agregados incubadas e as não incubadas resulta no Nitrogênio mineralizável (N-min).

2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente a observação das variações sazonais dos atributos microbiológicos dos solos foi feita por meio de estatística descritiva com (médias, desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo e mínimo). No intuito de identificar quais atributos biológicos que melhor explicam os teores de carbono e nitrogênio nos solos estudados, optou-se por fazer a análise dos dados por estação do ano. Inicialmente foi realizada análise exploratória dos dados, sendo os mesmos

submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e como não tinham normalidade em sua totalidade ($p > 0,05$), foram realizadas as correlações de Spearman entres as variáveis: N-mineralizável, da atividade enzimática da Fosfatase Ácida (Fosf. A.), β -Glucosidasae (Beta) e Urease e da biomassa microbiana (CBM e NBM).

Após o pré-tratamento dos dados, prosseguiu-se com uma análise de Regressão Múltipla Linear Stepwise para verificar quais variáveis podem ser combinadas para explicar a variação altitudinal dos teores de C_{org} e de NT dos solos. Inicialmente o modelo é testado apenas para o intercepto e as variáveis são adicionadas uma a uma, pela maior correlação entre a variável dependente e a independente. Por meio da estatística F a significância da variável independente é testada, e quando significativa a mesma é inserida no modelo. Posteriormente foi realizado o teste de colinearidade entre variáveis inseridas no modelo com o Variance Inflation Factor (BLANCHET; LEGENDRE; BORCARD, 2008), sendo retirada a variável que apresentar $VIF < 10$. O procedimento é repetido até que todas as variáveis sejam testadas. As análises utilizadas foram realizadas em ambiente R (GOTELLI; ELLISON, 2011).

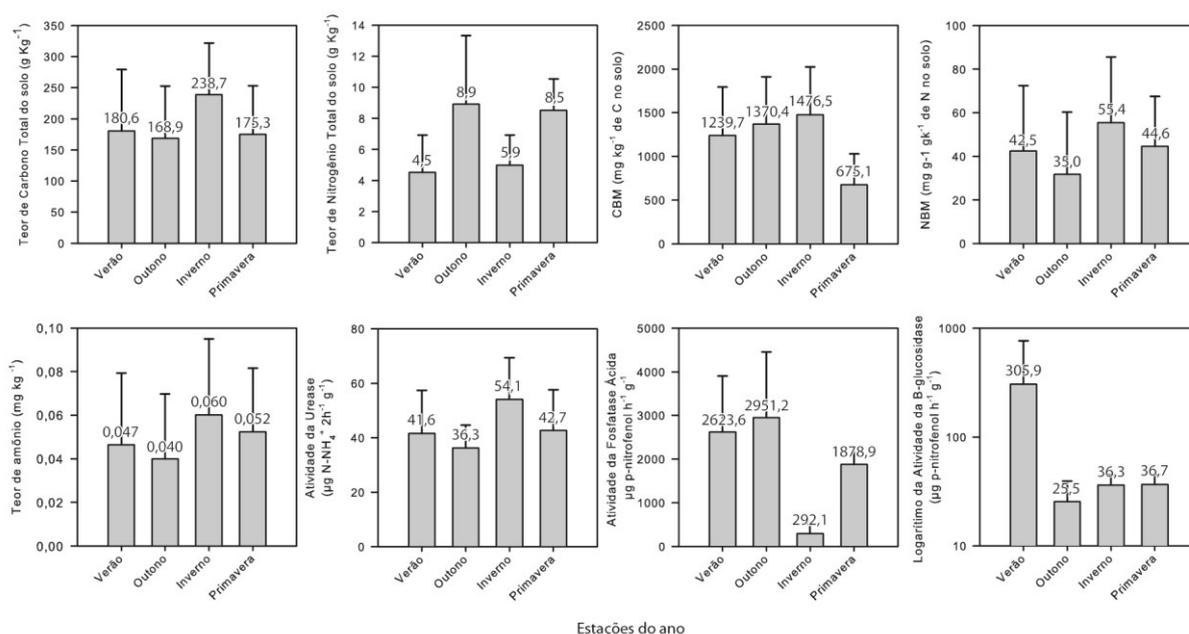
3 RESULTADOS

3.1 SAZONALIDADE DA ATIVIDADE BIOLÓGICA

Os teores de carbono (C_{org}) observados para a camada superficial do solo foram mais elevados durante o inverno, assim como o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) e o nitrogênio mineralizável (N-min). Em contrapartida, o teor total de nitrogênio (NT) foi mais elevado durante o outono e a primavera (Tabela 28 e Figura 17).

A atividade das três enzimas estudadas apresentou comportamento diferente entre estações. A urease teve valores semelhantes entre a maioria das estações, mas possuiu um pico pronunciado no inverno ($54,1 \mu\text{g N-NH}_4^+ 2\text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$) (Figura 17: F). A atividade da fosfatase ácida (Fosf. A.) foi menor inverno ($291,1 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$) em relação às demais estações, com valores 10 vezes menor nessa estação em relação ao outono ($2951,2 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$) (Figura 17: G). A β – glucosidase (βG) teve sua maior atividade no verão ($306,9 \mu\text{g p-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$), com valores muito superiores em relação às demais estações (Figura 17: H).

Figura 17 – Sazonalidade média da atividade biológica no solo para a camada superficial do solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES. (A) Carbono total do solo; (B) Nitrogênio Total do solo; (C) Carbono da Biomassa Microbiano; (D) Nitrogênio da Biomassa Microbiana; (E) Nitrogênio mineralizável; (F) Atividade da Urease; (G) Atividade da Fosfatase Ácida; (H) Atividade da β – glucosidase; Barras verticais = desvio padrão.



FONTE: O autor.

Quando observados os valores médios para os atributos biológicos estudados, todos tiveram coeficiente de variação superiores a 20%. A maior dispersão dos dados em relação à média para os teores de C_{org}, NT e a atividade de β G e Urease foram observadas durante o verão, para N-min e NBM foram observadas durante o outono, para a Fosf. A. foi durante o inverno e para o CBM durante a primavera. Em relação a todos os atributos em ambas as estações, a menor variação dos dados foi para a atividade da Fosf. A. na primavera (21%), e o maior para a β G de durante o verão (150%) (Tabela 28).

Tabela 28 – Coeficiente de Variação (CV%) para os atributos biológicos da camada superficial dos solos sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Estação	C _{org}	NT	N-min	Fosf. A.	β Go	Urease	CBM	NBM
Verão	55%	53%	71%	49%	150%	38%	45%	70%
Outono	50%	49%	75%	51%	55%	23%	40%	90%
Inverno	35%	39%	58%	76%	23%	28%	37%	54%
Primavera	44%	23%	56%	21%	23%	35%	52%	51%

Em relação à distribuição nas parcelas e em relação a variação altitudinal, os maiores teores de C_{org} e NT, maior atividade da Fosf. A e maior biomassa microbiana (CBM e NBM) foram observados na parcela P7 (1550 m de altitude). O maior teor de N-min foi observado para a parcela P6 (1420 m de altitude). A maior atividade da β G foi observada na parcela P1 (1112 m de altitude) e a maior atividade da urease na parcela P3 (1302 m de altitude) (Tabela 29).

No extremo oposto, o menor teor de C_{org} e a menor atividade de β G e urease foram observados para a parcela P1. O menor teor de NT e menor atividade da Fosf. A. foram observados a parcela P3. O menor teor de CBM foi observado no trecho da parcela P2 referente ao perfil P2.B (1224 m de altitude), e o menor teor de NBM foi observado na parcela P5 (1391 m de altitude). Nos solos das parcelas P1 e P4 não foram detectados teores de N-min (Tabela 29).

Em relação a variação dos dados para as parcelas (CV%), a maior variação do teor de C_{org} (33,25%), e da atividade β G (171,48%) e urease (42,40%) foi observada para a parcela P1. A maior variação observada para o teor de NT (46,6%) foi para a parcela P5, e para o teor de N-min (53,21%) na parcela P4. A maior variação observada para a atividade da Fosf.A (79,18%) na parcela P7. Para a biomassa microbiana, CBM teve maior variação (53,96%) para o trecho da parcela referente ao perfil P2.B, e NBM teve maior variação (62,05%) na parcela P4.

