



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS

THAMIRES RODRIGUES DE SÁ VALLE

NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS E QUALIDADE DE SOLO NA REGIÃO
DO MÉDIO VALE DO PARAÍBA DO SUL

Niterói, RJ.
Agosto/2018.

THAMIRES RODRIGUES DE SÁ VALLE

NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS E QUALIDADE DO SOLO NA REGIÃO
DO MÉDIO VALE DO PARAÍBA DO SUL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Biosistemas da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Biosistemas. Área de concentração Recursos Naturais e Ambiente. Linha de Pesquisa Sistemas Naturais.

Orientador: Dr. RENATO DE ARAGÃO RIBEIRO RODRIGUES
Co-orientador: Dr. GUILHERME KANGUSSÚ DONAGEMMA

Niterói, RJ.
Agosto/2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE

V181n Valle, Thamires Rodrigues de Sá
Níveis de degradação de pastagens e qualidade do solo na
Região do Médio Vale do Paraíba do Sul / Thamires Rodrigues
de Sá Valle ; Renato de Aragão Ribeiro Rodrigues, orientador
; Guilherme Kangussú Donagemma, coorientador. Niterói, 2018.
108 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGEB.2018.m.14075971759>

1. Qualidade do solo. 2. Pastagem. 3. Produção
intelectual. I. Título II. Rodrigues, Renato de Aragão
Ribeiro, orientador. III. Donagemma, Guilherme Kangussú,
coorientador. IV. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia.

CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

THAMIRES RODRIGUES DE SÁ VALLE

NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS E QUALIDADE DO SOLO NA REGIÃO
DO MÉDIO VALE DO PARAÍBA DO SUL

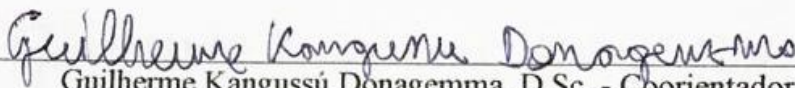
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia de Biosistemas da
Universidade Federal Fluminense, como
requisito parcial a obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Biosistemas. Área de
concentração Recursos Naturais e Ambiente.
Linha de Pesquisa Sistemas Naturais.

Aprovada em 15 de agosto de 2018.

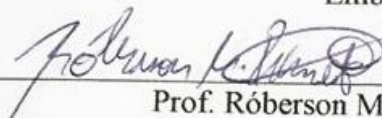
BANCA EXAMINADORA



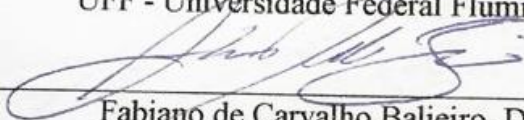
Renato de Aragão Ribeiro Rodrigues, D.Sc. - Orientador
Embrapa Solos



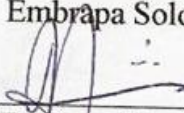
Guilherme Kangussú Donagemma, D.Sc. - Coorientador
Embrapa Solos



Prof. Róberson Machado Pimentel, D.Sc.
UFF - Universidade Federal Fluminense



Fabiano de Carvalho Balieiro, D.Sc.
Embrapa Solos



Carlos Eugênio Martins, D.Sc.
Embrapa Gado de Leite

Niterói, RJ.

Agosto/2018

Dedico esta dissertação aos meus avôs José Trajano de Sá (in memoriam) e Luiz Maurício da Costa Valle (in memoriam), que me ensinaram muito sobre a vida. Vocês farão falta sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por se manifestar das formas mais sutis e mostrar que a conquista de desafios é feita de luta e boas companhias.

Aos meus pais e meu irmão pelo apoio incondicional, tanto nos momentos de vibração por bons resultados, quanto nos momentos de medo quando achei que não fosse conseguir.

Aos meus avós pelo carinho e afago de sempre, pelas histórias de vida que só me inspiram, e pelas orações que me acompanham.

Aos orientadores Renato Rodrigues, pelas palavras amigas, confiança, bons momentos; e Guilherme Donagemma, pela atenção, empenho e disponibilidade. A ambos, pelo incentivo. E aos pesquisadores Ademir Fontana e Fabiano de Carvalho Balieiro pelo suporte em campo, laboratório, revisões e dicas.

Aos amigos de campo e de laboratório, Marcella Leal Santos, Fernanda Figueiredo Granja Dorilêo Leite, Fernanda Reis Cordeiro, Tainá Linhares, Pedro Augusto Dias, Mirelly Mioranza, Lana Baumgartner, Gabriel Souza Martins, Júlia Nogueira, Natalie Alcântara, pelos momentos felizes e positividade no dia a dia. Obrigada também ao Fernando Vieira Cesário pela ajuda e tempo dedicados com a estatística multivariada.

Aos funcionários e estrutura da Embrapa Solos, em especial ao Adoildo da Silva Melo por me ensinar a metodologia de avaliação do DRES, permitindo a condução deste trabalho.

Aos funcionários e estrutura da Embrapa Gado de Leite, em especial Fabiano de Oliveira Araujo, Jair Faccion Neto, Marcos Antônio da Silva e Marcelo da Silva, pelo suporte em campo.

Aos membros da banca Carlos Eugênio Martins, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, e Róberson Machado Pimentel, professor do curso de veterinária da Universidade Federal Fluminense, pelas críticas, elogios e sugestões que muito contribuíram para esta versão final.

Aos produtores rurais, Sr. Rosalvo de Lima Costa e Sr. Fernando Tejerina que gentilmente concederam acesso às propriedades rurais amostradas.

Ao apoio da CAPES, Projeto Rural Sustentável e Rede ILPF que forneceram recursos para realização desta pesquisa.

*“Quem tem consciência para ter coragem
Quem tem a força de saber que existe
E no centro da própria engrenagem
Inventa a contra-mola que resiste*

*Quem não vacila mesmo derrotado
Quem já perdido nunca desespera
E envolto em tempestade decepado
Entre os dentes segura a primavera.”*

Primavera entre os dentes
Ney Matogrosso (1973)

RESUMO

A Região do Médio Vale do Paraíba do Sul assume posição de destaque na produção de leite e de carne no estado. Todavia, a vocação pecuária da região é ameaçada pela degradação de pastagens. As pastagens da região encontram-se em algum estágio de degradação devido ao histórico de uso da terra, sobre pastoreio, uso do fogo e favorecido pela geomorfologia. Assim, estratégias para a recuperação de pastagens pressupõem diagnóstico da condição atual de degradação a fim de estabelecer práticas de manejo conservacionistas. Consequentemente, uma forma de conter o cenário é facilitar o diagnóstico por produtores e técnicos a fim de identificar situações de risco, monitorar a qualidade do solo e apoiar a tomada de decisão. Desta forma, o trabalho foi conduzido com os objetivos: confirmar os níveis de degradação das pastagens observados visualmente através de indicadores de qualidade do solo; selecionar os indicadores de qualidade de solo mais promissores na diferenciação dos níveis de degradação; indicar a época de avaliação das pastagens e do solo mais adequada na diferenciação dos níveis de degradação de pastagem. Sendo assim, foram selecionadas propriedades rurais no município de Valença-RJ, representando as unidades experimentais. O relevo é caracterizado como fortemente ondulado a montanhoso e a classe de solo predominante é o Cambissolo. Assim, quatro níveis de degradação foram definidos visualmente: N1-leve, N2-moderada, N3-forte, e N4-muito forte, cada qual com 3 repetições. Foram coletadas amostras de solo nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm a fim de mensurar indicadores físicos e químicos de qualidade do solo. Além disso, foram feitas avaliações da taxa de cobertura, estrutura do solo, profundidade de raízes e espessura do horizonte A. A análise estatística dos dados correspondeu ao *Teste Kruskal-Wallis* (estatística univariada) e escalonamento multidimensional não métrico (estatística multivariada). Foi possível diferenciar os níveis de degradação de pastagens utilizando indicadores de qualidade de solo, avaliados por métodos expeditos. Considerando a camada superficial, os indicadores de qualidade do solo: profundidade de raízes, Diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES), espessura do horizonte A, densidade do solo, teor de carbono e estoque de carbono são eficientes na separação dos níveis de degradação leve (nível N1) e muito forte (nível N4). A época seca é a mais adequada para avaliação dos indicadores de qualidade de solo na diferenciação dos níveis de degradação de pastagens. A percentagem de solo exposto é o indicador mais eficiente na diferenciação dos maiores níveis de degradação de pastagens (N3 e N4.)

Palavras chave: Física do solo, Manejo e conservação do solo, DRES, Pastagens degradadas.

ABSTRACT

Middle Valley of Paraíba do Sul occupies a prominent position in milk and beef production in the state of Rio de Janeiro. However, its agricultural vocation is jeopardized by pasture degradation. Most of pastures in region are under some degradation stage due to its historical land use, practices like overgrazing and fire, and region geomorphology. Thus, strategies to pasture recovery demand previous diagnosis of current stage of degradation in order to achieve soil and water conservative management practices. Hence, a strategy to reduce the panorama is to facilitate diagnosis by farmers identifying risky situations, supporting decision making, and monitoring soil quality. In this way, this work intends to confirm the levels of degradation of pastures observed visually through soil quality indicators; to select the most promising soil quality indicators in the differentiation of degradation levels; to indicate the time of evaluation of the pastures and of the soil more adequate in the differentiation of the levels of pasture degradation. The experimental site farms are located in Valença Municipality, Rio de Janeiro State, Brazil. Local sites soil is classified as Cambisols and geomorphology is characterized by rugged relief. Four stages of pasture degradation were visually defined in field as: N1-light, N2-moderate, N3-severe, and N4-very severe. Three repetition of each treatment were selected and soil samples were taken in 0 – 10 cm and 10 -20 cm depth in order to measure some physical and chemical soil quality indicators. Besides, soil surface cover rate, soil structure, root depth and thickness of A horizon were evaluated in field. The statistical analysis corresponded to *Kruskal-Wallis* test (univariate statistics) and non-metric multidimensional scaling (multivariate statistics). It was possible to differentiate the levels of degradation using indicators of soil quality, evaluated by expedient methods. Considering the surface layer, the soil quality indicators: root depth, rapid soil structure diagnosis (DRES), horizon thickness A, soil density, carbon content and carbon stock are efficient in separating degradation levels light (N1 level) and very strong (N4 level). The dry season is the most adequate to evaluate soil quality indicators in the differentiation of pasture degradation levels. The percentage of soil exposed is the most efficient indicator in differentiating the highest levels of pasture degradation (N3 and N4).

Key words: Soil physics, Soil management and conservation, DRES, Degraded pastures.

SUMÁRIO

- 1. INTRODUÇÃO, p. 13**
 - 1.1 Hipótese, p. 15**
 - 1.2 Objetivos, p. 15**
 - 1.2.1 Geral, p. 15
 - 1.2.2 Específicos, p. 15
- 2. REFERENCIAL TEÓRICO, p. 17**
 - 2.1 A Região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, p. 17**
 - 2.1.1 Cafeecultura, p. 18
 - 2.1.2 Pecuária extensiva, p. 19
 - 2.2 Degradação de pastagens, p. 22**
 - 2.3 Avaliação da qualidade de pastagens, p. 25**
 - 2.4 Indicadores de qualidade do solo, p. 28**
 - 2.5 Qualidade do solo e serviços ecossistêmicos, p. 30**
- 3. MATERIAL E MÉTODOS, p. 32**
 - 3.1 Caracterização da área de estudo, p. 32**
 - 3.2 Avaliação preliminar dos níveis de degradação, p. 33**
 - 3.3 Avaliações de campo, p. 36**
 - 3.3.1 Taxa de cobertura, p. 36
 - 3.3.2 Qualidade estrutural do solo, p. 37
 - 3.3.3 Profundidade de raízes e espessura do horizonte A, p. 41
 - 3.3.4 Declividade das encostas, p. 41
 - 3.4 Análises laboratoriais, p. 41**
 - 3.4.1 Análises físicas, p. 42
 - 3.4.2 Análises químicas, p. 46
 - 3.4.3 Fracionamento da matéria orgânica do solo, p. 48
 - 3.5 Análise estatística dos dados, p. 49**

3.6	Caracterização dos solos, p. 54
3.6.1	Textura, p. 54
3.6.2	Densidade de partículas, p. 56
3.6.3	Caracterização química, p. 57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO, p. 62
4.1	Avaliações de campo, p. 62
4.1.1	Qualidade estrutural do solo, p. 62
4.1.2	Taxa de cobertura, p. 66
4.1.3	Profundidade de raízes e espessura do horizonte A, p. 74
4.2	Atributos físicos, p. 77
4.2.1	Densidade do solo, p. 77
4.2.2	Porosidade total, microporosidade e macroporosidade, p. 79
4.2.3	Diâmetro Médio Ponderado e Diâmetro Médio Geométrico, p. 81
4.3	Atributos químicos, p. 83
4.3.1	Teor de Carbono e Estoque de Carbono, p. 83
4.3.2	Matéria Orgânica Leve, p. 86
4.4	Estatística multivariada, p. 88
5.	CONCLUSÕES, p. 91
6.	RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO, p. 92
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, p. 93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Fig. 1 Regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro, com destaque para o Médio Vale do Paraíba do Sul, f. 19
- Fig. 2 Produção leiteira do Rio de Janeiro segundo municípios, com destaque para o município de Valença, f. 20
- Fig. 3 Gado de corte do Rio de Janeiro segundo municípios, f. 21
- Fig. 4 Evolução do processo de degradação, f. 23
- Fig. 5 Níveis de degradação. a) N1-leve; b) N2-moderado; c) N3-forte; d) N4-muito forte, f. 34
- Fig. 6 Critérios de avaliação da cobertura de solo pela vegetação segundo Método da Corda adaptado de Rocha Júnior (2012). a) Forrageira; b) planta infestante de folha larga; c) planta infestante de folha estreita; d) solo exposto, f. 37
- Fig. 7 Representação da unidade experimental, com malha de avaliação da taxa de cobertura do solo pela vegetação, localização das mini trincheiras para coleta de amostras e monólitos de solo, e destaque do ponto central a partir do qual foram registradas as coordenadas geográficas, f. 38
- Fig. 8 Etapas de coleta do monólito para avaliação da estrutura pelo método DRES (RALISCH et al., 2017). a) Abertura da mini trincheira; b) Monólito com dimensões pré estabelecidas; c) Manipulação da amostra; d) Separação de camadas, f. 39
- Fig. 9 Esquematização dos critérios de avaliação e notas de qualidade estrutural da camada (Qec), f. 40
- Fig. 10 Medição da profundidade de raízes e espessura do horizonte A em mini trincheira, f. 41
- Fig. 11 Clinômetro utilizado na medição da declividade da encosta dos morros, f. 41
- Fig. 12 Valores médios e erro padrão da soma de bases segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 59
- Fig. 13 Valores médios e erro padrão da CTC efetiva segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 59
- Fig. 14 Valores médios e erro padrão da CTC total segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 60
- Fig. 15 Valores médios e erro padrão da saturação por bases segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 60
- Fig. 16 Valores médios e erro padrão da saturação por alumínio segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 61
- Fig. 17 Destaque para os minerais de quartzo encontrados em uma das amostras do nível N1 do DRES, f. 63
- Fig. 18 Amostra para o DRES referente ao nível N1, destaque para agregados granulares e ação das raízes na agregação, f. 64
- Fig. 19 Evidências de conservação e boa estrutura do solo: raízes abundantes e agregados de tamanho entre 1 e 4 cm, f. 65
- Fig. 20 Evidências de degradação e má estrutura do solo: poucas ou nenhuma raiz, e agregados menores que 1 cm ou maiores que 7 cm, f. 66
- Fig. 21 Porcentagem de cobertura do solo em função dos níveis de degradação e épocas de avaliação, f. 68

- Fig. 22 Plantas daninhas. a) Grama batatais; b) Cambará ou Chumbinho, f. 69
- Fig. 23 Plantas daninhas. a) Mata pasto; b) Guanxuma ou vassourinha; c) Capim lucas ou capim mourão; d) Sapé; e) Joá bravo, f. 70
- Fig. 24 Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época seca, f. 71
- Fig. 25 Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa, f. 72
- Fig. 26 Correlação linear negativa estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa, f. 73
- Fig. 27 Correlação linear negativa estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa, f. 73
- Fig. 28 Valores médios e erro padrão da profundidade de raízes segundo níveis de degradação, f. 74
- Fig. 29 Valores médios e erro padrão da espessura do horizonte A segundo níveis de degradação, f. 75
- Fig. 30 Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época seca, f. 77
- Fig. 31 Valores médios e erro padrão da densidade de solo segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 78
- Fig. 32 Correlação positiva estatisticamente significativa entre DMP e IQES, f. 83
- Fig. 33 Valores médios e erro padrão do teor de carbono segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 84
- Fig. 34 Valores médios e erro padrão do estoque de carbono corrigido pela última camada segundo níveis de degradação, f. 85
- Fig. 35 Correlação positiva estatisticamente significativa entre o estoque de carbono corrigido pela última camada e o IQES, f. 86
- Fig. 36 Mapa perceptivo obtido através do escalonamento multidimensional não métrico onde os números ordinais correspondem a umavariável de investigação, f. 88
- Fig. 37 Nível de degradação leve (N1). a) N1A1 na época seca; b) N1A2 na época seca; c) N1A3 na época chuvosa, f. 102
- Fig. 38 Nível de degradação moderado (N2). a) N2A1 na época seca; b) N2A2 na época seca; c) N2A3 na época chuvosa, f. 102
- Fig. 39 Nível de degradação forte (N3). a) N3A1 na época seca; b) N3A2 na época chuvosa; c) NA3 na época seca, f. 103
- Fig. 40 Nível de degradação muito forte (N4). a) N4A1 na época seca; b) N4A2 na época seca; c) N4A3 na época seca, f. 103
- Fig. 41 Mapa de Cobertura das áreas de nível N1 na época seca, f. 104
- Fig. 42 Mapa de Cobertura das áreas de nível N1 na época chuvosa, f. 104
- Fig. 43 Mapa de Cobertura das áreas de nível N2 na época seca, f. 105
- Fig. 44 Mapa de Cobertura das áreas de nível N2 na época chuvosa, f. 105
- Fig. 45 Mapa de Cobertura das áreas de nível N3 na época seca, f. 106
- Fig. 46 Mapa de Cobertura das áreas de nível N3 na época chuvosa, f. 106
- Fig. 47 Mapa de Cobertura das áreas de nível N4 na época seca, f. 107
- Fig. 48 Mapa de Cobertura das áreas de nível N4 na época chuvosa, f. 107

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1: Parâmetros de referência da avaliação visual do estágio de degradação do pasto, f. 27
- TABELA 2: Coordenadas geográficas do ponto central das unidades experimentais de acordo com o nível de degradação das pastagens, f. 34
- TABELA 3: Manejo da pastagem, sistema de pastejo e época de formação do pasto nas unidades experimentais, f. 35
- TABELA 4: Classificação das variáveis preditoras e resposta com indicação da forma de obtenção dos dados (campo ou laboratório) e objetivos envolvidos (caracterização do solo e diferenciação dos níveis de degradação), f. 50
- TABELA 5: Frações granulométricas das amostras de solo coletadas segundo camadas amostradas e níveis de degradação, e indicação da respectiva classe textural obtida pelo diagrama simplificado, f.54
- TABELA 6: Valores médios e erro padrão da densidade de partículas segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 56
- TABELA 7: Valores médios e erro padrão dos atributos químicos segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 57
- TABELA 8: Valores médios e erro padrão do Índice de Qualidade de Estrutura do Solo (IQES) e declividade média segundo níveis de degradação, f. 62
- TABELA 9: Valores médios das classes de cobertura do solo segundo níveis de degradação e épocas de avaliação, f. 67
- TABELA 10: Espécies daninhas identificadas nos níveis de degradação, com o nome popular correspondente e a classificação segundo formato das folhas, f. 69
- TABELA 11: Valores médios e erro padrão de e porosidade total, microporosidade e macroporosidade segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 78
- TABELA 12: Valores médios e erro padrão do Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG) segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 81
- TABELA 13: Valores médios e erro padrão da MOL segundo camadas amostradas e níveis de degradação, f. 87

1. INTRODUÇÃO

Por desempenhar múltiplas funções, solo é base fundamental para qualidade ambiental, sustentabilidade produtiva e mitigação das mudanças do clima, benefícios cuja máxima expressão depende da qualidade do solo. Entende-se por qualidade do solo a capacidade de manter os serviços ecossistêmicos e sustentar cultivos de modo a gerar bens econômicos que atendam as demandas da sociedade atual e futura. Desta forma, a degradação do solo gera impactos ambientais que se estendem no espaço, tempo e outras interações ecológicas.

Por isso, a conservação do solo é assunto estratégico para alcançar metas que visem a mitigação e resiliência dos ecossistemas frente às mudanças climáticas. O papel do solo na mitigação das mudanças climáticas ocorre através do sequestro e fixação de carbono, e redução ou emissão nula de gases de efeito estufa. E a resiliência diante das mudanças do clima refere-se à capacidade do solo de retornar à condição estável anterior à alguma perturbação ou novo estado decorrente das mudanças climáticas. Práticas conservacionistas, portanto, favorecem o estabelecimento ou recuperação da qualidade de solo garantindo a longevidade e qualidade dos sistemas agrícolas para as futuras gerações.

Sob o enfoque das ciências ambientais e da terra, o solo contribui para a manutenção do ciclo hidrológico através da filtragem de água percolada no perfil, e recarga de aquíferos e mananciais; é compartimento ativo de ciclos biogeoquímicos, com destaque para os ciclos do carbono, nitrogênio e fósforo; é substrato para a produção de biomassa a partir da ciclagem de nutrientes e armazenamento de água; contribui para a manutenção dos níveis tróficos, biodiversidade e produção agrícola; e pode comportar-se como fonte ou sumidouro de carbono atmosférico a depender do balanço do elemento no solo. O carbono do solo, por sua vez, é elemento chave para compreender a relação dos solos com a mudança do clima, e a importância da avaliação da degradação de solos para posterior recuperação e conservação como estratégia de mitigação das mudanças climáticas.

Ao contrário dos países industrializados, os setores “agropecuária” e “uso da terra e mudança de uso da terra e florestas” são os principais contribuintes das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Diante do peso do setor agrícola nas emissões brasileiras, os sistemas agropecuários estão pressionados a adaptar-se à mudança do clima através de políticas de apoio à inovação e tecnologias de baixo carbono, incentivo à adoção de fontes energéticas limpas e renováveis, comunicação e sensibilização da sociedade. Desta forma, após a Conferência das

Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima de 2009, simplesmente denominada COP 15, o governo assumiu o compromisso voluntário de redução das emissões e retenção de carbono no solo na agricultura.

O Plano ABC, ou Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, ou simplesmente Plano para Agricultura de Baixa Emissão de Carbono, prevê sete programas para execução das ações propostas e cumprimento do compromisso voluntário brasileiro. As tecnologias sustentáveis envolvem a recuperação de pastagens degradadas, integração lavoura-pecuária-floresta e sistemas agroflorestais, sistema plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, florestas plantadas, tratamento de dejetos e adaptação às mudanças climáticas.

Dadas as extensões territoriais, o programa para recuperação de pastagens degradadas tem como objetivo recuperar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e reduzir de 83 a 104 milhões de toneladas de CO_{2eq} . A recuperação possui potencial para aumento da eficiência na produção pecuária, emitindo menos gases de efeito estufa por quilo de carne ou litro de leite produzido. A recuperação implica em maior vigor e qualidade nutricional de forragem, refletindo em redução da duração das fases de criação animal e das emissões por fermentação entérica no ciclo de vida animal. Além disso, as áreas agrícolas tornam-se mais produtivas, evitando o desmatamento para abertura de novas áreas, e protegendo a biodiversidade dos biomas brasileiros.

Todavia, as abordagens para recuperação de pastagens degradadas exigem necessariamente diagnóstico prévio do nível de degradação, a fim de que sejam adotadas práticas adequadas ao nível tecnológico local. A depender do nível de degradação, do diagnóstico precoce ou tardio, e da extensão da pastagem degradada, diferentes recursos financeiros e tecnológicos serão exigidos para reverter a condição de degradação. Sendo assim, a sistematização do terreno em áreas de encosta; formação de pastagens com espécies condizentes às condições locais de clima, solo e drenagem; sistema plantio direto; correção dos níveis de fertilidade através do consórcio gramínea-leguminosa e adubações de plantio e de manutenção; sistema de pastejo rotacionado; controle da altura de pasto; respeito à taxa de lotação; e adoção de aceiros para prevenção e controle de queimadas, são exemplos de técnicas disponíveis a serem consideradas na recuperação.

A degradação de pastagens está intimamente relacionada a perda da qualidade dos solos. A degradação do solo configura perda de qualidade em termos produtivos, com prejuízo às funções do solo relacionadas aos ciclos biogeoquímicos e regulação ambiental, de modo que a degradação de pastagem, especificamente, é caracterizada pela perda de produtividade e da

capacidade de sustentar os níveis de produção. As causas de degradação são inúmeras, abrangendo desde a falha no estabelecimento da cobertura forrageira, até o mau manejo com pastejo intensivo e queimadas. Dentre os sintomas de degradação do solo, tem-se a mudança na composição botânica das pastagens, com surgimento de espécies daninhas, a ocorrência de pragas e doenças, a compactação, aumento da área de solo exposto e evidências de erosão.

Assim como a qualidade do solo, a degradação pode ser avaliada por indicadores de qualidade do solo, que, por sua vez, relacionam-se a atributos físicos, químicos e biológicos sensíveis a fatores locais e de cultivo. Tais indicadores podem ser quantitativos ou qualitativos, obtidos em campo ou a partir de análises laboratoriais. Ainda que os métodos analíticos sejam mais precisos, o acesso à análise de solo ainda não é universalizado por conta dos custos e tempo de processamento envolvidos. Desta forma, outras avaliações, ditas expeditas, ou de campo, ou de fácil execução, apresentam-se como alternativa aos métodos consagrados. O objetivo das avaliações de campo é facilitar o acesso a informação ao produtor e técnico responsável no diagnóstico da qualidade de solo, com obtenção de resultados de fácil interpretação e boa confiabilidade.

1.1 Hipótese

Indicadores de qualidade de solo determinados por métodos de campo de fácil execução são capazes de diferenciar os níveis de degradação de pastagens.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Diferenciar os níveis de degradação de pastagens a partir de avaliações visuais e métodos expeditos.

1.2.2 Específicos

Confirmar os níveis de degradação das pastagens observados visualmente através de indicadores de qualidade do solo.

Selecionar os indicadores de qualidade de solo mais promissores na diferenciação dos níveis de degradação que auxiliem produtor rural e técnico na tomada de decisão.

Indicar a época de avaliação das pastagens e do solo mais adequada na diferenciação dos níveis de degradação de pastagem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Região do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul

A biodiversidade do bioma Mata Atlântica deve-se à sua extensão por diferentes condições de clima e altitude, no entanto trata-se de um ambiente ameaçado pela alta pressão antrópica. O bioma abriga uma diversidade de ecossistemas, como mangues e restingas no litoral, mata de araucárias na região sul, e floresta tropical na Serra do Mar. Originalmente, a Mata Atlântica estendia-se por 1,3 milhão de km², porém sua derrubada foi deflagrada com a colonização e estendeu-se ao longo dos séculos movida por diferentes forças econômicas e populacionais (COLONELLI, 2009; MMA, 2018).

Atualmente, a vegetação nativa compreende apenas 29% da cobertura de original, sendo constituída basicamente por fragmentos florestais, o que reduz a potencialidade dos serviços ecossistêmicos da floresta, assim como dificulta a sua conservação (COLONELLI, 2009; MMA, 2018). E no Rio Janeiro, os 98% de cobertura de mata do Estado deram lugar a apenas 20,9% da superfície original (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLANTICA; INPE, 2018).

Uma vez que 70% da população brasileira vive sob domínio do bioma Mata Atlântica, o que corresponde a aproximadamente 120 milhões de pessoas, os fragmentos florestais estão inseridos numa malha urbana e rural, e sujeitos a conflitos de uso da terra (COLONELLI, 2009; MMA, 2018).

A conversão do ecossistema natural para o antrópico deve-se principalmente a urbanização e a expansão de áreas agrícolas em diferentes contextos históricos. No estado do Rio de Janeiro, a urbanização da região metropolitana é a principal causa de redução da área de mata nativa, enquanto que nos municípios interioranos a agropecuária foi responsável pela transformação da paisagem desde o século XVIII (SILVA; BOTELHO, 2014). Estima-se que haja 19,65 M ha de pastagem degradada no bioma Mata Atlântica, com potencial de sequestro 53,25 Tg C ano⁻¹ caso sejam adotadas práticas conservacionistas que revertam a condição de degradação (CARVALHO et al., 2010).

