UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA

BEATRIZ DE SOUSA DA SILVA

ZOOTECNIA DIGITAL: DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE REBROTA DO CAPIM-TANZÂNIA SUBMETIDO A DOSES DE NITROGÊNIO

ALEGRE
ESPÍRITO SANTO
2026

BEATRIZ DE SOUSA DA SILVA

ZOOTECNIA DIGITAL: DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE REBROTA DO CAPIM-TANZÂNIA SUBMETIDO A DOSES DE NITROGÊNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Zootecnia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Zootecnia.

Orientador: Prof. Dr. Samuel de Assis Silva

ALEGRE
ESPÍRITO SANTO
2026

BEATRIZ DE SOUSA DA SILVA

ZOOTECNIA DIGITAL: DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE REBROTA DO CAPIM-TANZÂNIA SUBMETIDO A DOSES DE NITROGÊNIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Zootecnia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Zootecnia.

Aprovado em 17 de julho de 2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
SAMUEL DE ASSIS SILVA
Data: 25/07/2026 09:15:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Samuel de Assis Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
IVAN JANNOTTI WENDLING
Data: 25/07/2026 12:06:40-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Ivan Jannotti Wendling
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
gov.br
JHEYLI BECERRA CAMPOS
Data: 25/07/2026 13:27:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Jheyli Becerra Campos
Universidad Nacional de San Martín

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Lucéli Cristine, uma mulher extraordinária que, mesmo sem muitos privilégios, me ensinou o valor do conhecimento. Ela, que é professora, foi quem abriu meus olhos, me fez pensar grande e, apesar de não ter podido realizar o próprio sonho de um diploma, nunca deixou de acreditar no meu. E, mesmo quando perdemos meu irmão no meio da minha faculdade, ela não se abateu, não deixou de acreditar em mim, me sustentou com força, e sempre foi meu farol. Esse diploma é nosso, mãe, e eu o dedico a você com todo meu amor.

“Não tenhas medo deles, pois estou contigo para defender-te.”

Jeremias 1,8

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a Nossa Senhora e aos meus pais pelo apoio incansável, pela dedicação e por acreditarem no sonho da caçula deles. Não me desampararam, seja emocional ou financeiramente.

Aos meus familiares, em especial às minhas tias Cida e Camila e ao meu tio Victor, que não mediram esforços nem distância para estarem presentes na minha trajetória. Ao meu primo Luan, que, mesmo do outro lado do oceano, me acolheu e aconselhou.

Aos meus amigos, que nunca deixaram o desânimo me vencer, mesmo nos momentos mais turbulentos da minha jornada. Ao meu professor, orientador e amigo Samuel, que, além de mestre, foi meu apoio incondicional, deixando de ser uma simples relação profissional e se tornando família. Mesmo estando longe de casa, senti-me acolhida e amada, como se cada passo meu estivesse envolto pelo cuidado e apoio dele.

E ao meu irmão, a pessoa que mais me inspirou a entrar na graduação, cujos olhos verdes brilhavam com orgulho ao ver minha aprovação. Obrigada, meu irmão, por sempre ter acreditado em mim desde que me lembro de ter consciência da vida. Te amo e sinto sua falta.

RESUMO

O manejo adequado de pastagens é fundamental para a sustentabilidade da produção animal, e o uso de tecnologias como sensoriamento remoto e aprendizado de máquina tem se destacado como ferramenta promissora para monitoramento e estimativa de produtividade. O objetivo deste estudo foi predizer a capacidade de rebrota do capim-Tanzânia (*Megathyrsus maximus*) submetido a doses de nitrogênio em diferentes períodos do ano, utilizando imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e modelos de Random Forest. O experimento foi conduzido em duas áreas experimentais, com aplicação de quatro doses de nitrogênio (50, 100, 150 e 200 kg ha^{-1}) e avaliações nos períodos chuvoso e seco. Os índices de vegetação NDVI e NDRE foram calculados a partir de imagens multiespectrais e utilizados como variáveis preditoras para estimativa da produção absoluta de rebrota e da relação rebrota/pré-corte. Os resultados demonstraram que o nitrogênio exerceu efeito positivo na recuperação da pastagem durante o período chuvoso, com resposta mais expressiva entre 100 e 150 kg ha^{-1}, enquanto no período seco a água foi o principal fator limitante. O NDVI apresentou maior importância relativa (66%) na modelagem da produtividade da rebrota em comparação ao NDRE (34%), indicando maior sensibilidade ao acúmulo de biomassa verde. Os modelos Random Forest apresentaram capacidade moderada de predição, com coeficiente de determinação (R^2) em torno de 0,60 para produção absoluta de rebrota e valores inferiores (0,20-0,35) para a relação rebrota/pré-corte. A validação cruzada revelou-se fundamental para avaliar a robustez dos modelos, evidenciando a necessidade de incorporar variáveis complementares (climáticas, edáficas e de manejo) para maior precisão quantitativa. Conclui-se que a integração entre sensoriamento remoto aéreo e aprendizado de máquina constitui uma ferramenta viável para monitoramento de pastagens tropicais, com potencial aplicação em agricultura de precisão.

Palavras-chave: *Megathyrsus maximus*; veículo aéreo não tripulado; NDVI; NDRE; Random Forest.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS vii
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE SIGLAS x
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 O problema e sua justificativa 2
1.2 Objetivos 3
1.2.1 Objetivo geral 3
1.2.2 Objetivos específicos 3
2 REVISÃO DE LITERATURA 4
2.1 Manejo de pastagem 4
2.2 Capim-Tanzânia para produção intensiva 5
2.3 Importância do Nitrogênio para as gramíneas forrageiras 6
2.4 Monitoramento de pastagens com sensoriamento remoto aéreo 7
2.5 Integração de conceitos e conhecimento: melhor manejo de pastagens 9
3 MATERIAL E MÉTODOS 10
3.1 Local do estudo 10
3.2 Cultura, adubação e manejo 10
3.3 Produtividade da forragem 12
3.4 Sensoriamento remoto aéreo 12
3.5 Análise de dados 14
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 15
4.1 Produtividade média da pastagem nas diferentes áreas 15
4.2 Desempenho dos modelos Random Forest 19
4.3 Predições obtidas por validação cruzada dos modelos Random Forest 21
4.4 Importância média das variáveis espectrais na modelagem da rebrota do capim-Tanzânia 27
4.5 Importância dos índices de vegetação para a estimativa de produtividade e rebrota 31
5 CONCLUSÃO 38
6 REFERÊNCIAS 39

LISTA DE TABELAS

Tabela1. Descrição das datas, horário de início dos voos, número de imagens, estação do ano e inclinação solar dos aerolevantamentos.....13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grade amostral contendo 64 pontos georreferenciados utilizados nas coletas de dados. 11
Figura 2. Produção média de biomassa no pré-corte e na rebrota do capim-Tanzânia por área experimental, período do ano e tratamento nitrogenado. 15
Figura 3. Relação entre a produção de rebrota e a biomassa pré-corte do capim-Tanzânia por área experimental, período do ano e tratamento nitrogenado, considerando a linha de recuperação total (relação = 1). 16
Figura 4. Desempenho da validação cruzada dos modelos Random Forest para as estratégias de modelagem por tratamento e geral (área × período). 20
Figura 5. Comparação entre valores observados e preditos pelos modelos Random Forest para produção absoluta de rebrota e relação rebrota/pré-corte, considerando as estratégias por tratamento e geral (área × período). 23
Figura 6. Relação entre os valores observados e preditos obtidos durante a validação cruzada do modelo Random Forest para a produtividade absoluta da rebrota e a relação rebrota/pré-corte , considerando as diferentes áreas e períodos avaliados. Os resultados mostram que apesar dos índices espectrais usados apresentarem potencial para representar o comportamento produtivo da pastagem, outros fatores que não foram analisados no modelo podem ter influenciado na rebrota, como as condições climáticas e fertilidade do solo. Sendo assim, obteve capacidade moderada de predição, com maior eficiência na identificação de tendencias gerais do que na estimativa precisa dos valores individuais. 24
Figura 7. Relação entre os valores observados e preditos obtidos pelo modelo Random Forest considerando os tratamentos nitrogenados para a produtividade absoluta da rebrota e para a relação rebrota/pré-corte 25
Figura 8. Importância relativa dos índices NDVI e NDRE na predição da produção absoluta de rebrota e da relação rebrota/pré-corte em diferentes áreas e períodos experimentais. 27

Figura 9. Importância relativa dos índices NDVI e NDRE na predição da produção absoluta de rebrota e da relação rebrota/pré-corte em função dos tratamentos nitrogenados, áreas experimentais e períodos climáticos. 29
Figura 10. Importância média das variáveis espectrais para a predição da produtividade absoluta da rebrota do capim-Tanzânia em função do período de estudo. 32
Figura 11. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação entre produtividade absoluta e rebrota do capim-Tanzânia em função do período de estudo. 32
Figura 12. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação rebrota/pré-corte do capim-Tanzânia em função dos tratamentos nitrogenados. 34
Figura 13. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação rebrota/pré-corte do capim-Tanzânia considerando as diferentes áreas e períodos experimentais. 35

LISTA DE SIGLAS

GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sampling Distance
MAE	Mean Absolute Error (Erro Médio Absoluto)
MAPE	Mean Absolute Percentage Error (Erro Percentual Médio Absoluto)
ND	Números Digitais
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index (Índice de Borda Vermelha de Diferença Normalizada)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
NIR	Near Infrared (Infravermelho Próximo)
PVC	Policloreto de Vinila
R^2	Coeficiente de Determinação
RE	Red Edge (Borda do Vermelho)
RF	Random Forest
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

1 INTRODUÇÃO

As pastagens desempenham papel importante no agronegócio brasileiro, constituindo a base dos sistemas de produção pecuária, especialmente sob regimes extensivos. Sua ampla predominância no território nacional, configurando-se como a principal fonte de alimentação, está diretamente associada ao seu baixo custo relativo e à elevada capacidade de suprimento nutricional para diferentes categorias de rebanhos, assegurando a sustentabilidade produtiva dos sistemas pecuários (DIAS-FILHO, 2014).

Entretanto, a eficiência e a longevidade das pastagens são fortemente condicionadas à adoção de estratégias de manejo tecnicamente fundamentadas, orientadas à maximização da produção de forragem e à manutenção de sua qualidade nutritiva. Nesse contexto, destacam-se práticas como a adubação racional, com ênfase no nitrogênio, e o pastejo rotacionado, os quais são determinantes para facilitar o equilíbrio entre oferta e demanda de forragem (DIAS-FILHO, 2014).

A dinâmica de crescimento das pastagens está intrinsecamente relacionada à disponibilidade de nutrientes no solo, influenciando diretamente a capacidade de rebrota das gramíneas forrageiras. Esse processo, por sua vez, constitui um dos principais critérios para a definição do momento ótimo de entrada e saída dos animais nos piquetes (CORSI, 1993; SILVA; NASCIMENTO JÚNIOR, 2007). Ressalta-se que tal momento é variável ao longo do ano, sendo influenciado por fatores edafoclimáticos e, sobretudo, pelo intervalo necessário para a recomposição da biomassa vegetal e o acúmulo de reservas fisiológicas.

A sincronização entre o crescimento da planta e o pastejo é, portanto, um fator crítico para o sucesso do sistema. A remoção precoce da forragem compromete o vigor vegetativo, reduz a taxa de acúmulo de biomassa e impacta negativamente a produtividade e o desempenho animal. Por outro lado, o atraso no pastejo resulta em perdas qualitativas, como a lignificação dos tecidos e a redução da digestibilidade, afetando o valor nutritivo da forragem. Assim, o manejo eficiente requer o ajuste fino entre crescimento, oferta de nutrientes e tempo de rebrota, visando à sustentabilidade produtiva (DIAS-FILHO, 2014).