Tabela 29 – Análise descritiva dos atributos biológicos dos solos em função da variação altitudinal dos solos sob Floresta Ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Parcela / Altitude		C _{org}	NT	N-min	Fósf. A.	βG	Urease	CBM	NBM
		g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	μg p-nitrofenol h ⁻¹ g ⁻¹	h ⁻¹ g ⁻¹	μg N-NH ₄ ⁺ 2h ⁻¹ g ⁻¹	μg C g ⁻¹ solo	μg N g ⁻¹ solo
Perfil 1 / 1.112 m	média	128,9	5,1	0,0	1151,8	381,9	32,6	870,4	33,4
	máximo	196,7	9,4	0,0	1889,6	1655,1	49,7	1610,0	58,9
	mínimo	76,6	2,9	0,0	76,2	2,6	6,3	206,4	14,7
	Desv. Pad.	42,87	2,14	0,01	572,57	654,81	13,8	435,04	14,21
	Cv%	33,25	42,27	37,66	49,71	171,48	42,40	49,98	42,52
Perfil 2.A/ 1219 m	média	134,4	5,6	0,1	1750,2	74,4	42,7	904,1	32,0
	máximo	182,6	8,4	0,1	2916,3	316,3	56,7	1300,0	44,4
	mínimo	108,1	3,5	0,0	176,2	11,3	28,0	269,0	26,6
	Desv. Pad.	24,47	2,05	0,01	969,34	93,33	9,63	283,99	13,01
	Cv%	18,21	36,61	16,79	55,38	125,51	22,55	31,41	40,71
Perfil 2.B 1224 m	média	116,1	4,6	0,1	1365,9	25,8	37,6	777,1	24,0
	máximo	148,9	6,9	0,1	2186,2	33,5	43,4	1603,3	38,1
	mínimo	94,1	2,3	0,0	60,3	16,6	30,8	173,7	4,8
	Desv. Pad.	19,52	2,04	0	754	5,6	3,93	419,37	9,17
	Cv%	16,82	44,96	9,86	55,20	21,75	10,44	53,96	38,29
Perfil 3/ 1.302 m	média	126,9	5,4	0,0	1380,8	44,0	65,2	1155,5	43,4
	máximo	182,6	9,3	0,1	2348,8	241,6	96,6	1686,1	60,3
	mínimo	102,5	1,8	0,0	7,9	13,6	39,9	556,6	35,0
	Desv. Pad.	26,89	2,7	0,01	865,02	63,05	18,31	393,16	16,12
	Cv%	21,18	50,34	25,54	62,65	143,46	28,08	34,03	37,11
Perfil 4/ 1.319 m	média	200,21	6,69	0,02	2892,55	53,25	35,88	1290,8	39,71
	máximo	266,9	10,3	0,0	5865,9	144,6	60,2	1906,7	74,7
	mínimo	145,4	2,6	0,0	290,5	31,1	18,2	294,9	2,3
	Desv. Pad.	43,99	2,86	0,01	2052,75	34,4	11,48	501,6	24,64
	Cv%	21,97	42,80	53,21	70,97	64,61	32,00	38,86	62,05
Perfil 5/ 1.391 m	média	178,9	7,6	0,0	2215,4	85,7	50,6	1124,5	36,3
	máximo	264,1	12,7	0,0	3936,6	338,0	70,0	1891,8	87,5
	mínimo	145,4	3,7	0,0	601,6	39,7	34,3	468,8	2,0
	Desv. Pad.	46,2	3,5	0,0	1192,0	85,5	10,9	513,1	20,5
	Cv%	25,8	46,6	34,9	53,8	99,8	21,5	45,6	56,5
Perfil 6/ 1.420 m	média	281,1	8,4	0,1	2092,4	66,1	40,2	1370,4	57,9
	máximo	331,5	13,2	0,1	4216,0	176,8	70,0	2152,0	102,3
	mínimo	219,4	6,3	0,0	198,4	20,2	18,9	681,5	4,3
	Desv. Pad.	36,0	2,3	0,0	1465,0	63,7	14,5	446,4	34,6
	Cv%	12,8	27,2	42,2	70,0	96,4	35,9	32,6	59,8
Perfil 7/ 1550m	média	360	11	0	2643	78	45	2031	89
	máximo	416	20	0	5955	233	60	2762	125
	mínimo	309	7	0	103	24	27	733	26
	Desv. Pad.	3730,0	497,0	2,0	209235,0	7288,0	906,0	67283,0	2916,0
	Cv%	10,4	46,4	17,4	79,2	93,7	20,3	33,1	32,7

Com exceção da primavera, a relação C:N do solo não variou entre as parcelas. Contudo, para os perfis de P1 a P5 no verão e no inverno valores são superiores as outras duas estações. Para os perfis P6 e P7, apenas o outono teve baixos valores da relação C:N. A relação CBM:C é crescente no período do verão e no outono até o perfil 3 e depois passa a decrescer com o aumento da altitude. A relação NBM:N segue o mesmo padrão da relação C:N do solo, com maiores valores no verão e inverno para a maioria dos perfis. Os perfis P6 e P7 também tiveram elevada relação na primavera (Tabela 30).

Tabela 30 – Relação C:N, Relação CBM:C, Relação NBM:NT relativas à camada superficial de oitos perfis de solos em diferentes posições da paisagem no Parque Nacional do Caparaó.

Estação	Perfil							
	P1	P2.A	P2.B	P3	P4	P5	P6	P7
	C:N							
Verão	38,74	35,47	43,84	34,47	46,19	39,68	38,76	41,97
Outono	18,26	18,11	17,70	17,14	23,10	17,99	19,62	18,53
Inverno	42,71	45,93	52,21	59,36	51,54	48,39	44,39	46,74
Primavera	15,15	13,87	15,15	13,14	19,51	12,35	41,02	47,38
	CBM:C							
Verão	0,07	0,08	0,05	0,14	0,09	0,08	0,05	0,06
Outono	0,08	0,08	0,11	0,13	0,10	0,09	0,05	0,06
Inverno	0,08	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,06	0,07
Primavera	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04
	NBM:N							
Verão	0,12	0,07	0,06	0,17	0,03	0,09	0,10	0,10
Outono	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03	0,01	0,04
Inverno	0,09	0,08	0,09	0,15	0,12	0,10	0,11	0,13
Primavera	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,10	0,12

Os teores de C_{org} da camada superficial do solo se correlacionaram negativamente com o conteúdo de fósforo aportado e acumulado sobre o solo ($\rho - 0,75$), e a relação Lignina+celulose:N da serapilheira acumulada sobre o solo ($\rho 0,75$). Em relação ao teor de nitrogênio total (NT) dos solos, ele se correlacionou negativamente com o conteúdo de N ($\rho -0,75$ e $\rho -0,75$), P ($\rho -0,82$ e $\rho -0,82$) e lignina ($\rho -0,75$ e $\rho -0,75$) aportado pela serapilheira e acumulado sobre os solos respectivamente. Também foram observadas correlações positivas entre o NT e a relação C:N do material aportado e acumulado ($\rho 0,79$ e $\rho 0,79$, respectivamente). Além disso, também correlacionou positivamente com a relação Lignina+celulose:N da serapilheira acumulada sobre o solo ($\rho 0,75$) (Tabela 31).

Tabela 31 – Coeficiente de Correlação de Spearman entre a atividade microbiana da camada superficial dos solos e as características químicas da serapilheira aportada e acumulada sob o solo nas parcelas Parque Nacional do Caparaó, ES.

