



## **Influência de atributos físicos, químicos e hídricos de solos e área foliar nos níveis de degradação de pastagens cultivadas**

### **César de Oliveira Ferreira Silva**

Doutorando em Engenharia Agrícola, UNICAMP, Brasil  
cesar.silva@feagri.unicamp.br

### **Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues**

Doutora em Biologia Vegetal, UNICAMP, Brasil, e pesquisadora da Embrapa Territorial  
cristina.rodrigues@embrapa.br

### **Célia Regina Grego**

Doutora em Agronomia, UNESP, Brasil, e pesquisadora da Embrapa Agricultura Digital  
celia.grego@embrapa.br

### **Carlos Fernando Quartaroli**

Mestre em Agronomia, USP, Brasil, e pesquisador da Embrapa Territorial  
carlos.quartaroli@embrapa.br

## RESUMO

Compreender os fatores predominantes para explicar degradação de pastagem é crucial para construir planos de recuperação viáveis e assertivos. O presente artigo produziu uma análise multivariada para reconhecimento de padrões de correlação entre atributos físico-químicos do solo e área foliar, com quatro diferentes níveis de degradação de pastagens cultivadas (não degradada, com baixa, média e alta degradação), na região noroeste do estado de São Paulo. Análises de componentes principais, estatística exploratória e dendrogramas de análise hierárquica de agrupamentos foram feitos para atributos físico-químicos do solo nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade. A taxa de infiltração de água, a fitomassa e a área foliar foram maiores em pastagem não degradada. A camada mais superficial apresentou agrupamentos mais reconhecíveis entre autovetores e níveis de degradação que a camada mais profunda. Atributos químicos (P, K, Ca, Mg, matéria orgânica, soma de bases e saturação de bases) foram mais explicativos quanto à variabilidade de degradação, enquanto os atributos físicos, como granulometria e parâmetros hídricos do solo, têm capacidade de explicação menor. Ações mais assertivas para a recuperação dessas pastagens podem priorizar os parâmetros mais explicativos na camada de 0 a 0,10 m. Esta abordagem pode ser replicada para estudos de recuperação de pastagens e planos de monitoramento, de modo a indicar priorização de parâmetros e otimização de custos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compactação. Permeabilidade. Fitomassa. Análise multivariada.

## 1 INTRODUÇÃO

Globalmente, as pastagens são o principal tipo de uso da terra e ocupam dois terços de toda a área arável (FAO, 2022). No Brasil, em 2021, as pastagens cultivadas ocupavam 164 milhões de hectares (MAPBIOMAS, 2022) e as pastagens naturais, 155,8 milhões de hectares (UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2022), representando, respectivamente, 19,7% e 18,9% do território nacional. Essas pastagens mantêm o maior rebanho bovino comercial do mundo, com 218 milhões de cabeças (IBGE, 2017), que tornam o Brasil o segundo maior produtor de carne e líder nas exportações mundiais (ABIEC, 2019).

Dentro dessa vasta extensão territorial há áreas subutilizadas, com pastagens degradadas (MAPBIOMAS, 2022), haja vista os baixos índices zootécnicos que refletem a produtividade da pecuária de corte (MACEDO; ARAÚJO, 2019). As atividades agropecuárias sem práticas conservacionistas têm razoável participação na degradação dos solos e consequente efeito nos recursos hídricos e no declínio da produtividade das culturas, inclusive das pastagens (EMBRAPA, 2011a). Também contribuem para a degradação das pastagens a sua má implantação, com o uso de espécies ou cultivares forrageiras muitas vezes inadequadas às características edafoclimáticas da região, bem como a falta de reposição de matéria orgânica e mineral no solo, e a taxa de lotação inadequada à capacidade de suporte de pastejo (EMBRAPA, 2011a). Como consequência, estima-se que de 70% a 80% das pastagens cultivadas brasileiras (entre 120,6 e 137,8 milhões de ha), ocupadas na maioria por forrageiras do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*) seguidas do gênero *Panicum*, apresentam algum estágio de degradação (IBGE, 2017).

Em virtude da gravidade desse problema ambiental e socioeconômico, existem políticas agrícolas e pecuárias em apoio a projetos de recuperação de pastagens degradadas e à implantação e ampliação de sistemas de integração de lavoura, pecuária e floresta (ILPF), como o Programa de Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que estimulam o desenvolvimento

sustentável da agropecuária (GIANETTI; FERREIRA FILHO, 2020).

A degradação dos solos conduz a uma diminuição da capacidade produtiva, que pode ser avaliada por meio de seus atributos químicos e físicos. Esses atributos são alterados quando o solo passa por alguma interferência antrópica, como tipos de manejo (TORRES; RICHTER; VOHLAND, 2019). Na avaliação da capacidade produtiva de um solo, a parte física é tão importante quanto a parte química ou a fertilidade (FELTRAN-BARBIERI; FÉRES, 2021).

## 2 OBJETIVOS

O objetivo do estudo ora apresentado foi avaliar, por meio de análise multivariada, atributos químicos e físicos e propriedades físico-hídricas do solo, bem como atributos da parte aérea da forrageira (fitomassa e índice de área foliar ou IAF) de pastagens com diferentes níveis de degradação, para o reconhecimento de padrões de níveis de degradação.