A seleção de espécies forrageiras adaptadas às condições tropicais é igualmente determinante, devendo considerar atributos como elevada produção de

matéria seca, valor nutritivo e plasticidade fisiológica. Nesse contexto, destaca-se o *Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia (capim-Tanzânia), amplamente utilizado em sistemas intensificados de produção. Para essa espécie, o nitrogênio constitui um nutriente-chave, exercendo papel central na regulação do crescimento, na emissão de perfilhos e na capacidade de rebrota, sendo imprescindível o ajuste de doses para otimização do desempenho agronômico (SILVA et al., 2020).

Paralelamente, o avanço das tecnologias digitais tem promovido uma transformação significativa no monitoramento de sistemas agrícolas. O sensoriamento remoto aéreo, especialmente por meio de veículos aéreos não tripulados (VANTs), tem se consolidado como ferramenta estratégica na agricultura de precisão (HUNT et al., 2010). Esses sistemas permitem a aquisição de imagens de alta resolução espacial e temporal, possibilitando a estimativa de variáveis biofísicas, como biomassa, vigor vegetativo e estresse hídrico (USTIN et al., 2009).

Os dados obtidos podem ser processados por meio de softwares especializados, permitindo a análise de bandas espectrais individuais ou a aplicação de índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), amplamente utilizado na avaliação do estado fisiológico das plantas. A integração dessas ferramentas com os conceitos de Agricultura Digital amplia a capacidade de amostragem, aumenta a representatividade espacial e permite o monitoramento não destrutivo das pastagens.

Nesse cenário, o uso de modelos baseados em sensoriamento remoto possibilita uma avaliação precisa, rápida e espacialmente detalhada da produtividade e do vigor das pastagens, além de subsidiar a tomada de decisão quanto ao manejo nutricional e ao planejamento do pastejo. Dessa forma, contribui significativamente para o aumento da eficiência produtiva e da sustentabilidade dos sistemas pecuários (SOUZA; LIMA, 2019).

1.1 O problema e sua justificativa

Apesar do capim-Tanzânia ser uma forrageira com grande potencial produtivo, existe a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre como as diferentes doses de nitrogênio influenciam a capacidade de rebrota da planta, nas diferentes épocas

do ano. A falta de dosagem correta impede a otimização do manejo, limitando a eficiência produtiva e a sustentabilidade da pastagem.

Entender o processo da rebrota do capim-Tanzânia com a aplicação de diferentes doses de nitrogênio é essencial, pois o mesmo é considerado um nutriente-chave para o desenvolvimento das plantas. Com o auxílio do sensoriamento remoto, pode-se avaliar o vigor das pastagens de forma continua, permitindo uma avaliação mais precisa do impacto das doses de nitrogênio utilizadas. Dessa forma, o estudo se justifica por contribuir com o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes, que equilibrem a produtividade com a preservação ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Predizer a capacidade de rebrota de capim-Tanzânia submetido a doses de nitrogênio em diferentes períodos do ano a partir de sensoriamento remoto aéreo e os modelos de aprendizado de máquina.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Avaliar o efeito de doses de nitrogênio sobre a capacidade de rebrota do capim-Tanzânia em diferentes épocas do ano;
b) Monitorar o crescimento vegetativo da pastagem por meio de índices de vegetação (NDVI e NDRE), obtidos a partir de sensor embarcado em VANT;
c) Correlacionar os índices de vegetação com variáveis biométricas, buscando identificar quais índices indicam o melhor estado nutricional e o potencial de rebrota da pastagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Manejo de pastagem

As pastagens ocupam aproximadamente 154 milhões de hectares do território brasileiro, estimativas apontam que 50% desta possui algum nível de degradação (DIAS-FILHO 2021) e a mesma possui um papel crucial nos sistemas de produção pecuária brasileira, sendo responsáveis pela principal fonte de alimento dos ruminantes em regiões tropicais (EUCLIDES et al., 2010).

As forragens apresentam relevância para o meio ambiente, conservando o solo, retendo água, ciclando nutrientes e aumentando a captura de carbono através da fotossíntese (CANTARUTTI et al., 1999). O manejo de pastagens é um conjunto de práticas que controlam o crescimento, o uso e a recuperação da planta (CECATO et al., 1994).

Dentre as principais atividades, destaca-se intensidade de pastejo, altura de entrada e saída, período de descanso e a fertilidade do solo. Controlar a altura do dossel semanalmente ou mensalmente, utilizando o auxílio da régua de manejo, podendo ser improvisada ou algum objeto que sirva de medida para garantir a manutenção das alturas de manejo das cultivares, geralmente a altura de saída é a metade da altura de entrada. A lotação também precisa ser avaliada rigorosamente, para evitar um superpastejo que reduzem a área foliar residual necessária para a que aconteça de forma eficiente a fotossíntese, comprometendo as reservas energéticas da planta e dificultando sua recuperação após a desfolha (DA SILVA et al., 2009), por outro lado o subpastejo onde o dossel perde a qualidade e aceitabilidade pelos animais, por conta do alto teor de lignina (MONTAGNER et al., 2024) Todos esses fatores influenciam na produção de biomassa, persistência da pastagem e na capacidade de rebrota das plantas após o pastejo dos animais.

Em compensação, o manejo adequado aumenta a eficiência fotossintética, melhora o aproveitamento da forragem e a longevidade da pastagem. Outro fator importante em relação ao manejo é a sazonalidade climática que interfere diretamente no crescimento das gramíneas tropicais, sendo necessário o uso de estratégias de manejo capazes de diminuir os efeitos das variações entre os períodos secos e chuvosos (MORAES et al., 2014). As gramíneas tropicais no período chuvoso

apresentam maior crescimento e desenvolvimento por conta da maior disponibilidade de água e condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal, como elevadas temperaturas e radiação solar.

Já no período seco o crescimento é reduzido, assim como o acúmulo de biomassa e a capacidade de recuperação da planta. Nesse contexto, estratégias de manejo associadas à adubação se tornam fundamentais para diminuir os impactos das variações climáticas sobre a produtividade das pastagens.

Dentre as gramíneas tropicais usadas na pecuária destaca-se o capim-Tanzânia (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia), que possui elevada resposta ao manejo intensivo, especialmente associado à adubação nitrogenada. A altura recomendada de entrada dos animais para o capim- Tanzânia varia entre 70 e 80 cm, enquanto a altura saída está no intervalo entre 35 e 40 cm (MARTUSCELLO et al., 2019).

2.2 Capim-Tanzânia para produção intensiva

O capim-Tanzânia (*Panicum maximum* cv. Tanzânia), atualmente reclassificado como *Megathyrsus maximus*, se destaca entre as principais gramíneas tropicais usadas no Brasil por conta de seu elevado potencial produtivo e qualidade nutricional (EUCLIDES et al., 2008). Essa espécie é adaptada as condições climáticas tropicais, com alta produção de matéria seca e boa aceitabilidade, o que o torna uma alternativa interessante para sistemas intensivos de produção animal a pasto.

O *Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia possui crescimento cespitoso, com alta capacidade de perfilhamento e rápido desenvolvimento vegetativo, características que favorecem sua utilização em sistemas rotacionados de pastejo, permitindo maior taxa de lotação animal e melhor aproveitamento da forragem produzida (CECATO et al., 1994). Além disso, apresenta boa digestibilidade e altos teores de proteína bruta quando manejado corretamente.

Outro fator que se destaca sobre a forrageira é sua alta capacidade de rebrota após o pastejo (MORAES et al., 2014). Estudos demonstram que o capim-Tanzânia apresenta respostas significativas à adubação nitrogenada, com aumento da produção de biomassa, do perfilhamento e da taxa de crescimento foliar (CECATO et al., 1994).

Entretanto, apesar do elevado potencial produtivo, o capim-Tanzânia exige manejo adequado para conseguir expressar sua capacidade produtiva O controle da altura do pasto, da pressão de pastejo e da fertilidade do solo são fatores essenciais para manter a qualidade da forragem e garantir maior eficiência produtiva (EUCLIDES et al., 2008).

2.3 Importância do Nitrogênio para as gramíneas forrageiras

O nitrogênio é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento e desenvolvimento das gramíneas forrageiras, por sua participação em diversos processos fisiológicos essenciais para o metabolismo vegetal (MORAES et al., 2014).

Nas gramíneas tropicais a deficiência de nitrogênio, diminui o crescimento vegetativo, a capacidade de rebrota e o perfilhamento. Por outro lado, a adubação nitrogenada promove aumento do crescimento foliar, aceleração do desenvolvimento vegetativo e melhora da qualidade nutricional da forragem (ALEXANDRINO et al., 2004). O nitrogênio influencia diretamente na coloração verde das folhas, devido à sua relação com a síntese de clorofila.

O capim-Tanzânia respondeu positivamente à adubação nitrogenada sobre a produção de matéria seca e o vigor de rebrota da forrageira (CECATO et al.,1994), parcelar o fornecimento de nitrogênio ao longo do período produtivo eleva de forma direta os teores proteicos da forragem disponível, otimizando o aporte de nutrientes aos animais e o desempenho do rebanho (GUIMARÃES et al., 2005).

O aumento das doses de nitrogênio favorece o perfilhamento, o aumento na produção de biomassa e uma recuperação melhor da planta após o pastejo. Além de auxiliar no crescimento vegetal, o nitrogênio tem relação com a produção de clorofila, que é o pigmento responsável pela absorção da energia luminosa durante a fotossíntese (MORAES et al., 2014). Doses inadequadas podem gerar desperdício de insumos e reduzir a eficiência econômica do sistema produtivo (CANTARUTTI et al., 1999).

Sendo assim, se torna necessário determinar doses adequadas de nitrogênio capazes de maximizar a produtividade das pastagens sem comprometer a sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, ferramentas de monitoramento do estado nutricional das plantas são importantes aliadas para o manejo racional da adubação

nitrogenada. Tecnologias capazes de identificar alterações no vigor vegetativo e na disponibilidade de nitrogênio das plantas podem contribuir para a otimização do uso de fertilizantes e melhoria da produtividade das pastagens (AROGOUNDADE et al., 2023).

2.4 Monitoramento de pastagens com sensoriamento remoto aéreo

O sensoriamento remoto consiste em obter informações sobre determinado alvo sem contato direto com ele, utilizando sensores que captam energia refletida pelos objetos. Essa tecnologia vem sendo amplamente utilizada na agricultura de precisão para monitoramento do desenvolvimento vegetativo das culturas, permitindo avaliações rápidas, não destrutivas e com precisão (ARVUS, 2021). O avanço dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) possibilitou uma acessibilidade maior com o uso do sensoriamento remoto no meio agrícola. Equipados com sensores multiespectrais, esses equipamentos permitem obter imagens de alta resolução espacial, ajudando no monitoramento da variabilidade das áreas cultivadas e na identificação de alterações com relação ao vigor vegetativo e ao estado nutricional das plantas (SILVA et al., 2022).

Para o monitoramento dos ecossistemas forrageiros o uso do sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta importante para gestão de pastagens tropicais (REINERMANN; ASAM; KENZER, 2020). Em pastagens de capim-Tanzânia, esse avanço tecnológico possui grande potencial para avaliação da produção de biomassa, capacidade de rebrota e da resposta das plantas à adubação nitrogenada (JUNGES et al., 2016; CISNEROS et al., 2020).

A partir das imagens obtidas pelos sensores multiespectrais, pode-se calcular índices de vegetação capazes de estimar características fisiológicas das plantas. Entre os índices mais usados tem-se o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDRE (Normalized Difference RedEdge Index). O NDVI é muito usado para o monitoramento do vigor vegetativo, sendo baseado na diferença existente entre a reflectância da vegetação na faixa do infravermelho próximo e da faixa do vermelho. Valores altos desse índice normalmente indicam maior atividade da fotossíntese e maior desenvolvimento vegetal (REINERMANN ASAM; KUENZER 2020). Já o NDRE utiliza a banda RedEdge, apresentando maior sensibilidade para avaliação do teor de

clorofila e do estado nutricional das plantas, principalmente em áreas com muita densidade vegetal (OGUNGBUYI et al., 2023).