Analisando a região administrativa do Médio Vale do Paraíba do Sul nota-se como a vegetação nativa fluminense cedeu espaço aos interesses econômicos em diferentes contextos históricos. Esta região compreende os municípios de Barra do Piraí, Barra Mansa, Itatiaia, Pinheiral, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Rio das Flores, Valença e Volta Redonda (Figura 1) (CEPERJ, 2014).

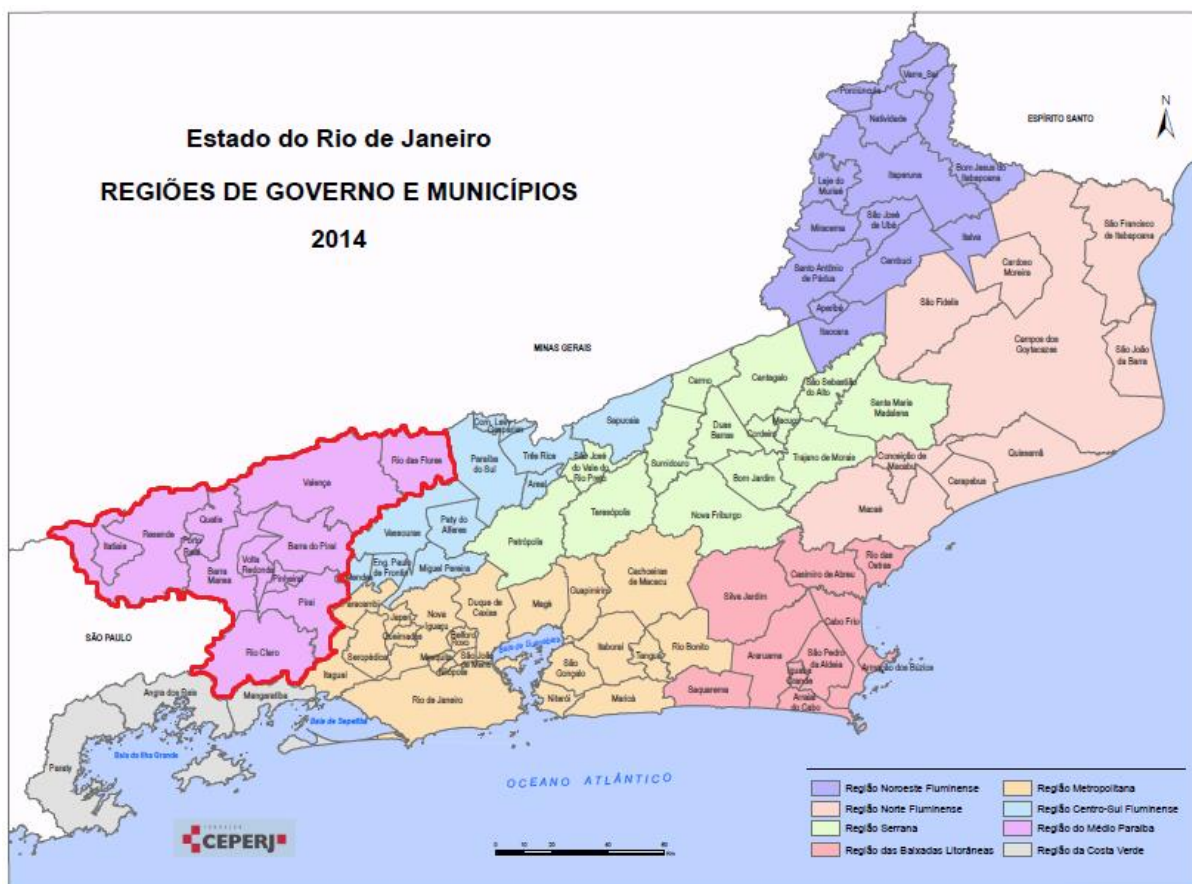


Figura 1: Regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro, com destaque para o Médio Vale do Paraíba do Sul.

Fonte: CEPERJ (2014).

2.1.1 Cafeicultura

Nos séculos XVII e XVIII, a região era rota para escoamento do ouro produzido em Minas Gerais até os portos do Rio de Janeiro. Portanto, a supressão da vegetação nativa restringiu-se basicamente à abertura de estradas. Porém, a grande transformação da paisagem deveu-se à conversão do sistema natural para o agroecossistema durante o ciclo do café no século XIX (SILVA; BOTELHO, 2014; SILVA, 2002).

Condições climáticas favoráveis ao cultivo, como temperaturas amenas, época seca melhor definida, e solo com matéria orgânica e boa condição física favoreceram o desenvolvimento da cafeicultura na região (MENEZES, 2008). A mata nativa não só cedeu lugar às plantações de café, como também à urbanização, agricultura tradicional e ferrovias. O aumento populacional na região, sobretudo pelo número de escravos trabalhadores nas

fazendas, gerou aumento na demanda por alimentos, assim como a produção agrícola incitou a criação de ferrovias para escoamento da produção (SÁ, 1996).

Todavia, o uso intensivo do solo, más práticas agrícolas, geomorfologia e clima da região contribuíram para a degradação dos solos, resultando em erosão, perda de massa e comprometimento das propriedades físicas químicas e biológicas dos solos (SILVA; BOTELHO, 2014). Ainda que o impacto ambiental provocado pelos pequenos produtores da região não se comparasse aos impactos gerados nos latifúndios monocultores, a pequena e média agricultura também dispunha de práticas desfavoráveis à conservação do solo e da água, intensificando a erosão e degradação do solo (MENEZES, 2008).

Com o declínio da cafeicultura, o empobrecimento dos solos da região e a abolição da escravatura, os cafezais cederam espaço à pecuária extensiva no final do século XIX e início do século XX (SILVA; BOTELHO, 2014). A pecuária extensiva apresentava-se como alternativa à ocupação das áreas agrícolas exauridas pelo monocultivo, assegurando grandes extensões sem exigir muito capital e mão de obra (REIS, 2017).

A opção pelo rebanho bovino se justifica por múltiplos fatores funcionais e produtivos. Por ter a capacidade de se autotransportar, o gado adapta-se a precariedade da infraestrutura de transporte, sendo força motriz para transporte de cargas agrícolas. Além disso, a versatilidade de produtos e subprodutos (leite, carne, couro e derivados) é outro atrativo para a subsistência ou comercialização (REIS, 2017).

2.1.2 Pecuária extensiva

A degradação do solo iniciada com os cafezais intensificou-se devido a práticas indevidas de manejo da pastagem, realidade que não é exclusiva da região do Médio Vale do Paraíba do Sul. É comum que as pastagens se desenvolvam em áreas de baixo potencial produtivo e sejam manejadas com baixo nível de tecnologia, o que pode ser explicado pelo perfil histórico do produtor associado ao modelo de criação extensiva. (DIAS-FILHO, 2014; REIS, 2017).

Dados de 2014 indicam que as pastagens fluminenses distribuem-se em 2,3 milhões de hectares (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2018), abrigando um rebanho bovino de 2,4 milhões de cabeças de gado, sendo a região administrativa do Médio Vale do Paraíba do Sul detentora de 356.077 animais, ou seja, 15% do rebanho fluminense (IBGE, 2016).

A bovinocultura leiteira do estado foi responsável pela produção de 500 milhões de litros de leite, enquanto que cerca de 875 mil animais foram destinados à produção de carne (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2018). Em ambos os casos, o município de Valença destaca-se no cenário estadual por ser o maior produtor de leite (Figura 2) e dispor de um dos maiores rebanhos de corte (Figura 3).

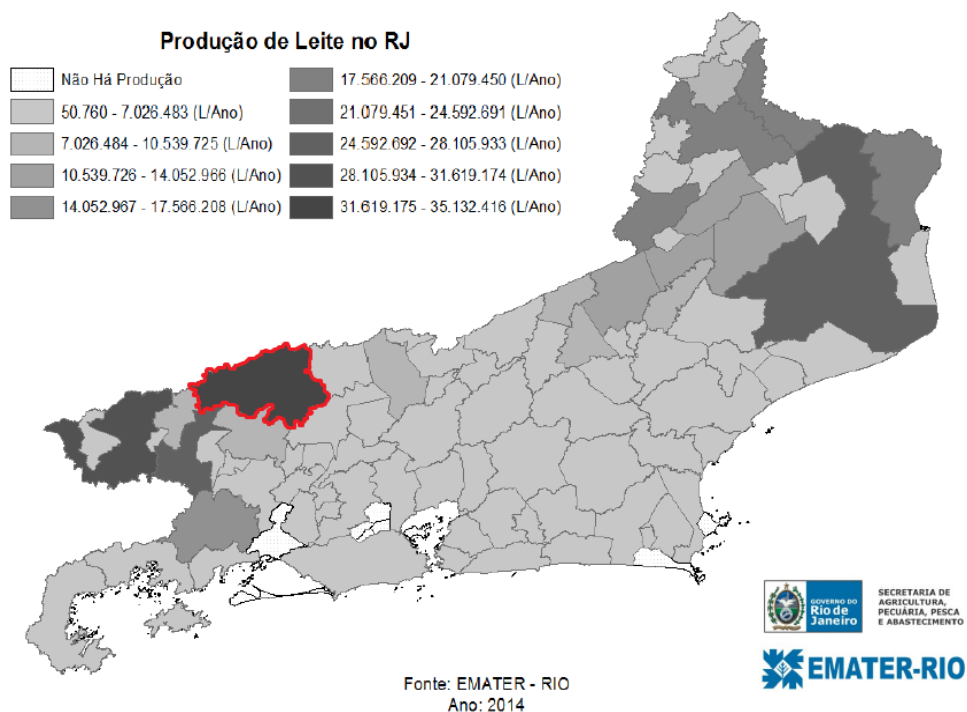


Figura 2: Produção leiteira do Rio de Janeiro segundo municípios, com destaque para o município de Valença.

Fonte: Governo do Estado do Rio de Janeiro (2018).

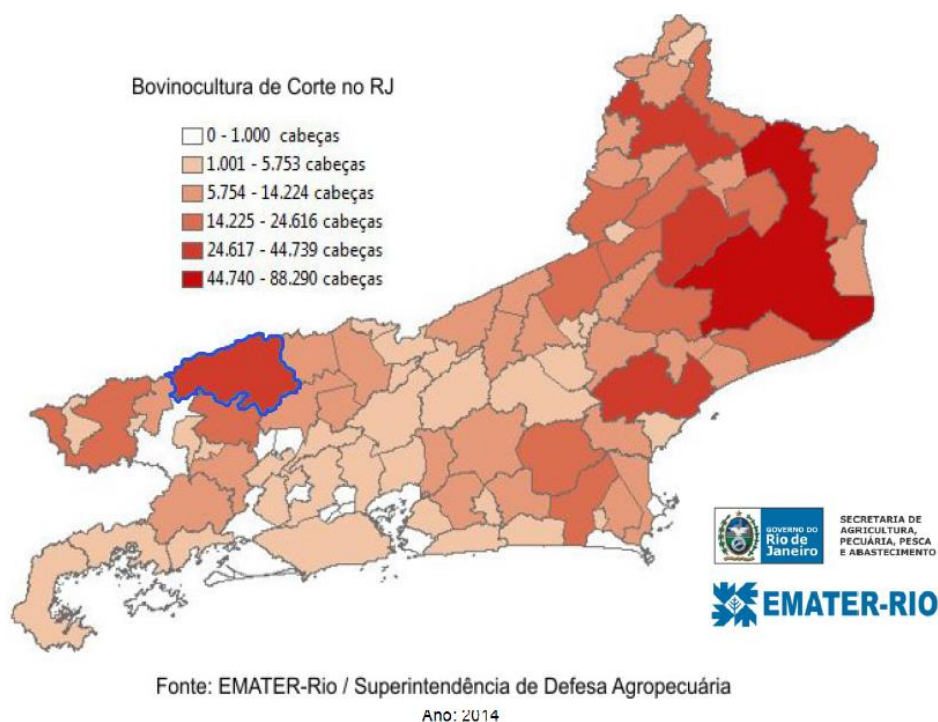


Figura 3: Gado de corte do Rio de Janeiro segundo municípios.

Fonte: Governo do Estado do Rio de Janeiro (2018).

A partir de análise histórica da ocupação de terras agricultáveis pelo país, Reis (2017) aponta que a pecuária extensiva se tornou estratégia para assegurar grandes extensões de terra sem exigir muitos insumos ou tecnologia. A pecuária apresentava-se como opção viável ao alcance de melhor qualidade de vida dos produtores rurais em termos econômicos e sociais, sem, no entanto, deter educação técnica e financeira, e acesso à tecnologia. Como resultado, o acúmulo de capital era logo convertido em número de animais e não em manutenção da qualidade das pastagens, resultando no uso intensivo, porém ineficiente do solo (REIS, 2017).

A bovinocultura do Médio Vale do Paraíba do Sul ainda hoje é marcada por manejo inadequado das pastagens, com taxas de lotação acima da capacidade de suporte, e queimadas para limpeza do pasto (MENEZES, 2008). Associado a isto, a geomorfologia da região caracteriza-se pelo predomínio de relevo fortemente ondulado alternando-se com montanhoso, o que favorece processos erosivos de diferentes intensidades e a degradação do solo (CARVALHO FILHO; LUMBRERAS; SANTOS, 2000; DANTAS, 2000; SANTOS et al., 2010). Estima-se que 50% das pastagens fluminenses estejam em condição de degradação (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2018).

2.2 Degradação de pastagens

A qualidade do solo pode ser compreendida por sua capacidade de cumprir as seguintes funções: apresentar produtividade biológica, com geração de bens econômicos; contribuir para a regulação ambiental; deter valor paisagístico e cultural. Já a degradação do solo, por sua vez, configura perda de produtividade atual ou potencial, considerando as demandas das gerações futuras, resultante de fatores naturais ou antropogênicos (LAL, 1993).

Em outros termos, a qualidade do solo refere-se à agricultura sustentável e qualidade ambiental, contribuindo para a saúde humana e animal. Enquanto que a degradação do solo indica comprometimento da sua capacidade produtiva, com desequilíbrio de ciclos biogeoquímicos e ameaça à qualidade das águas subterrânea e de superfície (DORAN et al., 1996).

A qualidade do solo não é estática, trata-se de um equilíbrio dinâmico entre processos que causam degradação e restauração das propriedades do solo, provocando alteração do equilíbrio em direções opostas. Enquanto que a degradação corresponde a processos relativos a perda de fertilidade, redução da biodiversidade, erosão, compactação, selamento superficial e anaerobiose, a restauração está associada a processos que favorecem a reserva de nutrientes, aumento da biodiversidade e atividade biológica, acúmulo de matéria orgânica, desenvolvimento da estrutura do solo, aumento da capacidade de água disponível e aeração (LAL, 1993).

O intemperismo responsável pela pedogênese, ciclos biogeoquímicos e evolução da paisagem é o principal agente natural interveniente na qualidade do solo. Enquanto que as mudanças de uso da terra e manejo são representantes da interferência humana no sistema solo (LAL, 1993, 2014).

Uma vez exposto tais conceitos, é possível descrever esquematicamente a degradação de pastagens conforme Figura 4 , a partir da seguinte definição:

processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade, de capacidade de recuperação natural para sustentar os níveis de produção e de qualidade exigidas pelos animais, assim como, o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e o desenvolvimento de plantas invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais em razão de manejos inadequados (MACEDO; ZIMMER, 1993).

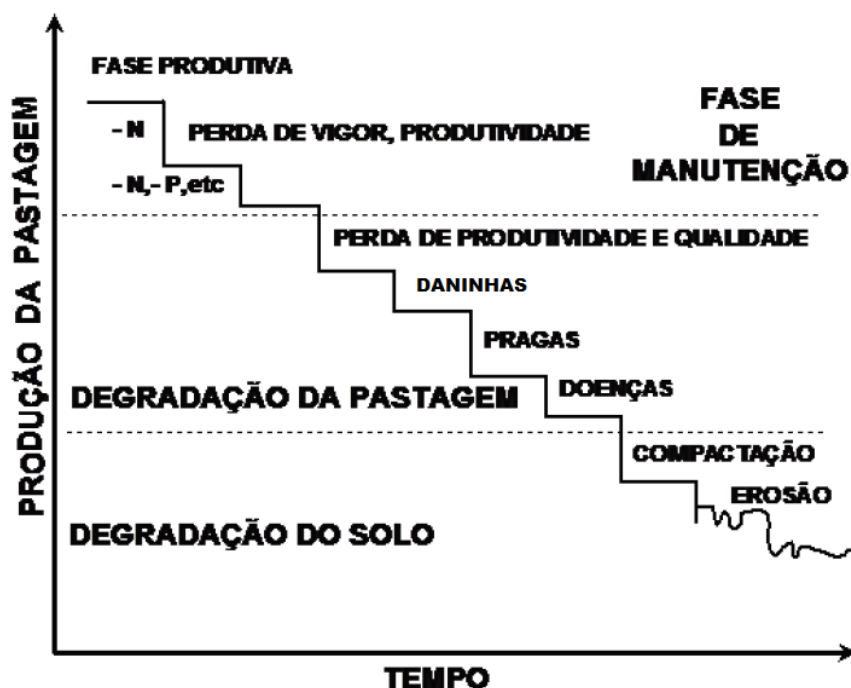


Figura 4: Evolução do processo de degradação

Fonte: Adaptado de Macedo e Zimmer (1993).

Ou, em termos mais objetivos, pode ser definida quando a depleção da produtividade potencial considerando as condições edafoclimáticas e bióticas locais (SPAIN; GUALDRÓN, 1991).

Nota-se que tanto a ideia de degradação do solo quanto a degradação de pastagens são dependentes do objetivo produtivo e da demanda das espécies envolvidas no sistema (DIAS-FILHO, 2011). Para fins agrícolas, a perda de produtividade está associada a baixa fertilidade, comprometimento do desenvolvimento de raízes, vulnerabilidade à erosão e baixa retenção de água (NIERO et al., 2010).

A degradação de pastagens pode ser classificada em agrícola ou biológica. A degradação agrícola, típica de regiões com época seca menos intensa, refere-se à redução da capacidade de suporte devido ao aumento da população de plantas daninhas. Dentre as possíveis causas para este cenário, tem-se a falha no estabelecimento da pastagem, contaminação de sementes ou perda de vigor da pastagem devido ao ataque de pragas. Já a degradação biológica diz respeito à incapacidade do solo de sustentar a biomassa, ou a capacidade de sustentar apenas espécies menos exigentes em termos de fertilidade do solo, tendo como principal característica a ocorrência de solo exposto na área. Tal condição deve-se a perturbações de ordem química, física, biológica ou climática, como lixiviação de nutrientes, sobre pastoreio, uso do fogo e

estiagem prolongada. A degradação biológica é mais frequente em regiões áridas e semi áridas (DIAS-FILHO, 2011).

As pastagens no Brasil apresentam diferentes níveis de degradação, distribuindo-se por todas as regiões do país, sobretudo nas áreas de fronteira agrícola (DIAS-FILHO, 2014). Os diferentes níveis de degradação decorrem da suscetibilidade do solo, duração do uso e manejo. Solos de baixa fertilidade, de textura média a grossa, sujeitos ao manejo inadequado e com alto risco de erosão são mais vulneráveis à degradação (ZIMMER et al., 2012; FREITAS et al., 2016).

Dentre as principais causas para a degradação de pastagens destaca-se o excesso de lotação animal, falta de adubação e correção de plantio e manutenção, técnicas impróprias de semeadura e preparo do solo, falhas de estabelecimento da pastagem, espécies inadequadas às condições edafoclimáticas locais, uso do fogo, perda de vigor pela ocorrência de pragas e doenças ou por baixa fertilidade do solo e má drenagem (SPAIN; GUALDRÓN, 1991; PERON; EVANGELISTA, 2004; DIAS-FILHO, 2011; BODDEY et al., 2012; ZIMMER et al., 2012).

Sob outro enfoque, credita-se a degradação ao baixo nível de tecnologia empregado na propriedade, devido à assistência técnica deficiente e baixa capacidade de investimentos por parte dos produtores rurais (NASCIMENTO et al., 2006), além de especulação da terra, posse insegura e falta de crédito de longo prazo (STRASSBURG et al., 2014). Mais do que causas de degradação, tais circunstâncias representam limitações às tecnologias de recuperação de pastagens degradadas (STRASSBURG et al., 2014)

Como a degradação da pastagem afeta diretamente a produção de biomassa e produtividade do rebanho, o produtor tem no monitoramento da capacidade de suporte um recurso prático para identificação de estágios iniciais de degradação e auxílio na tomada de decisão por medidas corretivas. A porcentagem de plantas daninhas e a porcentagem de solo descoberto seriam indicadores secundários (DIAS-FILHO, 2011).

Além de baixa produtividade, as pastagens em condição de degradação associam-se a outras problemáticas por vezes imperceptíveis e distantes do produtor, como as mudanças do clima. A queda da capacidade de suporte a níveis elevados, indício de baixo estoque de carbono no solo, inviabiliza a criação animal, aumentando a pressão sobre novas áreas. A conversão de áreas nativas em agroecossistemas através de desmatamento e queimada altera a dinâmica do carbono pela mudança de uso da terra e, a menos que haja ruptura do paradigma, o ciclo se perpetua.

2.3 Avaliação da qualidade de pastagens

Partindo do pressuposto de que a degradação de pastagens pode ser compreendida como perda da qualidade de solo para manutenção da produtividade agrícola, o diagnóstico da degradação beneficia-se da seleção de indicadores de qualidade do solo como ferramenta fundamental. Além disso, o arcabouço de avaliação da condição de degradação de pastagens também contempla a biomassa. Por denunciar a degradação, seja através de perda de vigor, perda de produtividade ou mesmo através de falhas na cobertura, a avaliação deve contemplar os indicadores acima e abaixo da superfície do solo.

Atributos físicos dizem respeito a condição do solo, os atributos biológicos referem-se à produtividade de biomassa. Entre os físicos, tem-se estrutura do solo, contemplando tamanho e aspecto dos agregados, porosidade e cor; já entre os biológicos tem-se presença de minhocas, coprólitos e cupins, abundância de raízes, composição e vigor da pastagem, presença de espécies invasoras, e ocorrência de solo exposto (SPAIN; GUALDRÓN, 1991; SHEPHERD, 2000; RALISCH et al., 2017). Desta forma, é feita a associação das práticas de manejo e produtividade com a qualidade do solo. (SHEPHERD, 2000).

De forma geral, indicadores de qualidade do solo mostram-se mais sensíveis na camada superficial (primeiros 5 cm), expressando efeitos do pisoteio animal, compactação e aporte de matéria orgânica em sistemas pastoris (LISBÔA et al., 2016). Comparativamente à ambientes naturais, as pastagens apresentam maior alteração estrutural devido à compactação do solo causada pelo pisoteio animal, observa-se assim o aumento da densidade de solo, conversão de macroporos em microporos, e redução da capacidade de água disponível, ainda que haja aumento da retenção de água em maiores potenciais (MELLONI et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2015; LISBÔA et al., 2016).

Quando há manejo de pastejo adequado, respeitando-se períodos de pousio, taxa de lotação, alturas de entrada e saída do pasto, as raízes fasciculadas das gramíneas e mesofauna do solo favorecem a formação de macroporos, intensificação a infiltração de água, permeabilidade e trocas gasosas (OLIVEIRA et al., 2015).

A compactação também compromete o desenvolvimento de raízes, podendo gerar exposição do solo e, em última instância, processos de erosão e perda da camada superficial rica em matéria orgânica do solo (MELLONI et al., 2008; RALISCH et al., 2017). A perda de matéria orgânica do solo (MOS), por sua vez, retroalimenta a degradação uma vez que ela desempenha papel em processos físicos, químicos e biológicos importantes para a produção e sustentação de biomassa forrageira. Ainda que as pastagens ofertem continuamente matéria

orgânica ao solo, pelo aporte de biomassa aérea, radicular ou por exsudatos, a sua composição é pouco diversa, de modo que os processos de estabilização dependem diretamente do manejo da área (CARDOSO et al., 2010). Os compartimentos de MOS demonstram-se sensíveis para diferenciação de ecossistemas naturais, agrícolas e pastagens (CARDOSO et al., 2010; ROCHA JÚNIOR et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015; PASSOS et al., 2015; LISBÔA et al., 2016).

Vale destacar que a degradação agrícola descrita por Dias Filho (2011) pode levar ao aumento da MOS devido a contribuição de compostos recalcitrantes por plantas invasoras, especialmente as de folha larga (DIAS-FILHO, 2011; LISBÔA et al., 2016).

Na tentativa de universalizar o diagnóstico da condição de degradação de pastagens, as avaliações visuais e métodos expeditos, ou de campo, ou de fácil execução, apresentam-se como avaliação complementar que facilitam o acesso a informação pelos produtores e técnicos *in loco* (LISBÔA et al., 2016). Tais avaliações dispensam equipamentos sofisticados e profundos conhecimentos técnicos, facilitando a transferência de tecnologia, monitoramento de práticas e definição de estratégias de recuperação (RALISCH et al., 2017).

Ainda que sujeitos a subjetividade, os métodos expeditos geram resultados simples de serem interpretados com razoável confiabilidade (SHEPHERD, 2000; MELLONI et al., 2008). Para tanto, deve-se buscar a padronização a fim de se reduzir a variabilidade inerente à área, admitindo glebas homogêneas, número de repetições compatível com a área amostrada, e época de avaliação. Em pastagens, glebas homogêneas significam mesmo histórico de uso, manejo, espécie forrageira, posição no relevo, tipo de solo. E a época de avaliação condiz com a aquela em que a pastagem já está estabelecida na área, com raízes bem formadas, e em condição de solo friável (SHEPHERD, 2000; RALISCH et al., 2017).

Com base nestas considerações, Spain e Gualdrón (1991) propõem 6 níveis de degradação avaliados visualmente no campo (Tabela 1), onde há perda gradativa de produtividade de biomassa à medida que novos sintomas de degradação são somados ao cenário. Nota-se que os estágios iniciais de degradação, onde a principal característica refere-se a perda de vigor da forrageira e início da mudança da composição botânica, são sucedidos pela degradação agrícola e biológica descritas por Dias Filho (2011). A pastagem nutricionalmente enfraquecida cede lugar a plantas invasoras e torna-se mais vulnerável ao ataque de pragas. E, uma vez que há prejuízo das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, nota-se maior ocorrência de solo exposto e erosão.

Tabela 1: Parâmetros de referência da avaliação visual do estágio de degradação do pasto.

Estágio de degradação	Parâmetros de referência	Perda de produtividade (%)	Nível de deterioração
1	Vigor e qualidade	< 25	Leve
2	Estágio anterior + pouca população	25 a 50	Moderado
3	Estágio anterior + plantas invasoras	50 a 75	Forte
4	Estágio anterior + formigas e cupins	> 75	Muito forte
5	Estágio anterior + solo exposto	> 75	Muito forte
6	Estágio anterior + erosão	> 75	Muito forte

Fonte: Spain e Gualdron (1991)

Alguns estudos, porém, verificaram que a classificação visual pode ser insuficiente para distinguir os níveis de degradação, sendo indicado o levantamento da cobertura vegetal (ROCHA JÚNIOR et al., 2014; LISBÔA et al., 2016). Por isso, a ocorrência de solo exposto e a predominância de forrageira demonstram ser os indicadores mais assertivos que configuram evolução do processo de degradação (PASSOS et al., 2015; LISBÔA et al., 2016).

A perda de cobertura vegetal e erosão do solo estão associados aos níveis de degradação mais severos por representarem impactos ambientais mais intensos tanto *on-site* quanto *off-site* (LAL, 2014). Em regiões com ciclos de chuva intensos e geomorfologia acidentada, o destacamento e transporte de partículas de solo é intensificado, levando a maior perda de massa de solo (SPAIN; GUALDRÓN, 1991; GUERRA, 2014). Nestes casos, a sustentabilidade ambiental e produtiva é altamente dependente de práticas adequadas de manejo e conservação do solo e da água.

Os impactos ambientais no local de erosão referem-se ao declínio da qualidade do solo, com perda da profundidade do solo, principalmente do horizonte superficial onde encontram-se maiores níveis de matéria orgânica e nutrientes, perda de carbono orgânico, silte, argila, e redução da capacidade de água disponível (LAL, 2014; PASSOS et al., 2015). Já no local onde ocorre a deposição de partículas de solo, os impactos podem se estender pela qualidade do solo, água e ar, através do soterramento de solo superficial, assoreamento de corpos hídricos, eutrofização, emissão de gases atmosféricos (LAL, 2014).

A topografia influi sobre atributos do solo e cobertura vegetal, já que o relevo acidentado intensifica o processo de degradação, refletindo na relação solo-planta. O aumento da declividade acentua a perda de solo levando à perda de MOS, perda de partículas finas, alteração de temperatura e umidade do solo (PASSOS et al., 2015).