## 3 METODOLOGIA

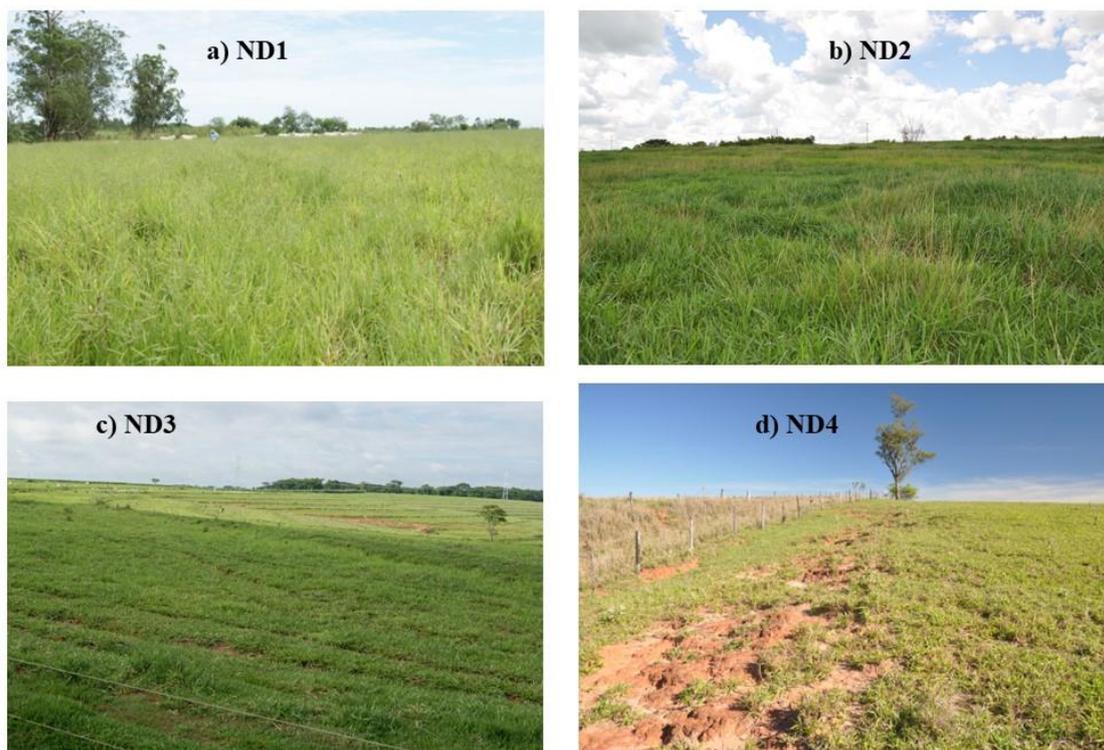
As áreas de estudo foram pastagens formadas basicamente por *Urochloa brizantha* (A. Rich.) R. D. Webster (syn. *Brachiaria brizantha*) localizadas no município de Guararapes, no Planalto Ocidental, região noroeste do estado de São Paulo, compreendidas entre os paralelos 21°15' e 21°28' de latitude Sul e os meridianos 50°35' e 50°45' de longitude Oeste, com altitude média de 398 m. Guararapes tem clima do tipo Aw (verão quente e úmido e inverno ameno e seco) segundo a classificação climática de Köppen. Apresenta precipitação anual média de 1.480 mm, com chuvas concentradas de setembro a março, e temperaturas médias anuais de 27 °C. A principal atividade econômica do município é a agropecuária (IBGE, 2022).

Para o trabalho de campo, foram selecionadas quatro áreas de pastagens com braquiária, classificadas quanto ao nível de degradação em pastagem não degradada (Figura 1a), pastagem com baixa degradação (Figura 1b), pastagem com média degradação (Figura 1c) e pastagem com alta degradação (Figura 1d), representadas, respectivamente, pelas siglas ND1, ND2, ND3 e ND4. Essa classificação foi feita previamente por observações de campo (estimativa de cobertura de solo e frequência de plantas invasoras) e coletas da parte aérea das forrageiras, para estimativa da fitomassa, conforme método adaptado de Nascimento Júnior et al. (1994) e descrito por Rodrigues et al. (2022). A área classificada como ND2 recebeu fertilização nitrogenada por Ajifer. O Ajifer é um fertilizante organomineral líquido, subproduto da fabricação do aminoácido essencial lisina (presente no glutamato monossódico) produzido pela Ajinomoto (SCHULTZ; REIS; URQUIAGA, 2015).

Os solos mapeados nas áreas de estudo (escala 1:50.000), conforme Valladares et al. (2012), foram: “Latossolo Vermelho Eutrófico típico com horizonte A moderado e textura média” (LV1); e associação de “Argissolo Vermelho Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura média e arenosa/ média” + “Latossolo Vermelho Eutrófico típico e cambissólico, horizonte A moderado, textura média” (PV1). As pastagens ND2, ND3 e ND4 estavam localizadas na unidade de mapeamento PVA1 e a pastagem ND1, na unidade de mapeamento

LV1. As classes de relevo predominantes nesta área são “suave ondulado” e “ondulado”, com ocorrência também de relevo “plano”.

Figura 1 – Aspecto das pastagens com diferentes níveis de degradação no ano de 2009 nas áreas selecionadas para amostragens no município de Guararapes, SP (ND1 = não degradado, ND2 = baixa degradação, ND3 = média degradação, ND4 = alta degradação).



Fonte: Autores, 2023.

Em dezembro de 2009 foi feita a amostragem do solo nas profundidades de 0 m a 0,10 m e de 0,10 m a 0,20 m, para determinação dos atributos químicos e físicos do solo nas pastagens com diferentes níveis de degradação. As amostras foram coletadas em cinco pontos aleatórios (amostra composta), distribuídos por toda a extensão de cada área selecionada. As amostras de solo foram submetidas às seguintes análises químicas: matéria orgânica (MO,  $\text{g.dm}^{-3}$ ), pH em  $\text{CaCl}_2$ , fósforo (P,  $\text{mg.dm}^{-3}$ ) e potássio (K,  $\text{mg.dm}^{-3}$ ) disponíveis, cálcio (Ca,  $\text{mmolc.dm}^{-3}$ ), magnésio (Mg,  $\text{mmolc.dm}^{-3}$ ), acidez potencial (H+Al,  $\text{mmolc.dm}^{-3}$ ), soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%).

Para a caracterização da granulometria, amostras deformadas foram coletadas para determinação dos teores de areia, silte e argila ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011b). A coleta foi de 0 m a 0,20 m de profundidade de solo, perfazendo 28 amostras no total. Para a determinação da porosidade (PS) em  $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$  (macroporosidade ou MAPS, microporosidade ou MIPS, e porosidade total ou PT) e densidade do solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ), foram coletadas amostras indeformadas utilizando o método do anel volumétrico, conforme metodologia descrita por Camargo et al. (1986), em duas frações do solo (de 0 m a 0,10 m e de

0,10 m a 0,20 m).

Em dezembro de 2010, foi feita a caracterização físico-hídrica do solo nas quatro áreas com pastagens em diferentes níveis de degradação. Em cada área, a caracterização foi feita em 30 pontos. Em cada ponto, foi determinada a taxa de infiltração tridimensional de água no solo saturado, na profundidade de 0,10 m. A infiltração tridimensional considera as componentes direcionais dos fluxos na vertical, horizontal e no declive. Para tanto, abriu-se um orifício no solo, com um trado holandês, até a profundidade desejada, e mediu-se a taxa de infiltração de água em cada ponto com o permeâmetro de Guelph, modelo IAC (VIEIRA, 1998), obtendo-se a taxa de infiltração constante em  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ .

A resistência do solo à penetração (indicador da compactação do solo) foi obtida utilizando-se o penetrômetro de impacto (STOLF, 1991). Foi feito o cálculo da resistência (MPa) para camada da superfície até 0,20 m de profundidade. No momento da medição com penetrômetro, o solo foi amostrado para caracterização do teor de água pelo método gravimétrico. Assim, foram quantificadas as capacidades de campo a 6KPa (CAP) e a umidade (em ponto de saturação).

A avaliação da biomassa aérea das pastagens nos quatro níveis de degradação foi feita em duas épocas do ano (janeiro de 2010 e agosto de 2010). A coleta de material para essa avaliação foi feita em pontos distribuídos aleatoriamente em cada área estudada. Em cada ponto, a parte aérea da vegetação dentro de um quadrado com 0,5 m de lado foi cortada. Foram separadas a matéria verde da matéria morta e as espécies invasoras. O IAF foi obtido usando o equipamento LAI-2000 entre os dias 26 e 29 de janeiro de 2010, conforme descrito em Andrade et al. (2013).

A análise de componentes principais (PCA) exploratória foi utilizada para entender a contribuição de cada atributo químico e físico-hídrico do solo para a variabilidade observada. Antes da aplicação da PCA, avaliou-se a pertinência das amostras para a PCA por meio do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), ou índice de adequação da amostra (KAISER, 1974). Esse teste analisa a redundância dos atributos por meio da análise de correlação parcial e retorna valores entre 0 e 1. Valores maiores que 0,6 indicam que os atributos e as amostras são pertinentes para análises fatoriais (MAO; MO; GUO, 2013; GUMBO; DZAGA; NETHENGWE, 2016; GHOLIZADEH; MELESSE; REDDI, 2016). Antes da aplicação da PCA, os dados, devido às suas diferenças dimensionais, foram padronizados utilizando a função de padronização pelo z-score (LIU; LIN; KUO, 2003).

A PCA dos atributos químicos e físicos do solo foi calculada utilizando a função “princomp”, nativa do programa R (R CORE TEAM, 2023). O pacote “multcompView” foi utilizado para o Teste de Tukey, para avaliação das médias dos dados que apresentavam distribuição normal (GRAVES, 2015), e o pacote “Pgirmess” para o Teste de Kruskal-Wallis, para comparação das médias dos atributos com dados que não apresentavam distribuição normal e nem eram passíveis de transformação (GIRAUDOUX; GIRAUDOUX, 2018). Os dendrogramas foram obtidos por meio da construção da matriz de dados padronizados. Os coeficientes de variação (CV) foram classificados conforme o critério de Warrick e Nielsen (1980) em baixo (< 12%), médio (de 12% a 60%) e alto (> 60%).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estatística descritiva e análise de correlação dos atributos químicos, físicos e hídricos dos solos

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores médios dos atributos químicos e físicos dos solos nas profundidades de 0 m a 0,10 m e de 0,10 m a 0,20 m para os níveis de degradação ND1, ND2, ND3 e ND4 das pastagens, acompanhados dos resultados do teste de Tukey. Os CV foram de baixos a médios nas duas profundidades de solo.

Tabela 1 - Análise dos atributos químicos e atributos físicos das pastagens na profundidade do solo entre 0 e 0,10 m (ND1 = não degradado, ND2 = baixa degradação, ND3 = média degradação, ND4 = alta degradação), pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

	pH	Mg (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	H+Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	V%	PS (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	MIPS	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	MO (g.dm <sup>-3</sup> )	P (mg.dm <sup>-3</sup> )	K (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Silte (g.kg <sup>-1</sup> )
ND 1	5,1 a	8,6 a	17,6 b	59,0 a	0,484 a	0,330 ab	1,54 b	20,20 b	3,8 b	2,5 b	52,8 c
ND 2	4,8 b	7,0 ab	27,4 a	54,0 ab	0,484 a	0,358 a	1,54 b	27,4 a	7,0 a	5,4 a	99,8 a
ND 3	4,8 b	4,6 b	20,0 b	47,6 b	0,416 b	0,314 ab	1,66 a	14,4 c	1,6 c	3,1 b	71,0 b
ND 4	4,7 b	5,6 b	20,6 b	47,4 b	0,456 ab	0,286 b	1,55 ab	15,2 c	1,4 c	1,7 b	68,0 bc
CV %	2,4	21,8	9,9	10,9	7,5	8,3	4,3	4,2	19,8	26,4	13,3

Fonte: Autores, 2023.

Tabela 2 - Análise dos atributos químicos e atributos físicos das pastagens na profundidade do solo entre 0,10 e 0,20 m (ND1 = não degradado, ND2 = baixa degradação, ND3 = média degradação, ND4 = alta degradação), pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

	pH	Mg (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	H+Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	V%	PS (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	MIPS	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	MAPS
ND1	5,0 a	7,6 a	18,4 b	57,4 a	0,484 a	0,332 a	1,53 a	0,154 a
ND2	4,9 a	7,0 a	25,0 a	56,2 a	0,462 a	0,332 a	1,59 a	0,134 a
ND3	4,8 a	4,6 a	20,4 ab	47,2 a	0,442 a	0,318 ab	1,61 a	0,124 a
ND4	4,8 a	5,4 a	19,8 b	46,6 a	0,454 a	0,276 b	1,59 a	0,176 a
CV%	3,7	26,0	12,6	16,2	7,2	7,6	4,5	25,5

Fonte: Autores, 2023.

A saturação por bases (V%), considerada um indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, apresentou maior valor médio significativo ( $p < 0,05$ ) na pastagem sem degradação (ND1) na profundidade de solo de 0 m a 0,10 m, sem diferir da pastagem de baixa degradação (ND2). O teor de Mg apresentou resultado similar a V%. O teor de matéria orgânica e o teor de P no solo apresentaram maiores valores médios significativos ( $p < 0,05$ ) na

pastagem ND2, seguida das outras pastagens (ND1, ND3 e ND4) na profundidade de solo de 0 m a 0,10 m. Na mesma profundidade de solo, o teor de K foi significativamente maior ( $p < 0,05$ ) somente na pastagem ND2. Uma possível explicação é a aplicação recente, de acordo com o produtor rural, de um fertilizante (Ajifer) rico em MO e K, o que pode ter contribuído para o incremento da fertilidade.

Na profundidade de 0,10 m a 0,20 m de solo, a V%, o Mg e o pH não apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) em nenhuma das pastagens. Todos os solos das pastagens estudadas foram considerados agronomicamente ácidos, com pH ( $< 5,5$ ) baixo, o que significa menor disponibilidade de Ca, Mg e P às plantas.