Entretanto, apesar do NDVI ser muito utilizado, o índice pode apresentar saturação em áreas elevadas de densidade foliar. O NDRE aparece como uma alternativa complementar, pois usa a banda RedEdge e apresenta maior sensibilidade para estimar o teor de clorofila e o estado nutricional das plantas, principalmente em estágios mais avançados de desenvolvimento vegetal (OGUNGBUYI et al., 2023). O NDRE é bastante citado em estudos relacionados à adubação nitrogenada, contribuindo para avaliações mais precisas da resposta das forrageiras ao fornecimento desse nutriente.

O uso de imagens de alta resolução obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) permite estimar a produtividade de biomassa através de correlação entre os índices de vegetação e variáveis agronômicas, como altura de plantas, área foliar e acumulo de matéria seca (BATISTOTI et al., 2019). De acordo com esses autores, o sensoriamento remoto com baixa altitude consegue identificar a heterogeneidade espacial causada por diferentes doses de nutrientes, auxiliando na decisão de estratégias de manejos mais eficientes e sustentáveis.

Apesar disso, o monitoramento frequente por meio de drones permite acompanhar a dinâmica de crescimento da pastagem ao longo do tempo, possibilitando ajustes mais precisos na adubação nitrogenada e no manejo do pastejo. O manejo de pastejo é uma das práticas mais importantes para a conservação e a produtividade das pastagens, pois define a intensidade e a frequência de desfolha, influenciando diretamente o rebrote, a persistência das plantas e a eficiência de utilização da forragem. Quando bem ajustado, esse manejo melhora o aproveitamento do pasto, reduz perdas por subpastejo ou superpastejo e contribui para a manutenção da capacidade produtiva da área ao longo do tempo. Além disso, o manejo adequado favorece o equilíbrio entre oferta e demanda de forragem, permitindo melhor desempenho animal e maior sustentabilidade do sistema pecuário (DIAS-FILHO, 2014; EMBRAPA, 2017). De acordo com (OGUNGBUYI et al., 2023), o uso dessas tecnologias favorece a aplicação estratégica de insumos, explorando o potencial máximo produtivo da área de acordo com a resposta fisiológica das plantas.

Por meio de ligação entre dados obtidos por sensoriamento remoto e as avaliações realizadas em campo é possível compreender a resposta das pastagens

ao manejo utilizado. A correlação entre índices de vegetação e variáveis biométricas contribui para o desenvolvimento de ferramentas mais eficazes de monitoramento, auxiliando na tomada de decisões e promovendo o uso racional dos insumos agrícolas em sistemas de produção animal à pasto.

2.5 Integração de conceitos e conhecimento: melhor manejo de pastagens

Integrar o manejo de pastagens, adubação nitrogenada e sensoriamento remoto é uma estratégia crucial para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis e eficientes. A associação entre as informações obtidas em campo e dados espectrais gerados por sensores remotos permite maior compreensão do comportamento das forrageiras frente às diferentes condições de manejo (SILVA et al., 2022)

Integrar o uso das ferramentas possibilita o monitoramento contínuo das áreas de pastagem, identificação precoce de problemas nutricionais e melhor planejamento das práticas de manejo. Além disso, o uso de tecnologias de agricultura de precisão auxilia para otimizar a adubação da pastagem, redução de desperdícios e aumento da eficiência produtiva (OGUNGBUYI et al., 2023).

Com o avanço da inteligência computacional e das técnicas de processamento digital de imagens dos últimos anos, aumentou o potencial do sensoriamento remoto aplicado às pastagens. Modelos de algoritmos computacionais e matemáticos vêm sendo usados para correlacionar índices de vegetação com características biométricas das plantas, onde as estimativas do estado nutricional e do vigor vegetativo das forrageiras são mais precisos (ARVUS, 2021).

A integração obtida entre dados obtidos por VANTs, analises estatísticas e informações coletadas em campo possuem grande potencial para maximizar o manejo sustentável das pastagens tropicais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do estudo

O estudo foi realizado em dois piquetes de pastagem experimental (A e B), pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo, no município de Alegre, sul do estado. O clima da região é classificado como Cwa (tropical quente e úmido), com temperatura média por ano de 23,1ºC e precipitação anual de 1341mm (KÖPPEN et al., 1928). O experimento foi conduzido a partir de duas áreas planas com a pastagem de capim-Tanzânia (*Megarthyrsus maximus*) desde 2015.

Foram realizadas duas avaliações foram feitas no pré pastejo, entre 2022 e 2023 no período chuvoso e seco. As variáveis climáticas foram obtidas da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a 350m de distância dos piquetes.

3.2 Cultura, adubação e manejo

Por ser tratar de uma área anteriormente sem manejo da fertilidade do solo e correção de acidez, no início do experimento foi realizada a análise de solo para avaliar a acidez e disponibilidade de nutrientes, com base na análise foi feito adubação química com 30kg.ha^{-1} de fosforo e 60kg.ha^{-1} de potássio, sem necessidade do uso de calagem para corrigir a acidez do solo.

Foram fixadas grades amostrais com 32 pontos dispersos aleatoriamente dentro de cada área, com o auxílio de estacas de fibra de vidro para assegurar que as avaliações fossem realizadas no mesmo ponto amostral. Para efeito deste estudo foi considerado um experimento em delineamento inteiramente casualizado, com 4 tratamentos e 4 repetições por área. Os tratamentos consistiram nas diferentes doses de nitrogênio utilizando ureia (44% de N) como fonte exclusiva desse nutriente, sendo: T1 = 50 kg de N ha^{-1}; T2 = 100 kg de N ha^{-1}; T3 = 150 kg de N ha^{-1}; e T4 = 200 kg de N ha^{-1}.

As áreas experimentais foram diferenciadas em função da dinâmica de manejo da pastagem e da estratégia de condução do pastejo. A reentrada dos animais em condição de pré-pastejo foi definida com base na área A, adotada como área de

referência por representar a dinâmica de crescimento do dossel sob o manejo estabelecido. A área B foi utilizada como ambiente experimental contrastante para avaliação da capacidade de generalização das relações identificadas na área de referência. Como ela foi submetida às mesmas doses crescentes de nitrogênio permitiu ampliar deliberadamente a variabilidade agronômica, produtiva e espectral do conjunto de dados. A adubação nitrogenada modifica a taxa de crescimento, o acúmulo de biomassa, a expansão da área foliar e o conteúdo de clorofila do dossel, produzindo diferentes respostas de recuperação da pastagem após o pastejo. Dessa forma, a inclusão da área B permitiu submeter os modelos a uma amplitude de respostas superior àquela observada na condição de referência, constituindo uma avaliação mais restritiva de sua robustez e capacidade de generalização. Assim, o objetivo não foi comparar diretamente as áreas como condições experimentais equivalentes, mas verificar se os padrões produtivos e espectrais associados à rebrota permaneceriam identificáveis diante de alterações induzidas na disponibilidade de nitrogênio e, consequentemente, na expressão fenotípica do capim-Tanzânia.

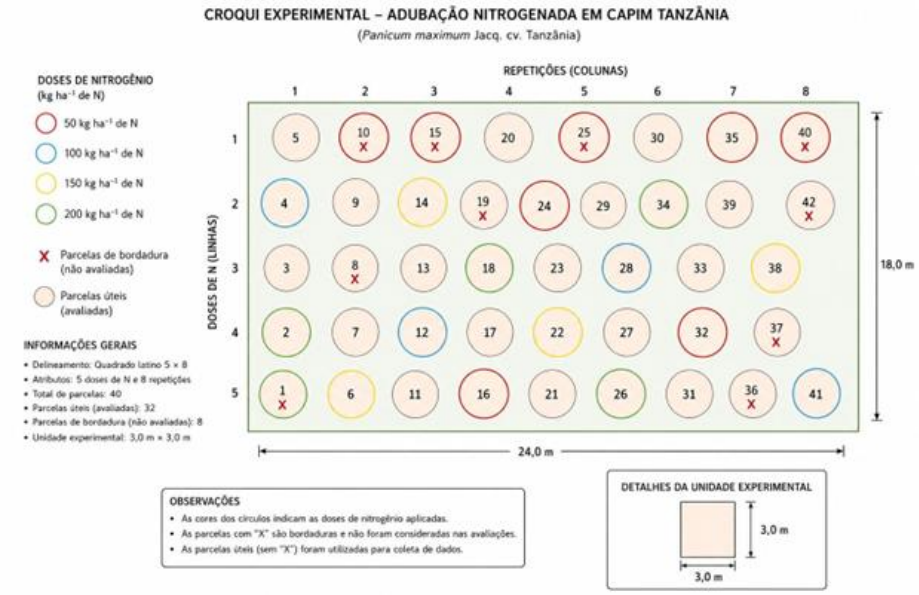

Figura 1. Grade amostral contendo 64 pontos georreferenciados utilizados nas coletas de dados.

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de solubilizar e diminuir a perda por volatilização foi feito a irrigação após a aplicação da ureia, garantindo a disponibilidade de nitrogênio para o solo. Os aspersores foram da marca “Plano PA-150”, com 8x5mm de diâmetro, com 2 bocais e vazão de 6,6 m^3/h.

Na área A quando a pastagem atingisse 0,70m os animais eram inseridos para o pastejo, e retirados quando o dossel atingia entre 0,30 e 0,40m, com a permanência de 24 a 48 horas em cada área. Em cada área era comportado cerca de 25 a 30 vacas em lactação por ciclo de pastejo. Após o pastejo, o período de descanso era de aproximadamente 40 dias, ou até as plantas da área A atingissem a altura mínima de 0,70m.

3.3 Produtividade da forragem

A produtividade da forragem foi avaliada nas duas áreas experimentais durante o pré-pastejo, em cada ponto amostral. Toda a forragem disponível foi coletada em uma área demarcada por um gabarito feito com cano de PVC de $1m^2$ (1,0 x 1,0m), fazendo um corte acima de 0,40m do solo (SANTOS et al., 2021; SOARES et al., 2009).

A massa de matéria fresca foi determinada, de acordo com a pesagem da forragem obtida em cada ponto amostral. Em seguida, foi retirado uma subamostra de 0,1kg, a qual foi submetida à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65ºC por 72 horas até atingir peso constante (SANTOS et al., 2021; RODRIGUES, 2010). Depois do resfriamento das amostras foi determinada o teor de matéria seca, e os resultados foram convertidos em produtividade de forragem, expressa em kg ha^{-1}.

3.4 Sensoriamento remoto aéreo

O veículo aéreo não tripulado (VANT) foi usado para aerotransportar um sensor multiespectral (câmera) RedEdge MX (Micasense, Seattle, WA, EUA) equipado com lentes 47.9º HFOV 5.4 mm, que captura segmentos dos comprimentos de onda do espectro eletromagnético do visível (Vermelho (Red- R), verde (Green-G) e azul (Blue-B), da borda do vermelho (RedEdge-RE) e do infravermelho próximo (Near infrared-NIR). O sensor foi colocado em um VANT multirotor, do tipo inspire 2, da empresa DJI (Shenzhen, CN).

As condições operacionais dos aerolevantamentos foram definidas por meio de testes preliminares, avaliados diferentes alturas de voo, velocidades de deslocamento da aeronave e percentuais de sobreposição frontal e lateral das imagens. Depois

dessa etapa, foi definida a altura ideal de voo de 80 m, velocidade média de 7 m s-[1] e sobreposição frontal e lateral de 80%, resultando em um Ground Sampling Distance (GSD) de 5,21 cm.

Para diminuir os efeitos das sombras sobre as imagens capturadas, os levantamentos foram realizados dentro de uma janela máxima de duas horas, onde os horários de início e término obtidos por meio da ferramenta online Sun Earth Tools de acordo com o ângulo da inclinação solar. Na Tabela 1 encontram-se os critérios e detalhes dos voos realizados.

Tabela 1. Descrição das datas, horário de início dos voos, número de imagens, estação do ano e inclinação solar dos aerolevantamentos.