A redistribuição de nutrientes e do carbono orgânico na paisagem expõe a matéria orgânica à oxidação e reduz o seu compartimento estável no solo. Tal condição gera desequilíbrio nos ciclos biogeoquímicos, principalmente do carbono e da água, levando à emissão de gases de efeito estufa (LAL, 1993, 2014; DORAN et al., 1996).

Desta forma, práticas conservacionistas protegem o solo contra degradação, mantendo ou melhorando sua qualidade, garantindo produtividade sustentável e prevenindo processos erosivos que podem gerar impactos ambientais em escala regional. Mas não só o manejo e conservação do solo é suficiente. Conhecer a aptidão agrícola e avaliar a capacidade de uso do solo permite planejamento racional dos recursos, evitando problemas futuros (ROCHA JÚNIOR et al., 2014)

Diante da subjetividade que as avaliações visuais estão sujeitas, a complementação da avaliação com amostragem de solo e análises em laboratório de atributos confere maior confiabilidade no diagnóstico e eficácia na diferenciação dos níveis de degradação (LISBÔA et al., 2016).

2.4 Indicadores de qualidade do solo

Os indicadores de qualidade do solo têm como função mensurar a qualidade do solo segundo atributos físicos, químicos e biológicos sensíveis ao manejo e clima (DORAN et al., 1996). Além disso, é desejável que sejam de fácil obtenção em campo, fácil determinação, de baixo custo e adequados a especificidade de cada região (LISBÔA et al., 2016). Indicadores que dependem de métodos laboratoriais, por exemplo, são mais exatos, porém são mais onerosos para determinação em larga escala, dificultando o acesso de pequenos produtores rurais (NIERO et al., 2010).

A avaliação quantitativa de indicadores de qualidade permite comparação, monitoramento e definição de limiares de degradação. É um equívoco pensar em valor fixo de referência para o indicador/atributo, uma vez que a condição de degradação está associada a fatores locais (clima, topografia, classe de solo) e a fatores de cultivo (cultura e manejo). Desta forma, a avaliação é pautada por uma faixa de valores produzidos a partir de estudos anteriores condizentes como contexto de investigação (DORAN et al., 1996).

Assim como não existe valores de referência da qualidade de solo, não existe um conjunto padrão de indicadores para a avaliação da qualidade de solo. A seleção dos indicadores deve estar alinhada ao que se deseja investigar. Ou seja, dentre as múltiplas funções do solo, quais são aquelas que o solo deve melhor desempenhar considerando o propósito da avaliação.

Tratando-se de uma avaliação da qualidade de solo para verificar contribuições à produção agrícola, ou a ciclos biogeoquímicos, ou à mudança do clima, ou à suscetibilidade à erosão, ou à qualidade de recursos hídricos (...) haverá diferentes pacotes de indicadores mais recomendados para a investigação (DORAN et al., 1996).

Traduzir a sustentabilidade de um agroecossistema por meio de atributos do solo é tarefa complexa dada às interações de processos físicos, químicos e biológicos, com sazonalidade, manejo e classe de solo. A análise estatística, portanto, assume papel para ordenar, discriminar e correlacionar situações a partir da análise de variáveis resposta, neste caso, atributos do solo (MELLONI et al., 2008)

De forma geral, os indicadores físicos relacionam-se à estabilidade e resistência do solo a processos erosivos, ao transporte e armazenamento de fluidos (DORAN et al., 1996; REYNOLDS et al., 2002; LAL, 2014). Os atributos físicos do solo se dividem em mecânicos, hidrológicos e zona de enraizamento. Entre os atributos mecânicos, tem-se textura, densidade, estabilidade de agregados e porosidade; dentre os hidrológicos, capacidade de água disponível, taxa de infiltração e condutividade hidráulica; e por fim, a zona de enraizamento refere-se à profundidade de raízes e temperatura do solo, além da resistência à penetração (LISBÔA et al., 2016).

Os indicadores químicos, por sua vez, estão associados à fertilidade, reserva e lixiviação de nutrientes, tendo como atributos frequentes o pH, capacidade de troca de cátion (T), soma (S) e saturação de bases (V), acidez total, macro e micronutrientes, e frações da matéria orgânica do solo (MOS), ainda que este último possa estar associado aos indicadores biológicos por guardar estreita relação com a atividade microbiana (DORAN et al., 1996; LAL, 2014). Além da deposição de biomassa, a diversidade na composição de matéria orgânica determina se haverá predominância de processos de estabilização ou decomposição da matéria orgânica, refletindo em acúmulo de carbono no solo ou emissão via oxidação.

Por fim, os indicadores biológicos correspondem à atividade biológica do solo traduzida pelos atributos biomassa aérea e radicular, taxa de respiração, atividade enzimática, diversidade de organismos, biomassa microbiana (DORAN et al., 1996; LAL, 2014). O desempenho microbiano é altamente dependente de condições de umidade e temperatura do solo, de modo que a época de amostragem deve considerar fatores ambientais além daqueles relacionados ao cultivo e manejo (CARDOSO et al., 2010).

2.5 Qualidade do solo e serviços ecossistêmicos

Apesar da perda de carbono e da emissão de gases de efeito estufa serem processos naturais inerentes aos ciclos biogeoquímicos, a interferência antrópica mediante mudança de uso da terra é capaz de alterar o equilíbrio natural dos ecossistemas (COUTINHO et al., 2010; CONANT, 2011). O balanço de carbono no solo e, portanto, o acúmulo do elemento depende de taxas de deposição e decomposição de resíduos, influenciadas por condições edafoclimáticas, mudança de uso da terra e manejo (BODDEY et al., 2012).

A conversão de ecossistemas naturais para agroecossistemas pressupõe imediata perda de carbono do solo devido à remoção da biomassa original e exposição do solo a processos erosivos. Felizmente, a depender da aptidão agrícola e manejo da área durante o período produtivo, o acúmulo de carbono no solo pode ser restaurado mediante a captura de CO_2 pela fotossíntese e estabilização da matéria orgânica através da humificação (LIMA et al., 2008; COUTINHO et al., 2010; CONANT, 2011; BODDEY et al., 2012; HENDERSON et al., 2015).

Práticas de manejo e conservação do solo em ambientes agrícolas contribuem para serviços ecossistêmicos relacionados ao solo, água, biodiversidade e mudanças climáticas, trazendo benefícios econômicos, agronômicos e ambientais que visam acúmulo de carbono no solo (NASCIMENTO et al., 2006; CONANT, 2011; HENDERSON et al., 2015).

Seja em cultivos florestais, culturas agrícolas ou em pastagens, solos bem manejados possuem estrutura física e conteúdo de matéria orgânica tal que favorecem a infiltração e armazenamento de água, trocas gasosas e ciclagem de nutrientes. Como resultado, atuam como meio filtrante para recarga de aquíferos, contribuem para transmissão da água em seus diferentes compartimentos no ciclo hidrológico, sustentam a biomassa produtora e os níveis tróficos subsequentes, mitigam as mudanças climáticas pelo sequestro e estabilização do carbono, fortalecem ciclos biogeoquímicos, e contribuem para a própria resiliência frente a distúrbios naturais ou antrópicos, restaurando condições necessárias para manutenção dos serviços ecossistêmicos. (LAL, 2014).

Em pastagens, práticas como semeadura de leguminosas, fertilização e cultivos de espécies forrageiras mais produtivas, manutenção da altura de pasto, sistema de pastejo rotacionado e respeito à taxa de lotação favorecem o aumento do estoque de carbono no solo, e a melhoria da capacidade de suporte (HENDERSON et al., 2015). Em decorrência disso, nota-se aumento da produção de forragem, aumento da fração orgânica do solo, melhoria da fertilidade de solo, melhoria da estrutura do solo, com maior resistência a erosão, e maior

capacidade de armazenamento de água (BODDEY et al., 2012; MAPA, 2012; HENDERSON et al., 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende propriedades rurais do Distrito de Barão de Juparanã, município de Valença-RJ, incluindo propriedades particulares e o Campo Experimental Santa Mônica (CESM), pertencente à Embrapa Gado de Leite.

A geomorfologia da região é conhecida como “Mar de Morros” e caracteriza-se pelo predomínio de relevo fortemente ondulado (20 a 45% de declive) alternando-se com montanhoso (45 a 75% de declive). Já o sistema de relevo do distrito de Barão de Juparanã é caracterizado pelo predomínio de colinas dissecadas, morrotes e morros baixos. As colinas dissecadas são descritas por condição de vertentes côncavas ou convexas, e com topos arredondados ou alongados, enquanto que os morrotes e morros baixos possuem encostas retilíneas ou côncavas. (DANTAS, 2000; SANTOS et al., 2010).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen (1938), foi identificado como Cwa, clima típico da região sudeste do Brasil, caracterizado pelo inverno seco e verão chuvoso (ALVARES et al., 2013).

A partir de avaliação visual do perfil de solo, a classe de solo foi identificada como Cambissolo. Com base no mapa de solos, foi possível retificar o primeiro nível categórico, e inferir que o solo em questão pode tratar-se de um Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CARVALHO FILHO; LUMBRERAS; SANTOS, 2000).

Os Cambissolos Háplicos Tb Distróficos caracterizam-se como “solos com argila de baixa atividade e baixa saturação por bases ($V < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B”. Além disso, por definição, são solos com horizonte B incipiente e intemperismo atuante, porém não tão intenso (pouco intemperizados). Como o próprio nome sugere, trata-se de um horizonte em transição e, portanto, é bastante variável conforme o grau de evolução da pedogênese. São solos pouco profundos, com translocação de argila, remoção de carbonatos e predomínio de minerais primários (SANTOS, 2013). No Rio de Janeiro, os Cambissolos são dominantes nas regiões serranas do estado, apresentam boa drenagem e elevados teores de alumínio trocável (Al^{3+}) (ANTONELLO et al., 2002).

A partir da exposição de características geológica, geomorfológica e de solo da região de Barão de Juparanã é possível inferir que a mineralogia encontrada nos estudos de Antonello et al. (2002) e Santos et al. (2010) se assemelha à mineralogia do campo experimental da pesquisa, ainda que sejam estudos desenvolvidos em outras localidades.

Em levantamento das principais classes de solo do estado fluminense, os cambissolos háplicos foram descritos segundo grandes quantidades de caulinita e gibbsita, e baixa relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (K_i), indicando perda de silício no perfil do solo (dessilicação) (ANTONELLO et al., 2002). Solos ricos em caulinita possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e são pouco expansivos devido à baixa reatividade do argilomineral. Para fins agrícolas, a baixa CTC é um fator limitante à produção, podendo ser corrigida com calagem e adubação periódicas.

3.2 Avaliação preliminar dos níveis de degradação

A classificação preliminar dos níveis de degradação foi feita a partir de avaliação visual das pastagens locais, segundo adaptação dos critérios propostos por Spain e Gualdrón (1991). Diferentemente dos autores, o nível de degradação mais brando foi o que se observa predominância de cobertura forrageira, e o pior nível considerado foi aquele em que se observa maior ocorrência de solo exposto, com nenhum ou poucos indícios de erosão do tipo laminar ou em sulcos.

Desta maneira, foram identificados 4 níveis de degradação (tratamentos), sendo selecionadas 3 áreas (repetições) para cada nível, conforme Figuras 33 a 36 no Apêndice A. Os tratamentos, portanto, consistiram em: Nível 1 - degradação leve, com predomínio da forrageira (Figura 5 a); Nível 2 - degradação moderada, com ocorrência de plantas invasoras (Figura 5 b); Nível 3 - degradação forte, com ocorrência de plantas invasoras e solo exposto (Figura 5 c); e Nível 4 - degradação muito forte (Figura 5 d), com predomínio do solo exposto.

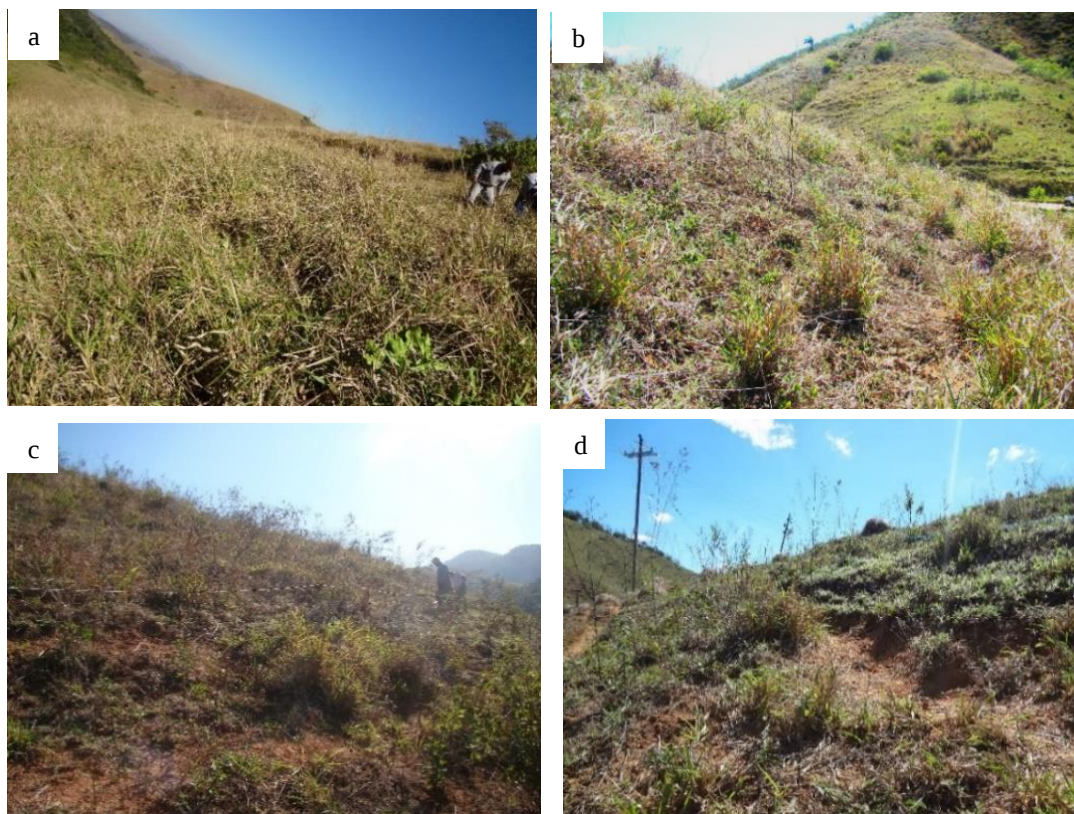


Figura 5: Níveis de degradação. a) N1-leve; b) N2-moderado; c) N3-forte; d) N4-muito forte.

Para determinar a localização espacial foram coletadas coordenadas centrais de cada parcela experimental, descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Coordenadas geográficas do ponto central das unidades experimentais de acordo com o nível de degradação das pastagens.

Tratamento	Unidade experimental	Propriedade	Longitude	Latitude
N1	A1	CESM ¹	43°42'49.47"O	22°20'38.50"S
	A2	CESM	43°42'46.38"O	22°20'40.36"S
	A3	CESM	43°42'57.69"O	22°20'56.93"S
N2	A1	CESM	43°42'6.52"O	22°21'56.94"S
	A2	CESM	43°42'17.82"O	22°22'10.95"S
	A3	CESM	43°41'54.25"O	22°21'22.54"S
N3	A1	CESM	43°42'36.77"O	22°20'50.98"S
	A2	CESM	43°42'34.26"O	22°20'50.93"S
	A3	CESM	43°42'47.55"O	22°20'53.67"S

Tratamento	Unidade experimental	Propriedade	Longitude	Latitude
N4	A1	Sr Rosalvo	43°40'15.98"O	22°19'2.96"S
	A2	Sr Rosalvo	43°40'10.18"O	22°18'59.53"S
	A3	Sr Fernando	43°42'50.83"O	22°17'51.01"S

Notas: ¹ CESM - Campo Experimental Santa Mônica.

A fim de uniformizar as unidades experimentais, padronizou-se a classe de solo (Cambissolo), a posição na encosta (terço médio), orientação solar (noroeste) e a forrageira (*Brachiaria decumbens* cv. *Basilisk* ou *Brachiaria brizantha* cv. *Marandu*). O histórico de uso da terra na região segue a cronosequência vegetação nativa, cafeeicultura e pastagem.

Informações adicionais sobre o manejo da pastagem, sistema de pastejo e época de formação do pasto estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3: Manejo da pastagem, sistema de pastejo e época de formação do pasto nas unidades experimentais.

Áreas	Formação da pastagem	Taxa de lotação	Manejo da pastagem	Sistema de pastejo
CESM ¹	Final do século XIX.	0,8 UA/ha, desde 2015.	Sem adubação; sem calagem; sem irrigação.	Sistema de pastoreio rotacionado semi-intensivo.
Propriedade Sr Rosalvo de Lima Costa	s.i. ²	1 UA/ha	Sem adubação; sem calagem; sem irrigação; altura do capim ao nível do solo (superpastoreio). ³ na época seca.	Sistema de pastoreio extensivo, com algumas divisórias na pastagem. ⁴
Propriedade Sr Fernando Tejerina	s.i.	1 UA/ha	Sem adubação; sem calagem; sem irrigação. ³	

Notas: ¹ CESM - Campo Experimental Santa Mônica.

² s.i. - sem informação.

³ O fogo não é utilizado como manejo da pastagem, porém ocorre pela proximidade do pasto com a rodovia.

⁴ Apesar das divisórias nas áreas de pastagens, não configura o sistema de pastejo rotacionado.

3.3 Avaliações de campo

3.3.1 Taxa de cobertura

Foi avaliada a taxa de cobertura do solo pela vegetação segundo o Método da Corda, uma adaptação do Método da Trena proposto por Rocha Júnior (2012) onde substituiu-se a trena por uma corda de *nylon* de 50 m de comprimento, marcada metro a metro com fita isolante branca, e a cada 10 metros fita amarela. O procedimento consistiu na varredura de 500 m² da área, classificando metro a metro a cobertura do solo em forrageira (Figura 6 a), planta infestante de folha larga (Figura 6 b), planta infestante de folha estreita (Figura 6 c) e solo exposto (Figura 6 d). Foram feitas as descrições de cobertura do solo na posição das fitas conforme percorria-se a extensão da corda. Finalizadas as 50 leituras, deslocava-se a corda em 1 metro a cima no terreno, recomeçando as descrições metro a metro. Ao final da varredura, a corda havia sido deslocada 10 vezes na encosta do morro, de modo que foram lidos 500 pontos de cobertura do solo na área.

A avaliação da cobertura do solo foi feita tanto na época seca (agosto e outubro de 2017) quando na época chuvosa (fevereiro de 2018).

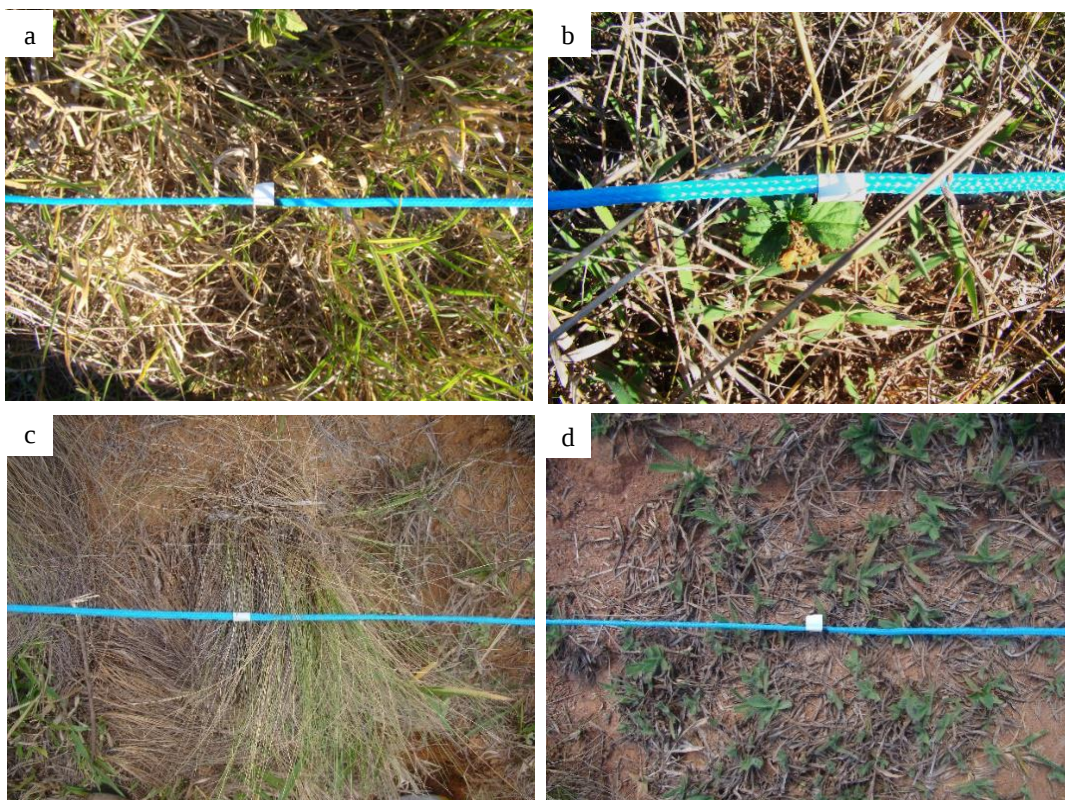


Figura 6: Critérios de avaliação da cobertura de solo pela vegetação segundo Método da Corda adaptado de Rocha Júnior (2012). a) Forrageira; b) planta infestante de folha larga; c) planta infestante de folha estreita; d) solo exposto.

3.3.2 Qualidade estrutural do solo

Para a avaliação da estrutura do solo, foram abertas mini trincheiras para coleta de amostras para o Diagnóstico Rápido de Estrutura do Solo (DRES) (RALISCH et al., 2017). Foram coletados 3 monólitos em cada unidade experimental na época seca, priorizando que fossem localizados na cota 5 da área de levantamento da cobertura do solo, nos metros 5, 25 e 45 (Figura 7). Havendo cupinzeiros, trilhas de animais ou evidências de erosão, as coletas eram deslocadas para pontos diretamente acima ou abaixo da cota preferencial (RALISCH et al., 2017).

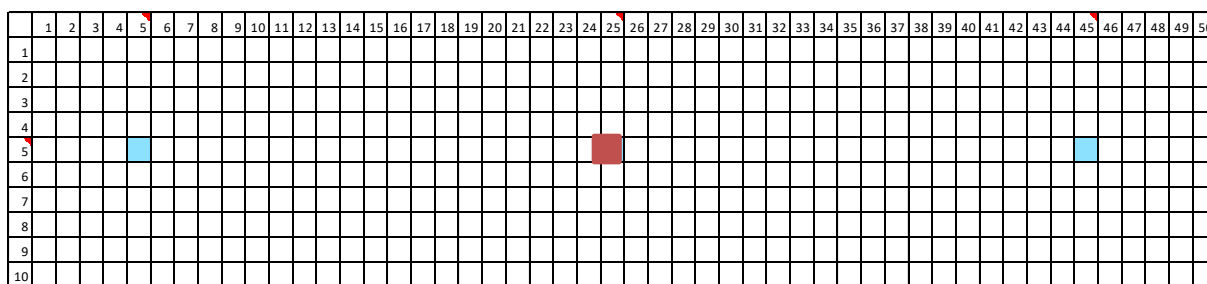


Figura 7: Representação da unidade experimental, com malha de avaliação da taxa de cobertura do solo pela vegetação, localização das mini trincheiras para coleta de amostras e monólitos de solo, e destaque do ponto central a partir do qual foram registradas as coordenadas geográficas.

Uma vez definido o local de coleta, procedeu-se a limpeza da superfície do solo, com cuidado a fim de preservar as raízes na matriz do solo (Figura 8 a). As trincheiras foram abertas com dimensões tais que permitam a coleta de monólitos de 10 cm de espessura, 20 cm de largura, 25 cm de profundidade (Figura 8 b). O bloco foi trabalhado manualmente de modo a fragmentá-lo em partes menores até obter os agregados do solo. É recomendado cuidado ao abrir a amostra para os lados, de modo a preservar as camadas de solo e permitir a sua diferenciação (Figura 8 c). A separação das camadas de solo foi feita considerando-se similaridade de tamanho dos agregados, cor do solo (presença de matéria orgânica) e abundância de raízes (Figura 8 d). Conforme recomendado pela literatura, a espessura mínima para diferenciação de camadas foi de 5 cm. Uma vez identificadas, procedeu-se a avaliação visual da estrutura do solo, atribuindo nota às camadas que compõem a amostra (RALISCH et al., 2017).

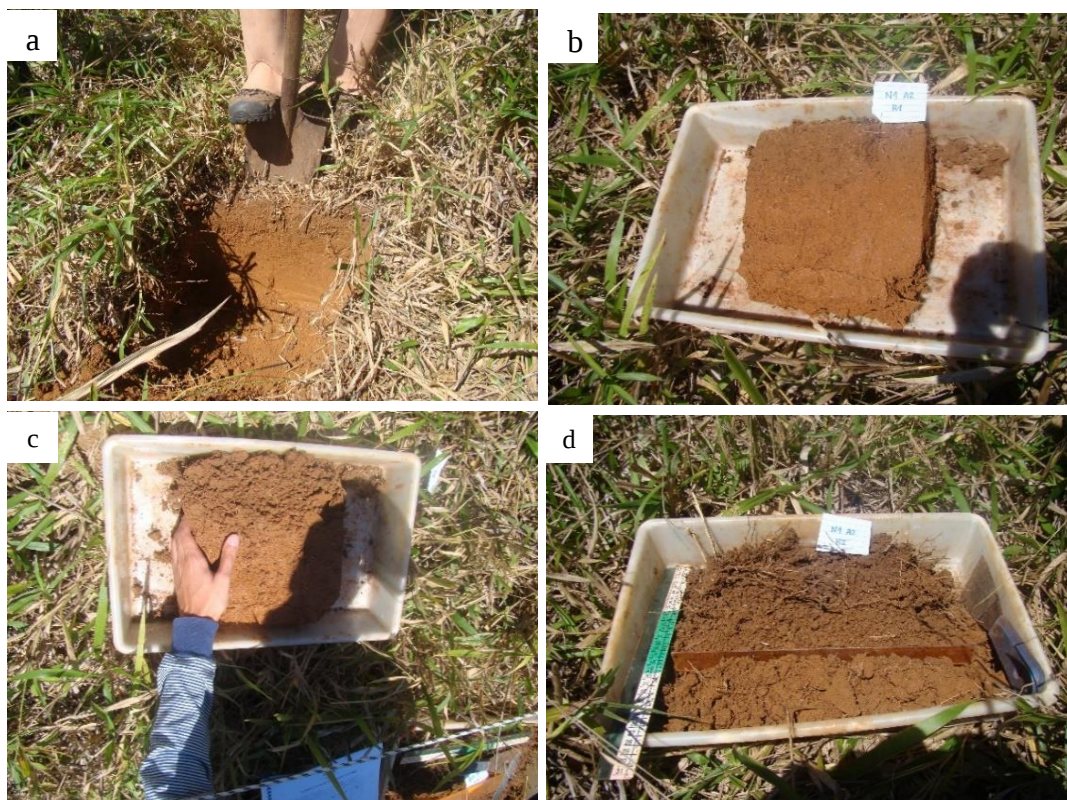


Figura 8: Etapas de coleta do monólito para avaliação da estrutura pelo método DRES (RALISCH et al., 2017). a) Abertura da mini trincheira; b) Monólito com dimensões pré estabelecidas; c) Manipulação da amostra; d) Separação de camadas.

Desta forma, atribuiu-se nota de 1 a 6 para cada camada considerando os critérios estabelecidos por Ralisch et al. (2017) e expostos na (Figura 9). A nota máxima indica a estrutura de solo mais desejável ao cultivo, predominando agregados entre 1 e 4 cm e evidências de conservação, como bom desenvolvimento de raízes e alta atividade biológica. Já a nota mínima indica estrutura com sinais de degradação, quer seja por compactação ou pulverização. O prejuízo da estrutura do solo é sinalizado pelo predomínio de agregados muito grandes (maiores que 7 cm) ou muito pequenos (menores que 1 cm), dificuldade de desenvolvimento das raízes, raízes achatadas e baixa atividade biológica.