	Deposição de serapilheira							
	Corg	NT	N-min	Fosf. A.	β G	Urease	CBM	NBM
Biomassa	-0,64	-0,68	-0,64	-0,75	0,32	-0,04	-0,75	-0,64
C	-0,46	-0,54	-0,61	-0,71	0,39	0,00	-0,57	-0,46
N	-0,68	-0,75	-0,79	-0,64	0,29	-0,11	-0,79	-0,71
P	-0,75	-0,82	-0,43	-0,96	-0,07	-0,18	-0,68	-0,54
C:N	0,30	0,79	0,61	0,39	0,11	0,79	0,43	0,50
Fenóis	0,29	-0,04	-0,50	-0,04	0,89	-0,46	-0,11	-0,21
Lignina	-0,68	-0,75	-0,79	-0,64	0,29	-0,11	-0,79	-0,71
Celulose	-0,64	-0,68	-0,64	-0,75	0,32	-0,04	-0,75	-0,64
Lig:N	0,25	0,39	0,43	0,68	-0,43	0,18	0,39	0,32
Lig+Cel:N	-0,21	0,21	0,71	0,07	-0,50	0,54	-0,04	0,07
	Acúmulo de serapilheira							
	Corg	NT	N-min	Fosf. A.	β G	Urease	CBM	NBM
Biomassa	-0,32	-0,39	-0,86	0,04	0,21	-0,11	-0,46	-0,54
C	-0,46	-0,54	-0,71	0,18	0,43	-0,32	-0,32	-0,46
N	-0,68	-0,75	-0,79	-0,64	0,29	-0,11	-0,79	-0,71
P	-0,75	-0,82	-0,61	-0,71	0,39	0,00	-0,57	-0,46
C:N	0,61	0,79	0,32	0,86	0,21	0,36	0,46	0,36
Fenóis	0,29	-0,04	-0,07	0,18	0,82	-0,07	0,14	0,07
Lignina	-0,68	-0,75	-0,68	0,36	0,39	-0,57	-0,32	-0,54
Celulose	-0,64	-0,68	-0,36	0,43	0,43	-0,61	0,29	0,07
Lig:N	0,68	0,71	0,25	1,00	0,00	0,07	0,61	0,43
Lig+Cel:N	0,75	0,75	0,36	0,96	-0,07	0,00	0,71	0,54

*Valores em negrito: correlação significativa ($p < 0,05$)

A atividade da Fosf. A. se correlacionou negativamente com o teor de P e de celulose da serapilheira, a β G se correlacionou positivamente com os teores de fenóis, e a urease se correlacionou positivamente com a relação C:N do material aportado nas parcelas (Tabela 31).

O teor de N-min na camada superficial do solo se correlacionou positivamente com a relação C:N do material aportado, e negativamente com o Teor de N e de lignina da serapilheira aportada. Em contrapartida, no material sobre o solo, o teor de N-min se correlacionou negativamente com o acúmulo de biomassa sobre o solo e teor de N acumulado sobre o solo (Tabela 31).

O CBM correlacionou-se negativamente com o total de biomassa aportada e os conteúdos de N, lignina e celulose desse material. Em relação a serapilheira acumulada sobre o solo, o CBM se correlacionou negativamente com o conteúdo de N do material vegetal. NBM não se correlacionou com nenhuma das variáveis relativas ao tecido vegetal, tanto aportado quando acumulado.

3.2 CARBONO E NITROGÊNIO TOTAL

Durante o verão e inverno, tanto para os teores de C_{org} quando os teores de NT os coeficientes de ajustamento foram superiores a 0,8, sendo os modelos bem descritos pela combinação de N-min, Fosf. A. e NBM para o verão, e CBM e NBM para o inverno. Durante o outono o ajuste dos teores de C_{org} e NT foram melhor preditos pelos teores de N-min e βG . Para a primavera, C_{org} foi descrito pela combinação de CBM e NBM, e NT foi ajustado pela interação de N-min, Fosf. A. e βG . Para os teores de NT durante a primavera a regressão também foi significativa com ajustamento com base no teor de N-min e na atividade das enzimas Fosf. A. e βG . (Tabela 32).

Tabela 32 – Resumo dos modelos de Regressão Linear Stepwise para os teores de C_{org} e NT da camada superficial do solo sob floresta ombrófila Densa Montana, no Parque Nacional do Caparaó, ES.

	Verão	Outono	Inverno	Primavera		Verão	Outono	Inverno	Primavera
N-min	***	***	ns	ns	N-min	***	***	ns	***
Fosf. A.	***	ns	ns	ns	Fosf. A.	***	ns	ns	***
βG	ns	***	ns	ns	βG	ns	***	ns	***
Urease	ns	ns	ns	ns	Urease	ns	ns	ns	ns
CBM	ns	ns	***	***	CBM	ns	ns	***	ns
NBM	***	ns	***	***	NBM	***	ns	***	ns
α	0,250	4,770	53,823	37,256	α	0,238	-0,144	0,627	3,495
R_2	0,937	0,796	0,899	0,849	R_2	0,946	0,858	0,901	0,811
R_{2ajust}	0,878	0,634	0,808	0,721	R_{2ajust}	0,895	0,737	0,812	0,658
β_1	1064,377	1923,359	0,0866	0,0851	β_1	45,694	99,185	0,00208	-31,919
β_2	0,0313	3,426	1,027	1,806	β_2	0,028	0,144	0,0231	0,0016
β_3	1,145				β_3		0,0411		0,101

4 DISCUSSÃO

4.1 ATIVIDADE BIOLÓGICA DO SOLO

A atividade das três enzimas Urease, Fosf. A. e β -G (Figura 17), corroboraram a hipótese de que há mudanças na qualidade da MO que entra no sistema e conseqüentemente sua ciclagem. Além da redução da β G do verão para o outono, Urease teve maior atividade no inverno indicando uma demanda por N. Em contrapartida Fosf. A. reduziu na mesma estação, indicando a mudança na alocação de recursos da comunidade microbiana no tipo de enzima produzida (WEINTRAUB et al., 2012). Assim como proposto por Schimel e Weintraub (2003) e demonstrado em seus modelos teóricos, a complexidade de ambientes naturais e da distribuição temporal e espacial do carbono e no caso deste trabalho do nitrogênio, pode em parte ser explicada pela atividade biológica do solo.

A combinação dos atributos biológicos se mostrou efetiva para estimar os teores C_{org} e NT com boa precisão tanto para verão quanto para o inverno. Assim como regressão demonstrou, o CBM e o NBM foram os atributos que na maioria das estações se mostraram diretamente relacionados com os teores de C_{org} e NT (Tabela 32, Apêndice 10). As correções negativas do CBM com a biomassa aportada e as quantidades de lignina e celulose, indicando que menor crescimento microbiano foi observado onde maior quantidade de substrato recalcitrante é aportado (Tabela 31). Esses resultados são um indicativo de que o crescimento da biomassa microbiana (CBM e NBM) é limitada pela distribuição e disponibilidade do carbono orgânico principalmente as fontes solúveis, que são prontamente utilizados. Desse modo, o maior desenvolvimento da biomassa microbiana está relacionado a maior disponibilidade de constituintes solúveis. Parte destes compostos são relativos a deposição de sistemas radiculares abundantes, com grande quantidade de raízes finas, principalmente nas camadas superficiais, decrescendo com a profundidade (CARNEIRO et al., 2008; CHEN; CHIU, 2000), e parte tem origem na deposição de serapilheira.

Os valores no outono das relações C:N e NBM:N, e o da relação CBM:C (Tabela 30), pode ser um indicativo de que há mudanças na alocação de recurso disponíveis para comunidade microbiológica do solo, tanto em função da variação estacional quando altitudinal. Isso ocorre porque a diferença na qualidade da

serapilheira pode provocar mudanças na composição e na atividade da comunidade microbiológica (USHIO; KITAYAMA; BALSER, 2010).

A própria variação microclimática pode provocar estresse fisiológico, e a comunidade microbiológica tende a consumir mais substrato para manter os níveis adequados para sua sobrevivência (CARNEIRO et al., 2008; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Estudando a camada superficial de solos em ambiente subalpino e alpino, Margesin et al. (2009) observam que o acréscimo da altitude modifica a comunidade microbiana nos solos, com aumentos de bactérias Gram-negativas e de fungos. Outros autores observaram que não há somente alterações na composição da comunidade microbiológica, mas também no substrato utilizado como fonte de energia que se tornou mais recalcitrante com o incremento de altitude (XU et al., 2014). Assim, geralmente as formas mais lábeis relativas ao carbono solúvel dominam em áreas mais baixas, sendo a principal fonte de substrato para a comunidade microbiana, e gradativamente vai sendo substituído por formas mais recalcitrantes e mais humificadas com a altitude (BARDGETT et al., 2005; VAN DER HEIJDEN; BARDGETT; VAN STRAALLEN, 2008).

Contraopondo estes estudos, a maior biomassa microbiana foi observada nos solos de maior altitude (Tabela 29). Sua relação negativa com os teores de lignina e celulose (Tabela 31), indica que onde os horizontes orgânicos apresentam camadas mais espessas com material ainda em estágio inicial de decomposição. Eles têm menor quantidade de lignina e celulose sendo assim menos recalcitrante que de áreas mais baixas. Uma possível explicação para formas mais lábeis em altitude, seria o próprio o carbono da biomassa microbiana, o carbono solúvel e os ácidos húmicos como fontes de C, que são mais relacionados aos horizontes hísticos superficiais (CHEN; CHIU, 2000).