Data	Horário de inicio	Nº de imagens	Estação do ano	Inclinação solar (º)
12/12/2022	11:58	202	Primavera	-23.12
07/05/2023	11:04	197	Outono	

Fonte: Adaptado de BONADIMAN, P.A. (2025)

As imagens obtidas passaram pelas calibrações geométricas e radiométricas, que corrigiu as distorções por conta das características da câmera e converteu os números digitais (ND) em valores físicos de refletância.

Após a correção as imagens foram processadas no software OpenDroneMap, gerando ortomosaicos para calcular os índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDRE (Normalized Difference RedEdge Index), usados para avaliação qualitativa e quantitativa do vigor vegetativo das plantas.

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad \text{Equação 1}$$

$$NDVI = \frac{(NIR-RE)}{(NIR+RE)} \quad \text{Equação 2}$$

Equações utilizadas para avaliar a relação quantitativa e qualitativa do vigor vegetativo das plantas, em que: R, RE e NIR são o comprimento de onda da banda do vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente.

O NDVI foi calculado através da relação entre bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R), enquanto o NDRE foi obtido a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR) e da borda do vermelho (RedEdge-RE). Os índices são

utilizados para estimar características como o crescimento vegetal, estado nutricional e a atividade fotossintética das plantas.

3.5 Análise de dados

Os dados obtidos em campo e por sensoriamento remoto foram inicialmente organizados em banco de dados e submetidos à análise exploratória, visando identificar valores discrepantes, inconsistências, dados faltantes e a distribuição das variáveis. Em seguida, foram calculadas estatísticas descritivas (média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos) para caracterização dos tratamentos e das variáveis avaliadas.

A modelagem da produtividade da rebrota foi realizada por meio do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (RF), utilizando como variáveis preditoras que são os índices espectrais derivados das imagens multiespectrais, bem como as variáveis agronômicas como a produtividade da rebrota que são relacionadas ao manejo e à produtividade da pastagem. Foram avaliadas diferentes estratégias de modelagem, considerando tanto o conjunto completo de dados quanto subconjuntos definidos por tratamentos e condições experimentais.

O desempenho dos modelos será avaliado por validação cruzada (*k*-fold cross-validation), permitindo estimar sua capacidade de generalização. A qualidade das predições será quantificada por meio do coeficiente de determinação (R^2), erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual absoluto médio (MAPE). Adicionalmente, foram construídos gráficos de dispersão entre valores observados e preditos, bem como análises residuais, visando verificar a precisão e possíveis tendências sistemáticas dos modelos.

A contribuição das variáveis preditoras será determinada por meio da análise de importância das variáveis (*Variable Importance*), permitindo identificar os índices espectrais e demais atributos com maior influência sobre a estimativa da produtividade da rebrota. Os resultados obtidos interpretados à luz das condições de manejo, das características ambientais e da literatura científica, buscando identificar os principais fatores associados ao desempenho produtivo da pastagem e ao potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento da rebrota.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produtividade média da pastagem nas diferentes áreas

A Figura 2 apresenta a produção média de biomassa no pré-corte e na rebrota do capim-Tanzânia, considerando as diferentes áreas experimentais, períodos do ano e tratamentos de adubação nitrogenada. A análise caracteriza a variabilidade dos dados utilizados na modelagem e identifica possíveis padrões associados às condições ambientais e ao manejo adotado.

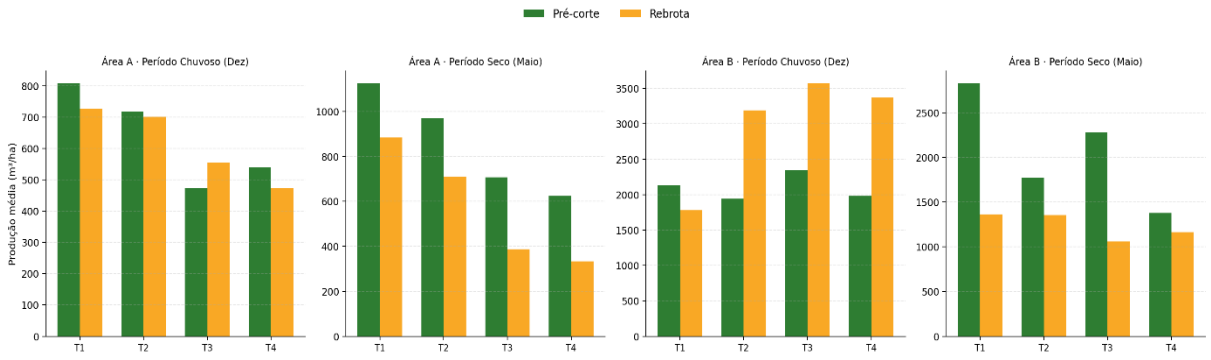

Figura 2. Produção média de biomassa no pré-corte e na rebrota do capim-Tanzânia por área experimental, período do ano e tratamento nitrogenado.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as produtividades variaram entre áreas, períodos e tratamentos. Na Área A, tanto no período chuvoso quanto no seco, a produção de pré-corte foi superior à produção da rebrota, com exceção do tratamento T3 no período chuvoso, em que a rebrota apresentou valores ligeiramente maiores.

Na Área B, verificou-se maior variabilidade produtiva, principalmente durante o período chuvoso, quando alguns tratamentos apresentaram produção de rebrota superior à biomassa pré-corte. Já no período seco, a produção pré-corte predominou em todos os tratamentos avaliados. Essas diferenças evidenciam a influência conjunta das condições climáticas, das características das áreas experimentais e dos tratamentos nitrogenados sobre a dinâmica produtiva da pastagem, justificando a utilização dessas variáveis na construção dos modelos preditivos.

Além da avaliação da produção absoluta de biomassa, foi analisada a relação entre produção de rebrota e a biomassa existente no pré-corte, permitindo identificar o nível de recuperação da pastagem após o manejo. A Figura 3 mostra os valores médios dessa relação para as diferentes áreas, períodos e tratamentos nitrogenados, considerando como referência a linha de recuperação total (relação igual a 1).

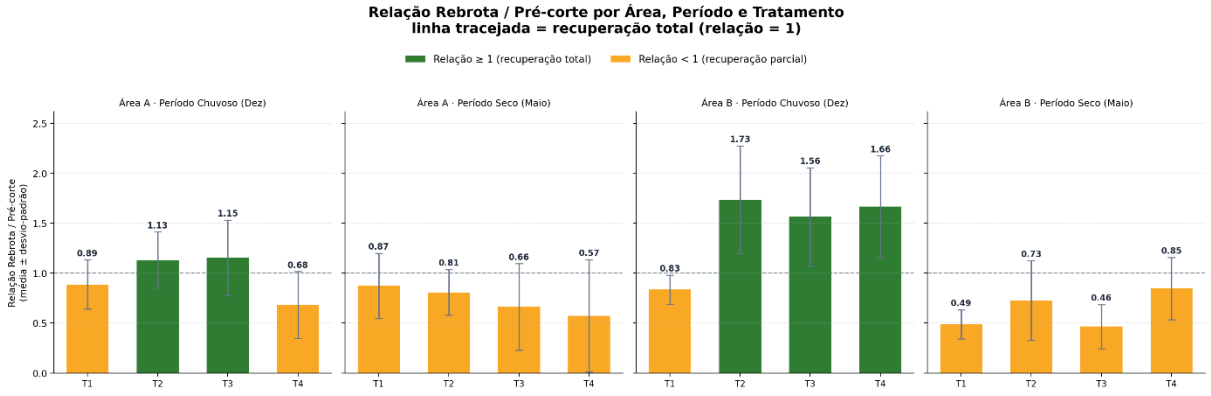

Figura 3. Relação entre a produção de rebrota e a biomassa pré-corte do capim-Tanzânia por área experimental, período do ano e tratamento nitrogenado, considerando a linha de recuperação total (relação = 1).

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o comportamento da relação rebrota/pré-corte variou entre áreas, períodos e tratamentos. Na Área A, durante o período chuvoso, os tratamentos T2 e T3 apresentaram valores maiores do que 1, indicando recuperação total ou até mesmo produção de biomassa maior do que à existente no pré-corte, já o T1 e T4 ficaram abaixo do limite. No período seco, todos os tratamentos apresentaram relações inferiores a 1, evidenciando redução na capacidade de recuperação da pastagem.

Na Área B, no período chuvoso apresentou os maiores valores da relação rebrota/pré-corte, principalmente nos tratamentos T2, T3 e T4, que superaram o valor de referência, demonstrando alta capacidade de rebrota. No período seco, nenhum tratamento atingiu recuperação total, indicando a influência das condições climáticas sobre o desenvolvimento da forrageira.

Os resultados indicam que a estação chuvosa favoreceu a recuperação da biomassa, enquanto o período seco limitou o potencial de rebrota do capim-Tanzânia, independente da dose de nitrogênio utilizada.

A dose de nitrogênio exerceu efeito dependente da disponibilidade hídrica e da área experimental, não sendo possível caracterizar uma resposta linear única da relação rebrota/pré-corte. No período chuvoso, o aumento da disponibilidade de N

favoreceu a recuperação da pastagem, sobretudo a partir de 100 kg ha^{-1}. Na Área A, a relação aumentou de 0,89 no T1 para 1,13 e 1,15 nos tratamentos T2 e T3, respectivamente, indicando que as doses de 100 e 150 kg ha^{-1} de N permitiram recompor ou superar a biomassa existente no pré-corte. Entretanto, a relação caiu para 0,68 no T4, demonstrando que o incremento para 200 kg ha^{-1} não proporcionou benefício adicional e pode ter representado uma dose superior àquela efetivamente aproveitada pela forrageira nessa condição.

Na Área B, durante o período chuvoso, a resposta ao N foi mais acentuada. O T1 apresentou relação de 0,83, enquanto os tratamentos T2, T3 e T4 alcançaram 1,73, 1,56 e 1,66, respectivamente. O aumento de 50 para 100 kg ha^{-1} de N produziu o maior ganho relativo, elevando a relação em aproximadamente 108%. A partir de 100 kg ha^{-1}, os resultados permaneceram em um patamar elevado, sem tendência consistente de aumento entre 100, 150 e 200 kg ha^{-1}. Esse comportamento sugere uma resposta do tipo incremento seguido de estabilização, na qual 100 kg ha^{-1} foi suficiente para atender grande parte da demanda nutricional associada à rebrota, enquanto doses superiores não resultaram em ganhos proporcionais.

O efeito positivo do N no período chuvoso está relacionado ao aumento da síntese de clorofila, da atividade fotossintética, da expansão foliar, do perfilhamento e da taxa de aparecimento de folhas. Após o pastejo, aumenta a entrada de luz nas touceiras, a ativação das gemas, a emissão de novas folhas e perfilhos favorecendo o acúmulo de matéria seca. Entretanto, essa resposta depende de disponibilidade adequada de água, pois a absorção e o transporte do N no solo, bem como sua assimilação metabólica pela planta, são fortemente limitados pelo déficit hídrico.

Essa limitação fica evidente no período seco. Na Área A, a relação rebrota/pré-corte diminuiu progressivamente com o aumento da dose, passando de 0,87 no T1 para 0,81, 0,66 e 0,57 nos tratamentos T2, T3 e T4. Portanto, doses mais elevadas de N não compensaram a restrição hídrica e tampouco aumentaram a capacidade relativa de recuperação da pastagem. Nessa condição, o maior suprimento de N pode elevar o potencial de crescimento e a demanda por água, mas, na ausência de umidade suficiente, a planta não consegue converter esse nutriente em biomassa. Pode ocorrer menor eficiência de uso do N, acúmulo temporário do nutriente no sistema e maior diferença entre o potencial fisiológico e o crescimento efetivamente realizado.

Na Área B, durante o período seco, os valores foram de 0,49, 0,73, 0,46 e 0,85 para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Embora o T4 tenha apresentado a maior relação, nenhum tratamento atingiu a recuperação total, e a sequência das respostas não foi linear. O T3, por exemplo, apresentou valor inferior ao T2 e ao T4. Assim, nesse período, a dose de N não explica isoladamente o comportamento da rebrota, que provavelmente foi condicionado por diferenças na disponibilidade de água, na biomassa remanescente, no estado fisiológico das plantas, na estrutura do dossel e na variabilidade espacial da área.