Não foi observada diferença significativa nos valores de MAPS dos solos das pastagens estudadas (volume de poros responsável pela aeração das raízes), mas a pastagem mais degradada (ND4) apresentou o maior valor médio ( $0,176 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Conforme Lima et al. (2007), o valor de MAPS detectado está dentro da faixa do ideal para esse tipo de solo, que é entre  $0,170$  e  $0,250 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Este resultado provavelmente decorreu da condição de subpastejo, sem a pressão do pisoteio animal na pastagem ND4 após essa pastagem ter ficado anteriormente submetida a excessivo número de animais na área.

As Tabelas 3 e 4 apresentam o Teste de Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ) para as médias dos atributos químicos e físicos dos solos que não apresentaram distribuição normal, na profundidade do solo de 0 m a 0,10 m e de 0,10 m a 0,20m.

Tabela 3 - Análise dos atributos químicos e atributos físicos das pastagens na profundidade do solo entre 0 e 0,10 m (ND1 = não degradado, ND2 = baixa degradação, ND3 = média degradação, ND4 = alta degradação) pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). F indica que não houve diferença e V indica que houve diferença.

	Ca ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	SB ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	CTC ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	Areia ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Argila ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	MAPS
ND1–ND2	5,0 F	4,8 F	6,4 F	2,8 F	10,10V	1,9 F
ND1–ND3	6,2 F	6,6 F	5,6 F	9,8 F	9,1 F	6,3 F
ND1–ND4	3,2 F	5,0 F	4,4 F	8,2 F	8,4 F	3,4 F
ND2–ND3	11,2 V	11,4 V	12,0 V	7,0 F	1,0 F	4,4 F
ND2–ND4	8,2 F	9,8 F	10,8 V	5,4 F	1,7 F	5,3 F
ND3–ND4	3,0 F	1,6 F	1,2 F	1,6 F	0,7 F	9,7 F

Fonte: Autores, 2023.

Tabela 4 - Análise dos atributos químicos e atributos físicos das pastagens na profundidade do solo entre 0,10 e 0,20 m (ND1 = não degradado, ND2 = baixa degradação, ND3 = média degradação, ND4 = alta degradação) pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). F indica que não houve diferença e V indica que houve diferença.

	Ca ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	SB ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	CTC ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )	MO ( $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	P ( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	K ( $\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ )
ND1–ND2	4,2 F	4,4 F	5,6 F	4,8 F	1,0 F	11,9 V
ND1–ND3	6,2 F	5,2 F	4,2 F	4,3 F	9,7 F	6,3 F
ND1–ND4	3,2 F	3,6 F	2,6 F	6,9 F	9,7 F	0,6 F
ND2–ND3	10,4 V	9,6 F	9,8 F	9,1 F	8,7 F	5,6 F
ND2–ND4	7,4 F	8,0 F	8,2 F	11,7 V	8,7 F	11,3 V
ND3–ND4	3,0 F	1,6 F	1,6 F	2,6 F	0,0 F	5,7 F

Fonte: Autores, 2023.

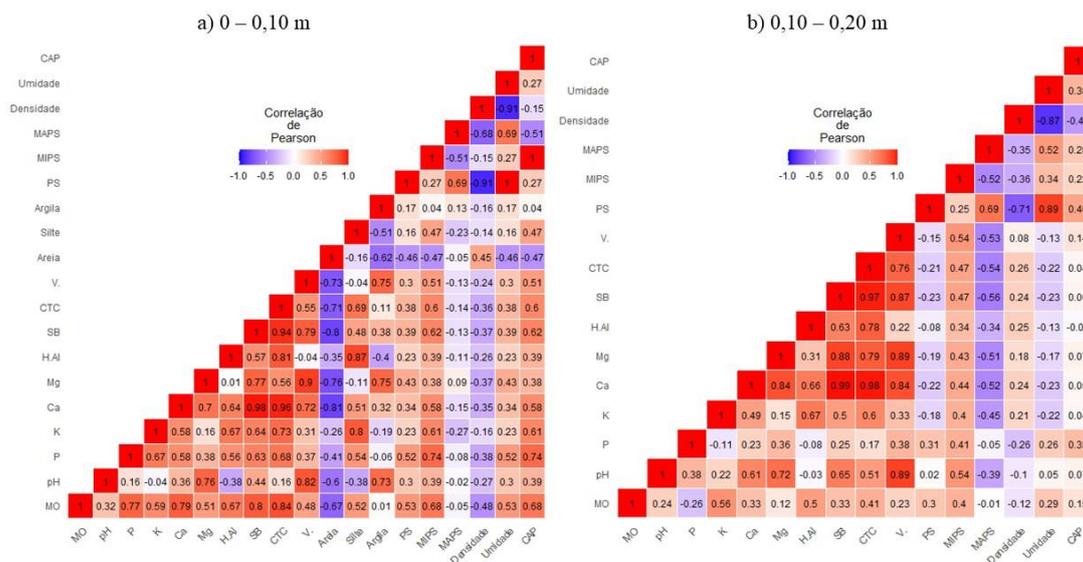
Segundo as Tabelas 3 e 4, houve diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para alguns

atributos químicos e granulométricos dos solos entre as pastagens ND1 e ND2, entre as pastagens ND2 e ND3, e entre ND2 e ND4, tanto na profundidade de solo de 0 m a 0,10 m quanto de 0,10 m a 0,20 m. Na profundidade de solo de 0 m a 0,10 m, o teor de argila apresentou diferença ( $p < 0,05$ ) nas pastagens ND1 e ND2, pois, pela análise das Tabelas 1 e 2, essas duas pastagens apresentaram teores de areia similares, enquanto a pastagem ND2 apresentou o maior teor de silte (quase o dobro da pastagem ND1). Para essas mesmas pastagens, o teor de K também foi diferente ( $p < 0,05$ ) na profundidade de 0,10 m a 0,20 m.

As pastagens ND2 e ND3 diferiram significativamente entre si nos teores de Ca, SB e CTC, e o teor de Ca também foi diferente na profundidade de solo de 0,10 m a 0,20 m. A CTC diferiu entre as pastagens ND2 e ND4 na profundidade de 0 m a 0,10 m de solo e nos atributos teor de MO e teor de K na profundidade de 0,10 m a 0,20 m.