Uma vez que se supõe a mudança da comunidade microbiana ao longo do gradiente, como observado em outros trabalhos (MARGESIN et al., 2009; XU et al., 2014), pode-se supor também que a diversidade de plantas pode produzir variados metabólitos secundários recalcitrantes, Esses metabólitos podem reduzir o processo de decomposição, uma vez que além da recalcitrância natural desses compostos há também formação de novos compostos no solo e a inibição da atividade microbiana (OSTERTAG et al., 2008; TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998). Dentre os metabólitos secundários, as substâncias fenólicas podem reduzir tanto a decomposição quanto o crescimento de plantas e microrganismos decompositores (GE et al., 2013; TANNER; VITOUSEK; CUEVAS, 1998).

Entretanto, a elevada correção entre a βG e o teor de fenóis totais (0,89), é um indicativo que esses compostos secundários favorecem a atividade desta enzima principalmente durante o outono, quando esta enzima foi uma das variáveis explicativas dos teores de C_{org} e NT dos solos.

É provável que uma diversidade de microrganismos seja responsável pela decomposição de diferentes constituintes da serapilheira (LI et al., 2018; SILES et al., 2017) em ecossistemas oligotróficos como este (Tabela 9, Cap.1). Isto indica que a diversidade microbiana causa maior impacto na produtividade em locais com menor disponibilidade de nutrientes (VAN DER HEIJDEN; BARDGETT; VAN STRAALLEN, 2008). Durante a decomposição, a biomassa microbiana imobiliza nutrientes reduzindo sua disponibilidade temporariamente para promover o crescimento microbiano. Porém, o processo de senescência a própria biomassa microbiana se torna uma fonte lábil de nutrientes para a vegetação, evitando assim, a perda dos nutrientes do sistema por lixiviação (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010).

O menor ajustamento dos teores de C_{org} durante o outono e para NT durante a primavera, pode estar relacionado a alternância entre ciclos de absorção e disponibilização de nutrientes. Dessa forma, a relação entre a vegetação e a comunidade microbiológica do solo também pode ser observada em uma escala sazonal, e envolve diversos mecanismos para o fornecimento de nutrientes para ambos durante a estação de crescimento (BARDGETT et al., 2005).

Durante o verão e o inverno existiu um acréscimo na relação C:N do solo bem como na relação NBM:N em oposição ao outono e a primavera (Tabela 30), o que pode indicar um padrão sazonal de imobilização de N pela biomassa microbiana (BARDGETT et al., 2005). A correlação negativa entre o CBM e o conteúdo de N aportado indica que o máximo de imobilização de N (maior NBM:N) ocorre na estação do verão, quando ocorre o maior aporte de biomassa de serapilheira, e no inverno quando o ambiente fica mais limitado por esse nutriente observado na maior relação C:N (Tabela 30). Segundo Bardgett et al. (2005), em ambientes onde há demanda por N, essa relação pode ser explicada pela competição entre vegetação e microrganismos durante a estação de crescimento (verão). Como há redução no aporte de biomassa durante o inverno (Figura 9, Capítulo 2), menor será a quantidade de formas mais solúveis de N, como aminoácidos.

Assim como observado por Xu et al. (2014), os valores de CBM:C durante o verão (Tabela 31), indicam uma relação de crescimento da comunidade microbiana

sazonal, acompanhando o desenvolvimento da vegetação, que na área de estudos ocorre o período chuvoso, como observado por Castro (2014) e maior biomassa aportada para o verão e a primavera neste estudo (Figura 9, Capítulo 2). Durante a estação de crescimento, a vegetação fornece reservas abundantes de carbono lábio via exsudação das raízes (XU et al., 2014). Esse carbono é consumido principalmente para a produção de exoenzimas, e como feedback, a atividade biológica produz uma diversidade de formas de N, incluindo formas inorgânicas, favorecendo a adsorção pela vegetação (SCHIMEL; WEINTRAUB, 2003; VAN DER HEIJDEN; BARDGETT; VAN STRAALLEN, 2008).

Por outro lado, os maiores valores da relação CBM:C no outono pode estar relacionada a estrutura da comunidade, como observado por Bardgett et al. (2005) em ambientes alpinos, segundo estes autores, no verão, a estrutura da comunidade é composta principalmente por bactérias, que utilizam principalmente fontes solúveis de carbono. No outono essa comunidade começa a ser substituída, e no inverno as fontes de carbono tornam-se mais complexas e recalcitrantes ricas em fenóis. Durante o inverno a estrutura da comunidade é constituída principalmente por fungos (BARDGETT et al., 2005). Corroborando com estes autores, foram observados maiores teores de polifenóis e lignina para o outono e o inverno na área de estudo (Tabelas 20 e 21, Capítulo 2). Entretanto, no estudo realizado por Siles et al. (2017) em função de um gradiente altitudinal que variou de Florestas Submontana a Alpinas na Itália, não houve variação na estrutura da comunidade entre a primavera e o outono, mas houve aumento na biomassa microbiana, sendo maior no outono, e em função da menor para a maior altitude.

A maior relação CBM:C no verão e no inverno corroboram com o observado no estudo de Nemergut et al. (2010). Estes autores observam que quando há maior quantidade de biomassa sendo produzida ou quando há uma redução da precipitação, há aumento da biomassa microbiana. Na área de estudo, como mencionado anteriormente os maiores aportes ocorrem no verão, junto com a estação chuvosa e posteriormente, no outono há uma redução significativa da precipitação (Figura 16). Segundo esses autores, há uma mudança nas características químicas do solo, com aumentos no reservatório de N, principalmente NH_4^+ e outras formas solúveis de N e de C, que passa a ter uma maior participação de microrganismos fixadores de N. Corroborando com esses autores, foi observado que durante o outono e o inverno, o maior teor de N do material aportado e acumulado sobre o solo (Tabela 18, Capítulo 2). Associado a isto, o menor teor de

N-min na camada superficial do solo, pode ser em razão da menor lavagem deste nutriente tanto das folhas senescentes quanto depositadas, favorecendo a utilização das formas disponíveis no solo.

Dessa forma, pode se supor que a comunidade na área de estudo interage de forma que a produção e a composição de espécies tanto de vegetais quanto da comunidade microbiana do solo, depende do fluxo de carbono e nitrogênio entres esses grupos. Onde a vegetação é dependente do fornecimento de formas lábeis de N (inorgânicos e aminoácidos) relativos da degradação da MO pelos microrganismos, e por outro lado, a comunidade microbiológica precisa de formas lábeis de carbono fornecidas pela vegetação (BARDGETT et al., 2005; XU et al., 2014)

Além de influenciar a biomassa microbiana, a condição climática da área de estudos com pesadas chuvas durante o verão (Figura 16), pode acarretar na diminuição da atividade das enzimas. Isso ocorre possivelmente pela lavagem de formas solúveis de carbono e de enzimas que estavam livres na solução do solo, complexados pela fração mineral do solo, ou no conteúdo intracelular (TAYLOR et al., 2002; TIWARI; TIWARI; MISHRA, 1988). Em contrapartida, estudos vêm mostrando que a adição de biomassa durante a estação seca, impulsiona a liberação de carbono solúvel no início do período chuvoso (NEMERGUT et al., 2010), aumentando assim a respiração basal do solo e o crescimento microbiano no verão. Essa alternância no crescimento e na atividade da comunidade microbiana dos solos durante as estações, é importante para o controle temporal das fontes de nutrientes transferidas no sistema solo planta (BARDGETT et al., 2005), e de explicar o melhor ajustamento com base na biomassa microbiana para os teores de C_{org} e NT (Tabela 32).

Segundo Kaschuk, Alberton e Hungria (2010), o aumento dos teores de N microbiano indicam uma eficiência na manutenção da fertilização dos solos, pela redução das perdas de N por lixiviação e volatilização. Esse efeito está relacionado ao crescimento microbiano que por um curto período imobiliza nutrientes e por consequência evita sua perda do sistema, sendo para este estudo principalmente durante o verão (Tabela 30). Quando considerados, a limitação de N e a ciclagem das formas lábeis do C_{org} e do NT entre estações (BARDGETT et al., 2005), o ajustamento temporal dos teores ao longo da variação altitudinal fica mais claro.