Também é importante considerar que a variável analisada é uma razão entre a biomassa da rebrota e a biomassa pré-corte. Dessa forma, uma dose de N pode aumentar a produção absoluta de rebrota e, ainda assim, apresentar uma relação menor, caso também tenha elevado intensamente a biomassa existente antes do corte. Portanto, valores inferiores a 1 não significam necessariamente baixa produtividade absoluta, mas indicam que, no período avaliado, a rebrota ainda não recompôs integralmente a biomassa registrada no pré-corte.

Os padrões observados foram de maior produtividade no pré-corte em muitas situações, melhor recuperação durante a estação chuvosa, e respostas ao nitrogênio dependentes da disponibilidade hídrica e da área estão de cordo com estudos prévios sobre forrageiras tropicais. A aplicação de N aumenta produção de matéria seca de Urochloa spp. sobretudo quando a água não é limitante, enquanto em condições de seca os incrementos de N não se traduzem proporcionalmente em biomassa devido à limitação hídrica sobre absorção e crescimento (MARQUES et al., 2018). Resultados semelhantes foram relatados em experimentos com capim-marandu, que encontraram resposta ótima a doses intermediárias de N e estabilização ou queda de eficiência acima de determinados níveis, especialmente em áreas com restrições de água ou solo (CARVALHO et al., 2020). Essas evidências reforçam a interpretação de que 100 kg ha^{-1} representou um patamar eficiente para rebrota nas condições favoráveis, e que doses mais altas (200 kg ha^{-1}) podem não ser aproveitadas quando há limitação hídrica ou diferenças edáficas locais.

Índices relativos de recuperação devem ser analisados considerando tanto a produção absoluta quanto a composição do dossel e o histórico de manejo, pois alta biomassa no pré-corte podem ter dificuldade em atingir relação = 1 no curto prazo mesmo quando a rebrota é alta em termos absolutos (BRISKE et al., 2008;

HODGSON, 1990). Estudos agrícolas mais recentes com capim-Tanzânia, também relatam que áreas com maior biomassa antes do pastejo exigem maior tempo e condições favoráveis para recompor totalmente a massa cortada (Santos et al., 2017).

Em síntese, os resultados indicam que o N contribuiu positivamente para a recuperação do capim-Tanzânia quando houve disponibilidade hídrica adequada, com resposta mais expressiva entre 50 e 100 kg ha^{-1} e ausência de ganho consistente acima dessa dose. As doses de 100 e 150 kg ha^{-1} mostraram melhor desempenho na Área A durante o período chuvoso, enquanto, na Área B, as doses entre 100 e 200 kg ha^{-1} mantiveram elevada capacidade de recuperação. No período seco, entretanto, o efeito do N foi limitado e irregular, demonstrando que a água foi o principal fator restritivo. A superioridade efetiva entre doses deve ser confirmada por análise estatística, pois a sobreposição das barras de erro sugere variabilidade considerável e não permite afirmar diferença significativa apenas pela comparação visual das médias.

4.2 Desempenho dos modelos Random Forest

Depois da construção dos modelos Random Forest para estimativa da produtividade da rebrota e da relação rebrota/pré-corte, foi feita a avaliação do desempenho preditivo por meio de métricas estatísticas. Utilizando métricas coeficientes de determinação (R^2), erro médio absoluto (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), que verifica a capacidade dos índices espectrais em estimar a produtividade da rebrota do capim-Tanzânia.

Os resultados mostraram capacidade moderada preditiva dos modelos desenvolvidos, evidenciada pelos valores de R^2 observados durante a validação cruzada. O comportamento indica que a variabilidade produtiva da rebrota não foi completamente explicada pelas variáveis espectrais usadas na modelagem.

Os valores de MAE e RMSE indicaram a existência de diferenças entre os valores observados e aqueles estimados pelos modelos. O RMSE possuiu valores maiores do que o MAE, indicando erros de maior significância em determinadas observações. Esse resultado é esperado em experimentos conduzidos em condições de campo, onde fatores ambientais e operacionais podem introduzir alta variabilidade nos dados coletados.

A menor precisão observada pode estar relacionada à complexidade do crescimento das pastagens tropicais, que depende do estádio vegetativo detectado pelos índices espectrais, disponibilidade de água, fertilidade do solo, intensidade de pastejo, condições climáticas e o crescimento da planta. O uso exclusivo do NDVI e NDRE pode não ter sido suficiente para representar toda a variabilidade presente no sistema produtivo.

Os modelos Random Forest foram capazes de identificar tendências relacionadas ao comportamento da pastagem, mas possui limitações quanto a predição quantitativa da produtividade, sendo necessário aperfeiçoamento dos modelos e ampliação do conjunto de variáveis utilizadas.

A Figura 4 apresenta uma comparação gráfica do desempenho dos modelos Random Forest, considerando as estratégias de modelagem por tratamento e por agrupamento geral das áreas e períodos experimentais, usando métricas coeficiente de determinação (R^2) e erro percentual médio absoluto (MAPE).

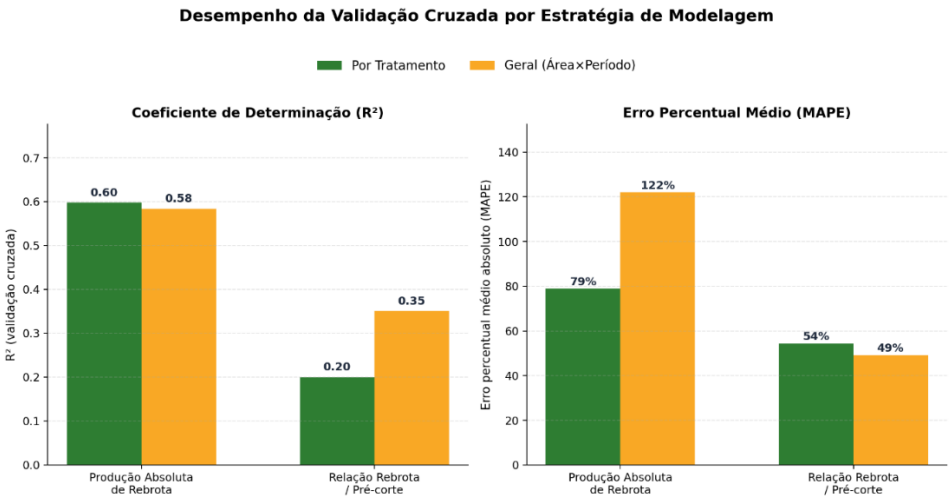

Figura 4. Desempenho da validação cruzada dos modelos Random Forest para as estratégias de modelagem por tratamento e geral (área × período).

Fonte: Autoria própria.

Para a variável produção absoluta de rebrota, ambas as estratégias apresentaram desempenho semelhante em termos de coeficiente de determinação, com valores de R^2 próximos de 0,60. O modelo por tratamento apresentou menor erro percentual médio absoluto (79%) em comparação ao modelo geral (122%), indicando maior precisão nas estimativas quando os tratamentos nitrogenados são considerados individualmente.

Para a variável relação rebrota/pré-corte, o comportamento foi distinto, com modelo geral apresentando melhor capacidade explicativa (R^2= 0,35) e menor erro percentual (MAPE =49%) em relação ao modelo por tratamento (R^2=0,20 e MAPE= 54%). Esses resultados sugerem que a agregação das informações por área e período pode favorecer a modelagem de variáveis relativas, reduzindo a variabilidade associada aos diferentes níveis de adubação nitrogenada.

Os resultados indicam que a escolha da estratégia de modelagem depende da variável resposta analisada, sendo o modelo por tratamento mais eficiente para estimar a produção absoluta de rebrota, já o modelo geral possuiu melhor desempenho para a relação entre rebrota e biomassa pré-corte.

Apesar dos índices explicarem parte da variação estrutural da forragem, a precisão preditiva fica muito dependente da inclusão de variáveis adicionais (umidade do solo, histórico de manejo, fenologia) e da resolução espacial/temporal dos sensores (KHOSAS et al., 2019). Modelos Random Forest combinados apenas com NDVI/NDRE apresentaram desempenho limitado (R2 modestos, altos RMSE), mas melhoraram significativamente quando acrescentaram variáveis climáticas (precipitação acumulada, ETp) e parâmetros do solo (OLIVEIRA et al., 2021).

O RMSE ser maior que MAE indica presença de erros grandes em algumas analises, provavelmente associada a pontos com manejo ou microambiente atípicos (ZARCO-TEJADA et al., 2018)

A estratificação por manejo ou condição edáfica melhora a predição de variáveis absolutas, porque reduz variabilidade não explicada dentro de grupos homogêneos; por outro lado, variáveis relativas (razões) podem se beneficiar de conjuntos maiores e mais variados que permitam que o modelo aprenda padrões proporcionais entre condições (LI et al., 2020). Sendo assim, os resultados indicam que a escolha da unidade de modelagem deve considerar o tipo de variável resposta: agrupar para modelar relações relativas e estratificar para modelar magnitudes absolutas.

4.3 Predições obtidas por validação cruzada dos modelos Random Forest

A validação cruzada dos modelos Random Forest foi usada para avaliar a capacidade preditiva dos índices espectrais na estimativa da produtividade da rebrota

e da relação entre a produtividade da rebrota e do pré-corte do capim-Tanzânia. As figuras 5 a 9 apresentam a relação entre os valores observados e preditos para as diferentes estratégias de modelagem adotadas.

Os modelos acompanharam parcialmente as tendências da variação da produtividade ao longo dos diferentes tratamentos e períodos avaliados. Na Área B, submetida à adubação nitrogenada, foram observados os maiores valores de produtividade da rebrota, com registros maiores do que 3.000 kg ha-1 durante o período chuvoso. Entre os tratamentos, os que mais se destacaram foram o T3 com 150 kg de N ha-1 e o T4 com 200 kg de N ha-1 por possuírem alguns dos maiores valores observados.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos valores observados e preditos obtidos por validação cruzada para as duas estratégias de modelagem avaliadas. A linha tracejada representa a relação ideal (1:1), na qual os valores previstos coincidem perfeitamente com os observados.

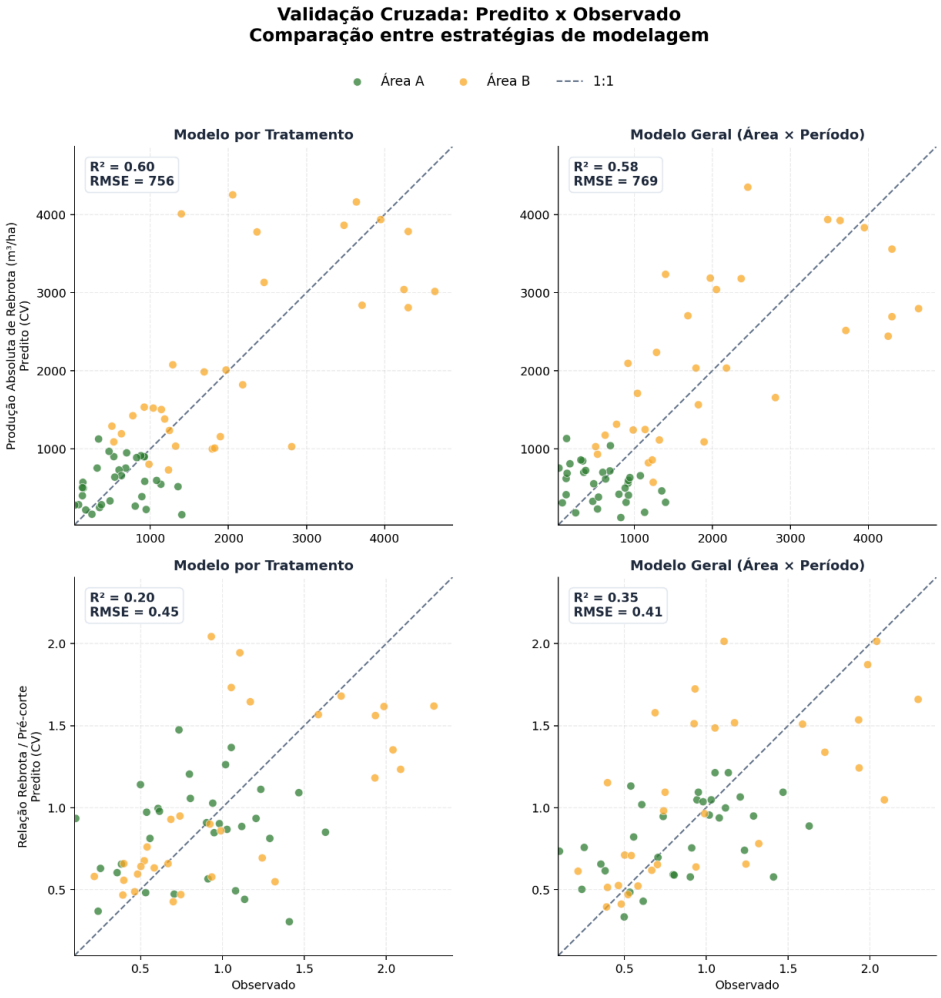

Figura 5. Comparação entre valores observados e preditos pelos modelos Random Forest para produção absoluta de rebrota e relação rebrota/pré-corte, considerando as estratégias por tratamento e geral (área × período).