A Figura 2 apresenta as correlações positivas (tons de vermelho) e negativas (tons de azul) entre os atributos físicos e químicos nas duas camadas de solo. Na camada mais superficial (0 a 0,10 m), o teor de areia foi correlacionado negativamente com atributos V% (-0,73), CTC (-0,71), SB (-0,8) e MO (-0,67), que são indicadores de fertilidade no solo (CENTERI, 2022). Estes mesmos indicadores de fertilidade apresentaram alta correlação positiva (maior que 0,75) com alguns atributos químicos (Ca, Mg, K e P), em ambas as camadas, conforme esperado (ADAMS et al., 2022), e MIPS apresentou média correlação positiva (entre 0,40 e 0,75) com esses mesmos atributos. Na camada mais profunda (0,10 a 0,20 m), a MAPS apresentou correlação negativa com os atributos químicos e físicos maior que na camada mais superficial.

Figura 2 – Matriz de correlação de Pearson multivariada dos atributos químicos e físicos nas duas camadas de solo: a) 0 m a 0,10 m e b) 0,10 m a 0,20 m.



Fonte: Autores, 2023.

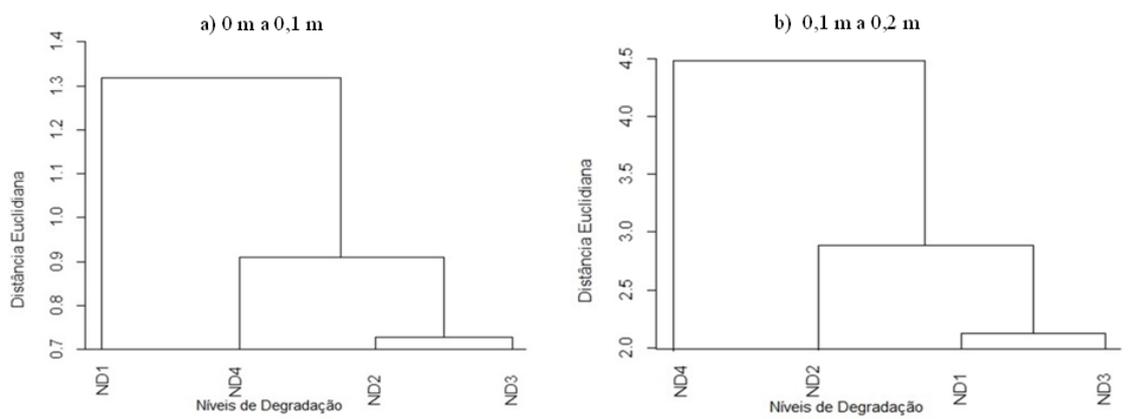
O coeficiente de correlação de Pearson entre densidade e PS foi de -0,91 ( $p < 0,05$ ) na camada de solo mais superficial. A densidade do solo apresenta estreita relação com a compactação do solo, pois o seu aumento determina a diminuição da PS e da MAPS, assim

como determina o aumento da MIPS e da resistência mecânica à penetração (LIMA et al., 2007). A pastagem ND3 apresentou significativamente o maior valor de densidade e o menor valor de PS (maior compactação) na camada de 0 m a 0,10 m de solo (Tabela 1), mas ficou em segunda posição entre as pastagens para a resistência à penetração (Tabela 5), valor este superado apenas pela pastagem ND2, que apresenta materiais endurecidos no solo, de caráter lítico.

Essa lista de atributos químicos e físicos do solo é um padrão comum entre os laboratórios de química do solo, e não é possível generalizar essas altas correlações como redundância (HAIR et al., 2017), visto que a quantidade de pontos é relativamente baixa (menor que 50 pontos amostrais) (SILVA; GOVEIA, 2019) e, assim, convém que haja maior quantidade de atributos para dar suporte a decisões.

Para a análise exploratória, após a padronização dos dados foram elaborados os dendrogramas dos solos sob pastagens nos níveis de degradação e nas duas profundidades de solo (Figura 3). Houve variação nos valores da distância euclidiana entre os níveis de degradação, tornando possível fazer uma divisão de grupos. Os dendrogramas resultantes da análise de agrupamento para avaliação da semelhança das áreas de estudo mostram a formação de três grupos em cada uma das profundidades do solo (Figura 3a e 3b). Nos dendrogramas, interpreta-se que níveis de degradação menos distanciados são mais semelhantes que os amplamente distanciados, ou seja, agrupamentos baseados em semelhança (ou similaridade) são mais relevantes nos níveis de degradação com menor distância euclidiana entre eles.

Figura 3 – Dendrogramas da análise hierárquica de agrupamentos dos solos sob pastagens em quatro níveis de degradação (ND1, ND2, ND3 e ND4) em duas profundidades: a) 0 m a 0,10 m e b) 0,10 m a 0,20 m.



Fonte: Autores, 2023.

Observa-se que, na profundidade de 0 m a 0,10 m (Figura 3a), as pastagens ND2 e ND3 são as de maior similaridade (menor distância euclidiana). Por sua vez, o agrupamento formado pelas pastagens ND3 e ND2 apresentou maior similaridade com a pastagem ND4 que em relação à pastagem ND1. Já na profundidade de 0,10 m a 0,20 m (Figura 3b), a maior

similaridade foi verificada entre as pastagens ND1 e ND3. O agrupamento formado por essas duas pastagens apresenta maior similaridade com a pastagem ND2 que com a pastagem ND4.

O esperado seria encontrar melhores índices químicos e físicos do solo em ambiente sem degradação (SILVA; GOVEIA, 2019), fato não observado nos dados obtidos. Consequentemente, a análise estatística de agrupamentos para os atributos físicos e químicos do solo indica maior similaridade da área ND1 com a área ND3, enquanto a avaliação visual da degradação, por meio da porcentagem de solo nu e da composição botânica, indicou maior similaridade entre as áreas ND1 e ND2.

#### **4.2 Estatística descritiva da infiltração da água no solo, da resistência do solo à penetração, do índice de área foliar e da fitomassa**

As taxas de infiltração de água no solo (INF), resistência do solo à penetração (RP) de 0 m a 0,10 m e de 0,10 m a 0,20 m de profundidade, índice de área foliar (IAF) e fitomassa (FIT) foram analisadas por meio de estatística descritiva (Tabela 5). Foram calculados a média, a variância, o desvio-padrão, o valor mínimo, o valor máximo, a assimetria, a curtose e o CV nos diferentes níveis de degradação de pastagens. Os CVs do conjunto de dados analisados são considerados médios, com exceção do IAF na pastagem ND4. O valor médio da taxa de infiltração de água no solo foi maior na pastagem ND1 e similar nas pastagens degradadas (ND2, ND3 e ND4). Este resultado também pode ser associado à lotação animal, visto que, nas pastagens degradadas, cultivadas ou naturais, a presença animal contínua com mesma lotação durante todo o ano gera compactação dos solos, aumento de área sem vegetação, redução da infiltração de água e aumento do escoamento superficial de água, com consequente perda de solo por erosão (SONE et al., 2020; CENTERI, 2022).