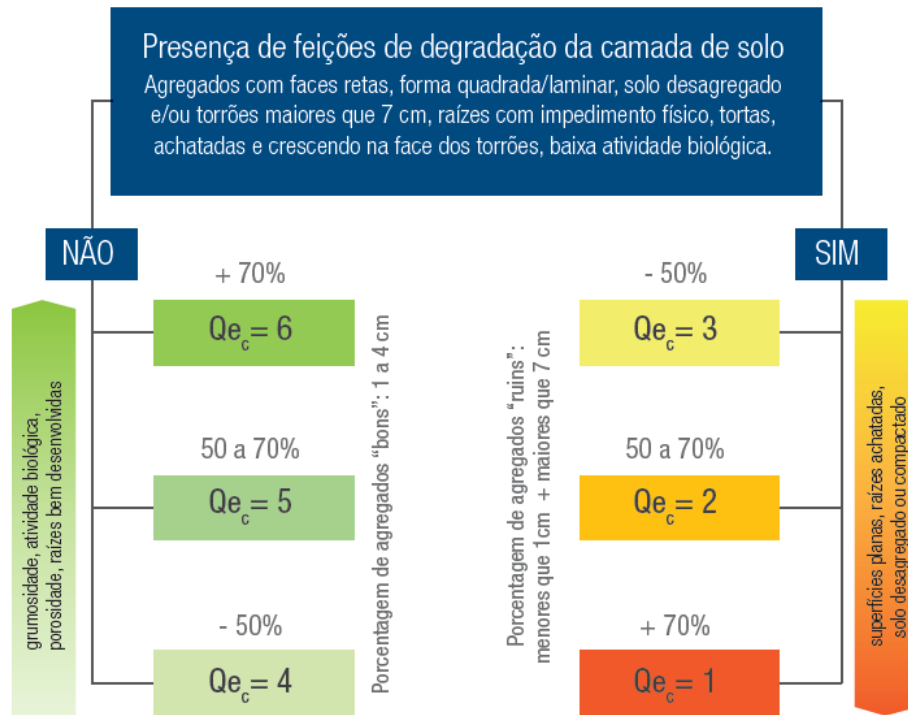


Figura 9: Esquematização dos critérios de avaliação e notas de qualidade estrutural da camada (Q_{ec}).

Fonte: Ralisch et al. (2017).

O índice de qualidade de estrutura da amostra (IQEA), portanto, refere-se à nota da amostra, e foi calculado por meio de uma média ponderada, considerando a nota da camada (Q_{ec}) e sua respectiva espessura (Equação 1). Já o índice de qualidade de estrutura do solo (IQES) foi calculado pela média aritmética das notas das amostras de solo da área (Equação 2).

$$IQEA = \frac{(E_{c1} \times Q_{ec1}) + (E_{c2} \times Q_{ec2}) + (E_{c3} \times Q_{ec3})}{E_{c1} + E_{c2} + E_{c3}} \quad (1)$$

Onde: $IQEA$ = Índice de Qualidade de Estrutura da Amostra;

E_c = Espessura da camada;

Q_{ec} = nota de qualidade estrutural da camada.

$$IQES = \frac{IQEA_1 + IQEA_2 + \dots + IQEA_n}{n} \quad (2)$$

Onde: $IQES$ = Índice de Qualidade de Estrutura do Solo;

IQEA = Índice de Qualidade de Estrutura da Amostra.

3.3.3 Profundidade de raízes e espessura do horizonte A

Nas mesmas mini trincheiras, foram medidas a profundidade de raízes e a espessura do horizonte A utilizando uma fita métrica, conforme Figura 10 (SANTOS et al., 2015)



Figura 10: Medição da profundidade de raízes e espessura do horizonte A em mini trincheira.

3.3.4 Declividade das encostas

Ainda em campo, foi medida a declividade dos morros onde se situavam as unidades experimentais com auxílio de um clinômetro (Figura 11).



Figura 11: Clinômetro utilizado na medição da declividade da encosta dos morros.

3.4 Análises laboratoriais

A amostragem de solo nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm foi realizada na época seca (agosto e outubro de 2017) em cada mini trincheira das unidades experimentais. Sendo assim,

foram coletadas 72 amostras de solo para avaliação de atributos físicos e atributos químicos seguindo metodologia utilizada na Embrapa Solos.

Dentre os atributos físicos, foram avaliados a textura, a densidade do solo, a densidade de partículas, a porosidade total, a microporosidade, a macroporosidade (TEIXEIRA et al., 2017) e a agregação do solo (adaptado de SALTON et al., 2012). A partir da análise de agregação foi possível calcular o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) (FERREIRA, 2016). Dos atributos físicos, a textura e densidade de partículas foram utilizados apenas para caracterização dos solos, e não objetivaram diferenciar os níveis de degradação.

Para caracterização química, foram determinados pH em água, pH em KCl, concentração de íons $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, K^+ , Na^+ , acidez trocável ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), Al^{3+} e C (TEIXEIRA et al., 2017). A partir do complexo sortivo do solo, foram calculados também os índices de fertilidade do solo. Devido a amostragem do solo realizada em campo, os atributos químicos foram utilizados apenas para caracterização dos solos, e também não objetivaram diferenciar os níveis de degradação.

Para a análise da matéria orgânica do solo foi realizado o fracionamento da matéria orgânica leve (MOL) em água (adaptado de BAILLIE; ANDERSON; INGRAM, 1990).

3.4.1 Análises físicas

A textura foi determinada pelo método densimétrico conforme estabelecido por Teixeira et al. (2017), sendo a classificação textural realizada considerando o diagrama simplificado de Santos et al. (2013).

A avaliação da densidade do solo pressupõe coleta de amostra indeformada com anel volumétrico de 100 cm³, utilizando-se martelo e “castelinho”. Em laboratório, as amostras foram deformadas, transferidas para latas metálicas de peso conhecido e levadas para a estufa a 105 °C até que a massa se estabilizasse, em aproximadamente 2 ou 3 dias, procedendo-se o cálculo da densidade conforme Equação 3. (TEIXEIRA et al., 2017)

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (3)$$

Onde: D_s = densidade de solo (kg dm⁻³ ou g cm⁻³);

m_a = massa de solo seco (g);

V = volume do anel volumétrico (cm³).

O objetivo da análise de densidade de partículas consiste em conhecer a densidade de partículas sólidas do solo, tanto minerais quanto orgânicas, desconsiderando-se os espaços vazios da massa. Desta forma, foi determinado o volume de partículas ocupado por uma massa conhecida e, para tanto, utiliza-se um balão volumétrico de 50 ml, procedendo os cálculos conforme Equação 4 (TEIXEIRA et al., 2017).

$$D_p = \frac{m_a}{V_t - V_u} \quad (4)$$

Onde: D_p = densidade de partículas (kg dm⁻³ ou g cm⁻³);

m_a = massa de solo seco (g);

V_t = volume do balão volumétrico (ml);

V_u = volume necessário para completar o balão com a amostra (ml).

O procedimento consistiu em ocupar parte do balão com uma massa de solo conhecida e preencher o volume gradativamente com álcool etílico. A sequência de passos consistiu em destorroar a amostra de solo com um rolo de modo a desfazer os agregados, passar o conteúdo numa peneira de malha 2 mm, e levar o material para secagem em estufa a 105 °C até que a massa estivesse estável, em aproximadamente 2 ou 3 dias. Quando fria e seca, fez-se a pesagem de 20 g de amostra, transferindo-a para um balão volumétrico de 50 ml com auxílio de funil. Utilizando uma bureta, procedeu-se o preenchimento gradual do balão volumétrico, agitando sempre que necessário de forma a assentar as partículas de solo e evitar a ocorrência de bolhas de ar na amostra. Estando os poros totalmente preenchidos pelo líquido, completou-se o volume do balão atentando-se para o menisco. A diferença entre o volume do balão e o volume necessário para completa-lo corresponde, portanto, ao volume das partículas de solo em seu interior (TEIXEIRA et al., 2017).

A porosidade total refere-se ao volume de espaços vazios em uma amostra de solo, podendo ser ocupados com água ou ar. A porosidade total foi obtida pelo método direto através da saturação do cilindro, onde considera-se que todos os poros são preenchidos por água na condição de saturação, conforme Equação 5 (TEIXEIRA et al., 2017):

$$P_t = \frac{a - b - c}{V} \quad (5)$$

Onde: P_t = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

a = massa do conjunto cilindro-pano-elástico-solo-água em condição de saturação (g);

b = massa do conjunto cilindro-pano-solo seca após estufa à 105 °C (g);

c = massa do elástico (g);

V = volume do anel volumétrico (cm^3).

Para avaliação da microporosidade parte-se do princípio que o volume de microporos corresponde ao volume de água retido, em amostra indeformada e previamente saturada, aplicando-se tensão de -6 kPa ou 60 cm de coluna d'água (TEIXEIRA et al., 2017).

O procedimento experimental consiste em coletar amostras de solo indeformadas no campo, isto é, com auxílio de anel volumétrico, saturar as amostras com água destilada e, preferencialmente, desaerada, cuidando para evitar o crescimento de fungos. O controle de fungos consiste em gotejar lisofórmio sobre as amostras, ou dissolver sulfato de cobre em água (TEIXEIRA et al., 2017).

Uma vez saturadas, as amostras são dispostas em mesa de tensão de modo que haja total contato entre amostra e o leito. Ajusta-se a tensão para -6 kPa e, nos dias que se seguem, faz-se monitoramento do volume de água drenado, até que o nível d'água no coletor se estabilize, indicando que a drenagem cessou. Neste momento, as amostras são pesadas e levadas para estufa a 105 °C durante 3 dias, a fim de obter a massa seca ao final da análise (TEIXEIRA et al., 2017).

A microporosidade portanto, corresponde ao conteúdo gravimétrico de água no solo à tensão de -6 kPa, sendo calculada pela Equação 6.

$$M_i = \frac{p_{as} - m_s}{V} \quad (6)$$

Onde: M_i = microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

p_{as} = massa de solo e água após mesa de tensão (g);

m_s = massa de solo seca após estufa à 105 °C(g);

V = volume do cilindro (cm^3).

Já a macroporosidade é dada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade conforme Equação 7 (TEIXEIRA et al., 2017).

$$M_a = P_t - M_i \quad (7)$$

Onde: M_a = macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

P_t = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

M_i = microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

O procedimento para avaliação do grau de agregação do solo consiste em coleta de torrão no campo, embalando-o de modo a preservar sua estrutura. No laboratório, o torrão é trabalhado manualmente a fim de fragmentá-lo em partes menores, sempre buscando a ruptura em superfícies de fraqueza e descartando faces planas geradas durante a coleta, pedras, cascalhos e material vegetal. Em seguida, deve-se passar a amostra na peneira de malha 9,52 mm, rejeitando o material retido. De posse da fração menor que 9,52 mm, deve-se quartear a amostra até obter 50 g para o tamisamento via úmida (SALTON et al., 2012). Coleta-se também uma massa de solo para determinação de umidade em estufa (105°C , 48 h), a fim de calcular o fator f de umidade (TEIXEIRA et al., 2017) e corrigir a massa de solo seco (CESÁRIO et al., 2010).

Os 50 g de solo são dispostos em papel filtro para umedecimento via capilaridade durante 2 h, adaptado de Salton et al. (2012). Uma vez úmida, a amostra é uniformemente disposta na peneira mais alta do conjunto de peneiras, que compreende as malhas 4 mm – 2 mm – 1 mm – 0,5 mm – 0,25 mm – 0,105 mm – 0,053 mm. O nível de água do tanque deve encobrir a amostra no nível mais alto da oscilação. As amostras são agitadas verticalmente por 15 min, a 42 oscilações por min. Por fim, retira-se as amostras de cada peneira com o pissete, despejando-as em placas de petri a serem conduzidas à estufa (60°C , 4 dias), adaptado de Salton et al. (2012).

O cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG) é dado pela Equação 8 e Equação 9, respectivamente (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998):

$$DMP = \sum \frac{w_i}{w_t} \times x_i \quad (8)$$

Onde: DMP = Diâmetro Médio Ponderado (mm);

w_i = massa retida na peneira i (g);

w_t = massa de amostra usada no tamisamento (g);

x_i = diâmetro médio da peneira (mm).

$$DMG = \exp \left[\sum \left(\frac{w_i}{w_t} \times \ln x_i \right) \right] \quad (9)$$

Onde: DMG = Diâmetro Médio Geométrico (mm).

w_i = massa retida na peneira i (g);

w_t = massa de amostra usada no tamisamento (g);

x_i = diâmetro médio da peneira (mm).

3.4.2 Análises químicas

A acidez ativa do solo refere-se ao pH do solo em meio aquoso ou em solução de KCl a 1 mol.l⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017).

Os íons Ca²⁺ + Mg²⁺ e Al³⁺ são determinados com auxílio de solução extratora KCl a 1 mol.l⁻¹, sendo que a determinação do Al³⁺ envolve ainda solução de NaOH, enquanto que a determinação de Ca²⁺ + Mg²⁺ trocáveis requer indicadores negro de eriocromo e murexida ou calcon. Já a determinação do Na⁺ e K⁺ é feita com solução extratora Mehlich-1 e espectrofotometria de chama (TEIXEIRA et al., 2017).

A acidez trocável (H⁺+Al³⁺) refere-se ao tamponamento de acidez do solo, sendo importante para estimar a CTC do solo a pH neutro. Para tanto, utiliza-se o extrator acetato de cálcio a pH 7,0 e solução de NaOH (TEIXEIRA et al., 2017).

Conhecendo os teores de cátions trocáveis e acidez potencial é possível calcular a soma de bases trocáveis (Equação 10), CTC efetiva (Equação 11), CTC total (Equação 12), saturação por alumínio (Equação 13) e saturação por bases (Equação 14), sendo este último importante na caracterização de solos eutróficos e distróficos (TEIXEIRA et al., 2017).

$$\text{Valor S} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+} \quad (10)$$

Onde: Valor S = soma de bases trocáveis (cmol_c kg⁻¹).

$$CTC_{\text{efetiva}} = \text{Valor S} + Al^{3+} \quad (11)$$

Onde: CTC_{efetiva} = capacidade de troca de cátions efetiva ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

$$\text{Valor T} = \text{valor S} + H^+ + Al^{3+} \quad (12)$$

Onde: Valor T = capacidade de troca de cátions total ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

$$m = \frac{100 \times Al^{3+}}{\text{valor S} + Al^{3+}} \quad (13)$$

Onde: m = saturação por alumínio (%).

$$\text{Valor V} = \frac{\text{Valor S}}{\text{Valor T}} \times 100 \quad (14)$$

Onde: Valor V = saturação por bases (%).

O teor de carbono refere-se à fração orgânica pode ser obtida pelo método de via úmida, por meio da oxidação com dicromato de potássio, desconsiderando-se estruturas de carbonatos e carvão (TEIXEIRA et al., 2017). A partir dos teores de carbono e da densidade de solo foi possível calcular o estoque de carbono para as camadas investigadas e o total contido nos 20 cm de profundidade amostrados (FERNANDES; FERNANDES, 2008).

O cálculo do estoque de carbono em cada camada Ct_i é dado pelo produto entre o teor de carbono (CO), densidade de solo (D_s) e espessura da camada (e), dividindo o resultado por 10, conforme Equação 15. O estoque de carbono da última camada é denominado Ct_n . Tanto Ct_i quanto Ct_n são expressos em Mg C ha^{-1} .

$$Ct_i = \frac{CO \times D_s \times e}{10} \quad (15)$$

A massa total de solo por camada Mt_i em um hectare é dado pelo produto entre a densidade de solo na camada considerada (D_s) e o volume relativo a 10000 m^3 , isto é, lâmina

de solo de 1 metro de profundidade em 1000 m² ou 1 hectare, de acordo com Equação 16. A massa de solo da última camada é denominada Mt_n . Tanto Mt_i quanto Mt_n são expressos em Mg solo ha⁻¹.

$$Mt_i = D_s \times 1000 \quad (16)$$

Por fim, o estoque total corrigido em função da massa de solo é dado pela Equação 17 (FERNANDES; FERNANDES, 2008):

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} Ct_i + \left[Mt_n - \left(\sum_{i=1}^n Mt_i - \sum_{i=1}^n Ms_i \right) \right] \times Ct_n \quad (17)$$

Onde: $\sum_{i=1}^n Ms_i$ = somatório da massa total do solo amostrado na área de referência, ou valor mínimo da massa de solo amostrado na profundidade de uma trincheira.

3.4.3 Fracionamento da matéria orgânica do solo

O procedimento para fracionamento físico da matéria orgânica leve em água consiste em dispor 25 g de amostra (TFSA) em proveta, despejar 500 ml de água e suspender o material com uma haste para agitação manual por aproximadamente 30 s, deixando em repouso por 24 h. No dia seguinte, é preciso verter o material cuidadosamente sobre peneira de malha 0,25 mm com objetivo de coletar apenas o material sobrenadante evitando que partículas de solo sejam vertidas. Em seguida, deve-se remover material retido na peneira com pisseta, dispondo-o em placas de petri para secagem em estufa a 60 °C por 4 dias. Registra-se, então, o peso seco do material retido na peneira de 0,25mm em uma balança de três casas decimais (adaptado de BAILLIE; ANDERSON; INGRAM, 1990).

A massa obtida após secagem corresponde a massa de MOL e é calculada descontando-se a massa da placa de petri (Equação 18).

$$MOL = m_{as} - m_{placa} \quad (18)$$

Onde: MOL = matéria orgânica leve (g);

m_{as} = massa após secagem em estufa (g);

m_{placa} = massa da placa de petri (g).

3.5 **Análise estatística dos dados**

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado e os dados foram avaliados segundo estatística univariada e multivariada. As variáveis preditoras e resposta foram classificadas em qualitativas ou quantitativas. Dentre as qualitativas, ainda foi discriminado se eram variáveis nominais ou ordinais. E dentre as quantitativas, se eram variáveis discretas ou contínuas. A classificação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação das variáveis preditoras e resposta com indicação da forma de obtenção dos dados (campo ou laboratório) e objetivos envolvidos (caracterização do solo e diferenciação dos níveis de degradação).

Variável	Tipo ¹	Natureza		Quantitativa		Qualitativa	
		Qualitativa	Quantitativa	Contínua	Discreta	Nominal	Ordinal
Nível de degradação	P	x					x
Diferenciação dos níveis de degradação segundo métodos de campo							
Cobertura pela vegetação							
Área ocupada por forrageira	R		x		x		
Área ocupada por planta daninha de folha larga	R		x		x		
Área ocupada por planta daninha de folha estreita	R		x		x		
Área ocupada por solo exposto	R		x		x		
Profundidade de raízes	R		x	x			
Espessura do horizonte A	R		x	x			
Índice de Qualidade de Estrutura do Solo (IQES)	P/R ²		x	x			
Análises laboratoriais							
Caracterização do solo segundo atributos físicos e químicos							
Textura	R		x	x			
Densidade de partícula	R		x	x			
Complexo Sortivo do Solo			x	x			
pH em H ₂ O	R		x	x			
pH em KCl	R		x	x			
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	R		x	x			
K ⁺	R		x	x			

Variável	Tipo ¹	Natureza		Quantitativa		Qualitativa	
		Qualitativa	Quantitativa	Contínua	Discreta	Nominal	Ordinal
Na ⁺	R		x	x			
Al ³⁺	R		x	x			
H ⁺ + Al ³⁺	R		x	x			
Índices de Fertilidade							
Soma de bases	R		x	x			
CTC efetiva	R		x	x			
CTC total	R		x	x			
Saturação por alumínio	R		x	x			
Saturação por bases	R		x	x			
Diferenciação dos níveis de degradação segundo atributos físicos							
Densidade do solo	R		x	x			
Porosidade total	R		x	x			
Microporosidade	R		x	x			
Macroporosidade	R		x	x			
Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	R		x	x			
Diâmetro Médio Geométrico (DMG)	R		x	x			
Diferenciação dos níveis de degradação segundo atributos químicos							
Teor de C	R		x	x			
Estoque de C	R		x	x			
Matéria Orgânica Leve (MOL)	R		x	x			

Notas: ¹ P: variável preditora; R: variável resposta.

² Índice de Qualidade de Estrutura do Solo (IQES) assume comportamento de variável resposta quando considerado na diferenciação dos níveis de degradação, e de variável preditora quando avaliada sua correlação com outros atributos associados ao desenvolvimento da estrutura de solo.

As variáveis quantitativas foram descritas em função das medidas de posição (média), medidas de dispersão (desvio padrão e erro padrão) e métodos gráficos (gráfico de caixa ou *box-plot*). O gráfico de caixa permitiu identificar a ocorrência de valores discrepantes ou *outliers* no conjunto de dados. *Outliers* são valores além dos limites máximo e mínimo definidos em função do conjunto de dados, e ocorrem devido a erros de medição ou algum fenômeno a ser considerado (FONTELLES, 2012). Uma vez identificados, procedeu-se a avaliação individual de tais valores, buscando referências em literatura que embasassem a decisão de mantê-los ou não no conjunto de dados. A fim de comparar os valores obtidos com os de outros trabalhos, buscou-se publicações que apresentassem objetivos semelhantes e tivessem em comum pelo menos um dos seguintes parâmetros: região de estudo e geomorfologia, classe de solo (1º nível categórico), espécie forrageira e profundidade amostrada. Optando-se pelo descarte do valor discrepante, foi feita a eliminação completa do registro no conjunto de dados.

Dando continuidade à análise estatística, a etapa seguinte correspondeu à avaliação de normalidade das variáveis através do teste de aderência *Kolmogorov-Smirnov* (teste D) (FONTELLES, 2012). O objetivo do teste é verificar se o conjunto de dados amostrado apresenta mesma distribuição de frequência de uma distribuição hipotética, no caso, a distribuição normal. A opção pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* deveu-se ao tamanho da amostra ($n > 50$) e por ser indicado para quando a média da população (μ) e a variância da população (σ^2) são desconhecidos. O nível de significância considerado foi 5% (teste bilateral). Uma vez que algumas variáveis apresentaram comportamento não normal, procedeu-se à estatística não paramétrica para todas as variáveis em estudo.

O teste de *Kruskal-Wallis* (teste H) foi escolhido por ser o teste não paramétrico de comparação de médias indicado para verificar se existe diferença estatística entre 3 ou mais tratamentos, com mesmo tamanho amostral ou não (FONTELLES, 2012). A hipótese nula testada é que as amostras obtidas foram retiradas da mesma população e, portanto, não há diferença entre as médias. E o teste foi conduzido de forma bilateral, com nível de significância de 5% (teste bilateral).

Como o teste de *Kruskal-Wallis* apenas indica se há ou não diferença entre os tratamentos sem diferenciá-los entre si, foi realizado o teste de *Dunn* (teste Q) na sequência como procedimento *post-hoc* (FONTELLES, 2012). O nível de significância considerado foi 5% (teste bilateral). Só então foi possível afirmar quais tratamentos diferiram entre si segundo cada variável.

Além disso, foi feita a correlação linear simples entre o IQES obtido a partir do método de campo DRES e alguns indicadores de qualidade do solo obtidos por análises laboratoriais das amostras coletadas. A intenção foi verificar o comportamento simultâneo do IQES e de indicadores relacionados ao desenvolvimento de estrutura do solo, e assim avaliar se método de campo é capaz de prever o comportamento de determinados atributos medidos em laboratório (FONTELLAS, 2012). Para tanto, foi feita a média das profundidades 0-10 cm e 10-20 cm, uma vez que os monólitos para avaliação da estrutura pelo método DRES foram coletados em 25 cm de profundidade. Além disso, para cada atributo avaliado foi feita a média das mini-trincheiras de modo a obter um valor médio representativo de cada unidade experimental. Este artifício foi usado pois a avaliação da cobertura pela vegetação pelo Método da Corda diz respeito às unidades experimentais como um todo, e não às mini-trincheiras onde as amostras de solo foram coletadas. Desta forma, o conjunto de dados foi reduzido à 12 registros, correspondendo às 3 unidades experimentais de cada um dos 4 níveis de degradação. A medida da correlação foi feita pelo coeficiente de correlação de *Spearman* com nível de significância 10% (teste bilateral).

Na sequência foi feita ainda a análise estatística multivariada dos dados com objetivo de analisar simultaneamente como os indicadores de qualidade do solo obtidos em campo e em laboratório (variáveis resposta) descrevem os níveis de degradação (variável preditora ou tratamento). A abordagem multivariada considera múltiplas combinações entre as variáveis de modo que a interpretação final dos tratamentos deve ser feita considerando todo o cenário, e não as variáveis individualmente (HAIR JR. et al., 2009).

A escolha pela técnica multivariada pressupõe avaliação de como as variáveis preditora e resposta se relacionam, e a sua classificação em variáveis qualitativas ou quantitativas (HAIR JR. et al., 2009). Considera-se que existe uma interdependência entre os indicadores e os níveis de degradação, de modo que o solo responde ao efeito da degradação, assim como afeta o seu avanço ou recuo. E conforme apresentado na Tabela 4, os níveis de degradação são classificados como variáveis preditoras de natureza qualitativa ordinal. Desta forma, seguindo o fluxograma de Hair Jr. et al. (2009), a estatística multivariada indicada para o conjunto de dados é a escalonamento multidimensional não métrico (*multidimensional non metric scaling*), também conhecido como mapeamento perceptivo (*perceptual mapping*).

Assim como foi feito para a avaliação da correlação entre indicadores de qualidade do solo e o IQES, a análise estatística multivariada foi realizada com um conjunto de 12 dados, correspondendo às médias das profundidades mini-trincheiras amostradas das 3 unidades experimentais distribuídas nos 4 níveis de degradação. Entre os indicadores obtidos em campo

foram selecionados: a profundidade de raízes, a espessura do horizonte A, o IQES, a porcentagem de solo coberto nas épocas seca e chuvosa, e a porcentagem de solo exposto nas épocas seca e chuvosa. Por solo coberto entende-se a soma da cobertura do solo por vegetação forrageira e por plantas daninhas. Já entre os indicadores de qualidade do solo obtidos em laboratório foram selecionados: a porosidade total, a densidade do solo, o DMP, o DMG, a matéria orgânica leve (MOL), o teor de carbono e o estoque de carbono.

3.6 Caracterização dos solos

3.6.1 Textura

Os resultados da análise granulométrica e as respectivas classes texturais estão dispostos na Tabela 5. A classificação foi feita com base no diagrama textural simplificado (SANTOS et al., 2013).

Tabela 5: Frações granulométricas das amostras de solo coletadas segundo camadas amostradas e níveis de degradação, e indicação da respectiva classe textural obtida pelo diagrama simplificado.

Nível de degradação ¹	Repetição	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe textural
Camada 0-10 cm					
N1	1	44	16	40	Franco argilosa
	2	46	12	42	Franco argilosa
	3	48	12	40	Franco argilosa
	4	44	12	44	Franco argilosa
	5	43	13	44	Franco argilosa
	6 ²	0	0	0	0
	7	43	15	42	Franco argilosa
	8	46	14	40	Franco argilosa
	9	40	14	46	Franco argilosa
N2	1	54	18	28	Franca
	2	40	24	36	Franco argilosa
	3	56	18	26	Franca
	4	48	18	34	Franca
	5	56	14	30	Franca
	6	53	11	36	Franco argilosa
	7	49	15	36	Franco argilosa
	8	47	15	38	Franco argilosa

Nível de degradação ¹	Repetição	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe textural
	9	57	15	28	Franca
N3	1	35	13	52	Franco argilosa
	2	49	9	42	Franco argilosa
	3	35	15	50	Franco argilosa
	4	43	17	40	Franco argilosa
	5	45	9	46	Franco argilosa
	6	44	12	44	Franco argilosa
	7	31	13	56	Franco argilosa
	8	42	10	48	Franco argilosa
	9	41	9	50	Franco argilosa
N4	1	42	14	44	Franco argilosa
	2	37	15	48	Franco argilosa
	3	41	17	42	Franco argilosa
	4	40	14	46	Franco argilosa
	5	44	14	42	Franco argilosa
	6	39	15	46	Franco argilosa
	7	42	16	42	Franco argilosa
	8	44	14	42	Franco argilosa
	9	47	15	38	Franco argilosa
Camada 10-20 cm					
N1	1	55	7	38	Franco argilosa
	2	48	8	44	Franco argilosa
	3	60	6	34	Franca
	4	45	9	46	Franco argilosa
	5	56	8	36	Franco argilosa
	6	49	11	40	Franco argilosa
	7	42	12	46	Franco argilosa
	8	44	12	44	Franco argilosa
	9	47	9	44	Franco argilosa
N2	1	52	18	30	Franco argilosa
	2	39	21	40	Franco argilosa
	3	54	18	28	Franca
	4	48	16	36	Franco argilosa
	5	53	11	36	Franco argilosa
	6	49	11	40	Franco argilosa
	7	49	15	36	Franco argilosa
	8	44	14	42	Franco argilosa
	9	62	10	28	Franca
N3	1	33	11	56	Franco argilosa
	2	43	9	48	Franco argilosa
	3	37	9	54	Franco argilosa

Nível de degradação ¹	Repetição	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe textural
N1	4	44	12	44	Franco argilosa
	5	40	12	48	Franco argilosa
	6	38	12	50	Franco argilosa
	7	28	12	60	Argila
	8	39	11	50	Franco argilosa
	9	38	10	52	Franco argilosa
	1	38	14	48	Franco argilosa
	2	34	12	54	Franco argilosa
	3	31	17	52	Franco argilosa
N4	4	36	14	50	Franco argilosa
	5	38	14	48	Franco argilosa
	6	37	11	52	Franco argilosa
	7	38	14	48	Franco argilosa
	8	43	13	44	Franco argilosa
	9	46	12	42	Franco argilosa

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Amostra com massa insuficiente para análise granulométrica.