Fonte: Autoria própria.

A diferença entre os valores observados e preditos sugere que a produtividade da rebrota sofreu influência por fatores além dos que foram representados pelos índices espectrais utilizados na modelagem. Características ligadas à fertilidade do solo, condições climáticas, variabilidade espacial da área experimental e disponibilidade hídrica podem ter contribuído para reduzir a precisão dos modelos.

Para a produção absoluta de rebrota, observa-se que ambos os modelos apresentaram desempenho semelhante, com coeficientes de determinação próximos de 0,60 e valores RMSE inferiores a 800 m^3 ha^{-1}. Os pontos encontram-se relativamente distribuídos ao redor da linha 1:1, indicando alta capacidade preditiva, apesar de ser notado maiores dispersões para valores elevados de produção, principalmente na Area B.

O modelo por tratamento apresentou ligeiramente melhor ajuste (R^2= 0,60 e RMSE= 756) quando comparado ao modelo geral (R^2= 0,58 e RMSE=769), sugerindo que a consideração individual das doses de nitrogênio contribui para reduzir parte da variabilidade associada à produção absoluta de rebrota.

A relação de rebrota/pré-corte, nota-se menor capacidade explicativa dos modelos, com R^2 variando entre 0,20 e 0,35. Apesar disso, os valores de RMSE permaneceram baixos, próximos a 0,40, os erros absolutos foram moderados. O modelo geral teve melhor desempenho, sugerindo que a agregação das informações por área e período favorece a estimativa dessa variável relativa.

A Figura 6 mostra a relação entre os valores observados e preditos para a produtividade absoluta da rebrota durante a validação cruzada do modelo Random Forest. Existe a tendência positiva entre as variáveis, mostrando que o modelo captou parcialmente a variação da produtividade da rebrota. Porém, a dispersão considerável dos pontos em relação a linha de referencia (1:1), nota-se diferenças entre os valores observados e estimados.

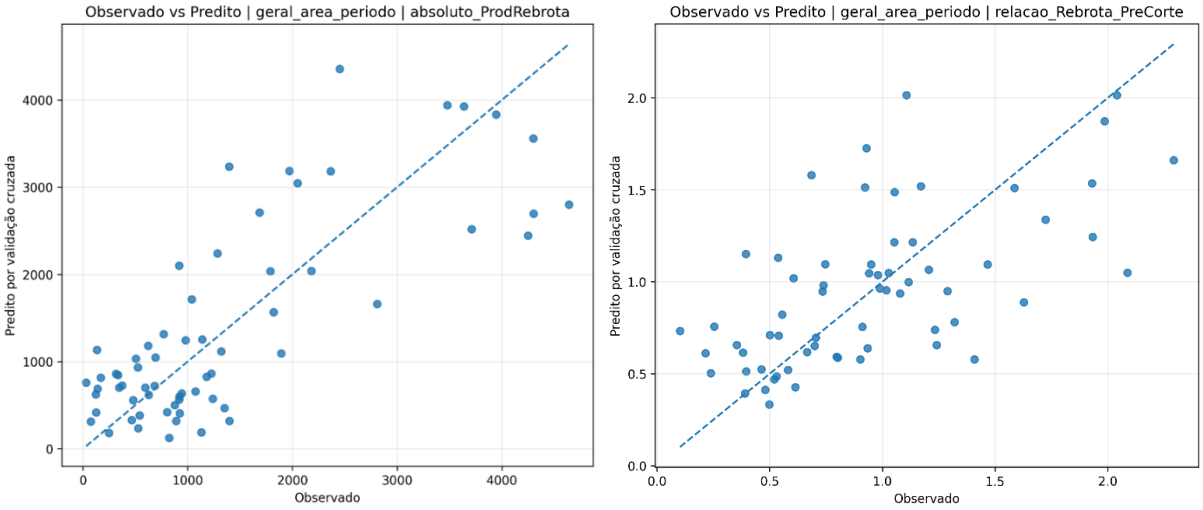

Figura 6. Relação entre os valores observados e preditos obtidos durante a validação cruzada do modelo Random Forest para a produtividade absoluta da rebrota e a relação rebrota/pré-corte, considerando as diferentes áreas e períodos avaliados. Os resultados mostram que apesar dos índices espectrais usados apresentarem potencial para representar o comportamento produtivo da pastagem, outros fatores que não foram analisados no modelo podem ter influenciado na rebrota, como as condições climáticas e fertilidade do solo. Sendo assim, obteve capacidade moderada de predição, com maior eficiência na identificação de tendencias gerais do que na estimativa precisa dos valores individuais.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 6 mostra que, além das métricas estatísticas, o desempenho dos modelos foi avaliado pela comparação entre os valores observados e os valores preditos obtidos na validação cruzada. Permitindo verificar visualmente a capacidade do modelo em reproduzir os padrões observados no experimento, onde as predições mais precisas se concentram próximas à linha de identidade (1:1).

A Figura 7 mostra a relação entre os valores observados e os preditos da variável relação rebrota/pré-corte obtidos a partir do modelo Random Forest de acordo com os tratamentos nitrogenados.

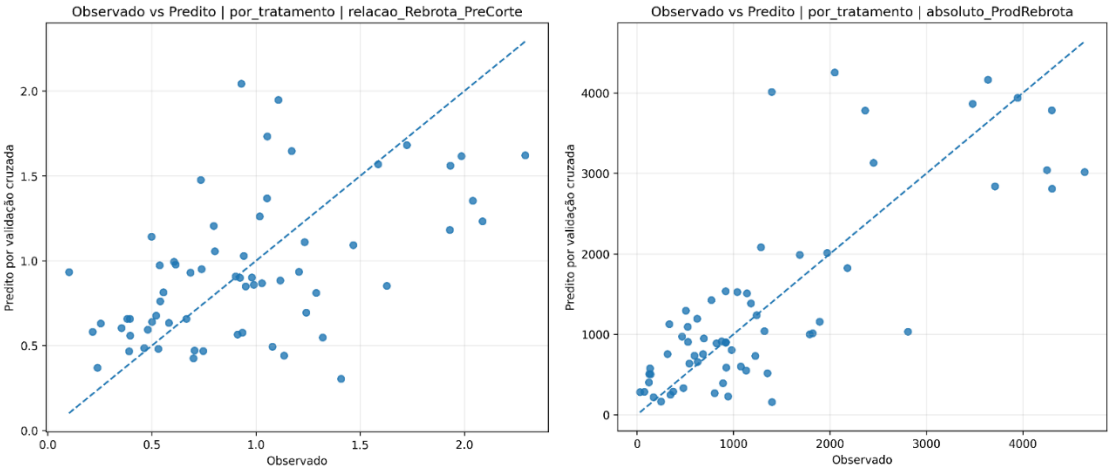

Figura 7. Relação entre os valores observados e preditos obtidos pelo modelo Random Forest considerando os tratamentos nitrogenados para a produtividade absoluta da rebrota e para a relação rebrota/pré-corte.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se a tendencia positiva entre os valores observados e estimados, mostrando a capacidade de captar a parte variável da resposta da pastagem às doses de nitrogênio.Apesar disso, como foi observado nas figuras anteriores, verificou-se dispersão dos pontos em relação à linha de identidade (1:1), evidenciando diferenças entre os valores observados e os preditos. Sugerindo que, embora os tratamentos nitrogenados contribuam para o comportamento da rebrota, fatores externos, ambientais e fisiológicos, também influenciaram sobre a dinâmica de crescimento da planta.

A Figura 7 apresenta a relação entre os valores observados e preditos da produtividade absoluta da rebrota obtidos pelo modelo Random Forest considerando os tratamentos nitrogenados. O comportamento do gráfico foi semelhante aos já apresentados, onde houve dispersão dos pontos em torno da linha de identidade, evidenciando diferenças entre os valores observados e preditos.

Os maiores desvios foram principalmente em níveis intermediários de produtividade, sugerindo a influência de fatores adicionais não mencionados no modelo.

Os modelos para à predição da produtividade absoluta da rebrota apresentaram comportamento semelhantes aos modelos para relação rebrota/pré-corte, caracterizados por tendência positiva entre valores observados e preditos apesar das dispersões moderadas dos dados. Os resultados indicam que os índices NDVI e NDRE capturaram parte importante da variabilidade produtiva da pastagem, mas não foram capazes de explicar integralmente a complexidade do processo de rebrota.

A moderada capacidade dos modelos Random Forest em capturar tendências gerais da produtividade da rebrota, porém com dispersão considerável em relação à linha 1:1, é um padrão observado em estudos que usam índices espectrais isolados para predizer biomassa em pastagens tropicais. Modelos para produção de matéria seca em pastagens *Pennisetum purpureum* usando NDVI e algoritmos de aprendizado de máquina, reportaram R^2 na faixa de 0,55-0,65 e destacaram que, apesar dos modelos capturarem a direção geral da variação produtiva, a precisão para valores

individuais continua limitada pelo fato da influência de fatores não espectrais, como umidade do solo e fenologia da planta (Pullanagari et al., 2018). Resultados parecidos foram encontrados em sistemas de pastagem ativa, onde modelos baseados em índices de vegetação apresentam R^2 moderados (0,50-0,62) e RMSE altos, especialmente para biomassa acima de 2.500 kg ha^{-1}, padrão observado na Área B durante o período chuvoso (JIN et al., 2020).

O melhor desempenho para a produção absoluta quando os tratamentos são modelados individualmente (R^2= 0,60 vs. 0,58 no modelo geral) corrobora com trabalhos que demonstraram que a estratificação por manejo ou condição edáfica reduz a variabilidade não explicada dentro de grupos homogêneos, possibilitando a identificação de padrões mais específicos em cada tratamento pelo algoritmo. (LU et al., 2019). A superioridade do modelo geral para relação rebrota-pré-corte (R^2=32 vs. 0,20 no modelo por tratamento) sugere que variáveis relativas se beneficiam de conjuntos de dados maiores e mais diversos, que permitem ao modelo aprender proporções médias entre condições distintas (LI et al., 2020).

Os pontos dispersos em níveis intermediários de produtividade e a tendência de sub ou superestimação em valores extremos são limitações documentadas em revisões sobre o uso de NDVI e NDRE para estimativa de biomassa forrageira (KHOSLA et al., 2019). Índices baseados em vermelho e infravermelho próximo saturam em dosséis densos (>2.000-2.500 kg ha^{-1}), diminuindo a sensibilidade para diferenciar altos níveis de biomassa, o que explica maiores desvios na Área B, que foram registradas produtividades maiores do que 3.000 kg ha^{-1} . A variabilidade espacial do solo e microclimática em experimentos de campo indicia que o ruído que não é capturado por índices pontuais, gerando resíduos maiores mesmo quando o modelo é estatisticamente significativo. (MUTANGA et al., 2021).