Tabela 5 – Estatística descritiva para as taxas de infiltração no solo (INF), resistência à penetração (RP) nas profundidades de solo de 0 m a 0,10 m e de 0,10 m a 0,20 m, índice de área foliar (IAF) e fitomassa em kg MS/ha (FIT), nos níveis de degradação de pastagens ND1 (não degradado), ND2 (baixa degradação), ND3 (média degradação) e ND4 (alta degradação).

Variável	Média	Variância	Desvio-padrão	CV*	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
INF ND1	14,50	80,62	8,98	61,92	2,21	44,27	1,32	2,99
INF ND2	8,42	18,45	4,30	51,04	2,21	19,92	0,59	0,23
INF ND3	6,81	10,62	3,26	47,89	2,21	14,39	0,93	0,15
INF ND4	8,42	18,45	4,30	51,04	2,21	19,92	0,59	0,23
RP ND1 0–0,1 m	1,89	0,21	0,46	24,27	1,10	2,85	0,27	-0,69
RP ND1 0,1–0,2 m	2,53	0,45	0,67	26,54	1,33	3,98	0,18	-0,38
RP ND2 0–0,1 m	2,26	0,27	0,52	23,01	1,35	3,93	0,92	2,63
RP ND2 0,1–0,2 m	3,20	1,20	1,10	34,26	0,33	6,52	0,96	4,19
RP ND3 0–0,1 m	2,17	0,35	0,59	27,12	1,19	3,82	0,71	0,68
RP ND3 0,1–0,2 m	2,59	1,74	1,32	50,98	1,49	7,87	2,84	9,28
RP ND4 0–0,1 m	1,55	0,06	0,25	16,41	1,06	2,07	0,21	-0,55
RP ND4 0,1–0,2 m	2,34	0,23	0,48	20,48	1,40	3,61	0,95	1,31
IAF ND1	3,10	1,77	1,33	42,91	1,06	5,20	0,15	-1,50
IAF ND2	2,43	0,35	0,59	24,43	1,19	3,59	0,03	-0,57
IAF ND3	2,20	1,64	1,28	58,38	0,48	4,47	0,39	-1,18
IAF ND4	0,65	0,17	0,41	62,83	0,19	2,29	2,06	5,71
FIT ND1	5442,00	5587000,00	2364,00	43,43	1192,00	10680,00	0,18	-0,37
FIT ND2	3609,00	2681000,00	1637,00	45,37	1245,00	6528,00	0,54	-0,90
FIT ND3	1776,00	1011000,00	1005,00	56,61	247,10	3909,00	0,76	0,00
FIT ND4	536,70	103900,00	322,30	60,06	151,90	1277,00	0,80	-0,30

Fonte: Autores, 2023.

A RP aumentou com a profundidade em todas as pastagens, o que é comum em solos arenosos (todos com teores maiores que 75%). Assim, a pastagem ND2 foi a que apresentou a maior resistência à penetração, devido à sua pedregosidade natural em seu perfil superficial. A pastagem ND3 apresentou a menor infiltração de água e a segunda maior resistência do solo à penetração, que pode ser explicada pela alta taxa de lotação de animais (a maior dentre as pastagens estudadas) e, conseqüentemente, maior compactação do solo por superpastejo. A resistência do solo à penetração gera uma barreira contra o crescimento radicular de até 2,6 vezes a força exercida pela raiz, além da diminuição na infiltração de água, o que intensifica o processo de degradação das pastagens (ADAMS et al., 2022). E em solos arenosos existe ainda maior risco de erosão decorrente da desagregação do solo. A pastagem ND4 (mais degradada) vem de um histórico contínuo de subpastejo, após um período de superpastejo por alguns anos, seguida da falta de reposição de nutrientes no solo e de reforma do pasto.

A classificação de pastagens degradadas em campo é geralmente baseada em que da do vigor e de produtividade, baixa população de forrageiras e presença de cupinzeiros e invasoras, ou seja, baseada em elementos da paisagem e vegetação epígea (SONE et al., 2020). Mas a classificação de pastagens quanto ao seu grau de degradação deve considerar também muitos parâmetros dos solos e não somente a avaliação da parte aérea (fitomassa, cobertura do solo, composição botânica, IAF e outros). Nesse caso, conforme Dias-Filho (2014), as características visuais diretamente observadas na área da pastagem, como os percentuais (ou

a biomassa) de plantas daninhas e de solo descoberto, seriam indicadores secundários de degradação dessa pastagem.

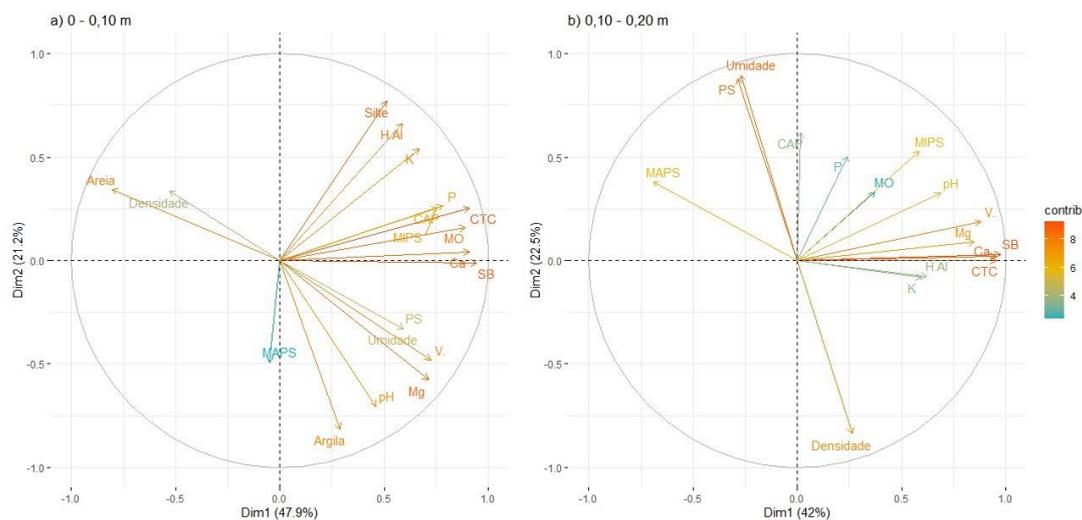
### 4.3 Análise de componentes principais (PCA)

O teste KMO resultou no coeficiente 0,79, indicando que dados amostrados sob as pastagens, caso não haja redundâncias, podem ser estudados usando análise fatorial (MAO; MO; GUO, 2013; GUMBO; DZAGA; NETHENGWE, 2016; MEDEIROS et al., 2017).