3.6.2 Densidade de partículas

A densidade de partículas, embora também seja um atributo estável, pode indicar mudanças no conteúdo de matéria orgânica do solo, uma vez que sua composição é função das contribuições minerais (maior densidade) e orgânicas (menor densidade) (FERREIRA, 2016). Os valores encontrados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores médios e erro padrão da densidade de partículas segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
Densidade de partículas - Dp (kg dm ⁻³)		
N1	2,57 (0,022) ²	2,62 (0,015)
N2	2,50 (0,008)	2,55 (0,029)
N3	2,59 (0,015)	2,63 (0,014)
N4	2,60 (0,021)	2,64 (0,016)

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

3.6.3 Caracterização química

Ainda que a caracterização química dos solos não possa ser considerada na diferenciação dos níveis de degradação, ela contribui para o entendimento do ambiente químico que a vegetação encontra nos níveis de degradação. A Tabela 7 apresenta os valores médios e erro padrão dos atributos químicos segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Tabela 7: Valores médios e erro padrão dos atributos químicos segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
pH H₂O		
N1	5,20 (0,094) ²	4,91 (0,035)
N2	5,84 (0,057)	5,56 (0,084)
N3	4,79 (0,129)	4,80 (0,075)
N4	4,83 (0,037)	4,73 (0,029)
pH KCl		
N1	4,25 (0,063)	4,07 (0,017)
N2	4,63 (0,061)	4,38 (0,040)
N3	4,01 (0,072)	4,01 (0,048)
N4	3,95 (0,019)	3,94 (0,024)
Ca²⁺ + Mg²⁺ (cmol_c dm⁻³)		
N1	2,71 (0,417)	0,94 (0,108)
N2	6,74 (0,755)	5,59 (0,639)
N3	1,07 (0,259)	0,57 (0,146)
N4	1,21 (0,164)	0,64 (0,075)
K⁺ (mg dm⁻³)		
N1	92,35 (14,165)	51,28 (6,827)
N2	91,00 (11,105)	51,64 (8,157)

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
N3	51,93 (7,327)	36,61 (7,466)
N4	84,25 (13,167)	28,86 (2,041)
Na⁺ (cmol_c dm⁻³)		
N1	0,04 (0,005)	0,03 (0,003)
N2	0,07 (0,011)	0,06 (0,006)
N3	0,03 (0,002)	0,03 (0,002)
N4	0,04 (0,002)	0,04 (0,005)
H⁺ + Al³⁺ (cmol_c dm⁻³)		
N1	8,02 (0,422)	7,23 (0,392)
N2	4,16 (0,323)	4,53 (0,306)
N3	8,94 (0,615)	7,95 (0,313)
N4	6,84 (0,283)	6,59 (0,303)
Al³⁺ (cmol_c dm⁻³)		
N1	0,49 (0,127)	0,99 (0,090)
N2	0,04 (0,025)	0,18 (0,020)
N3	1,31 (0,212)	1,33 (0,144)
N4	1,08 (0,076)	1,41 (0,084)

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

Os índices de fertilidade calculados para os níveis de degradação e camadas amostradas estão dispostos na Figura 12 a Figura 16.

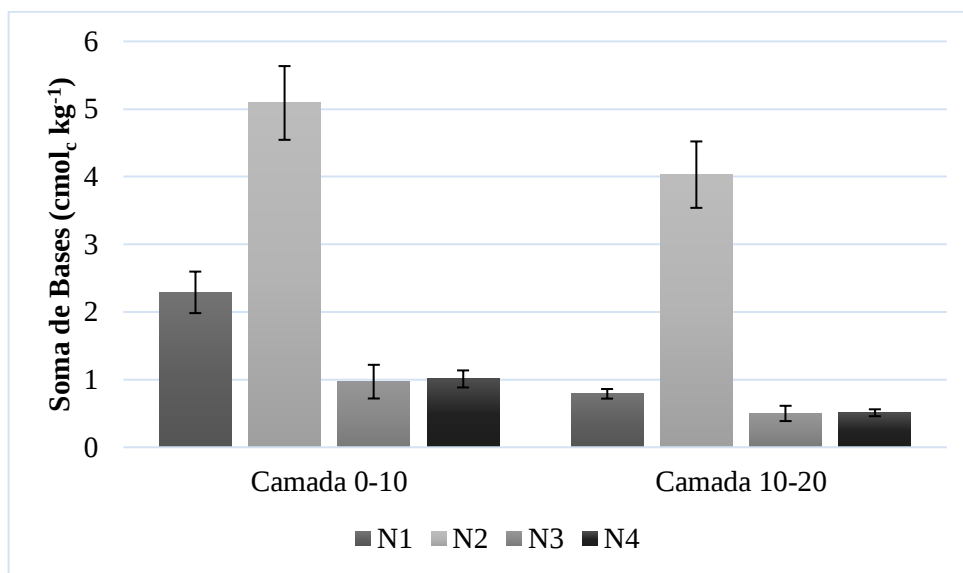


Figura 12: Valores médios e erro padrão da soma de bases segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

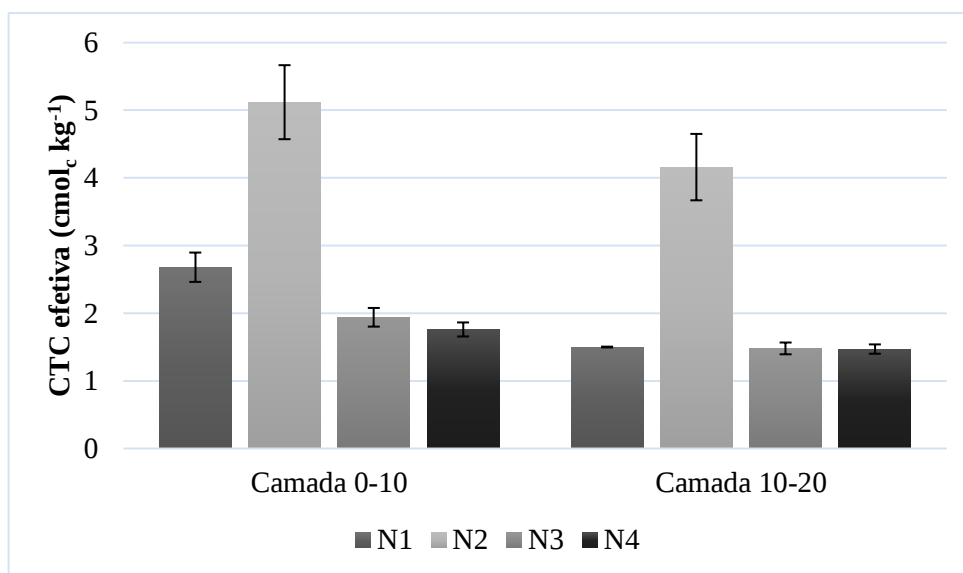


Figura 13: Valores médios e erro padrão da CTC efetiva segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

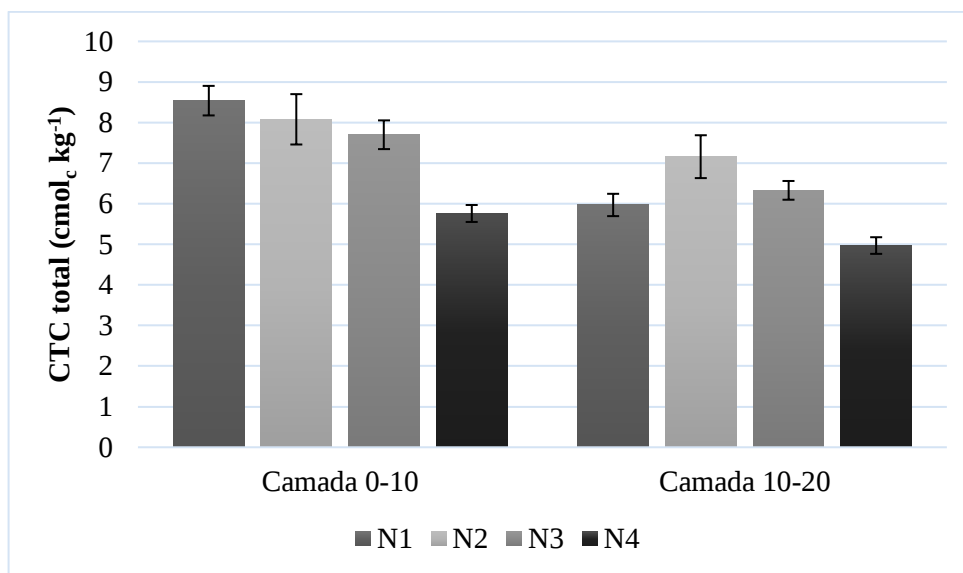


Figura 14: Valores médios e erro padrão da CTC total segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

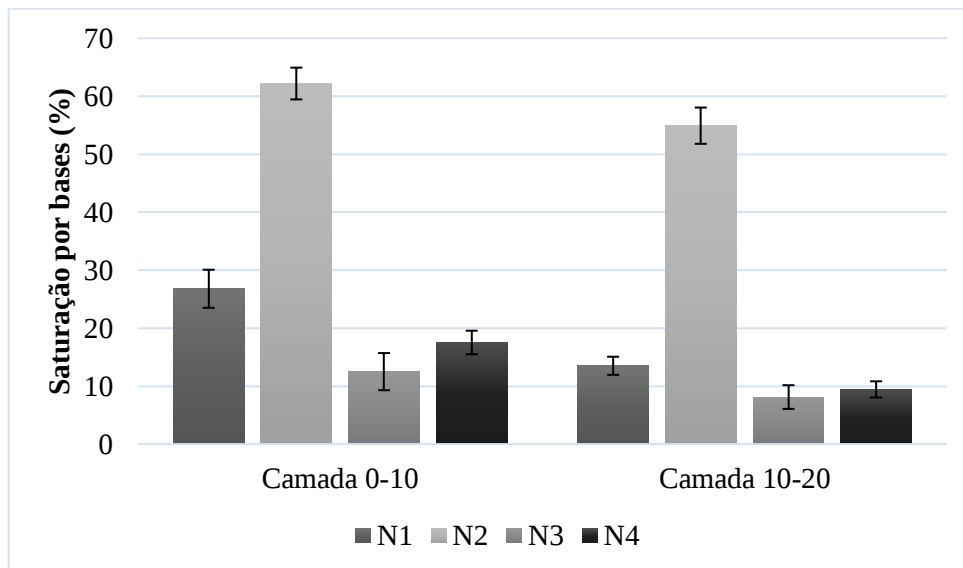


Figura 15: Valores médios e erro padrão da saturação por bases segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

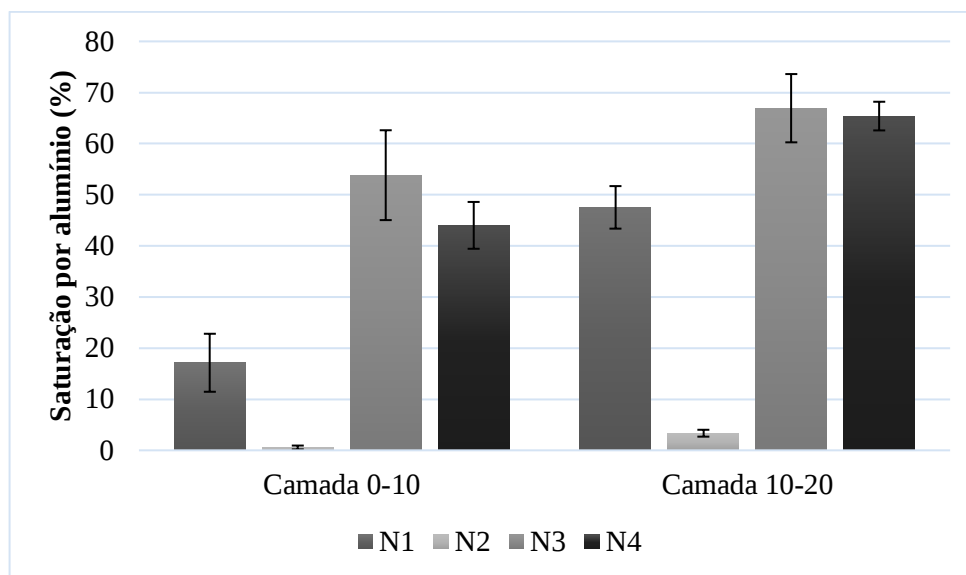


Figura 16: Valores médios e erro padrão da saturação por alumínio segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações de campo

4.1.1 Qualidade estrutural do solo

Os dois principais critérios de avaliação do DRES consistem no tamanho e forma dos agregados; e evidências de degradação ou conservação. Em relação ao primeiro, admite-se que solos com agregados entre 1 e 4 cm com superfície rugosa favorecem a atividade biológica e possuem porosidade adequada à percolação de água, aeração e ciclagem de nutrientes, sendo, portanto, melhor avaliado. Já o segundo critério diz respeito ao aspecto e distribuição de raízes, atividade biológica, indícios de compactação ou pulverização, entre outros. A abundância de raízes ao longo do perfil e a presença de mesofauna indicam boa estrutura e elevam a nota da amostra. Já a ocorrência de agregados muito grandes ou muito pequenos, são mal vistos pois indicam, respectivamente, solo compactado ou pulverizado (RALISCH et al., 2017).

A partir da avaliação das amostras em campo, foram calculados Índices de Qualidade de Estrutura do Solo (IQES) obtidos nos níveis de degradação (Tabela 8). Os níveis N3 e N4 apresentam as menores notas (2,4 e 2,7 respectivamente), indicando qualidade estrutural inferior aos níveis N1 e N2, que obtiveram nota 3,9.

Tabela 8: Valores médios e erro padrão do Índice de Qualidade de Estrutura do Solo (IQES) e declividade média segundo níveis de degradação.

Nível de degradação ¹	IQES	Declividade média (%)
N1	3,9 (0,355) ² B ³	38 (0,025)
N2	3,9 (0,317) B	45 (0,029)
N3	2,4 (0,155) A	57 (0,029)
N4	2,7 (0,151) AB	62 (0,017)

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

A análise estatística permite diferenciar os níveis de degradação agrupando os níveis N1 e N2 como representantes de níveis com solos mais estruturados, e os níveis N3 e N4 como representantes de níveis com solos menos estruturados. Porém, o nível N4 ainda se assemelha ao primeiro grupo por ter obtido melhor avaliação da qualidade estrutural.

Ainda que os níveis N1 e N2 tenham apresentado estrutura mais preservada em relação aos níveis N3 e N4, vale reconhecer que as notas ainda são ruins quando comparadas à escala de avaliação da metodologia. Isto significa que de forma geral a estrutura dos solos avaliados é pouco desenvolvida ou pouco preservada.

A manipulação das amostras para o DRES permitiu observar a abundância de minerais primários, principalmente quartzo, em todos os níveis de degradação (Figura 17). A matéria orgânica, portanto, torna-se o principal diferencial nos graus de agregação e desenvolvimento da estrutura.



Figura 17: Destaque para os minerais de quartzo encontrados em uma das amostras do nível N1 do DRES.

Assim como a MOS interfere no desenvolvimento, o manejo das pastagens é fator principal na preservação da estrutura do solo, pela manutenção da cobertura pela vegetação. A melhor estrutura dos solos nos níveis N1 e N2, portanto, deve-se principalmente à ação das raízes na agregação (Figura 18). A cobertura vegetal tem função no desenvolvimento de estrutura do solo pela atividade de raízes, aporte de matéria orgânica, além de proteger o solo de processos erosivos. Desta forma, a manutenção das pastagens com práticas conservacionistas é importante para a conservação do solo.



Figura 18: Amostra para o DRES referente ao nível N1, destaque para agregados granulares e ação das raízes na agregação.

O empate dos IQES dos níveis N1 e N2 deve-se à uniformidade da cobertura nestes níveis. No nível N2, a presença de plantas daninhas em meio à gramínea resulta em maior diversidade na origem de MOS, contribuindo para o incremento da fração orgânica do solo e desenvolvimento da estrutura. Segundo Lisbôa et al. (2016), plantas invasoras de folha larga podem contribuir com o acúmulo de MOS devido a deposição de compostos recalcitrantes, o que beneficia a formação de estrutura do solo através da ação de raízes e do aporte de matéria orgânica que atua como composto cimentante na agregação. Evidências de conservação da estrutura do solo podem ser verificadas na Figura 19 que apresenta amostras com melhor qualidade estrutural segundo critérios de avaliação do método DRES.



Figura 19: Evidências de conservação e boa estrutura do solo: raízes abundantes e agregados de tamanho entre 1 e 4 cm.

As notas de N3 e N4 indicam sinais de degradação na estrutura do solo, como ocorrência de agregados soltos em superfície, vulneráveis à erosão pluvial, ou de agregados maiores em subsuperfície, limitando o desenvolvimento de raízes (Figura 20). Além disso, a declividade média observada nos níveis N3 (57%) e N4 (62%) potencializa a degradação nessas áreas.



Figura 20: Evidências de degradação e má estrutura do solo: poucas ou nenhuma raiz, e agregados menores que 1 cm ou maiores que 7 cm.

4.1.2 Taxa de cobertura

A partir do método da corda, foi possível elaborar mapas de cobertura das unidades experimentais conforme épocas seca e chuvosa (Apêndice B), quantificando a área relativa à cobertura forrageira, plantas daninhas de folha larga, plantas daninhas de folha estreita e solo exposto.

A evolução da degradação é caracterizada pelo declínio da cobertura forrageira entre os níveis, cedendo lugar às plantas daninhas e solo exposto, tanto na época seca quanto na chuvosa. A partir de análise estatística, observa-se que a cobertura forrageira foi capaz de diferenciar os níveis de degradação N1 e N3 nas épocas seca e chuvosa (Tabela 9).

Tabela 9: Valores médios das classes de cobertura do solo segundo níveis de degradação e épocas de avaliação.

Cobertura		Época	Nível de degradação ¹			
			N1	N2	N3 ²	N4
			Área (%)			
Forrageira	Seca	96 B ³	63 AB	15 A	57 AB	
	Chuvosa	98 B	63 AB	21 A	59 AB	
Solo Exposto	Seca	2 A	2 A	36 A	39 A	
	Chuvosa	1 A	4 A	27 A	31 A	
Planta Daninha	Folha Larga	Seca	2 A	8 A	3 A	1 A
		Chuvosa	1 A	11 B	15 B	4 AB
	Folha Estreita	Seca	0 A	26 B	46 B	4 AB
		Chuvosa	0 A	22 B	35 B	6 AB

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² A avaliação da cobertura no N3 época chuvosa foi comprometida pela presença de vespeiro na unidade experimental, impedindo que 100% da área fosse percorrida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação para o tipo de cobertura numa determinada época de avaliação. Análise pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

Conforme os critérios definidos para seleção dos níveis de degradação, os níveis N2 e N3 apresentaram maior contribuição de plantas daninhas no recobrimento do solo, havendo aumento da ocorrência de espécies de folha larga durante a estação chuvosa, sobretudo no nível N3. Os níveis N3 e N4, por sua vez, são caracterizados pela maior ocorrência de solo exposto, condição amenizada durante a estação chuvosa que propicia o recobrimento do solo pela própria gramínea ou por espécies daninhas (Figura 21).

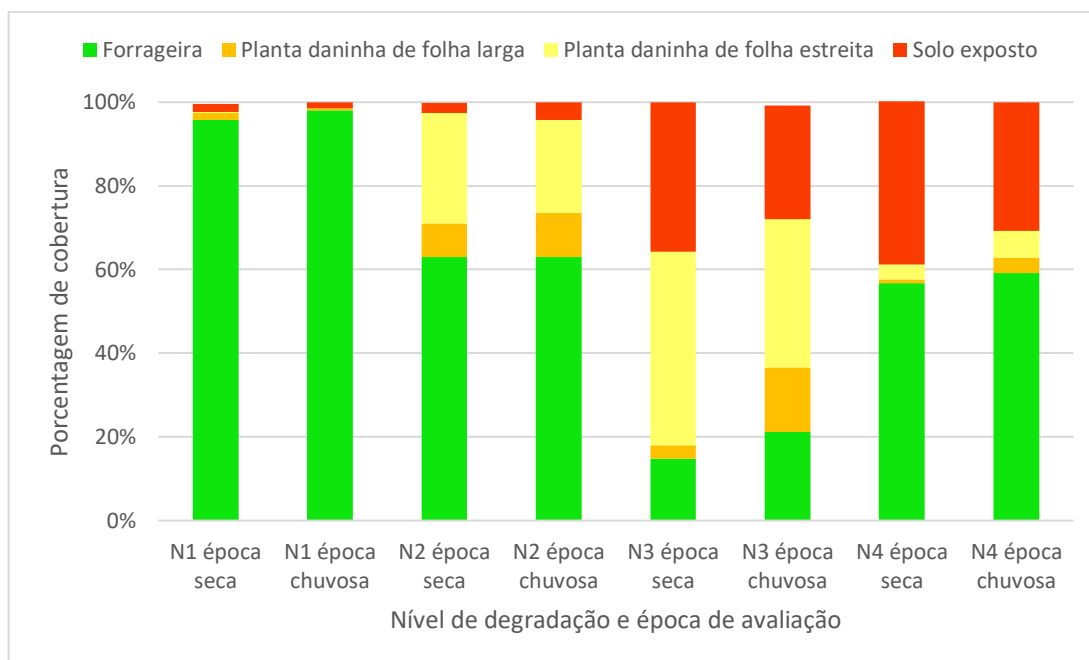


Figura 21: Porcentagem de cobertura do solo em função dos níveis de degradação e épocas de avaliação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² A avaliação da cobertura no N3 época chuvosa foi comprometida pela presença de vespeiro na unidade experimental, impedindo que 100% da área fosse percorrida.

Freitas et al. (2014) também constatou que em níveis avançados de degradação há redução de produção de forragem, mesmo nas estações chuvosas, resultando em maior porcentagem de área com solo exposto e com plantas daninhas, sobretudo as de folhas larga.

Tal recuperação da cobertura do solo por espécies daninhas, apesar de não configurar recuperação da pastagem, indica que o banco de sementes no solo encontra condições favoráveis de germinação com o aumento da umidade e temperatura do solo, protegendo-o de processos erosivos. Nesse sentido, pode-se afirmar que o nível de degradação moderado ou N2 corresponde à degradação agrícola descrita por Dias-Filho (2011), onde há perda da capacidade de suporte devido à ocorrência de espécies daninhas em competição com a gramínea de interesse. Já os níveis de degradação forte (N3) e muito forte (N4) relacionam-se à degradação biológica, uma vez que a baixa fertilidade dos solos nestas áreas viabiliza o crescimento de espécies mais rústicas e menos exigentes, podendo inclusive comprometer o desenvolvimento de qualquer vegetação, culminando na ocorrência de solo exposto (DIAS FILHO, 2011).

Algumas espécies daninhas foram identificadas nas unidades experimentais, sendo a relação descrita na Tabela 10 e as imagens agrupadas nas Figura 22 e Figura 23. Sabe-se que a

infestação de daninhas configura problema quer seja num cultivo, quer seja numa pastagem. As daninhas competem por água e nutrientes do solo com a espécie de interesse, além de existirem espécies tóxicas que configuram perigo à criação animal. Porém, algumas espécies são também indicadoras da condição química do solo. O sapê (*Imperata brasiliensis*) é indicador de solos ácidos, enquanto que o mata-pasto (*Eupatorium pauciflorum*) ocorre em solos de baixa fertilidade (BRIGHENTI, 2010).

Tabela 10: Espécies daninhas identificadas nos níveis de degradação, com o nome popular correspondente e a classificação segundo formato das folhas.

Nível de degradação ¹	Espécie	Nome popular	Classificação ²
N3	<i>Paspalum notatum</i>	Grama batatais	PDFE
N3	<i>Lantana camara</i>	Cambará ou Chumbinho	PDFL
N3	<i>Imperata brasiliensis</i>	Sapé	PDFE
N3	<i>Solanum sisymbriifolium</i>	Joá bravo	PDFL
N3 e N4	<i>Eupatorium pauciflorum</i>	Mata pasto	PDFL
N3 e N4	<i>Sida glaziovii</i>	Guanxuma ou Vassourinha	PDFL
N4	<i>Sporobolus indicus</i>	Capim Lucas ou Capim mourão	PDFE

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

²PDFE: planta daninha de folha estreita; PDFL: planta daninha de folha larga.

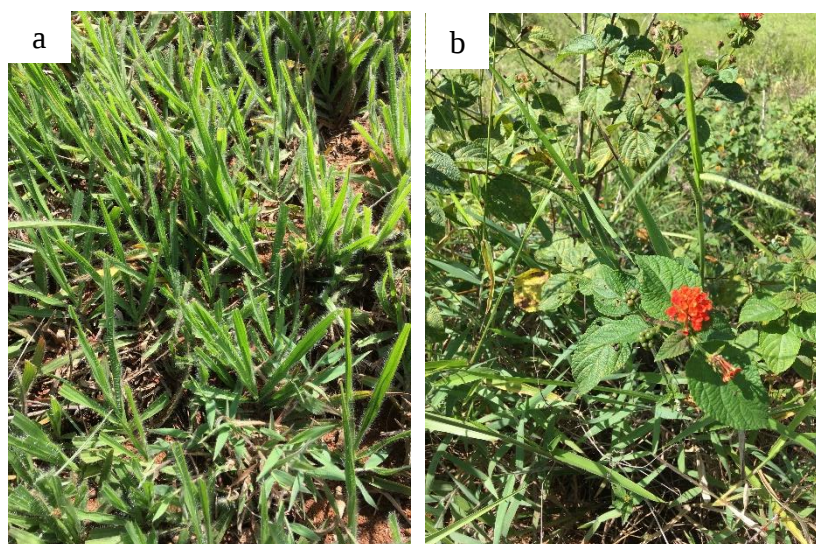


Figura 22: Plantas daninhas. a) Grama batatais; b) Cambará ou Chumbinho.



Figura 23: Plantas daninhas. a) Mata pasto; b) Guanxuma ou vassourinha; c) Capim lucas ou capim mourão; d) Sapé; e) Joá bravo.

Sabe-se que a vegetação contribui para o desenvolvimento de estrutura do solo, através da ação de raízes, aporte de resíduos vegetais e por propiciar ambiente favorável à atividade da mesofauna e outros organismos. Sendo assim, a fim de avaliar o comportamento simultâneo da qualidade estrutural do solo e da cobertura do solo pela vegetação, somando-se a área relativa à forrageira e às plantas daninhas, foi feita a correlação dos dados coletados na estação seca e chuvosa.

A partir dos diagramas de dispersão, o desenvolvimento da qualidade estrutural do solo guarda estreita relação com a cobertura do solo pela vegetação, e com a falta dela, em ambas as estações. Nota-se correlação positiva estatisticamente significativa ($p < 0,10$) entre o solo coberto e o IQES, tanto na época seca (Figura 24) quanto na época chuvosa (Figura 25). Na época chuvosa, no entanto, o grau de associação dado pelo coeficiente de correlação de *Spearman* é mais forte do que na época seca. Em termos numéricos, 79% das variações de IQES são acompanhadas pelas variações na porcentagem de cobertura do solo na época chuvosa (Figura 25). Tal constatação deve-se ao fato de que na estação das chuvas a vegetação encontra condições mais favoráveis ao desenvolvimento, tanto em relação à biomassa aérea quanto radicular, interferindo ativamente na estrutura do solo.

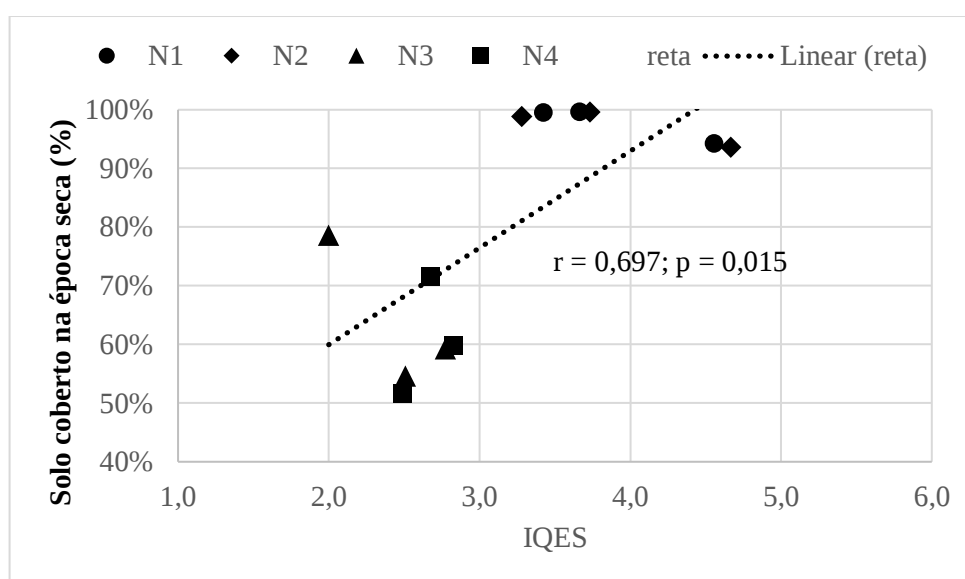


Figura 24: Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época seca.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p -valor considerando nível de significância $< 0,10$.