Os resultados mostram que NDVI e NDRE, juntos com Random Forest, são ferramentas úteis para identificar tendências gerais e classificar áreas com maior ou menor potencial produtivo, porém falta variáveis complementares (umidade do solo, precipitação acumulada e propriedades edáficas) para alcançar precisão quantitativa adequada para recomendações de manejo em tempo real. Demais trabalhos sugerem que a integração de dados multiespectrais de maior resolução, séries temporais e covariáveis ambientais para superar as limitações de índices espectrais isolados em

sistemas forrageiros complexos (ZARCO-TEJADA et al., 2018 e OLIVEIRA et al., 2021).

4.4 Importância média das variáveis espectrais na modelagem da rebrota do capim-Tanzânia

Para compreender o auxílio dos índices espectrais para a estimativa da rebrota das pastagens, foi feita inicialmente uma análise considerando apenas as áreas experimentais e os períodos climáticos, sem a separação por tratamentos nitrogenados. Permitindo identificar tendências gerais sobre a importância relativa do NDVI e do NDRE na predição da produção absoluta de rebrota e da relação entre a produção de rebrota e a biomassa pré-corte. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 8.

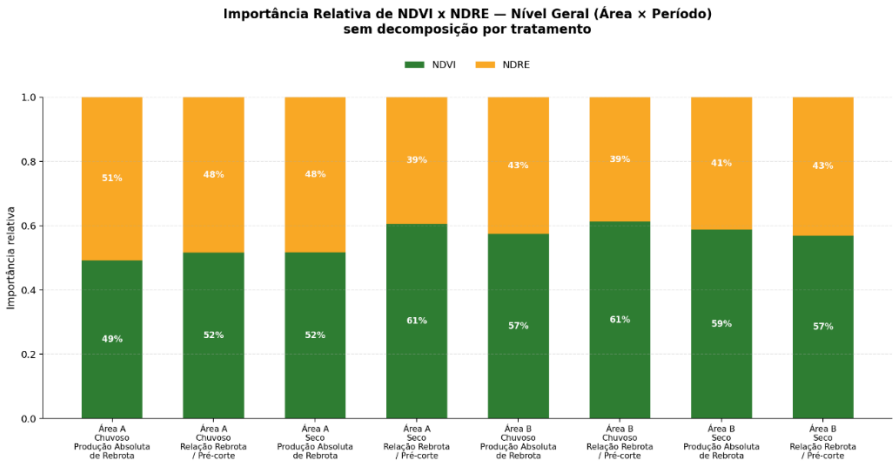

Figura 8. Importância relativa dos índices NDVI e NDRE na predição da produção absoluta de rebrota e da relação rebrota/pré-corte em diferentes áreas e períodos experimentais.

Fonte: Autoria própria.

Pelo que foi observado na figura 8, o NDVI apresentou maior importância relativa em praticamente todas as combinações entre áreas e períodos avaliados, variando de 49% a 61% da contribuição total para os modelos. O NDRE, apresentou participação entre 39% e 51%.

Na Área A, no período chuvoso, ambos os índices apresentaram contribuições semelhantes para a produção absoluta da rebrota, enquanto para a relação rebrota e pré-corte o NDVI tornou-se ligeiramente mais importante (52%). Já no período seco,

a superioridade do NDVI foi mais evidente, atingindo 61% de importância relativa para a relação rebrota/pré-corte.

Na Área B, o comportamento se repetiu, com predominância do NDVI em todas as situações avaliadas, especialmente durante o período seco. Esses resultados indicam que a refletância associada ao vigor vegetativo pelo NDVI, constitui um importante indicador da capacidade de rebrota das pastagens, enquanto o NDRE atua como variável complementar relacionada ao estado nutricional e ao teor de clorofila das plantas.

A análise da importância média das variáveis permitiu identificar a contribuição dos índices espectrais NDVI e NDRE para estimar a produção da rebrota e da relação entre a produtividade da rebrota e a do pré-corte do capim. O NDVI teve maio contribuição quando comparado ao NDRE, tanto na Area A como na B, independe do período de avaliação.

Na produtividade absoluta da rebrota, os valores de importância do NDVI variaram entre 0,49 e 0,59, já os valores de NDRE variaram de 0,41 e 0,51. Na área A, durante as chuvas os índices obtiveram contribuições semelhantes, com os valores de 0,49 para NDVI e 0,51 para o NDRE. Durante a seca o NDVI obteve maior relevância de 0,52, enquanto o NDRE foi de 0,48. Na área B, o NDVI teve maior importância nos dois períodos, alcançando valores de 0,57 no período chuvoso e 0,59 na seca. Por outro lado, o NDRE teve significância de 0,43 e 0,41 respectivamente. Os resultados mostram que o NDVI foi melhor para representar as variações associadas à produtividade da rebrota nas condições avaliadas.

Resultados semelhantes foram analisados para a modelagem da relação entre produtividade da rebrota e produtividade pré-corte. Os maiores valores de importância foram atribuídos ao NDVI, principalmente na área B durante o período das águas, o índice teve importância de 0,61, enquanto o NDRE apresentou o resultado de 0,39. Na área A, durante a seca, o NDVI também se destacou com o valor de 0,61, mostrando sua grande capacidade de representar alterações relacionadas ao crescimento vegetativo e à recuperação da forrageira após o pastejo.

Após a análise geral, realizou a decomposição dos resultados por tratamento nitrogenados, permitindo avaliar se as doses de nitrogênio alteraram a importância relativa dos índices espectrais utilizados nos modelos de predição. Os resultados são observados na Figura 9.

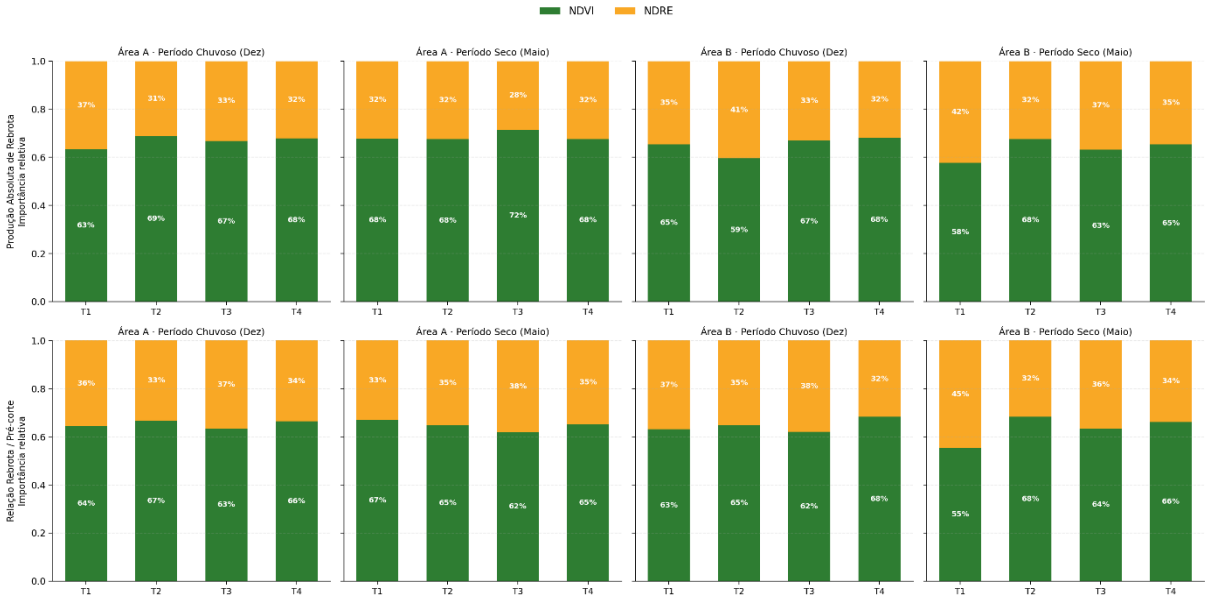

Figura 9. Importância relativa dos índices NDVI e NDRE na predição da produção absoluta de rebrota e da relação rebrota/pré-corte em função dos tratamentos nitrogenados, áreas experimentais e períodos climáticos.

Fonte: Autoria própria.

A predominância do NDVI na modelagem da produtividade absoluta da rebrota, os valores com maior relevância variaram de 0,63 e 0,69, o NDRE, apresentou valores entre 0,31 e 0,37. O que se repetiu quando observado a relação entre produtividade da rebrota e produtividade pré-corte, onde o NDVI apresentou valores próximos a 0,65 em basicamente todas as condições avaliadas.

O fato de o NDVI ter se destacado pode ser explicada pela elevada sensibilidade ao vigor vegetativo e ao acúmulo de biomassa verde das plantas. Como a disponibilidade de nitrogênio influencia diretamente no crescimento foliar, a atividade fotossíntese e a produção de matéria-seca, alterações na produtividade da pastagem são refletidas de forma mais evidente nesse índice. Apesar do NDRE também ter auxiliado nos modelos, a menor participação do mesmo indica que, nas condições que foi realizada o estudo, as variações relacionadas a biomassa e ao vigor vegetativo geraram maior influência sobre a produtividade da rebrota do que as alterações especificas ligadas ao teor de clorofila.

Sendo assim, os resultados mostraram que o NDVI teve maior potencial para o monitoramento da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia, constituindo uma ferramenta promissora para aplicação de sensoriamento remoto voltadas ao manejo de pastagens e à agricultura de precisão.

A maior relevância do NDVI sobre o NDRE na predição da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia, observada em todas as combinações de área, período e tratamento nitrogenado, está de acordo com estudo de Pullanagari 2018, que avaliaram a contribuição relativa de índices espectrais para estimativa de biomassa em pastagens tropicais. Foi visto que a biomassa em *Pennisetum purpureum* com a modelagem usando múltiplos índices de vegetação, identificaram que o NDVI contribuiu com 52-64% da variância explicada pelos modelos, superando índices baseados em red-edge como o NDRE, que apresentaram contribuições entre 34-48% (Pullanagari et al., 2018).Os autores atribuem essa diferença à maior sensibilidade do NDVI ao acúmulo de biomassa verde e à cobertura do dossel, variáveis diretamente relacionadas à produção de matéria seca, enquanto o NDRE responde mais fortemente a variações no teor de clorofila e estado nutricional, que nem sempre se correlacionam linearmente com a biomassa total.

A maior importância do NDVI durante o período seco (atingindo 61% na Área A e 59% na Área B para produção absoluta) contribui com trabalhos que mostram as condições de estresse hídrico, o NDVI mantém maior poder discriminatório para diferenciar níveis de biomassa residual e capacidade de rebrota, enquanto índices red-edge como o NDRE tendem a perder sensibilidade devido à redução da atividade fotossintética e ao fechamento estomático, que limitam a expressão espectral do estado nutricional (JIN et al., 2020). O padrão explica o motivo da maior relevância do NDVI durante a seca, captando variações estruturais do dossel que persistem mesmo quando o metabolismo vegetal está comprometido.

A importância relativa dos índices sobre a influência do nitrogênio foi documentada em estudos prévios que avaliaram a resposta espectral de gramíneas forrageiras a diferentes doses de N, observaram que o NDVI responde de forma mais consistente ao aumento de biomassa induzido pela adubação nitrogenada, já o NDRE apresenta maior variabilidade e saturação em doses intermediárias e altas (acima de 100kg ha^{-1}), padrão semelhante aos tratamentos T3 e T4 (MARESMA et al., 2016). A diferença acontece pois o NDVI integra informações de reflectância no vermelho e infravermelho próximo, que são altamente sensíveis à densidade foliar e ao fechamento do dossel, enquanto o NDRE, baseado na região red-edge (700-750nm), é mais especifico para detectar mudanças no conteúdo de clorofila, que pode não aumentar proporcionalmente à biomassa em doses elevadas de N.