A aplicação da PCA para os parâmetros físico-químicos do solo gerou quatro componentes principais (CPs) com autovalores maiores que a unidade nas duas camadas estudadas. Há mais de um critério para escolher os CPs a serem considerados. Kaiser (1974) sugere o uso dos fatores com autovalor acima de 1, enquanto Hair et al. (2017) sugerem que o número de componentes seja representado por 60% da variância acumulada. No presente caso, ambos os critérios são satisfeitos.

A Figura 4 apresenta a representação bidimensional dos dois primeiros CPs de cada camada de solo. Na camada de solo de 0 m a 0,10 m, a variância explicada pelos dois primeiros CPs soma 69,2% (Figura 4a) da variabilidade total dos atributos do solo sob as pastagens, enquanto na camada de solo de 0,10 m a 0,20 m, os dois primeiros CPs têm variância acumulada de 64,6%. Os quatro CPs de cada camada explicam 85% e 83% da variação total na primeira e na segunda camada, respectivamente.

Figura 4 – Representação bidimensional dos componentes principais (PCA): a) solo de 0 m a 0,10 m; e b) solo de 0,10 m a 0,20 m.



Fonte: Autores, 2023.

A Tabela 6 apresenta as cargas (“loadings”) dos atributos estudados dentro de cada CP em cada camada. O primeiro CP, na camada entre 0 e 0,10 m, é explicado por vários atributos químicos (P, K, Ca, Mg, SB, CTC e V) e físicos (MO, MIPs, capacidade de campo e teor de areia). Já o segundo CP é explicado pelos atributos químicos pH, H+Al e os teores de silte e

argila. Os atributos físicos PS, MAPS e densidade são explicativos apenas no terceiro CP.

Na camada entre 0,10 e 0,20 m, os mesmos atributos também predominam na explicabilidade do primeiro CP (com exceção de MO, P e capacidade de campo), enquanto a MIPS passa a ser explicativa no CP1 nesta camada. O segundo CP é explicado por P, PS, densidade, umidade de saturação e CAP.

Tabela 6 – Componentes principais (CPs) e cargas de cada atributo (químicos e físicos) das pastagens analisadas.

Profundidade	0 a 0,10 m				0,10 a 0,20 m				
	Variável	CP1	CP2	CP3	CP4	CP1	CP2	CP3	CP4
MO	<b>0,890</b>	0,159	0,102	0,038	0,371	0,33	<b>0,706</b>	0,107	
pH	0,463	<b>-0,705</b>	-0,362	0,256	<b>0,688</b>	0,326	-0,399	0,216	
P	<b>0,782</b>	0,264	0,134	0,321	0,241	<b>0,505</b>	-0,541	-0,131	
K	<b>0,669</b>	0,54	-0,008	0,027	<b>0,595</b>	-0,083	0,591	0,181	
Ca	<b>0,909</b>	0,041	-0,154	-0,348	<b>0,953</b>	0,021	0,017	-0,231	
Mg	<b>0,713</b>	-0,577	-0,228	-0,126	<b>0,85</b>	0,09	-0,368	-0,172	
H+Al	0,588	<b>0,662</b>	0,259	-0,325	0,621	-0,077	<b>0,642</b>	-0,201	
SB	<b>0,943</b>	-0,013	-0,166	-0,259	<b>0,975</b>	0,03	-0,023	-0,186	
CTC	<b>0,911</b>	0,255	-0,018	-0,316	<b>0,953</b>	0	0,167	-0,203	
V	<b>0,724</b>	-0,481	-0,423	-0,031	<b>0,881</b>	0,186	-0,335	0,01	
Areia	<b>-0,804</b>	0,342	0,109	0,248	-	-	-	-	
Silte	0,514	<b>0,771</b>	0,181	-0,132	-	-	-	-	
Argila	0,288	<b>-0,816</b>	-0,346	-0,18	-	-	-	-	
PS	0,593	-0,330	<b>0,692</b>	0,215	-0,287	<b>0,879</b>	0,186	-0,152	
MIPS	<b>0,755</b>	0,255	-0,298	0,496	<b>0,585</b>	0,528	0,052	0,498	
MAPS	-0,051	-0,493	<b>0,840</b>	-0,157	<b>-0,692</b>	0,381	0,137	-0,504	
Densidade	-0,529	0,334	<b>-0,706</b>	-0,072	0,263	<b>-0,837</b>	0,01	-0,236	
Umidade	0,593	-0,330	<b>0,692</b>	0,215	-0,272	<b>0,896</b>	0,14	0,088	
CAP	<b>0,755</b>	0,255	-0,298	0,496	0,017	<b>0,617</b>	0,007	-0,371	

Fonte: Autores, 2023.

A partir da PCA é possível identificar (em negrito na Tabela 6) os atributos químicos como os mais relevantes para explicar a variabilidade dos níveis de degradação da pastagem. Usualmente, uma amostra de solo enviada ao laboratório tem esses atributos quantificados pela maioria das empresas (P, K, Ca, Mg, MO, SB, CTC e V). Os atributos físicos como granulometria e parâmetros hídricos do solo têm uma capacidade de explicação menor.

#### 4.4 Possíveis implicações para a gestão agroambiental

Com a identificação dos atributos mais relevantes para explicar a degradação das pastagens, é possível delinear diretrizes para as intervenções necessárias à restituição da qualidade ambiental dessas pastagens. Vale notar que PCA, dendrogramas e análise de correlação permitiram agrupar os atributos e relacioná-los com os níveis de degradação. Sugere-se que seja priorizado o monitoramento dos atributos mais explicativos, a saber, os atributos químicos (P, K, Ca, Mg, MO, SB, CTC e V). Esta estratégia pode ser útil para otimizar economicamente a avaliação dos níveis de pastagens degradadas.