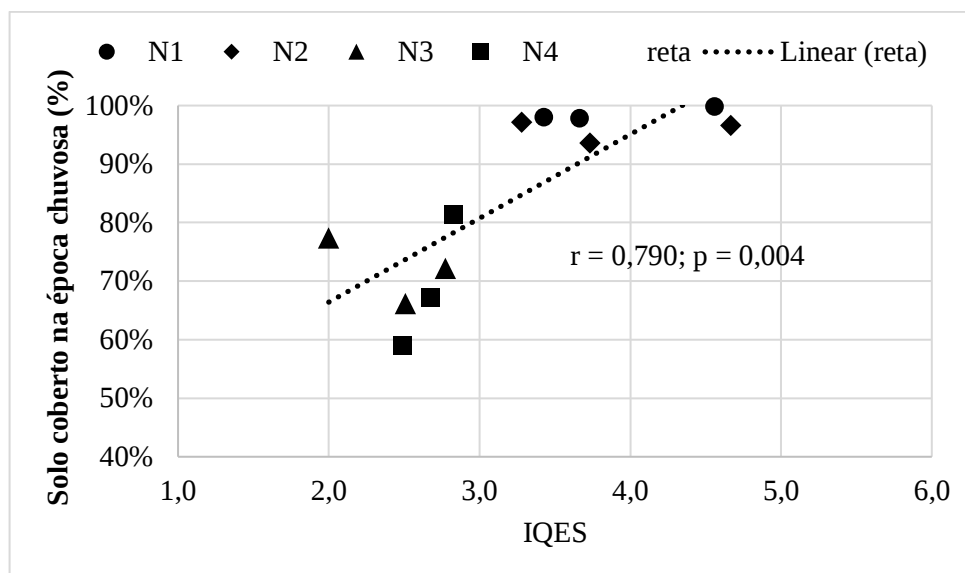


Figura 25: Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p -valor considerando nível de significância $< 0,10$.

Da mesma forma, nota-se correlação negativa estatisticamente significativa ($p < 0,10$) entre o solo exposto e o IQES, em ambas as estações (Figura 26 e Figura 27). Seguindo o raciocínio oposto, a ausência de vegetação está relacionada ao menor desenvolvimento da estrutura do solo devido à baixa contribuição de biomassa vegetal. E na época chuvosa, tal associação torna-se ainda mais intensa. O efeito da sazonalidade, neste caso, prejudica a estrutura do solo através da perda de solo por ação da chuva, que ao deparar-se com o solo exposto apresenta maior erosividade. Assim como na estação seca, 79% das variações de IQES são acompanhadas pelas variações na porcentagem de cobertura do solo na época chuvosa (Figura 27).

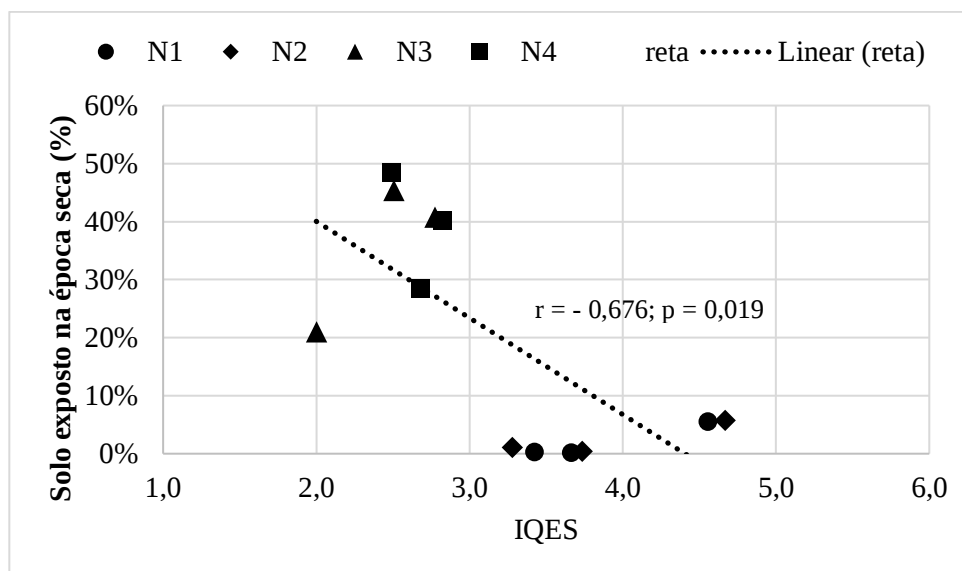


Figura 26: Correlação linear negativa estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p-valor considerando nível de significância $< 0,10$.

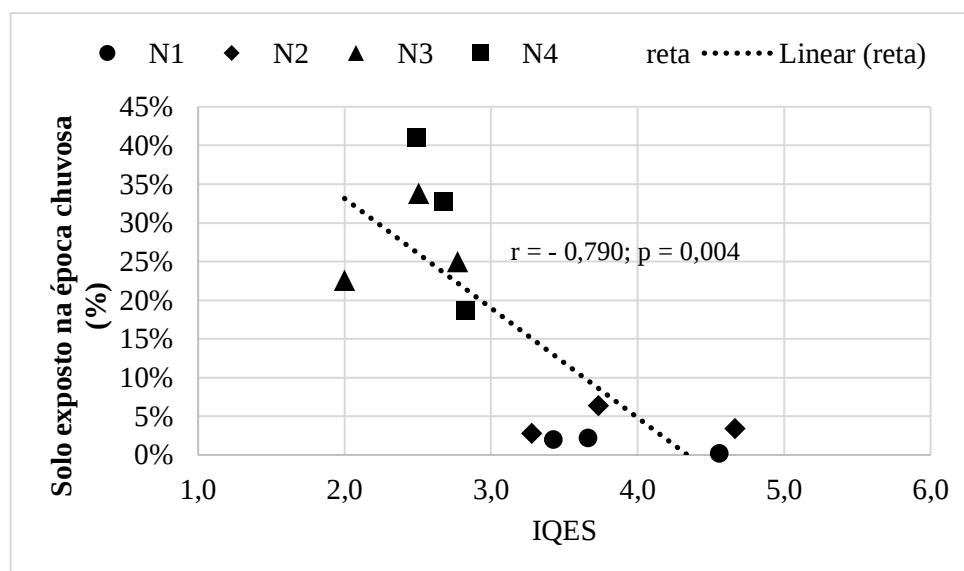


Figura 27: Correlação linear negativa estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época chuvosa.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p-valor considerando nível de significância $< 0,10$.

4.1.3 Profundidade de raízes e espessura do horizonte A

Quando o solo apresenta condições físicas e químicas favoráveis ao desenvolvimento de raízes, espera-se que elas se estendam em profundidade ao longo da zona radicular característica de cada espécie. As medidas feitas em campo durante a estação seca indicam maior profundidade de raízes no nível N1 ($26,33 \pm 1,080$ cm) e menor no nível N4 ($14,89 \pm 1,006$ cm). Os níveis N2 ($21,44 \pm 1,529$ cm) e N3 ($21,22 \pm 1,460$ cm) não apresentam diferença estatística entre si de modo que não é possível distinguir os dois níveis de degradação por esta avaliação (Figura 28).

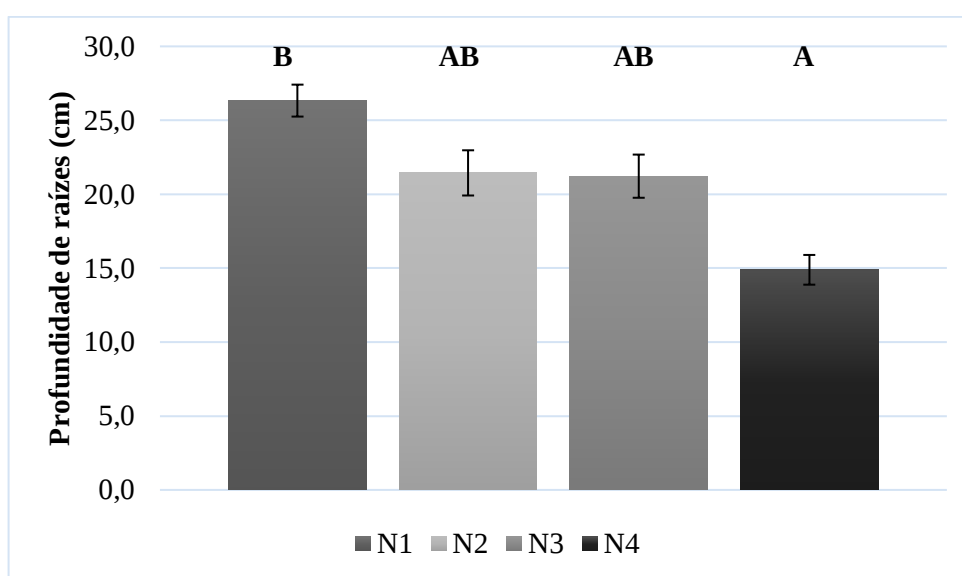


Figura 28: Valores médios e erro padrão da profundidade de raízes segundo níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

O desenvolvimento de raízes em maior profundidade no nível N1 corrobora o IQES deste nível, uma vez que a solos bem estruturados favorecem a produção agrícola através da porosidade adequada ao desenvolvimento de raízes, aeração, infiltração e armazenamento de água, troca de calor, atividade biológica e ciclagem de nutrientes, permitindo a presença de raízes em maiores profundidades (FREIRE et al., 2013).

Já o comprometimento ao desenvolvimento de raízes no nível N4 está associado ao ambiente químico neste nível, sobretudo na camada 10-20 cm. Conforme a caracterização química dos solos, o nível N4 apresenta baixo valor de pH na camada subsuperficial, baixa CTC e alta saturação por alumínio (Tabela 7, Figura 13, Figura 14 e Figura 16).

Em relação à espessura do horizonte A, horizonte mineral com maior contribuição orgânica, a análise estatística permite diferenciar os níveis de degradação em dois grupos: o primeiro representado pelo nível N1 ($18,00 \pm 1,093$ cm), e o segundo representado pelos níveis de degradação N3 ($10,89 \pm 1,195$ cm) e N4 ($9,56 \pm 1,192$ cm). O nível N2 ($14,56 \pm 1,281$ cm) guarda semelhanças com os dois grupos (Figura 29).

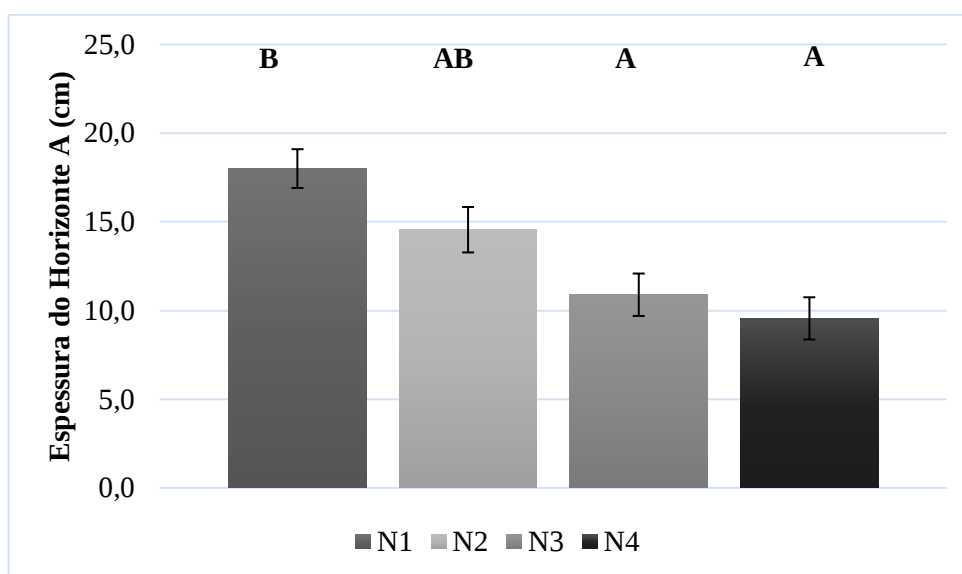


Figura 29: Valores médios e erro padrão da espessura do horizonte A segundo níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

A preservação do horizonte A no nível N1 deve-se à proteção da superfície do solo pela forrageira, conforme verificado na taxa de cobertura, contribuindo para proteger o solo e evitar o carreamento de partículas por ação erosiva das chuvas. Pela mesma razão, as raízes desenvolvem-se em profundidade e há maior qualidade estrutural. Resultados semelhantes

foram encontrados por Rocha Júnior et al. (2017) trabalhando com Argissolo em relevo acidentado na região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais.

O nível N2, apesar de ter apresentado índices de fertilidade mais favoráveis ao desenvolvimento de vegetação apresentou menor profundidade de raízes e menor espessura do horizonte A em relação ao nível N1. A justificativa reside na porcentagem de solo exposto do nível N2 ser ligeiramente superior ao nível N1, assim como a declividade média das unidades experimentais. Tal condição contribui para aumento da perda de solo em N2, redução do horizonte superficial. Já a dificuldade de desenvolvimento de raízes é associada a maior densidade do solo nestas áreas, conforme será exposto adiante.

Da mesma forma, a menor espessura do horizonte A verificada nos níveis N3 e N4 está relacionada à exposição do solo e à declividade das áreas amostradas. Os dois níveis apresentam ao aumento progressivo da área de solo exposto associado ao de aumento da declividade, levando a perdas crescentes de solo.

Nos níveis N3 e N4, a condição de degradação do solo também se revela através do ambiente químico desfavorável ao estabelecimento da cobertura forrageira, com ocorrência de daninhas e solo exposto em diferentes proporções. Isto resulta em menor desenvolvimento e preservação da estrutura do solo, pela dificuldade ao desenvolvimento de raízes, e redução do horizonte A devido à erosão hídrica (ROCHA JÚNIOR et al., 2017).

Assim como a cobertura do solo pela vegetação relaciona-se ao desenvolvimento da estrutura do solo pelo aporte do MOS e proteção da superfície contra agentes erosivos, a profundidade de raízes também influencia a agregação numa correlação positiva estatisticamente significativa ($p < 0,10$). Porém, a intensidade da correlação neste caso é inferior ao verificado na cobertura ou exposição do solo ao desenvolvimento da estrutura, limitando-se a explicar 63,2% dos dados (Figura 30).

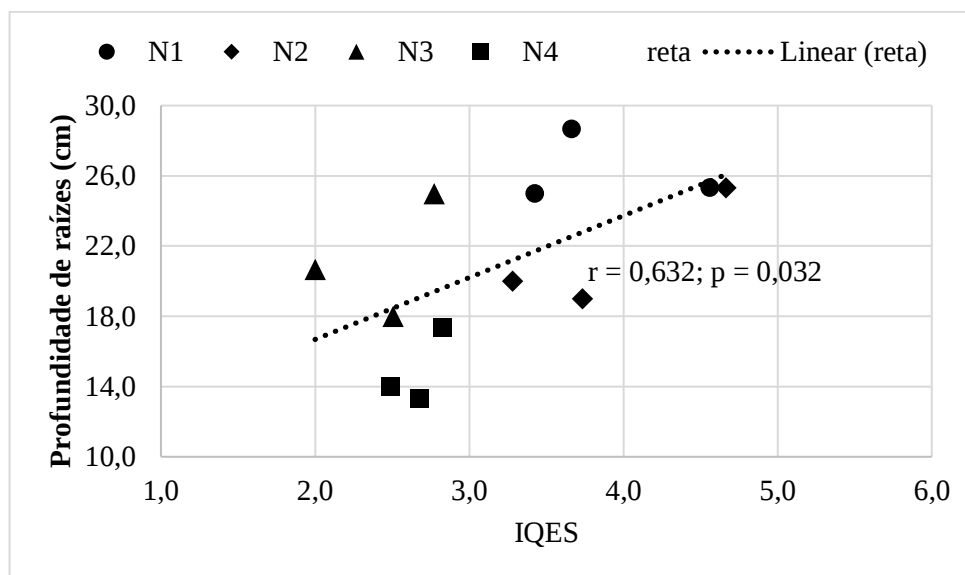


Figura 30: Correlação linear positiva estatisticamente significativa entre o IQES e a porcentagem de solo coberto na época seca.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p -valor considerando nível de significância $< 0,10$.

Em relação a espessura do horizonte A, não foi observado correlação estatisticamente significativa com o IQES para um nível de significância de 10% ($r = 0,452$; $p = 0,143$). Isto significa dizer que variações na espessura do horizonte A, tanto no que diz respeito a sua preservação quanto a sua perda, não estão associados diretamente à qualidade estrutural do solo segundo critérios de avaliação do método DRES. Existem outros fatores que devem estar contribuindo mais fortemente, como o efeito de raízes das gramíneas na acumulação de matéria orgânica no solo.

4.2 Atributos físicos

4.2.1 Densidade do solo

A densidade do solo é um dos atributos físicos que mais se relaciona à estrutura do solo e suas implicações, uma vez que é muito sensível às mudanças no arranjo e disposição das partículas do solo. Por isso, o monitoramento da densidade ao longo do tempo é peça chave para verificar a influência do uso e manejo na qualidade física do solo, sobretudo nos primeiros centímetros de profundidade do solo (FERREIRA, 2016).

Comparando as profundidades amostradas (Figura 31), a menor densidade do solo em superfície deve-se a maior concentração de raízes, conteúdo de matéria orgânica e atividade biológica (mesofauna) (FERREIRA, 2016). Comparando a densidade do solo dos níveis de degradação nesta camada, é possível observar diferença estatística apenas entre os níveis N1 ($1,29 \pm 0,024 \text{ kg dm}^{-3}$) e N4 ($1,44 \pm 0,025 \text{ kg dm}^{-3}$).

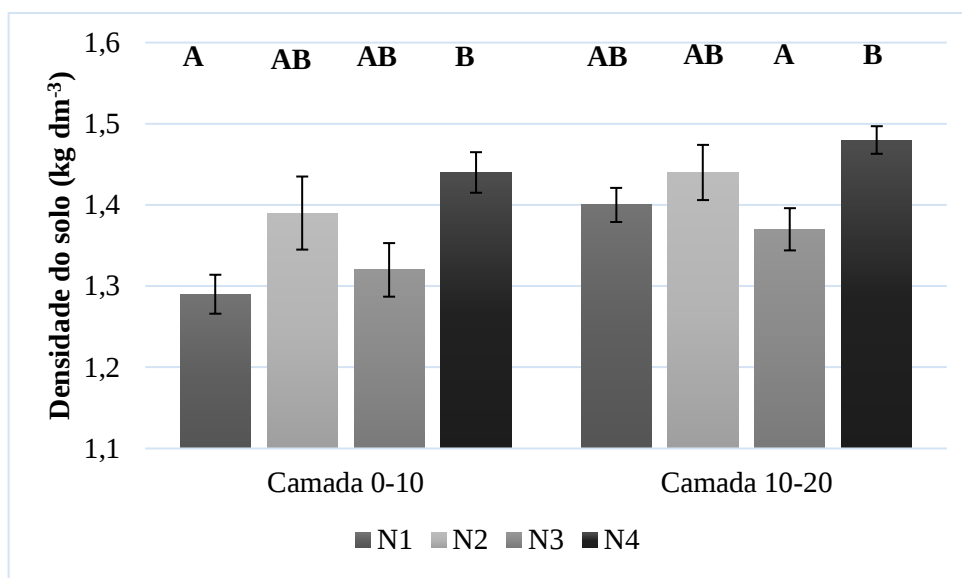


Figura 31: Valores médios e erro padrão da densidade de solo segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

A densidade do solo verificada no nível N4 corrobora que o manejo nestas áreas é prejudicial à estrutura do solo, confirmando as evidências de compactação sugeridas pelos métodos de campo. Tais valores assemelham-se aos verificados por Portugal et al. (2008) em condição de pastagem com sobrepastejo e uso contínuo durante todo o ano. Além disso, estão acima do valor considerado crítico ao desenvolvimento de raízes (PASSOS et al., 2015).

Cabe ressaltar que as áreas de nível N4 localizam-se em propriedades rurais particulares, sendo uma delas manejada segundo a lógica de “pasto raspado é melhor do que pasto queimado”. Isso significa que o produtor intensifica o pastejo da área na época seca, como estratégia para evitar que a queimada de propriedades vizinhas se alastre por suas terras. E a

densidade do solo reflete tal manejo uma vez que a época de amostragem de solo coincide com a época seca do ano.

Os valores de densidade de solo obtidos nos níveis de degradação são superiores aos valores encontrados por Lisbôa et al. (2016) e Coutinho et al. (2012), tanto em superfície quanto em subsuperfície. No estudo de Lisbôa et al. (2016), também foram estabelecidos estágios de degradação de pastagens cujo manejo consistia em roçadas, queimadas, ausência de calagem e adubação, e ajuste de taxa de lotação. Isso indica que o manejo descrito pelos autores, sobretudo no que diz respeito à taxa de lotação variada conforme oferta de pasto, contribuiu para reduzir a compactação em relação às áreas amostradas do presente estudo.

A densidade do solo é um dos indicadores de qualidade do solo mais eficientes na diferenciação dos níveis de degradação, segundo Lisbôa et al. (2016). A camada superficial é mais sensível ao manejo da área, sobretudo no que diz respeito à compactação provocada pelo pisoteamento animal e ao aporte de matéria orgânica advinda da biomassa aérea, radicular e atividade microbiana (LISBÔA et al., 2016).

Apesar da densidade do solo ser um dos atributos físicos associados à estrutura do solo, o IQES obtido a partir do método DRES não guarda correlação estatisticamente significativa com este atributo para um nível de significância de 10% ($r = 0,049$; $p = 0,886$). Isto significa dizer que o método de campo não é capaz de prever a densidade do solo, uma vez que a variação de IQES não é acompanhada pela variação de Ds.

4.2.2 Porosidade total, microporosidade e macroporosidade

Os valores de porosidade total, microporosidade e macroporosidade estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11: Valores médios e erro padrão de e porosidade total, microporosidade e macroporosidade segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
	Porosidade total (m ³ m ⁻³)	
N1	0,47 (1,072) A	0,41 (0,627) A
N2	0,46 (1,272) A	0,44 (1,602) AB
N3	0,50 (1,226) A	0,48 (0,892) B
N4	0,46 (0,944) A	0,46 (0,557) B

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
Microporosidade (m³ m⁻³)		
N1	0,42 (0,668) B	0,37 (0,623) AB
N2	0,40 (1,277) AB	0,38 (1,144) AB
N3	0,38 (0,991) A	0,39 (0,776) AB
N4	0,41 (0,756) AB	0,40 (0,675) B
Macroporosidade (m³ m⁻³)		
N1	0,04 (0,529) A	0,04 (0,308) A
N2	0,06 (0,613) AB	0,07 (0,944) AB
N3	0,12 (1,668) B	0,09 (0,780) B
N4	0,05 (0,512) A	0,06 (0,556) AB

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

Da mesma forma que para a densidade do solo, a porosidade total em superfície traduz os efeitos da MOS proveniente do sistema radicular da gramínea, com aumento da atividade biológica e melhor agregação. Por isso, os valores em superfície são ligeiramente superiores aos da camada 10-20 cm.

Considerando a camada 0-10 cm, os níveis de degradação não podem ser diferenciados segundo a porosidade total, porém os níveis N1 e N3 podem ser diferenciados em função da microporosidade e macroporosidade. Em ambos os casos, existem mais microporos do que macroporos, o que condiz com a classificação textural dos solos. Porém, a proporção entre os microporos e macroporos nos níveis é diferente. Existem mais macroporos no nível N3 do que no nível N1. E pela lógica inversa, há mais microporos no nível N1 do que no N3. Conforme o que foi apresentado até aqui, outros fatores também são capazes de distinguir os níveis N1 e N3 na camada superficial, a saber: a cobertura do solo pela vegetação, o IQES e a espessura do horizonte A.

A distinção quanto ao tamanho dos poros contribui para o entendimento da movimentação de água no solo, sendo os microporos associados a retenção e armazenamento (também chamada “porosidade para a água”), enquanto os macroporos referentes à infiltração e aeração (também chamada “porosidade de aeração”) (FREIRE et al., 2013; FERREIRA, 2016). Isto implica dizer que o nível N1 tem maior capacidade de retenção e armazenamento

de água que o nível N3, condição que beneficia a vegetação e se reflete na maior cobertura do solo, proteção do mesmo e conservação do horizonte superficial.

De acordo com Ferreira (2016), a porosidade de aeração inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou 10% é prejudicial à produção agrícola por comprometer a troca gasosa do solo. Apenas o nível N3 camada 0-10 cm apresenta macroporosidade acima do valor de referência. De modo que todos os demais níveis evidenciam a degradação pela quantidade escassa de macroporos, comprometimento da difusão de CO_2 e O_2 no ar (FERREIRA, 2016), e comprometimento da infiltração de água no solo (OLIVEIRA et al., 2015).

Em outros estudos, o valor de macroporosidade, embora baixo, não ultrapassou o limite mínimo adequado à aeração (MELLONI et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2015; LISBÔA et al., 2016; COUTINHO et al., 2017).

4.2.3 Diâmetro Médio Ponderado e Diâmetro Médio Geométrico

Comparando os valores de DMP e DMG obtidos segundo as camadas amostradas, não foi possível verificar diferença estatística entre os níveis de degradação (Tabela 12), ainda que de forma geral os agregados em superfície sejam ligeiramente superiores na camada superficial pela ação das raízes. Isto significa que ambos os atributos físicos não são eficientes para diferenciar a degradação nas condições deste experimento.

Tabela 12: Valores médios e erro padrão do Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG) segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Nível de degradação ¹	Camada (cm)	
	0-10	10-20
Diâmetro Médio Ponderado (mm)		
N1	3,60 (0,305) ² A ³	3,00 (0,165) A
N2	3,75 (0,198) A	3,42 (0,190) A
N3	3,37 (0,265) A	3,07 (0,254) A
N4	3,21 (0,227) A	3,43 (0,170) A
Diâmetro Médio Geométrico (mm)		
N1	2,08 (0,258) A	3,00 (0,165) A
N2	2,21 (0,232) A	1,88 (0,171) A
N3	1,97 (0,187) A	1,75 (0,179) A

N4

1,68 (0,160) A

2,18 (0,156) A

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

Conforme dito anteriormente, o desenvolvimento da estrutura do solo está associado a três principais fatores: mineralogia, conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo, e manejo da área. Pela análise textural, predomínio de microporos e ocorrência regular de minerais de quartzo nas amostras de solo, a mineralogia contribui de forma uniforme para o desenvolvimento da estrutura em todos os níveis de degradação, não sendo fator diferenciador.

Desta forma, a proximidade dos valores encontrados de DMP e DMG em todos os níveis de degradação e camadas amostradas deve-se ao equilíbrio de fatores que atuam sobre o desenvolvimento e perda da estrutura do solo. Ainda que fosse esperado maiores valores de DMP e DMG nos níveis N1 e N2 pela contribuição da biomassa vegetal para o aumento de MOS e proteção do solo, não se pode afirmar que a qualidade da MOS favoreça a sua permanência no sistema. E, por isso, não há contribuição efetiva para o desenvolvimento de agregados do solo nestes níveis.

Partindo-se do princípio que o método DRES, tem como um de seus principais critérios o tamanho e forma de agregados do solo, foram comparados os comportamentos entre DMP e o IQES, e entre DMG e o IQES. Apesar dos indicadores físicos apresentarem correlação positiva com o índice, o grau de associação entre eles não foi considerado satisfatório.

O DMG sequer apresenta correlação estatisticamente significativa ($r = 0,308$; $p = 0,331$). Já o DMP apresenta correlação estatisticamente positiva para um nível de significância de 10% ($r = 0,566$; $p = 0,059$). Isto significa que 56,6% da variação observada em DMP é acompanhada pela variação de IQES e que o comportamento não se deve ao acaso (Figura 32).