Em florestas tropicais a interação entre elevados aportes de biomassa e a chuva, causam variações sazonais na respiração microbiana no solo. No começo da

estação chuvosa o aporte de serapilheira abastece o solo com formas de carbono lábeis que eleva respiração do solo pela modificação da comunidade microbiana (NEMERGUT et al., 2010), causando maior requerimento de formas solúveis de carbono e competição com a vegetação por N.

A correlação entre as Fosf.A, β -glucosidade e a biomassa microbiana (CBM e NBM) em ambas as estações explica em grande parte dos valores de carbono no solo. Como observado por Kaschuk, Alberton e Hungria (2010), o aumento da biomassa microbiana (CBM) se combina com a maior atividade de enzimas que fazem a ciclagem de C, N, P e S. Como pode ser observado, a Fosf. A. foi incluída nos modelos tanto para o C_{org} quando para o NT no verão, para o teor de NT também na primavera. Esta enzima teve elevada correlação negativa com as quantidades de P aportadas, e este nutriente se correlacionou negativamente com os teores de C_{org} e NT. Isso indica que menores aportes de fósforo favorece a atividade da enzima, já que esses solos são deficientes em P (Tabela 9, capítulo 1 e Tabela 31). A participação da atividade enzimática no ajuste dos teores de C_{org} e NT corrobora com a afirmação de que a maior atividade da fosfatase é relacionada com a maior atividade microbiológica que pode ser explicado pelo maior número de microrganismos (RAMIREZ-MARTINEZ; MCLAREN, 1966 apud (TIWARI; TIWARI; MISHRA, 1988). Consequentemente a maior relação CBM:C no verão, e de forma inversa, menor atividade da Fosf. A. e menor relação CBM:C no inverno (Figura 17; Tabela 30).

A β -glucosidase foi importante na ciclagem de C_{org} e NT durante o outono e para NT também durante a primavera (Tabela 32). A menor atividade desta enzima associada com a menor relação C:N desta estação no solo (Figura 17; Tabela 30). A menor relação C:N do material aportado e acumulado sobre o solo nessa estação (Tabela 23, Capítulo 2), indicam que há abundância de formas solúveis de C no solo. Consequentemente, não ocorre a decomposição de formas mais complexas de carbono para suprir a demanda por C, e menor atividade desta enzima que atua no processo de decomposição da celulose (MATSUOKA; MENDES; LOUREIRO, 2003).

Uma vez que a comunidade microbiológica responde a alterações no substrato a ser decomposto e as mudanças físicas e químicas do solo, é de se supor que essas alterações também afetem a atividade enzimática no solo (USHIO; KITAYAMA; BALSER, 2010). Segundo Hernández e Hobbie (2010), as enzimas que degradam o C, são estimulados pela presença e ausência do substrato a qual ela é associada. Essa relação ficou evidente quando a atividade média da β -G reduziu do

verão para o outono, juntamente com os valores médios da relação C:N da serapilheira aportada, o que indica que há alteração da qualidade do substrato aportado (RIETL; JACKSON, 2012) que se tornou menos recalcitrante.

Partindo do pressuposto de que a atividade da β G, está fortemente relacionada com abundância das fontes de C que a mesma utiliza como substrato. A presença desta enzima na regressão durante o outono juntamente com o teor de N-min, pode indicar que a pouca atividade desta enzima está associada à maior disponibilidade de fontes de N e fontes lábeis de carbono no solo que favorece a menor relação C:N nesta estação.

A composição da matéria orgânica do solo relativa à variação altitudinal e sazonal observada por Siles et al. (2017) em solos na Itália, indica que polissacarídeos e compostos nitrogenados foram mais abundantes durante a primavera e o outono, enquanto que ácidos graxos foram mais abundantes no outono. Além disso, observaram o acréscimo de ácidos graxos e grupamentos aromáticos com a atitude, e contrapartida, polissacarídeos e compostos nitrogenados decrescem. Assim como observados pelos autores supracitados, as mudanças sazonais e altitudinais da relação C:N (Tabela 30), podem indicar mudanças na composição do material aportado. Corroborando com essa suposição, há maior relação C:N durante o inverno principalmente na fração folhas da serapilheira aportada (Tabela 23, Capítulo 2).

A elevada relação C:N no inverno indica uma maior demanda de N (WEINTRAUB et al., 2012), e corroborando com a maior atividade da Urease nessa estação e menor da Fosf. A. (Figura 17). Weintraub et al., (2012) observou que input de matéria orgânica, muda o investimento enzimático para maior aquisição de N em detrimento a aquisição de P, que segundo estes autores se dá pela maior recalcitrância do material indicado pela maior relação C:N. Como a urease não foi significativa tanto para C_{org} quando NT e com base no relatado por Weintraub et al., (2012), pode se esperar que esse seja um efeito competitivo entre a demanda por N e por P.

Estudando a atividade da Fosf. A. e a ciclagem de C, N e P sob a copa de diferentes espécies leguminosas e não leguminosas, Keller et al. (2013) observam nos solos onde a serapilheira tem elevada relação N:P, maior foi atividade da Fosf. Segundo os autores, esse padrão está associado a baixa disponibilidade de P no solo, com a elevada disponibilidade de N, provido da serapilheira, que propicia a alocação do excesso de N na produção de Fosf. A. Em contrapartida, em

experimento com redução do aporte de biomassa e precipitação, Weintraub et al. (2012) observaram que a remoção da serapilheira aumentou a atividade da Fosf. A. uma vez que a produção da mesma também é estimulada pela baixa disponibilidade de Fósforo inorgânico (Pi). E corroborando com Weintraub et al. (2012), Ushio, Kitayama e Balser, (2010) estudando a vegetação em ambiente montano em Borneo, obtiveram uma correlação negativa entre a atividade da Fosf. A. e os teores de P inorgânico, bem como uma correlação positiva com a presença de fungos do tipo saprófitos. Segundo estes últimos autores, uma vez que esses fungos produzem uma proporção maior dessa enzima que outros microrganismos, uma maior atividade dessa enzima indica que há uma baixa disponibilidade dessa forma de P e uma abundância desses decompositores.

5 CONCLUSÕES

A atividade microbiológica foi caracterizada por uma mudança gradativa ao longo da variação altitudinal. Esta mudança está associada a modificações nas quantidades de compostos recalcitrantes aportados pela biomassa e pela mudança microclimática.

As mudanças na disponibilidade de recursos e a sua alternância entre estações têm o mesmo efeito sobre a atividade microbiana no solo que a observada para a variação altitudinal. Com maiores aportes e formas mais solúveis no verão, e recalcitrância associada durante o inverno. A disponibilidade de N e P controla o crescimento microbiano uma vez que os melhores ajustes dos teores de C_{org} e NT do solo foram relacionadas na atividade da Fosf. A relacionada a baixa disponibilidade de P no aporte vegetal, e a disponibilidade de formas mineralizáveis de N no solo que contribuem para a degradação das quantidades de material recalcitrante aportado.

6 REFERÊNCIAS

- BARDGETT, R. D. et al. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 11, p. 634–641, 2005.
- BIRKELAND, P. W. et al. Integrating soils and geomorphology in mountains - An example from the Front Range of Colorado. **Geomorphology**, v. 55, n. 1–4, p. 329–344, 2003.
- BLANCHET, G.; LEGENDRE, P.; BORCARD, D. Forward selection of spatial explanatory variables. **Ecology**, v. 89, n. 9, p. 2623–2632, 2008.
- BURNS, R. G. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, n. 5, p. 423–427, jan. 1982.
- CARNEIRO, M. A. C. et al. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronosseqüências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 621–632, abr. 2008.
- CASTRO, K. C. **Serapilheira e estoque de carbono ao longo de um gradiente altitudinal na Floresta Ombrófila Densa, no parque Nacional do Caparaó, ES.** [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- CHEN, J. S.; CHIU, C. Y. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. **Geoderma**, v. 96, n. 1–2, p. 19–30, 2000.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, jan. 1988.
- GE, X. et al. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 33, n. 2, p. 102–108, 2013.
- GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia.** Porto Alegre: Artmed, 2011.
- HERNÁNDEZ, D. L.; HOBBIE, S. E. The effects of substrate composition, quantity, and diversity on microbial activity. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1, p. 397–411, 2010.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.
- KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 1, p. 1–13, 2010.
- KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen inorganic forms. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of soil analysis. Part 2.** Madison, Wis., USA: American Society of Agronomy, 1982. p. 643–698.