#### 4 CONCLUSÕES

1. A camada mais superficial apresentou agrupamentos mais reconhecíveis entre autovetores e níveis de degradação, bem como nos dendrogramas, que a camada mais profunda. Entre 0 m e 0,10 m, pH e teor de argila predominam para explicar a não degradação, enquanto H+Al, teor de silte, matéria orgânica, microporosidade e compactação explicam a baixa degradação.
2. Na camada mais profunda, a distinção entre os parâmetros é menor e a correlação com os níveis de degradação é menor.
3. Esta abordagem pode ser replicada em estudos preliminares para recuperação de pastagens e planos de monitoramento, de modo a indicar priorização de parâmetros e otimização de custos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC – Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. **Perfil da Pecuária no Brasil**. São Paulo: ABIEC, 2019. Disponível em: <http://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2019/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

ADAMS, T. C.; ASHWORTH, A. J.; OWENS, P. R.; POPP, M.; MOORE, P. A.; PENNINGTON, J. Pasture conservation management effects on soil surface infiltration in hay and grazed systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 77, n. 1, p. 59-66, 2022.

ANDRADE, R. G.; RODRIGUES, C. A. G.; SANCHES, I. D.; TORRESAN, F. E.; QUARTAROLI, C. F. Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto na Detecção de Processos de Degradação de Pastagens. **Engenharia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, p. 234-243, 2013.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, L. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 93 p., 1986.

CENTERI, C. Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on Grasslands. **Hydrology**, Basel, v. 9, n. 2, p. 34, 2022.

DIAS FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 36 p., 2014.

EMBRAPA. **Boas práticas agropecuárias: bovinos de corte: manual de orientações**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 69 p., 2011a.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 230 p., 2011b.

FAO. **FAOSTAT – Food and agriculture data. Crop Statistics**. Roma: FAO, 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

FELTRAN-BARBIERI, R.; FÉRES, J. G. Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. **Royal Society Open Science**, Londres, v. 8, n. 7, p. 201854, 2021.

GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida. **Science of the Total Environment**, Nova Jersey, v. 566, p. 1552-67, jun. 2016.

GIANETTI, G. W.; FERREIRA FILHO; J. B. D. S. O Plano e Programa ABC: uma análise da alocação dos recursos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Piracicaba, v. 59, 2020.

GIRAUDOUX, P.; GIRAUDOUX, M. P. **Package ‘pgirmess’**. Viena: R Core Team, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=pgirmess/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

GRAVES, S. **Package ‘multcompView’**. Viena: R Core Team, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

GUMBO, J. R.; DZAGA, R. A.; NETHENGWE, N. S. Impact on water quality of Nandoni water reservoir downstream of municipal sewage plants in Vhembe District, South Africa. **Sustainability**, Basel, v. 8, n. 7, p. 597, jun. 2016.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analysis**. Nova Jersey: Prentice Hall, 2017.

IBGE. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

IBGE. **PAM - Produção Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

KAISER, H. F. An index of factorial simplicity. **Psychometrika**, Berlim, v. 69, n. 1, p 31-6, mar. 1974.

LIMA, C. G. da R.; CARVALHO, M. de P.; MELLO, L. M. M. de; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n.6, Nov./Dec. 2007.

LIU, C. W.; LIN, K. H.; KUO, Y. M. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. **Science of the Total Environment**, Nova Jersey, v. 313, n. 1-3, p. 77-89, set. 2003.

MACEDO, M. C. M.; ARAUJO, A. R. de. Sistemas de produção em integração: alternativa para recuperação de pastagens degradadas. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa, 2019. p. 295-317.

MAO, L.; MO, D.; GUO, Y. Multivariate analysis of heavy metals in surface sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, southern China. **Environmental Earth Sciences**, Berlim, v. 69, n. 3, p. 765-71, jun. 2013.

MAPBIOMAS. **Coleção 7 (1985 – 2021) da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. Brasília: Mapbiomas, 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

MEDEIROS, G. A.; TRESMONDI, A. C. C. L.; QUEIROZ, B. P. V.; FENGLER, F. H.; ROSA, A. H.; FIALHO, J. M.; LOPES, R. S.; NEGRO, C. V.; SANTOS, L. F.; RIBEIRO, A. I. Water quality, pollutant loads, and multivariate analysis of the effects of sewage discharges into urban streams of Southeast Brazil. **Energy, Ecology and Environment**, Berlim, v. 2, n. 4, p. 259-76, 2017.

NASCIMENTO JR., D.; QUEIROZ, D. S.; SANTOS, M. V. F. **Degradação das pastagens e critérios para avaliação**. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DAS PASTAGENS, 11, 1994. Anais. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, p. 107-151, 1994.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Core Team, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

RODRIGUES, C. A. G.; QUEIROZ, H. P. de; QUARTAROLI, C. F. **Avaliação em campo de pastagens de *Urochloa* spp. (syn. *Brachiaria* spp.) no bioma Cerrado para estimar níveis de degradação: parâmetros qualitativos.** Campinas: Embrapa Territorial, 34 p., 2022.

SILVA, C. O. F.; GOVEIA, D. Avaliação da qualidade ambiental de corpos hídricos urbanos utilizando análise multivariada. **Interações**, Campo Grande, v. 20, p. 947-958, 2019.

SONE, J. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; ARAUJO, A. R. de; ZAMBONI, P. A. P.; SOBRINHO, T. A. Effects of nitrogen fertilisation and stocking rates on soil erosion and water infiltration in a Brazilian Cerrado farm. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Berlim, v. 304, p. 107159, 2020.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Lavras, v.15, p.229-235, 1991.

SCHULTZ, N.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S. **Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada: fontes nitrogenadas, formas de aplicação, épocas de aplicação e efeito varietal.** Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 52 p, 2015.

TORRES, F. N.; RITCHER, R.; VOHLAND, M. A multisensoral approach for high-resolution land cover and pasture degradation mapping in the humid tropics: A case study of the fragmented landscape of Rio de Janeiro. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Nova Jersey, v. 78, p. 189-201, 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG-UFG). **Atlas digital das pastagens brasileiras.** Área de pastagem Brasil 2021. Disponível em: <https://pastagem.org/atlas/map>. Acesso: 1 ago. 2023.

VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 1376-1383, 2012.

VIEIRA, S. R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agrônomo**, Piracicaba, v.47-50, p.32 - 33, 1998.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of some physical properties of the soil. In: HILL, D. (ed.). **Applications of Soil Physics.** Nova Iorque: Academic Press, 13. p.319-344, 1980.