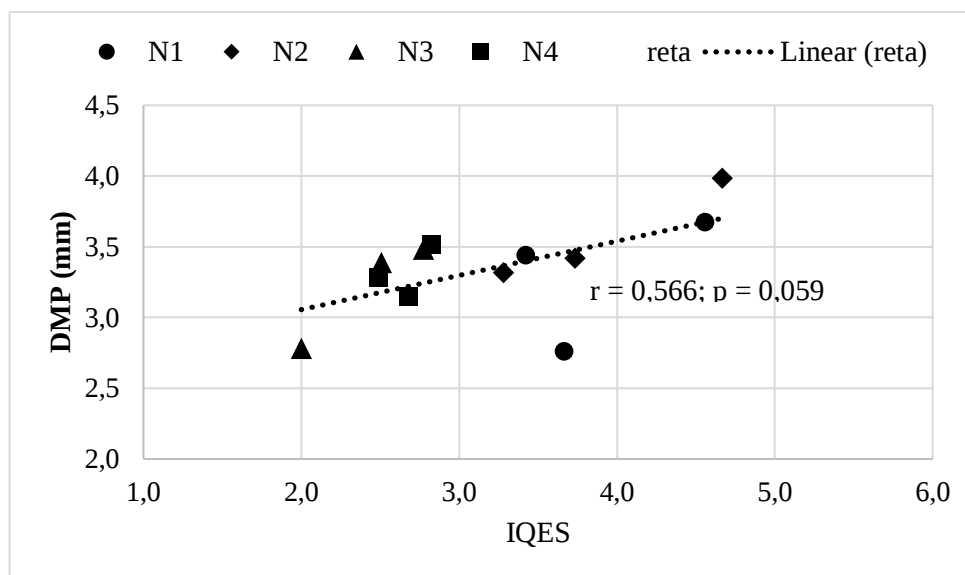


Figura 32: Correlação positiva estatisticamente significativa entre DMP e IQES.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p-valor considerando nível de significância < 0,10.

A correlação revela, portanto, que apenas os agregados de solo não são suficientes para a avaliação da qualidade estrutural do solo. As evidências de conservação e degradação constituem o outro critério de avaliação que não deve ser dispensado. O desenvolvimento das raízes de forma abundante e distribuídas espacialmente, além da atividade biológica são fatores importantes na estruturação do solo.

4.3 Atributos químicos

4.3.1 Teor de Carbono e Estoque de Carbono

Os maiores teores de carbono em superfície são esperados em decorrência do maior conteúdo orgânico na camada superficial. Em decorrência disso, os valores verificados na camada 0-10 cm são ligeiramente acima dos encontrados na camada 10-20 cm. A análise estatística permite diferenciar dois grandes grupos considerando ambas as camadas (Figura 33).

O nível N1 assume maior teor de carbono (camada 0-10 cm: $18,73 \pm 0,924 \text{ g kg}^{-1}$; camada 10-20 cm: $12,28 \pm 0,425 \text{ g kg}^{-1}$) e o nível N4 configura o menor teor de carbono (camada 0-10 cm: $11,74 \pm 0,388 \text{ g kg}^{-1}$; camada 10-20 cm: $8,41 \pm 0,282 \text{ g kg}^{-1}$), embora se assemelhe ao nível N2 (camada 0-10 cm: $13,20 \pm 0,496 \text{ g kg}^{-1}$; camada 10-20 cm: $9,68 \pm 0,530 \text{ g kg}^{-1}$).

kg⁻¹). O nível N3 guarda semelhança com ambos (camada 0-10 cm: 14,49 ± 0,671 g kg⁻¹; camada 10-20 cm: 11,16 ± 0,211 g kg⁻¹).

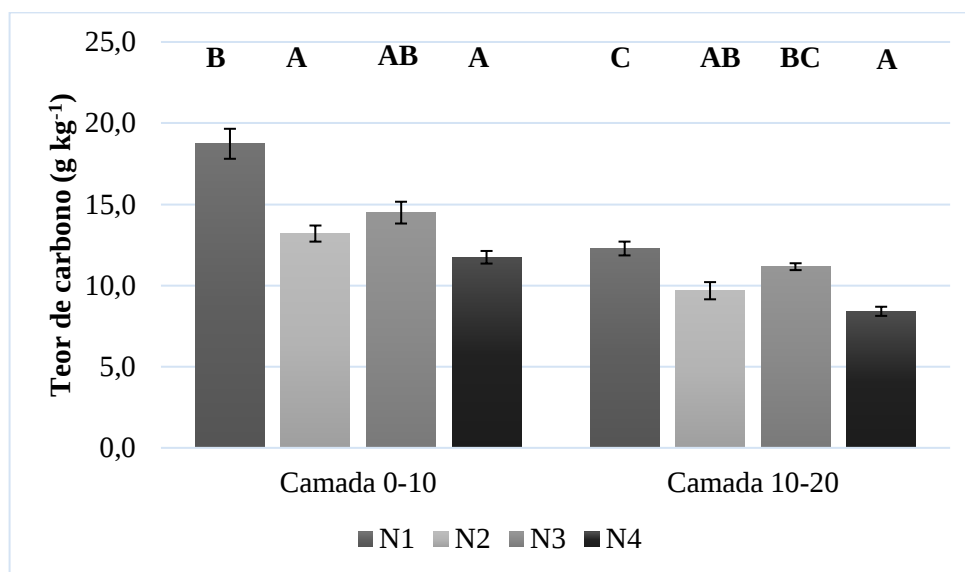


Figura 33: Valores médios e erro padrão do teor de carbono segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

O destaque ao nível N1 pode ser creditado a cobertura forrageira, com aporte regular de matéria orgânicas pelas raízes e o dossel vegetal, conforme verificado por Rocha Júnior et al. (2014). A ocorrência de plantas daninhas no nível N2, embora também contribua para o aporte (LISBÔA et al., 2016), não foi suficiente para equiparar-se ao nível N1 possivelmente devido ao sistema de raízes da gramínea ter dinâmica maior e aportando mais carbono que espécies de folha larga (ROCHA JÚNIOR et al., 2014).

Apesar do carbono, sobretudo a fração orgânica, também contribuir para o desenvolvimento da estrutura do solo, não foi verificada correlação estatisticamente significativa entre o teor de carbono e o IQES ($r = 0,406$; $p = 0,193$). Isto significa que apenas 40,6% das variações de IQES são acompanhadas por variações do teor de carbono, e que as escalas de variação não são compatíveis, podendo ocorrer ao acaso. Isso porque não é somente

matéria orgânica representada pelo carbono que influencia a agregação, mas o tipo de matéria orgânica.

Em relação ao estoque de carbono, o atributo também é capaz de diferenciar os níveis N1 e N4. O maior estoque de carbono é observado no nível N1 ($38,72 \pm 1,378 \text{ Mg C ha}^{-1}$) enquanto que o N4 possui o menor estoque ($26,20 \pm 0,863 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Os níveis N2 ($29,92 \pm 1,388 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e N3 ($32,20 \pm 0,986 \text{ Mg C ha}^{-1}$) assumem valores intermediários e guardam semelhanças entre si e com os demais níveis (Figura 34).

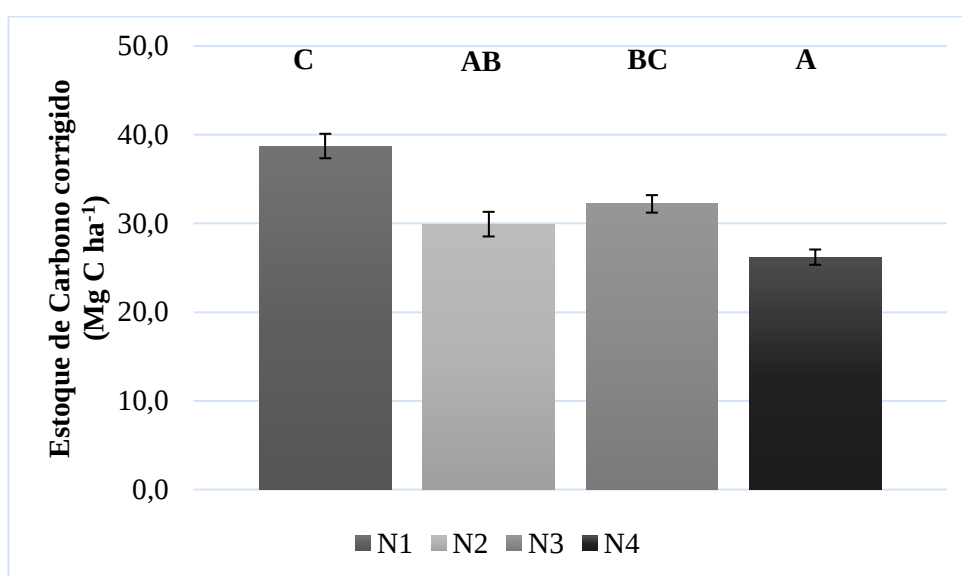


Figura 34: Valores médios e erro padrão do estoque de carbono corrigido pela última camada segundo níveis de degradação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Barra de erro nas colunas corresponde ao erro padrão da medida.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

A maior eficiência do nível N1 em estocar carbono deve-se a cobertura forrageira predominante e a rede de raízes da gramínea. Em seguida, o nível N2 apesar de ter apresentado menores valores de densidade de partícula, guarda similaridades com o estoque de carbono dos níveis N3 e N4. Tal comportamento deve-se aos valores de densidade do solo verificados nas unidades experimentais do nível N2.

Por fim, o nível N4 por ser o de maior porcentagem de solo exposto, é o que possui maior depleção do carbono e menor estoque do elemento.

Diferentemente do observado na correlação do teor de carbono com o IQES, a correlação entre o estoque de carbono e o índice indica significância estatística mesmo que o grau de associação entre as variáveis não seja considerado satisfatório (Figura 35). Ainda assim, nota-se uma correlação linear positiva, indicando que pode-se ter uma ideia também do carbono de forma indireta pelo IQES, ou seja, indica que as áreas com maior IQES estão associadas a maior teor de carbono.

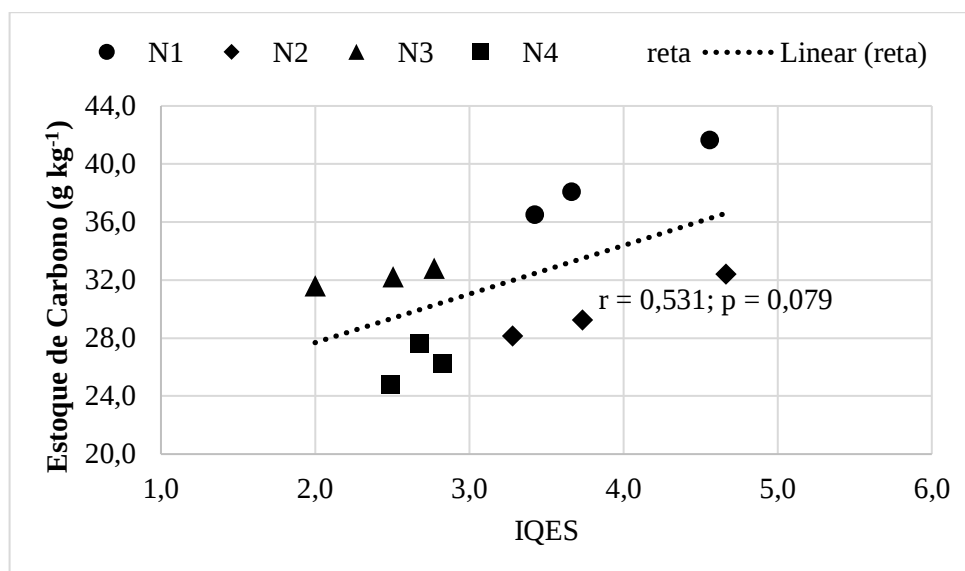


Figura 35: Correlação positiva estatisticamente significativa entre o estoque de carbono corrigido pela última camada e o IQES.

Notas: ¹ IQES: Índice de Qualidade de Estrutura do Solo obtido pelo método DRES (RALISCH et al., 2017).

² r = coeficiente de correlação de *Spearman*; p -valor considerando nível de significância $< 0,10$.

4.3.2 Matéria Orgânica Leve

Maiores valores de MOL em superfície são justificáveis pela contribuição da liteira e predomínio de materiais orgânicos pouco processados pela biota do solo. Porém, este indicador não é eficiente na diferenciação dos níveis de degradação segundo análise estatística (Tabela 13).

Tabela 13: Valores médios e erro padrão da MOL segundo camadas amostradas e níveis de degradação.

Nível de degradação	Camada (cm)	
	0-10	10-20
Matéria Orgânica Leve - MOL (g kg ⁻¹)		
N1	2,05 (0,158) A	0,90 (0,088) A
N2	2,80 (0,668) A	0,87 (0,112) A
N3	1,82 (0,298) A	0,91 (0,157) A
N4	2,24 (0,323) A	0,91 (0,089) A

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Valores médios e erro padrão entre parênteses.

³ Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os níveis de degradação pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de nível de significância.

A proximidade dos valores do MOL entre os níveis de degradação indica que mesmo nas áreas de manejo da pastagem mais favorável à conservação do solo, ainda há baixa contribuição de MOS no sistema solo. Tal como verificado nos índices DMP e DMG, a qualidade da matéria orgânica depositada pela biomassa aérea e radicular nos níveis N1 e N2 não é suficiente para integrar os mecanismos de estabilização em frações menos lábeis. E a ação de agentes erosivos e exposição do solo pela falta de cobertura vegetal no níveis N3 e N4, levam à prejuízos no aporte de compostos orgânicos no solo, quiçá de qualidade que favoreça a sua permanência.

Rocha Júnior et al. (2017) também verificou que o avanço da degradação está relacionado à menor produção de liteira, menor renovação de raízes e, conseqüentemente, à menor produtividade da pastagem.

Lisbôa et al (2016) também obtiveram resultados semelhantes e justificaram contribuição da MOL por plantas infestantes nos piores níveis de degradação, sobretudo as espontâneas de folha larga ricas em lignina. Uma vez que a fração leve é mais sensível a mudanças recentes na composição botânica, os resultados não diferem para as áreas de forrageira predominante ou infestação de daninhas.

4.4 Estatística multivariada

Uma vez que os objetos ocupam lugares distintos e não se sobrepõem no mapa, afirma-se que os indicadores seleccionados para a análise estatística multivariada são capazes de diferenciar os níveis de degradação (Figura 36).

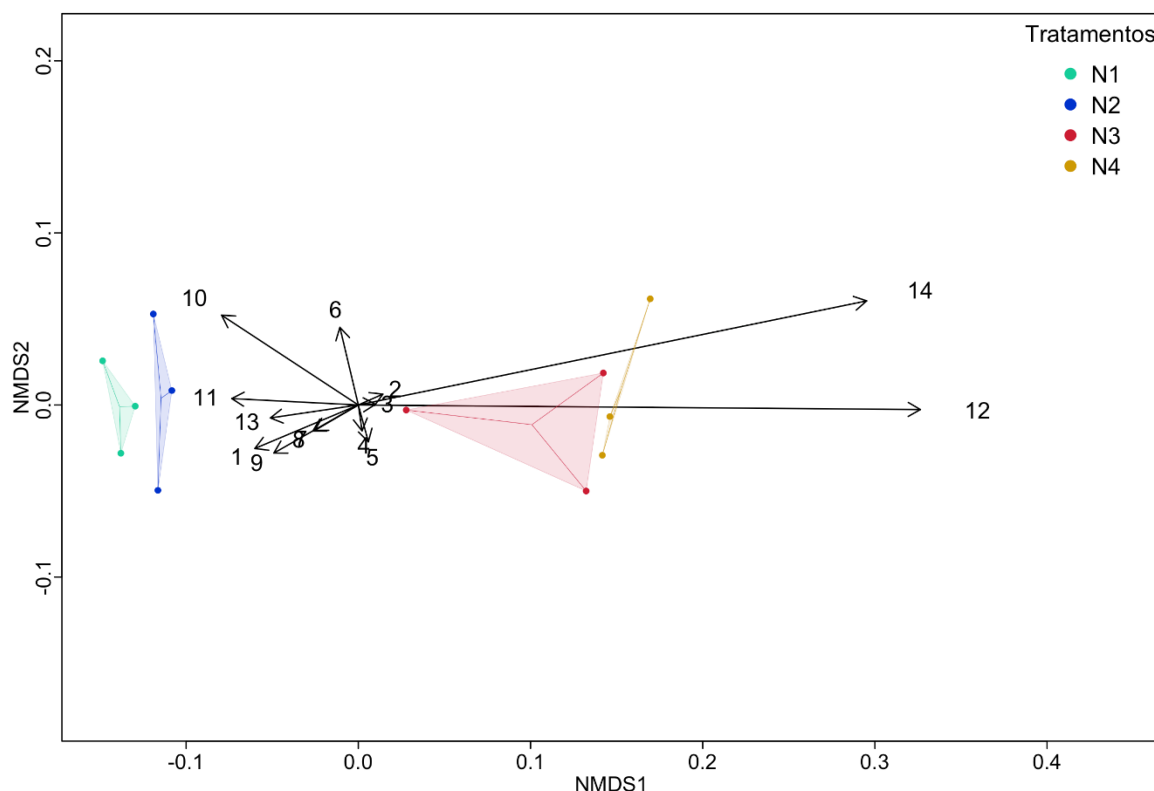


Figura 36: Mapa perceptivo obtido através do escalonamento multidimensional não métrico onde os números ordinais correspondem a uma variável de investigação.

Notas: ¹ N1: nível de degradação leve; N2: nível de degradação moderado; N3: nível de degradação forte; N4: nível de degradação muito forte.

² Variáveis: 1- IQES; 2- porosidade total; 3- densidade do solo; 4- DMP; 5- DMG; 6- MOL; 7- teor de carbono; 8- estoque de carbono; 9- profundidade de raízes; 10- espessura do horizonte A; 11- solo coberto na época seca; 12- solo exposto na época seca; 13- solo coberto na época chuvosa; 14- solo exposto na época chuvosa.

O eixo horizontal do mapa refere-se à evolução da degradação, onde à direita do ponto central tem-se maior nível de degradação, e à esquerda menor nível de degradação. Tendo isto em mente, observa-se um sentido crescente de degradação, considerando a ordenação dos níveis de degradação. Percorrendo o mapa no sentido horizontal da esquerda para direita, o nível N1

ocupa a posição da extrema esquerda seguido de N2 à sua direita. Isso indica que o nível N1 tem menor nível de degradação quando comparado o N2, e que ambos guardam similaridades por estarem próximos entre si e distantes de N3 e N4. Já os níveis N3 e N4 estão à direita do ponto central, sendo N3 mais ao centro e N4 à extrema direita. Isso indica que o nível N3 configura maior nível de degradação que N1 e N2, porém ainda aquém do nível N4. E por estarem próximos entre si, pode-se dizer que há semelhanças entre N3 e N4 (Figura 36).

Portanto, a estatística multivariada confirma a sequência de degradação estabelecida em campo: $N1 < N2 < N3 < N4$ (ordem crescente de degradação).

O formato dos objetos permite inferir sobre a sua homogeneidade dos níveis de degradação. Verifica-se que N1 e N2 ocupam as menores áreas do mapa no sentido horizontal, indicando maior homogeneidade quanto ao nível de degradação que cada um representa. Já o nível N3 possui formato alongado no sentido horizontal, o que indica heterogeneidade entre as unidades experimentais amostradas do nível. Inclusive, há dados de N3 que o aproximam do ponto central. E embora o nível N4 seja praticamente representado por uma reta, a inclinação permite observar que uma das unidades experimentais amostradas apresentou maior condição de degradação do que as demais (Figura 36).

Cada variável de investigação é representada por um vetor no mapa perceptivo. A decomposição de um vetor nos eixos do mapa permite avaliar o quanto ele interfere no nível de degradação (eixo horizontal). Vetores do primeiro e segundo quadrantes quando decompostos em relação ao eixo horizontal, apontam para o desenvolvimento da degradação. Os principais vetores associado ao aumento da degradação, portanto, se referem às variáveis solo exposto na época seca (vetor 12) e solo exposto na época chuvosa (vetor 14), sendo que na época seca há ainda maior contribuição à degradação.

O solo exposto é a variável mais decisiva na caracterização dos níveis de maior degradação pois está ligada ao manejo da área. As unidades experimentais do nível N4, por exemplo, são caracterizadas pelo superpastoreio na época seca (Tabela 3) e isto contribui diretamente para o prejuízo das propriedades físicas e químicas verificadas. Freitas et al. (2014) associa o superpastoreio à perda da cobertura do solo e à redução do sistema radicular, levando a prejuízos na capacidade de infiltração de água e absorção de nutrientes. Lisboa et al. (2016) também verificou que solo exposto foi o critério visual mais eficiente na diferenciação dos níveis de degradação.

A porosidade total (vetor 2), a densidade do solo (vetor 3), a MOL (vetor 6), o DMP (vetor 4) e o DMG (vetor 5) praticamente não interferem na diferenciação dos níveis de degradação. Apesar da porosidade total e densidade do solo apontarem para o desenvolvimento

da degradação (direita), o módulo ou comprimento dos vetores é muito pequeno quando comparado a todos os demais. Já os vetores referentes à MOL, ao DMP e ao DMG, ainda que apresentem maior módulo, possuem projeção desprezível no eixo horizontal. Estas três variáveis também não foram capazes de diferenciar os níveis de degradação na estatística univariada (Tabela 12 e Tabela 13).

Avaliando os vetores do terceiro e quarto quadrantes, isto é, aqueles que indicam menor degradação, os quatro maiores módulos referem-se à espessura do horizonte A (vetor 10), ao solo coberto na época seca (vetor 11), ao IQES (vetor 1), e à profundidade de raízes (vetor 9). O manejo dos níveis N1 e N2 garante maior uniformidade da cobertura do solo e maior densidade de raízes, favorecendo a preservação do horizonte A. E a matéria orgânica do solo é fator decisivo para o desenvolvimento de estrutura do solo considerando que não há variação textural entre as unidades experimentais. Sendo assim, os níveis de menor degradação refletem boa cobertura do solo e maior qualidade estrutural.

5. CONCLUSÕES

Apesar da estatística univariada dos indicadores de qualidade de solo não ter sido suficiente para diferenciar todos os níveis de degradação entre si, a estatística multivariada permitiu tal diferenciação.

A estatística multivariada dos indicadores de qualidade de solo também permitiu confirmar a sequência de degradação estabelecida visualmente no campo.

Considerando a camada superficial, os indicadores de qualidade do solo mais promissores na diferenciação dos níveis de degradação foram: o DRES, a profundidade de raízes, a espessura do horizonte A, a densidade do solo, o teor de carbono e o estoque de carbono. Apesar de não terem sido eficientes na caracterização dos níveis intermediários, os indicadores serviram para diferenciar os níveis extremos de degradação: leve (nível N1) e muito forte (nível N4).

A taxa de cobertura, em ambas as épocas de avaliação da cobertura do solo foi eficiente para diferenciar as pastagens segundo a porcentagem de cobertura forrageira.

A época seca é mais adequada para avaliação dos indicadores na diferenciação dos níveis de degradação de pastagens.

A porcentagem de solo exposto é o indicador mais eficiente na diferenciação dos níveis de degradação de pastagens mais avançados (N3 e N4) em relação os mais brandos (N1 e N2).

6. RECOMENDAÇÕES PARA O FUTURO

A fim de contribuir com trabalhos futuros, recomenda-se que sejam considerados atributos biológicos, além dos físicos e químicos.

Sugere-se detalhar informações relativas à biomassa forrageira, com medidas da altura de pasto e identificação de espécies daninhas, uma vez que estas podem ser bioindicadoras da qualidade do solo.

Em relação à taxa de cobertura, é possível proceder a avaliação visual com imagens de satélite ou geradas por drones. Além de minimizar o esforço físico em campo, tais imagens ajudariam a selecionar melhor os níveis de degradação uma vez que permitem vista superior da área antes mesmo de ir ao local.

Recomenda-se também aumentar o número de repetições e reduzir o número de variáveis, apostando naquelas que se demonstraram mais promissoras neste estudo.

Recomenda-se fazer estudos de mineralogia para compreender a contribuição do material de origem no desenvolvimento da estrutura do solo e de sua qualidade química.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLO, L. L. et al. *Mineralogia e química de algumas unidades de solos do estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. 2012. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 15) Disponível em < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/159381/1/bpd152002mineralogia.pdf> >

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em < DOI < <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507> >

BAILLIE, I. C.; ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. *The Journal of Ecology*, v. 78, n. 2, p. 547, 1990. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2261129?origin=crossref>>.

BODDEY, R. M. Estoques de carbono e emissões nos solos do Brasil. In: LIMA, Magda A. et al. *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília, DF: Embrapa Meio Ambiente, 2012. p. 33–73.

BRIGHENTI, A. M. *Manual de identificação e manejo de plantas daninhas em cultivos de cana-de-açúcar*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2010. 112 p. Disponível em < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/26157/1/Manual-Brighenti.pdf> >

CARDOSO, E. L. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 9, p. 1028–1035, 2010. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000900013> >

CARVALHO FILHO, A.; LUMBRERAS, J.; SANTOS, R. D. *Os solos do Estado do Rio de Janeiro: Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília: EMBRAPA, 2000. Disponível em < http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/9/rel_proj_rj_solos.pdf >

CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277-289, 2010. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001> >

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função dos sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 1, p. 527-538, 1998. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019> >

CEPERJ. Centro de estatísticas, estudos e pesquisas. Estado do Rio de Janeiro. Divisão político-administrativa. Mapa do Estado do Rio de Janeiro- Regiões de Governo e Municípios, 2014. Disponível em: <http://www.ceperj.rj.gov.br/ceep/info_territorios/divis_politico_administrativo.html>.

CESÁRIO, F. V. et al. *Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização*. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. 2010. 7 p. (Comunicado Técnico n. 57) Disponível em < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/128680/1/ComTec-57-Estabilidade-Agregados.pdf>>

COLONELLI, P. *Propriedades Rurais na Mata Atlântica: Conservação ambiental e produção florestal*. São Paulo: MMA Ministério do Meio Ambiente, 2009. 39 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/fnma/_publicacao/1_publicacao22112010060206.pdf>.

CONANT, R. T. Sequestration through forestry and agriculture. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 2, n. 2, p. 238-254, 2011. Disponível em < <https://doi-org.ez24.periodicos.capes.gov.br/10.1002/wcc.101> >

COUTINHO, F. S. *Atributos edáficos e qualidade do solo em áreas de agricultura , pastagem e fragmentos florestais na região do Médio Vale do Paraíba do Sul*, Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012. 67 p. Disponível em <[http://www.ia.ufrj.br/cpacs/arquivos/teses_dissert/314_\(ME-2012\)_Fernando_Silva_Coutinho.pdf](http://www.ia.ufrj.br/cpacs/arquivos/teses_dissert/314_(ME-2012)_Fernando_Silva_Coutinho.pdf)>

COUTINHO, F. S. et al. Atributos edáficos em áreas de agricultura, pastagem e três estágios sucessionais de floresta. *Floresta e Ambiente*, 24: e00091914. 2017. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.091914>>

COUTINHO, R. P. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 2, p. 195–203, fev. 2010. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000200011>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

DANTAS, M. E. *Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro: estudo geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*. CPRM: Brasília, 2000. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Projeto-Rio-de-Janeiro-3498.html> >

DIAS-FILHO, M. B. *Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação*. 4ª ed. Belém, PA: MBDF, 2011. 215 p.

DIAS-FILHO, M. B. *Diagnóstico das pastagens no Brasil*. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 38 p. (Documentos n. 402). Disponível em < <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/986147> >

DORAN, J. W. et al. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set. *Soil Science Society of America*, v. 49. p. 25–37, 1996 (Special publication). Disponível em: < <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300917194>>.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. *Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo*. Corumbá, MS: Embrapa Pantanal. 2008. 4 p. (Comunicado técnico n. 69) Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/792567/1/COT69.pdf>>.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. *Física do solo*. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 1–28.

FONTELLES, M. J. *Bioestatística aplicada à pesquisa experimental*: volume 2. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012. 406 p.

FREIRE, L. R. et al. *Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 434 p. Disponível em < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/177352/1/Manual-de-calagem-e-adubacao-RJ-2013.pdf> >

FREITAS, G. A. et al. Diagnóstico ambiental de áreas de pastagens degradadas no município de Gurupi - TO. *Biota Amazônia*. v. 6, n. 1, p. 10–15, 2016. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v6n1p10-15> >

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. *Atlas dos remanescentes florestais aa Mata Atlântica: Período 2016-2017*. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2018. 63 p. (Relatório Técnico). Disponível em: < <https://www.sosma.org.br/projeto/atlas-da-mata-atlantica/dados-mais-recentes/> >

GUERRA, A. J. T. Degradação dos solos: conceitos e temas. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. DO C. O. *Degradação dos Solos no Brasil*. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. 320 p.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *Plano Estadual de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas: Plano ABC*. Rio de Janeiro: Secretaria de Agricultura, Pecuária, Pesca e Abastecimento. 2018. 49 p. Disponível em < http://www.rj.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=82b929ed-74e5-40ce-ac1f-6f249e5971d5&groupId=132950 >

HAIR JR., J. F. et al. *Multivariate Data Analysis*. 7a ed. Pearson, 2009. 785 p.