KELLER, A. B. et al. Effects of canopy tree species on belowground biogeochemistry in a lowland wet tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 58, p. 61–69, 2013.

LALIBERTÉ, E. et al. How does pedogenesis drive plant diversity? *Trends in Ecology & Evolution*, v. 28, n. 6, p. 331–340, 2013.

LI, G. et al. Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 120, n. February, p. 212–221, 2018.

MARGESIN, R. et al. Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 67, n. 2, p. 208–218, 2009.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 3, p. 425–433, 2003.

NEMERGUT, D. R. et al. Plot-scale manipulations of organic matter inputs to soils correlate with shifts in microbial community composition in a lowland tropical rain forest. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 12, p. 2153–2160, 2010.

O'CONNELL, A. M. ; SANKARAN, K. V. Organic Matter Accretion, Decomposition and Mineralisation. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (Eds.). . *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. Australia: Canberra: ACIAR, 1997. p. 443–480.

OLSON, J. S. Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in Ecological Systems. *Ecology*, v. 44, n. 2, p. 322–331, abr. 1963.

OSTERTAG, R. et al. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico. *Ecosystems*, v. 11, n. 5, p. 701–714, 2008.

PANDEY, R. R. R. et al. Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in northeastern India. *Forest Ecology and Management*, v. 240, n. 1–3, p. 96–104, 2007.

RIETL, A. J.; JACKSON, C. R. Effects of the ecological restoration practices of prescribed burning and mechanical thinning on soil microbial enzyme activities and leaf litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 50, p. 47–57, 2012.

SCHIMEL, J. P.; WEINTRAUB, M. N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: A theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 35, n. 4, p. 549–563, 2003.

SILES, J. A. et al. Altitudinal, seasonal and interannual shifts in microbial communities and chemical composition of soil organic matter in Alpine forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 112, p. 1–13, set. 2017.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 1, n. 4, p. 301–307, nov. 1969.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 4, n. 4, p. 479–487, nov. 1972.

TANNER, E. V. J.; VITOUSEK, P. M.; CUEVAS, E. Experimental Investigation of Nutrient Limitation of Forest Growth on Wet Tropical Mountains. **Ecology**, v. 79, n. 1, p. 10, jan. 1998.

TAYLOR, J. P. et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 3, p. 387–401, 2002.

TEDESCO, M. J. et al. **ABNT**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de solos, UFRGS, 1995.

TIWARI, S.; TIWARI, B.; MISHRA, R. Enzyme activities in soils: Effects of leaching, ignition, autoclaving and fumigation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 4, p. 583–585, 1988.

USHIO, M.; KITAYAMA, K.; BALSER, T. C. Tree species effects on soil enzyme activities through effects on soil physicochemical and microbial properties in a tropical montane forest on Mt. Kinabalu, Borneo. **Pedobiologia**, v. 53, n. 4, p. 227–233, 2010.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; VAN STRAALLEN, N. M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v. 11, n. 3, p. 296–310, 2008.

WEINTRAUB, S. R. . et al. Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest. **Biogeochemistry**, v. 114, n. 1–3, p. 1–14, 2012.

XU, M. et al. Soil microbial community structure and activity along a montane elevational gradient on the Tibetan Plateau. **European Journal of Soil Biology**, v. 64, p. 6–14, set. 2014.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar de abranger uma gama de estudos relacionados ao solo e a vegetação, este abre novas possibilidades para novos trabalhos mais detalhados que ainda necessitam ser elaborados para ampliar o conhecimento sobre ambientes montanos. Estudos relacionado ao clima, dedicados a mensurações detalhadas dos elementos climáticos de cada parcela dentro da variação altitudinal, e a associação destes dados com a vegetação, não somente a produção de biomassa, mais também a distribuição das espécies são bons exemplos desses estudos.

Apesar disto, este trabalho demonstrou que para a floresta em questão, fatores relacionados ao solo, clima, vegetação e atividade biológica são correlacionados, e evoluem em conjunto para a formação de um ecossistema diverso no âmbito da ciclagem de nutriente e manutenção do sistema. Todos estes atributos não obedeceram a um padrão contínuo ou um gradiente único de formação e interação, mas foram condicionados de forma diferentes a gerar um ambiente diverso em pequena escala, mas que funciona com um único sistema equilibrado e estável ao longo do tempo.

APÊNDICE

Apêndice 1 – Coeficiente de Variação (%) da dinâmica da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada e do acúmulo médio de serapilheira entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

Ano	Folha	Outros Materiais	Total	Acumulada
2013	46,18	69,06	48,19	27,32
2014	48,66	61,65	48,69	26,04
2015	51,77	65,76	48,40	29,00
2016	49,11	58,46	43,75	23,22

Apêndice 2 – Coeficiente de Variação (%) da biomassa média da produção de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada para as estações entre os anos de 2013 e 2016, em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES. para Barras na vertical representam o desvio padrão

Estação	Folha	Outros Materiais	Total	Acumulada
VERÃO	9,3	8,0	8,4	20,1
OUTONO	9,2	11,9	8,7	8,5
INVERNO	3,7	14,0	6,9	14,4
PRIMAVERA	10,6	9,3	7,2	8,0

Apêndice 3 – Coeficiente de Variação (%) para a produção média (2013 – 2016) de folhas, outros materiais e total da serapilheira depositada para o acúmulo de serapilheira das parcelas em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES.

	Folhas						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
VERÃO	22,0	37,8	23,3	26,0	16,7	29,4	27,1
OUTONO	27,9	74,2	13,9	37,9	22,9	20,8	25,3
INVERNO	35,7	42,6	17,3	50,8	29,8	26,1	30,7
PRIMAVERA	29,3	23,9	33,0	31,6	38,4	28,7	18,3
	Outros Materiais						
	VERÃO	28,4	56,7	58,2	41,4	57,7	56,2
OUTONO	33,8	56,4	43,9	83,9	85,8	35,4	29,0
INVERNO	42,2	92,2	65,1	111,3	64,8	45,5	37,1
PRIMAVERA	37,0	43,2	38,1	40,5	52,1	38,5	51,1
	Total						
	VERÃO	22,1	38,6	33,8	24,2	25,0	35,1
OUTONO	19,2	55,3	12,2	43,7	43,8	18,7	22,8
INVERNO	30,6	44,9	34,3	71,3	32,6	30,0	24,6
PRIMAVERA	23,8	26,5	25,1	29,5	25,7	27,0	23,7
	Acumulada						
	VERÃO	25,3	31,9	35,4	23,7	26,7	31,3
OUTONO	21,5	28,2	27,6	22,0	17,1	19,3	22,1
INVERNO	24,6	25,4	20,3	23,2	19,0	22,6	28,2
PRIMAVERA	22,6	16,9	17,4	13,0	34,9	17,0	24,3