HENDERSON, B. B. et al. Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 207, p. 91–100, 1 set. 2015. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.029> >

IBGE. *Séries estatísticas*. Utilização de terras no Brasil. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=1&op=1&vcodigo=AGRO03&t=utilizacao-terras-ha>>.

IBGE. *Séries estatísticas*. Efetivo de animais por rebanho. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=1&op=1&vcodigo=PPM01&t=efetivo-rebanhos-tipo-rebanho>>.

IBGE. *Pesquisa Pecuária Municipal*. Tabelas 2016. Tabela 2.19 Rio de Janeiro. 2016. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>>

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research*, v. 27, n. 1–4, p. 1–8, 1 out. 1993. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90059-X) >

LAL, R. Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 2, n. 3, p. 36–47, 1 set. 2014. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30021-6](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30021-6) >

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 1053–1063, jun. 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300014> >.

LISBÔA, F. M. et al. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1184–1193, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900018> >.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. *Sistemas pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária*. In: *Simpósio sobre Ecossistemas das Pastagens*, Jaboticabal. Anais... Jaboticabal: Fundação de Estudos e Pesquisas em Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia, 1993. p.216-245.

MAPA. *Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura: Plano ABC. (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)*. Brasília, DF: MAPA. 2012. 173 p. Disponível em < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf> >

MELLONI, R. et al. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 2461–2470, 2008. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n6/v32n6a23.pdf> >

MENEZES, C. E. G. *Integridade de paisagem, manejo e atributos do solo no Médio Vale do Paraíba do Sul, Pinheiral-RJ*. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008. Disponível em: <<https://tede.ufrj.br/jspui/handle/tede/326>>.

MMA. *Projeto Biodiversidade e Mudanças Climáticas na Mata Atlântica Parte 1: Experiências e Aprendizados*. Brasília, 2018. 70 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica_emdesenvolvimento/projeto-biodiversidade-e-mudancas-climaticas-na-mata-atlantica>.

NASCIMENTO, M. C. et al. Uso de imagens do sensor ASTER na identificação de níveis de degradação em pastagens. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 196–202, 2006. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100029> >

NIERO, L. A. C. et al. Avaliações visuais do solo como índice de qualidade de um Latossolo Vermelho em oito usos e manejos e sua validação por análises físicas e químicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 1271–1282, 2010. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400025> >

OLIVEIRA, G. G.s et al. Indicadores de qualidade física de Argissolos sob pastagens no leste e sul de MG. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 58, n. 4, p. 388-395, 2015. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2092> >

PASSOS, R. R. et al. Quality indices in degraded pasture in hilly relief. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 36, n. 4, p. 2465–2482, 2015. Disponível em < <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/17928/16693> >

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. Degradação de pastagens em regiões de Cerrado. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 28, n. 3, p. 655–661, 2004. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542004000300023> >

PORTUGAL, A. F. et al. Atributos químicos e físicos de um cambissolo háplico Tb distrófico sob diferentes usos na Zona da Mata Mineira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 32 p. 249-258, 2008. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100024> >

RALISCH, R. et al. *Diagnóstico rápido da estrutura do solo: DRES*. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2017. 65 p. (Documentos n. 390). Disponível em: < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160858/1/Doc-390-OL.pdf> >.

REIS, E. Opportunities and challenges to the sustainable development of cattle raising in Brazil, 1970–2005. *Economia*, v. 18, n. 1, p. 18-39. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1517758016300716>>.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, 1 nov. 2002. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8) >. Acesso em: 28 out. 2017.

ROCHA JÚNIOR, P. R. *Indicadores de qualidade do solo e determinação dos níveis de degradação de pastagens*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Pós Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2012. 135 p. Disponível em < <http://repositorio.ufes.br/handle/10/1212> >

ROCHA JÚNIOR, P. R. et al. Can Soil Organic Carbon Pools Indicate the Degradation Levels of Pastures in the Atlantic Forest Biome?. *Journal of Agricultural Science*, v. 6, n. 1, p. 84–95, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5539/jas.v6n1p84>>.

ROCHA JÚNIOR, P. R. et al. Field-based quality indicators in degraded pasture of the Atlantic forest biome. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, n. 6, p. 652-661. Disponível em <http://www.cropj.com/junior_11_6_2017_652_661.pdf>

SÁ, M. R. A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica Brasileira. *História, Ciências, Saúde*. v. 3, n. 3, p. 558-559, 1996. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-59701996000300014>>

SALTON, J. C. et al. *Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na Embrapa Agropecuária Oeste*. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2012. 8 p. (Comunicado técnico n. 184) Disponível em <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/79247/1/COT2012184.pdf>>

SANTOS, A. C. et al. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de Mar de Morros no Médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 1, p. 1297-1314, 2010. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400027>>

SANTOS, R. D. et al., *Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2015

SANTOS, H. G. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SHEPHERD, G. Visual Soil Assessment: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. *Horizon.mw & Landcare Research*, 2000. 84 p. Disponível em <http://orgprints.org/30582/1/VSA_Volume1_smaller.pdf>

SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Degradação dos Solos no Estado do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. DO C. O. *Degradação dos Solos no Brasil*. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. 320 p.

SILVA, V. V. *Médio Vale do Paraíba do Sul: Fragmentação e vulnerabilidade dos remanescentes da Mata Atlântica*. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) Pós

Graduação em Ciência Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Niterói.,2002. 123 p.
Disponível em: <www.uff.br/analisegeoambiental/mestrado/publicacoes>.

SPAIN, J. M.; GUALDRÓN, R. Degradación y rehabilitación de pasturas. In: LASCANO, C. E.; SPAIN, J. M. (Ed.). *Establecimiento y renovacion de pasturas: conceptos, experiencias y enfoque de la investigacion*. Cali: CIAT, 1991. p. 269–283. Disponível em <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CO2001001082> >

STRASSBURG, B. B.N. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>>.

TEIXEIRA, P. C. et al. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília, DF: Embrapa. 2017. 575 p.

ZIMMER, A. H. et al. *Degradação, recuperação e renovação de pastagens*. Brasília, DF: Embrapa Gado de Corte, 2012. 46 p. (Documentos n. 189) Disponível em <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77431/1/DOC189.pdf>>

APÊNDICE A

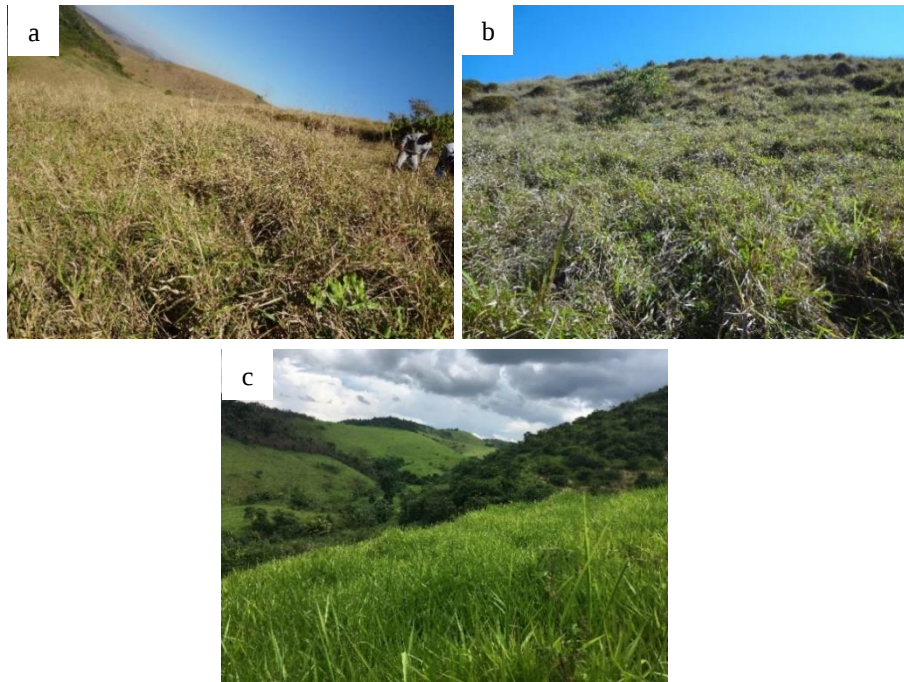


Figura 37: Nível de degradação leve (N1). a) N1A1 na época seca; b) N1A2 na época seca; c) N1A3 na época chuvosa.

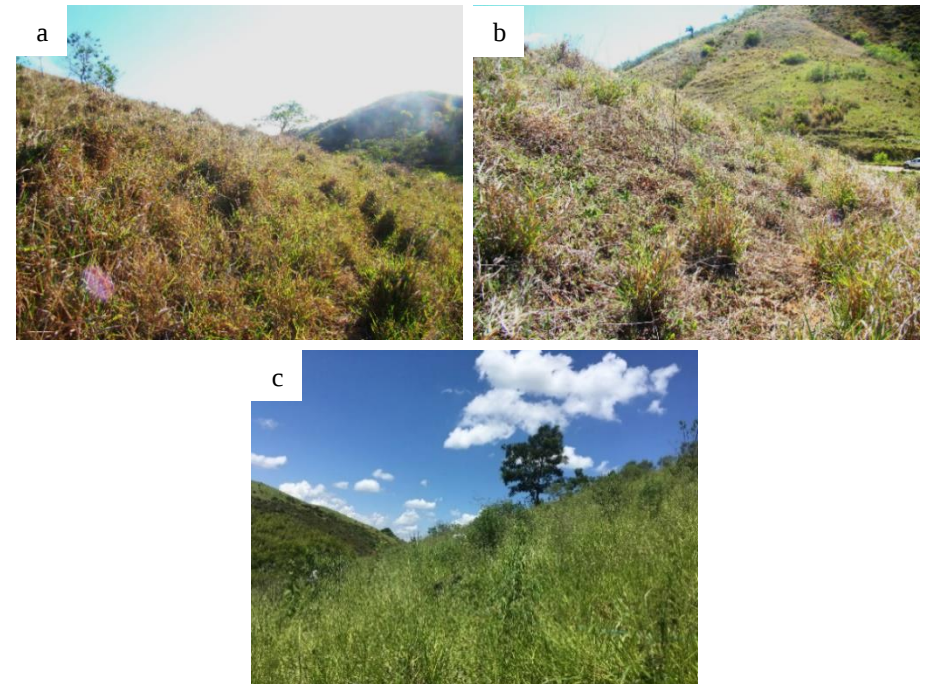


Figura 38: Nível de degradação moderado (N2). a) N2A1 na época seca; b) N2A2 na época seca; c) N2A3 na época chuvosa.



Figura 39: Nível de degradação forte (N3). a) N3A1 na época seca; b) N3A2 na época chuvosa; c) NA3 na época seca.

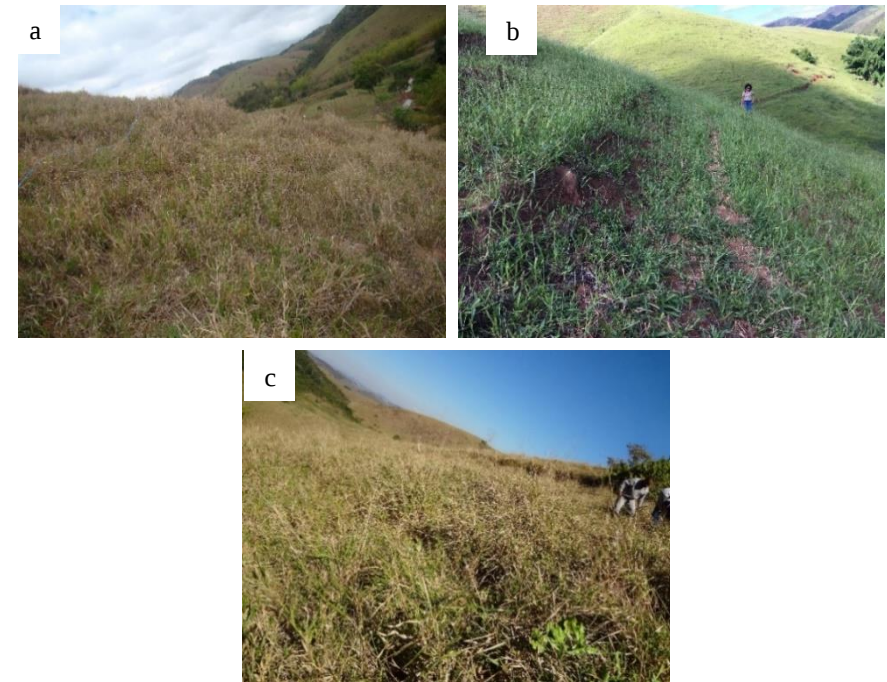


Figura 40: Nível de degradação muito forte (N4). a) N4A1 na época seca; b) N4A2 na época seca; c) N4A3 na época seca.

APÊNDICE B

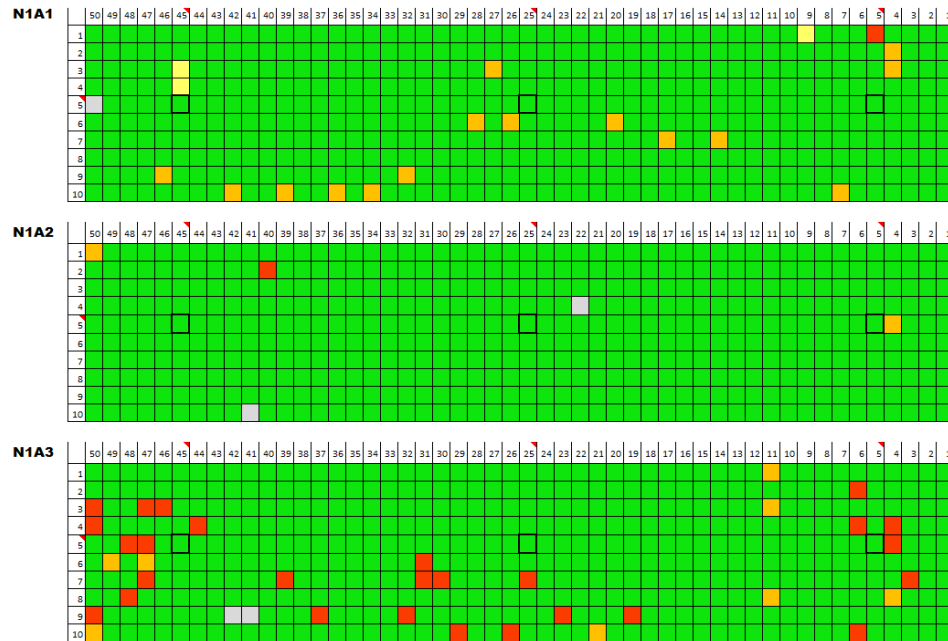


Figura 41: Mapa de Cobertura das áreas de nível N1 na época seca.

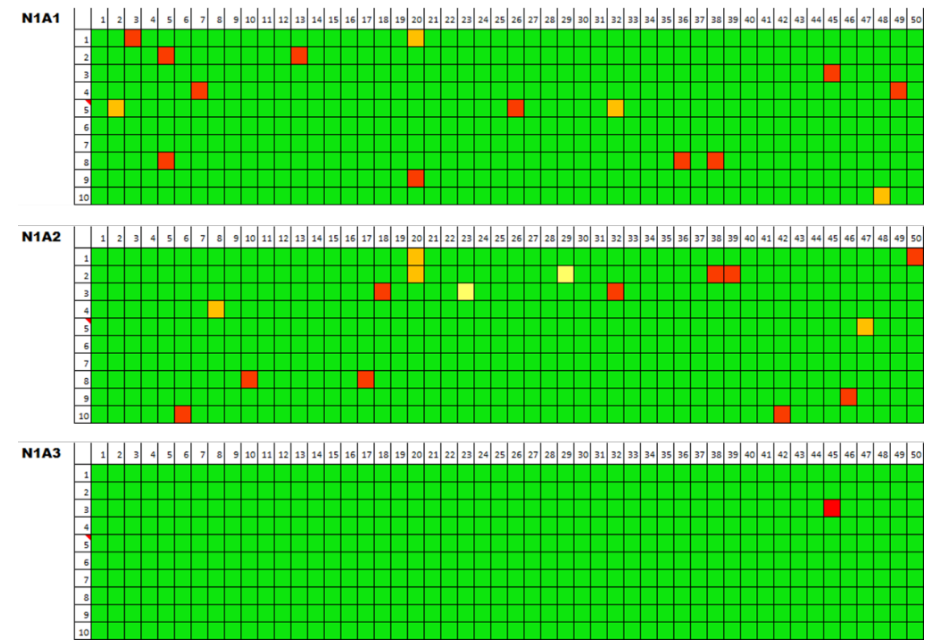


Figura 42: Mapa de Cobertura das áreas de nível N1 na época chuvosa.

Legenda:

Forrageira
 Solo exposto
 Planta Infestante de Folha Larga
 Planta Infestante de Folha Estreita
 s/info



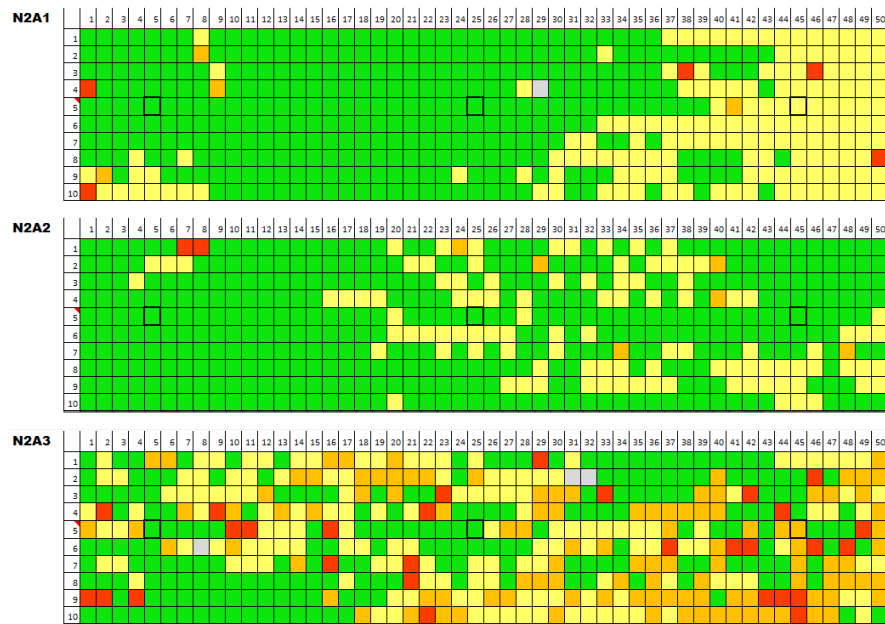


Figura 43: Mapa de Cobertura das áreas de nível N2 na época seca.

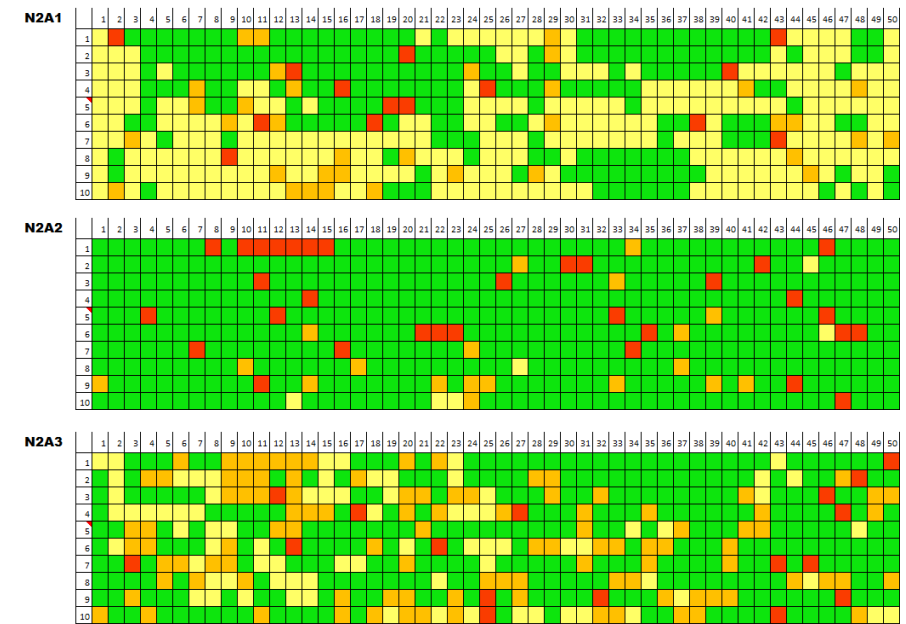


Figura 44: Mapa de Cobertura das áreas de nível N2 na época chuvosa.

Legenda:

Forrageira
Solo exposto
Planta Infestante de Folha Larga
Planta Infestante de Folha Estreita
s/info



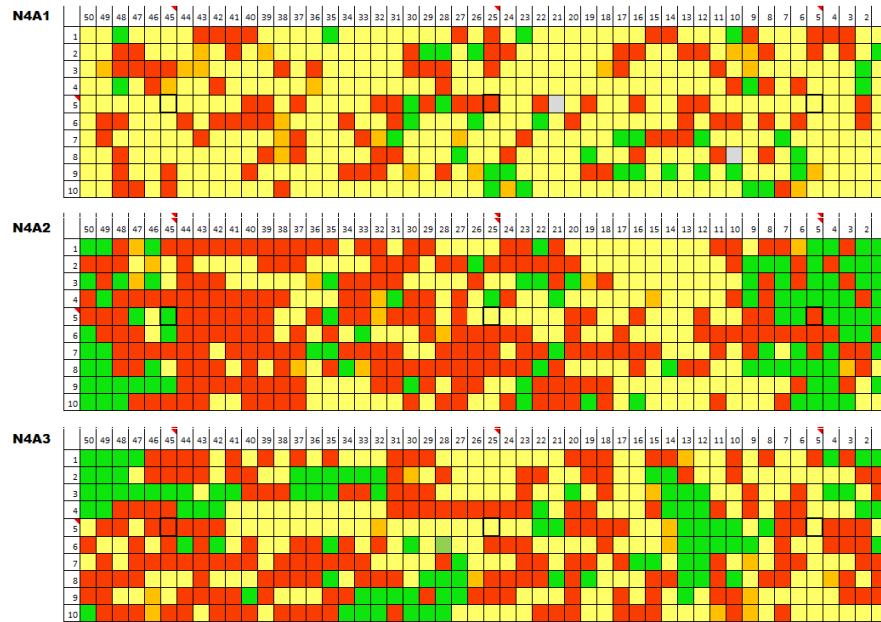


Figura 45: Mapa de Cobertura das áreas de nível N3 na época seca.

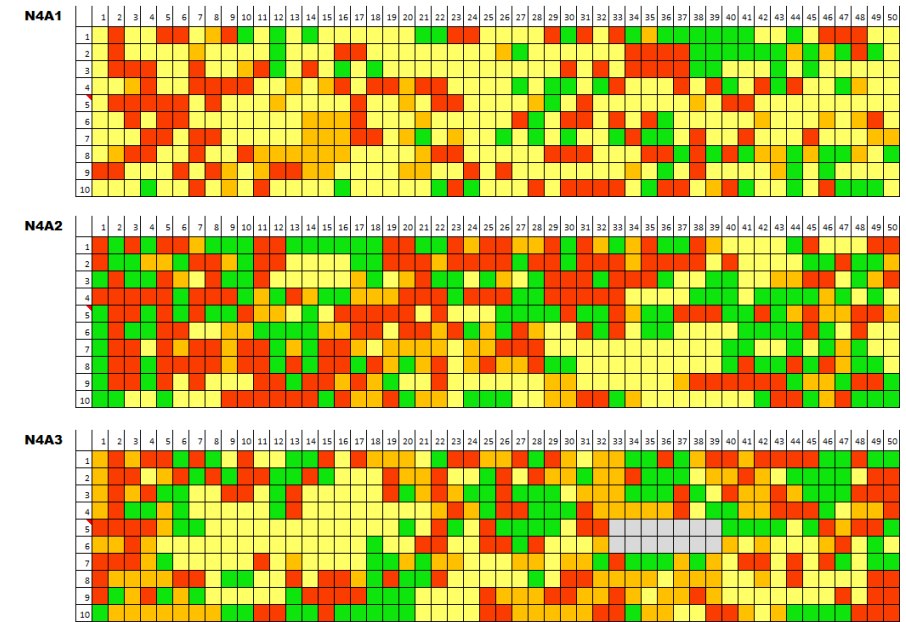


Figura 46: Mapa de Cobertura das áreas de nível N3 na época chuvosa.

Legenda:

Forrageira
Solo exposto
Planta Infestante de Folha Larga
Planta Infestante de Folha Estreita
s/info



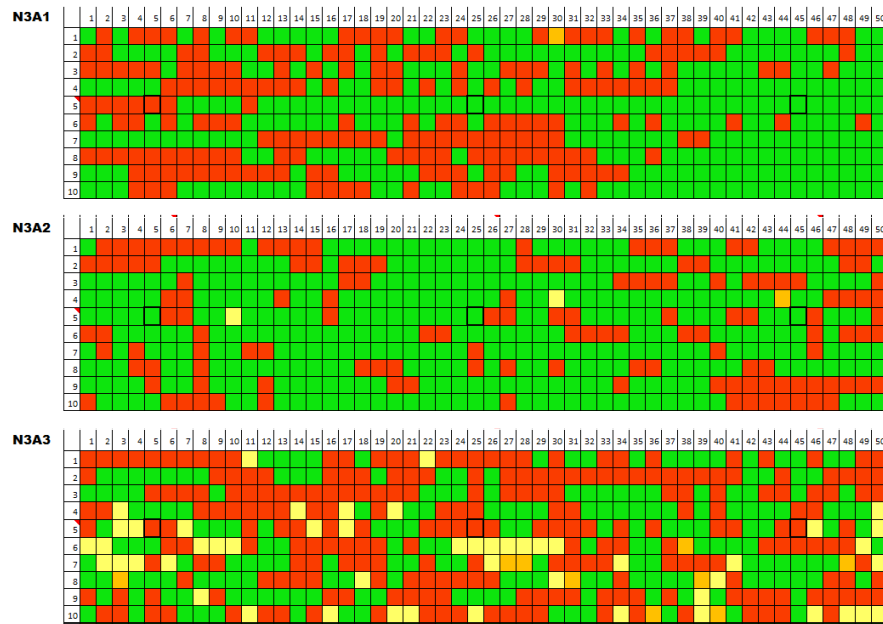


Figura 47: Mapa de Cobertura das áreas de nível N4 na época seca.

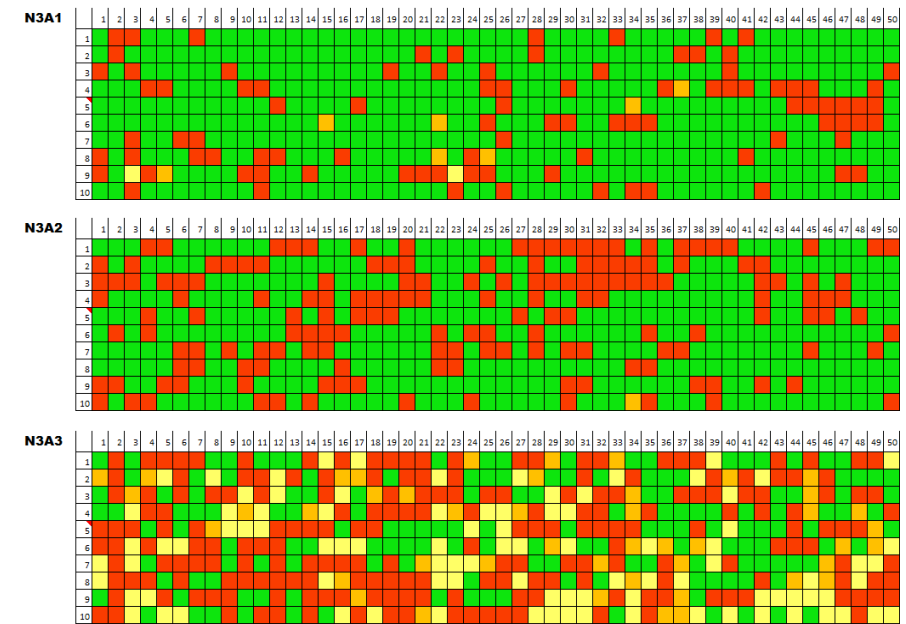


Figura 48: Mapa de Cobertura das áreas de nível N4 na época chuvosa.

Legenda:

Forrageira
Solo exposto
Planta Infestante de Folha Larga
Planta Infestante de Folha Estreita
s/info