Apêndice 4 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg⁻¹) para a fração folhas da serapilheira depositada entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Estação	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7								
	\bar{x}	Desv.	cv%																		
Potássio																					
Verão	4,63	0,12	2,49	3,93	0,70	17,86	6,77	0,72	10,69	2,4	34,63	3,37	2,40	71,31	4,00	0,26	6,61	3,87	0,67	17,22	
Outono	5,93	0,32	5,42	6,17	1,93	31,29	5,83	3,09	52,96	7,77	2,1	27,32	3,20	2,12	66,32	4,23	0,40	9,55	3,23	0,29	8,93
Inverno	5,63	0,60	10,70	8,23	0,35	4,27	4,73	1,45	30,57	5,87	1,7	28,39	3,93	1,67	42,34	3,83	0,47	12,33	4,13	0,60	14,58
Primavera	4,03	0,21	5,16	5,93	2,57	43,38	4,03	1,46	36,13	4,27	1,3	31,47	2,97	1,34	45,27	2,93	0,15	5,21	3,03	0,49	16,26
Cálcio																					
Verão	7,67	0,14	1,88	6,75	0,50	7,41	9,25	1,39	15,05	8,00	0,9	11,27	7,42	0,90	12,15	5,92	1,28	21,68	5,83	0,72	12,37
Outono	6,92	0,29	4,17	8,50	2,65	31,13	6,33	2,67	42,21	7,75	2,0	25,19	7,08	1,95	27,57	3,92	0,80	20,52	5,75	1,15	19,92
Inverno	5,92	1,15	19,52	8,33	1,01	12,12	5,92	0,63	10,63	6,92	0,6	9,10	6,33	0,63	9,93	6,17	1,26	20,40	6,33	1,15	18,23
Primavera	7,25	0,90	12,43	8,50	2,22	26,14	7,92	1,81	22,84	8,50	0,9	10,60	6,58	0,90	13,69	5,25	1,15	21,82	6,13	0,13	2,05
Magnésio																					
Verão	3,00	0,25	8,33	3,2	0,1	4,56	2,83	0,38	13,48	2,17	0,3	13,32	3,42	0,29	8,45	2,50	0,43	17,32	2,08	0,14	6,93
Outono	2,58	0,14	5,59	2,8	0,0	0,00	3,00	0,00	0,00	2,42	0,4	15,80	3,75	0,38	10,18	2,25	0,00	0,00	2,50	0,25	10,00
Inverno	2,75	0,43	15,75	2,8	0,0	0,00	3,50	0,50	14,29	2,33	0,4	16,37	3,92	0,38	9,75	2,75	0,00	0,00	2,58	0,14	5,59
Primavera	2,92	0,14	4,95	2,8	0,5	18,37	3,17	0,52	16,43	2,42	0,3	11,95	3,25	0,29	8,88	2,58	0,14	5,59	2,70	0,18	6,68
Enxofre																					
Verão	0,45	0,33	74,91	0,2	0,1	56,87	0,44	0,22	49,65	0,45	0,3	62,37	0,05	0,28	605,91	0,03	0,06	173,21	0,06	0,10	173,21
Outono	0,16	0,20	126,01	0,2	0,1	54,59	0,01	0,03	173,21	0,26	0,3	99,84	0,13	0,26	202,94	0,02	0,03	173,21	0,00	0,00	#DIV/0!
Inverno	0,14	0,25	173,21	0,1	0,1	156,64	0,26	0,11	43,73	0,22	0,1	23,93	0,31	0,05	16,89	0,58	0,95	165,83	0,03	0,06	173,21
Primavera	0,08	0,14	168,04	0,3	0,2	86,67	0,30	0,24	78,82	0,02	0,0	138,92	0,07	0,03	50,36	0,14	0,17	122,38	0,01	0,02	173,21

¹ Média; ² Desvio padrão; ³ Coeficiente de variação (%)

Apêndice 5 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg⁻¹) para a fração outros materiais da serapilheira depositada entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Estação	P1				P2				P3				P4				P5				P6				P7						
	\bar{x}^1	Desv.	cv% ³	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	s	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	s	cv%	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	Desv.	cv%	\bar{x}	Desv.	cv%		
Potássio																															
Verão	12,73	2,85	22,41	16,27	8,28	50,90	7,70	1,04	13,56	16,70	10,87	65,10	9,10	2,69	29,51	8,73	1,95	22,33	9,00	1,91	21,20	22,33	9,00	1,91	21,20	22,33	9,00	1,91	21,20		
Outono	22,47	10,87	48,36	15,87	7,61	47,99	24,07	3,66	15,22	27,27	8,01	29,37	10,60	4,94	46,63	15,60	5,80	37,20	8,80	0,75	8,58	37,20	8,80	0,75	8,58	37,20	8,80	0,75	8,58		
Inverno	24,97	5,26	21,08	28,67	9,58	33,43	13,67	8,11	59,34	17,07	0,42	2,44	12,67	4,75	37,48	12,67	3,85	30,42	9,40	4,50	47,92	30,42	9,40	4,50	47,92	30,42	9,40	4,50	47,92		
Primavera	10,13	3,12	30,80	14,57	3,87	26,54	9,03	4,05	44,85	11,07	3,81	34,41	6,87	0,31	4,45	8,17	0,50	6,16	8,23	2,85	34,62	6,16	8,23	2,85	34,62	6,16	8,23	2,85	34,62		
Cálcio																															
Verão	22,00	1,39	6,33	28,08	2,50	8,92	17,50	5,24	29,93	18,4	2,53	13,73	14	1,32	9,45	10,3	1,76	16,99	16,25	3,7	22,77	16,99	16,25	3,7	22,77	16,99	16,25	3,7	22,77		
Outono	17,17	3,69	21,47	17,83	1,77	9,95	28,17	4,71	16,71	17,7	1,76	9,94	15,7	3,69	23,52	15,7	2,88	18,36	16,333	1,01	6,19	23,52	15,7	2,88	18,36	16,333	1,01	6,19			
Inverno	14,92	2,75	18,46	31,58	5,39	17,08	17,50	7,94	45,38	21,2	1,66	7,86	19,4	4,4	22,68	14,4	2,5	17,37	17,417	9,03	51,84	22,68	14,4	2,5	17,37	17,417	9,03	51,84			
Primavera	16,08	1,51	9,37	31,33	1,59	5,07	17,00	4,12	24,21	21,5	7,15	33,28	15,8	1,56	9,91	14,8	0,66	4,48	14,167	1,46	10,34	9,91	14,8	0,66	4,48	14,167	1,46	10,34			
Magnésio																															
Verão	8,08	1,23	15,26	6,25	0,50	8,00	5,92	0,38	6,45	5,58	0,80	14,39	6,25	0,43	6,93	4,08	0,52	12,74	5,42	0,52	9,61	12,74	5,42	0,52	9,61	12,74	5,42	0,52	9,61		
Outono	6,50	0,75	11,54	7,50	2,61	34,80	6,58	0,38	5,80	6,00	0,50	8,33	6,67	2,13	31,89	6,25	1,00	16,00	5,33	0,80	15,07	31,89	6,25	1,00	16,00	5,33	0,80	15,07			
Inverno	5,83	0,72	12,37	7,67	0,80	10,48	5,50	2,61	47,46	5,58	0,76	13,68	6,33	1,26	19,87	6,00	0,90	15,02	4,92	1,18	24,03	19,87	6,00	0,90	15,02	4,92	1,18	24,03			
Primavera	5,75	1,15	19,92	6,00	0,43	7,22	6,08	0,52	8,55	5,58	1,26	22,54	5,33	0,14	2,71	5,50	0,66	12,03	6,58	2,32	35,28	22,54	5,33	0,14	2,71	5,50	0,66	12,03	6,58	2,32	35,28
Enxofre																															
Verão	3,308	1,02	30,70	1,39	0,09	6,39	1,46	0,19	13,16	2,15	0,41	19,28	1,41	0,08	5,33	1,08	0,18	16,88	1,08	0,22	20,16	5,33	1,08	0,18	16,88	1,08	0,22	20,16			
Outono	2,181	1,01	46,18	1,60	0,08	5,21	1,30	0,08	5,85	1,56	0,50	31,99	1,62	0,30	18,26	1,18	0,19	15,97	1,18	0,27	22,62	18,26	1,18	0,19	15,97	1,18	0,27	22,62			
Inverno	1,325	0,19	14,23	1,38	0,16	11,86	1,34	0,32	24,27	1,21	0,14	11,55	1,28	0,04	3,48	1,06	1,37	128,88	1,06	0,25	23,07	3,48	1,06	1,37	128,88	1,06	0,25	23,07			
Primavera	4,031	1,84	45,63	1,27	0,01	1,09	1,20	0,23	19,50	1,72	0,51	29,84	1,36	0,30	21,80	1,23	0,27	22,26	1,23	0,02	1,47	21,80	1,23	0,27	22,26	1,23	0,02	1,47			

¹ Média; ² Desvio padrão; ³ Coeficiente de variação (%)

Apêndice 6 – Variação sazonal do teor médio de macronutrientes (g kg⁻¹) para a serapilheira acumulada entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Estação	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7								
	\bar{x}	Desv.	cv%																		
Potássio																					
Verão	4,38	0,13	2,86	4,46	0,26	5,82	3,67	0,26	7,07	4,88	0,25	5,12	3,71	0,29	7,77	4,13	0,13	3,03	4,25	0,70	16,43
Outono	4,84	0,48	9,82	4,59	1,00	21,86	3,34	0,44	13,09	3,88	0,58	14,83	3,34	0,19	5,66	3,58	0,38	10,66	4,25	0,45	10,53
Inverno	5,34	0,57	10,61	4,67	0,19	4,14	4,09	0,44	10,68	4,92	0,19	3,93	3,38	0,13	3,70	4,55	1,01	22,22	4,17	0,19	4,63
Primavera	4,46	0,07	1,55	4,67	0,47	10,10	3,58	0,14	4,03	3,88	0,54	14,03	3,05	0,29	9,48	3,88	0,22	5,66	3,88	0,13	3,23
Cálcio																					
Verão	6,01	1,26	20,93	11,00	1,92	17,42	8,09	1,22	15,08	10,09	0,65	6,45	7,82	1,49	19,08	6,10	0,20	3,26	7,61	2,31	30,31
Outono	7,59	0,72	9,49	10,75	0,80	7,48	6,55	0,76	11,63	7,49	2,29	30,63	8,01	0,64	7,94	4,79	0,14	3,02	6,34	0,22	3,48
Inverno	6,20	0,78	12,54	10,13	0,78	7,70	6,82	0,69	10,08	7,57	0,42	5,51	7,59	1,43	18,83	6,13	1,01	16,47	5,66	0,56	9,91
Primavera	7,51	0,28	3,77	10,30	0,27	2,65	6,05	0,43	7,16	6,93	1,26	18,20	7,43	0,75	10,03	4,99	0,72	14,40	5,78	0,61	10,63
Magnésio																					
Verão	1,79	0,10	5,36	1,75	0,11	6,26	2,06	0,13	6,06	1,88	0,07	3,47	2,40	0,23	9,72	1,77	0,10	5,48	2,08	0,65	31,17
Outono	1,86	0,04	2,18	1,58	0,20	12,54	1,69	0,23	13,38	1,40	0,26	18,69	2,33	0,16	6,70	1,40	0,10	6,88	1,56	0,19	11,84
Inverno	1,54	0,13	8,46	1,63	0,16	10,11	1,79	0,30	16,66	1,37	0,16	11,97	2,33	0,58	24,74	1,96	0,16	8,21	1,46	0,22	15,12
Primavera	1,71	0,03	2,03	1,54	0,03	2,25	1,82	0,16	9,05	1,29	0,16	12,04	1,98	0,09	4,63	1,46	0,14	9,86	1,46	0,07	4,75
Enxofre																					
Verão	1,05	0,14	13,09	0,93	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,93	0,09	9,68	0,87	0,05	5,97	0,93	0,00	0,00
Outono	1,79	0,46	25,97	1,43	0,36	24,93	1,55	0,22	14,12	1,30	0,10	7,33	1,59	0,43	27,14	1,27	0,06	4,56	1,43	0,11	7,69
Inverno	1,59	0,26	16,32	1,55	0,20	13,04	1,79	0,30	16,79	1,49	0,10	6,39	1,24	0,30	24,32	1,33	0,11	8,27	1,36	0,15	10,83
Primavera	1,33	0,05	3,91	1,33	0,05	3,91	1,85	0,06	3,13	1,36	0,24	17,38	1,46	0,20	13,63	1,27	0,06	4,56	1,33	0,15	11,08

¹ Média; ²Desvio padrão; ³Coefficiente de variação (%)

Apêndice 7 – Coeficiente de Variação (%) para o teor médio de polifenóis totais para a serapilheira entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Folhas							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Verão	31,90	43,69	53,79	26,77	18,02	6,05	3,22
Outono	21,58	40,17	32,77	23,11	32,47	19,75	10,50
Inverno	12,17	7,93	11,04	27,02	14,71	5,57	27,86
Primavera	23,52	55,91	10,68	0,19	29,49	29,80	7,65
Outros materiais							
Verão	47,06	20,72	4,97	32,33	33,92	33,78	20,69
Outono	2,95	14,04	16,21	31,86	28,26	19,93	8,17
Inverno	63,01	34,17	11,46	28,20	23,03	6,82	12,27
Primavera	17,20	37,35	4,36	14,95	29,67	24,57	29,41
Acumulada							
Verão	25,02	9,33	21,25	22,43	14,45	10,71	1,39
Outono	13,44	21,79	49,60	35,85	22,95	26,98	41,91
Inverno	26,95	31,58	9,10	24,20	3,38	18,89	3,24
Primavera	6,22	4,76	6,41	40,95	8,64	19,03	4,90

Apêndice 8 – Coeficiente de Variação (%) para o teor médio de lignina para a serapilheira entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Folhas							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Verão	2,29	11,89	12,37	2,05	1,99	3,30	5,79
Outono	5,65	9,73	4,10	2,98	3,94	1,46	14,37
Inverno	2,15	3,34	4,74	41,32	4,62	10,28	4,39
Primavera	5,01	10,40	6,55	2,39	6,76	4,19	4,73
Outros materiais							
Verão	6,91	6,84	0,64	5,39	10,86	10,04	4,81
Outono	18,42	4,59	14,76	4,41	10,02	4,61	3,72
Inverno	20,19	7,97	7,28	6,52	5,04	11,75	8,50
Primavera	11,22	20,71	7,29	13,81	3,01	6,13	3,85
Acumulada							
Verão	2,04	5,48	10,61	6,09	1,16	8,65	9,84
Outono	5,39	7,22	13,87	6,69	8,14	6,27	5,46
Inverno	8,84	12,11	7,71	6,20	11,20	22,10	18,08
Primavera	8,93	5,31	2,36	8,20	16,37	6,40	2,87

Apêndice 9 – Coeficiente de Variação (%) para o teor médio de celulose para a serapilheira entre as parcelas em um gradiente altitudinal em Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Folhas							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Verão	8,37	5,08	5,07	4,86	4,59	5,44	1,58
Outono	3,19	8,24	9,35	2,28	5,02	3,88	11,88
Inverno	6,07	5,37	5,20	9,04	2,69	1,70	3,95
Primavera	10,60	8,66	2,56	0,48	6,46	5,96	2,01
Outros materiais							
Verão	5,67	7,24	3,53	5,95	1,58	6,67	15,49
Outono	1,84	4,71	5,37	2,55	5,11	9,61	4,19
Inverno	10,48	6,23	11,44	7,12	6,54	11,23	10,89
Primavera	8,39	8,23	4,90	8,76	7,87	10,61	20,91
Acumulada							
Verão	2,27	3,47	8,73	5,82	3,96	3,01	6,26
Outono	12,21	38,43	10,89	6,19	7,51	4,77	2,80
Inverno	9,89	12,07	14,80	8,78	8,01	6,10	9,64
Primavera	0,97	13,55	6,64	12,00	4,60	7,10	4,21

Apêndice 10 – Coeficiente de Correlação de Spearman entre os atributos microbiológicos da camada superficial do solo sob Floresta Ombrófila Densa Montana no Parque Nacional do Caparaó, ES

Verão												Outono											
C _{org}			NT			N-min			Fosf. A.			βG			Urease			CBM			NBM		
C _{org}			NT			N-min			Fosf. A.			βG			Urease			CBM			NBM		
0,83*			0,56			0,49			0,19			0,17			0,17			0,13			0,53		
N-min			0,73			0,01			-0,48			0,12			-0,17			0,25			0,25		
Fosf. A.			0,25			-0,09			0,30			0,04			0,06			0,20			0,27		
βG			-0,39			0,30			0,44			0,35			0,09			0,20			0,27		
Urease			0,58			0,52			0,33			0,35			0,09			0,20			0,27		
CBM			0,67			0,52			0,33			0,35			0,09			0,20			0,27		
NBM			0,67			0,52			0,33			0,35			0,09			0,20			0,27		
inverno												Primavera											
C _{org}			NT			N-min			Fosf. A.			βG			Urease			CBM			NBM		
C _{org}			NT			N-min			Fosf. A.			βG			Urease			CBM			NBM		
0,97			0,30			-0,33			0,68			0,08			0,18			0,11			0,26		
N-min			0,46			-0,33			-0,01			0,52			0,19			0,71			0,71		
Fosf. A.			0,63			0,03			0,34			0,22			0,35			0,19			0,71		
βG			0,77			0,37			0,22			0,35			0,19			0,71			0,71		
Urease			0,10			0,03			-0,01			0,08			0,18			0,18			0,18		
CBM			0,77			0,31			0,34			0,52			0,18			0,18			0,18		
NBM			0,76			0,37			0,22			0,35			0,19			0,71			0,71		

*Valores em negrito, correlações significativas (p<0,05)