A consistência da superioridade do NDVI entre áreas experimentais (A e B) e períodos (chuvoso e seco) reforça conclusões de revisões sistemáticas sobre o uso de sensoriamento remoto em pastagens. O NDVI continua sendo o índice mais robusto e universalmente aplicável para predição de biomassa, principalmente em sistemas heterogêneos e com variabilidade espacial acentuada, enquanto índices red-edge como o NDRE são recomendados como variáveis complementares para refinar estimativas de estado nutricional ou estresse fisiológico, dificilmente superam o NDVI em modelos de produção total de matéria seca (KHOSLA et al., 2019).

Os resultados confirmam que o NDVI é o índice espectral mais adequado para monitoramento da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia em condições de campo, enquanto o NDRE atua como variável auxiliar que captura informações a mais sobre o estado metabólico das plantas, mas com contribuição secundária para predição de biomassa. Em contextos operacionais com restrições de custo ou processamento, o NDVI isolado pode fornecer estimativas satisfatórias da produtividade, e o NDRE deve ser priorizado em diagnósticos nutricionais ou detecção precoce de estresse.

4.5 Importância dos índices de vegetação para a estimativa de produtividade e rebrota

Nas Figuras 10 e 11 observa-se a predominância do NDVI sobre o NDRE na estimativa da produtividade do capim-Tanzânia por tratamento e por período de estudo, respectivamente.

Para os tratamentos, os índices de Maio_NDVI e Dez_NDVI apresentaram valores de maior relevância com aproximadamente 0,66, já Maio_NDRE e Dez_NDRE os valores foram próximos a 0,34. Indicando que as variações da produtividade da rebrota estiveram mais associadas ao vigor vegetativo e ao acúmulo de biomassa verde da pastagem do que às alterações relacionadas ao teor de clorofila. O NDVI se destacou nas respostas da forrageira as condições de manejo avaliadas, sendo o principal indicador espectral para o monitoramento da rebrota do capim-Tanzânia.

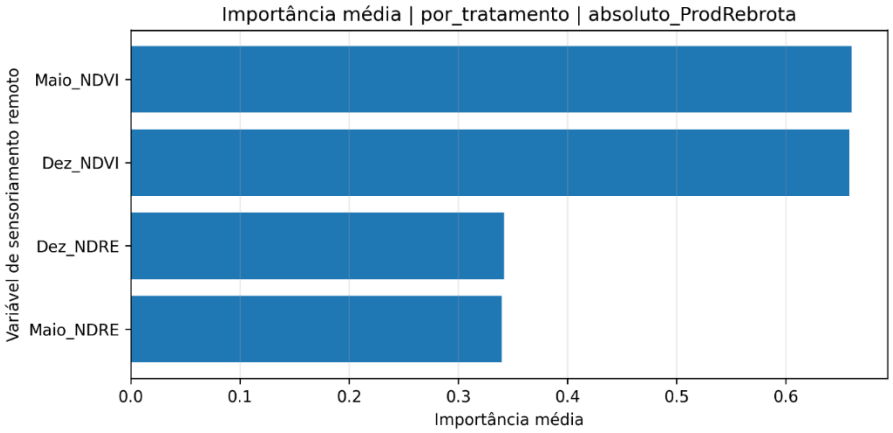

Figura 10. Importância média das variáveis espectrais para a predição da produtividade absoluta da rebrota do capim-Tanzânia em função do período de estudo.

Fonte: Autoria própria.

No gráfico da Figura 11, analisando o efeito do período, é possível avaliar os índices NDVI, assim como a figura anterior, apresentaram maior significância para a predição da produtividade absoluta de capim-Tanzânia. Os valores de importância observados para Maio_NDVI e Dez_-NDVI foram de 0,55 e 0,53 respectivamente.

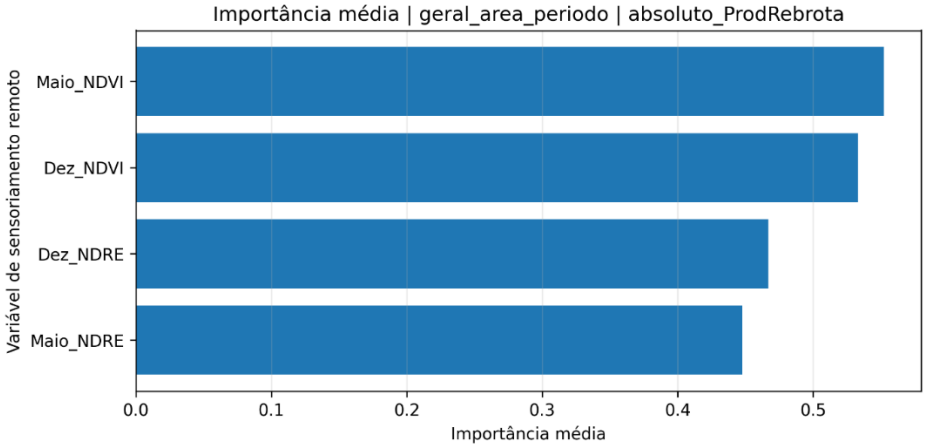

Figura 11. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação entre produtividade absoluta e rebrota do capim-Tanzânia em função do período de estudo.

Fonte: Autoria própria.

O NDRE também apresentou elevada relevância para os modelos, com valores de 0,45 para Maio_NDRE e 0,47 para Dez_NDRE. A pouca diferença entre o NDVI e o NDRE mostra que o vigor vegetativo e o estado nutricional das plantas tiveram influência sobre a produtividade da rebrota.

Os resultados condizem com a função do nitrogênio no metabolismo vegetal, pois o nutriente está ligado a síntese de clorofila e ao crescimento foliar. Com isso,

tanto os indicadores estruturais da vegetação (NDVI) quanto os indicadores relacionados ao conteúdo de clorofila (NDRE) evidenciaram a sua importância para explicar a resposta produtiva do capim nas condições avaliadas.

O algoritmo Random Forest obteve a importância média das variáveis, que demonstrou diferenças na contribuição dos índices espectrais para a estimativa da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia. O índice NDVI apresentou maior relevância quando comparado ao NDRE, independente da época avaliada.

Os valores médios de importância do NDVI foram aproximadamente 0,66, tanto para as avaliações feitas em maio quanto as de dezembro, o NDRE apresentou valores próximos a 0,34 nos mesmos períodos. Os valores indicam que o NDVI auxiliou de forma mais significativa para a construção de modelos preditivos usados no estudo, sendo o responsável por grande parte da variabilidade explicada pelos algoritmos de aprendizado de máquina.

O NDVI teve maior importância por sua elevada sensibilidade as alterações no vigor vegetativo e acumulo de biomassa verde das plantas. Como o nitrogênio exerce papel fundamental na síntese de clorofila, atividade fotossintética e expansão foliar, espera-se que mudanças na disponibilidade desse nutriente sejam refletidas diretamente nos valores desse índice.

Apesar do NDRE ser amplamente utilizado para monitorar o estado nutricional das plantas devido à sua sensibilidade ao teor de clorofila, os resultados sugerem que, nas condições experimentais avaliadas, esse índice apresentou pouca capacidade de contribuir para a explicação da produtividade da rebrota quando comparado ao NDVI. Esse comportamento pode estar relacionado às características do dossel forrageiro e a resposta espectral especifica do capim-Tanzânia durante os períodos analisados.

A semelhança dos valores de importância entre maio e dezembro mostra a estabilidade temporal do NDVI como variável explicativa, indicando que seu uso pode ser eficiente em diferentes épocas do ano e em diferentes condições de desenvolvimento da pastagem.

Sendo assim, os resultados evidenciam o potencial do NDVI como ferramenta para monitorar o vigor vegetativo e da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia, ressaltando sua aplicabilidade em sistemas de agricultura de precisão voltados ao manejo de pastagens.

Nas Figuras 12 e 13 observa-se a predominância do NDVI sobre o NDRE na estimativa da relação da produtividade pós e pré-corte do capim-Tanzânia por tratamento e por período de estudo, respectivamente.

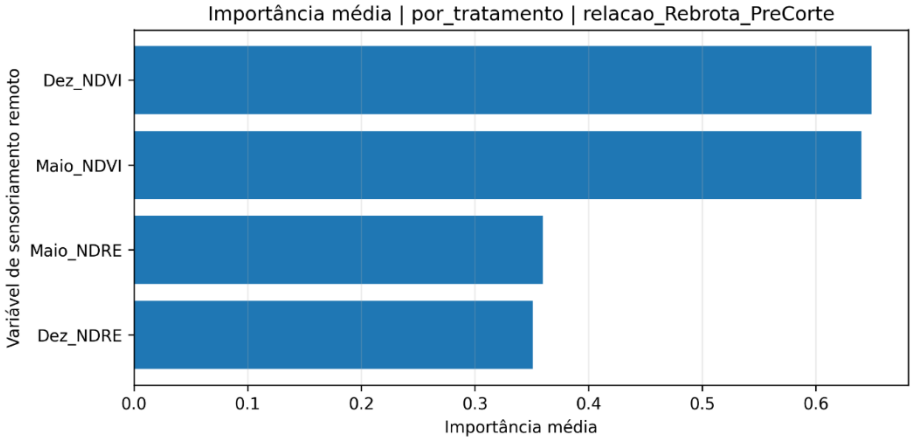

Figura 12. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação rebrota/pré-corte do capim-Tanzânia em função dos tratamentos nitrogenados.

Fonte: Autoria própria.

No gráfico o NDVI teve maior predominância, os índices Dez_NDVI e Maio_NDVI apresentaram valores de importância próximos de 0,65 e 0,64, enquanto Maio_NDRE e Dez_NDRE apresentam valores próximos de 0,36 e 0,35.

Os resultados indicam que a capacidade de recuperação da planta após o pastejo estava associada ao vigor vegetativo e ao acumulo de biomassa verde do que

às variações relacionadas ao teor de clorofila. A maior atuação do NDVI mostra sua alta sensibilidade para detectar alterações estruturais do dossel forrageiro.

A semelhança dos valores dos meses de maio e dezembro sugere que a relevância do NDVI foi consistente entre diferentes períodos de avaliação, reforçando o potencial para aplicações de monitoramento de pastagens por sensoriamento remoto.

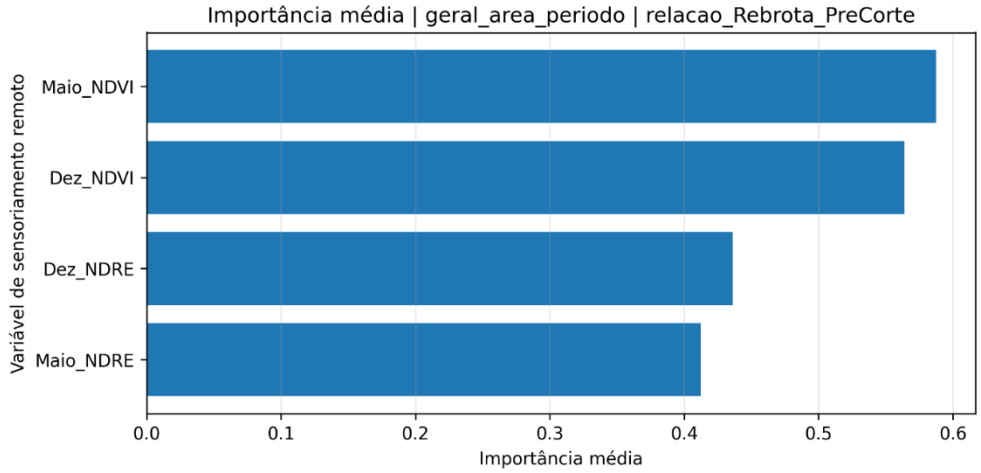

Figura 13. Importância média das variáveis espectrais para a predição da relação rebrota/pré-corte do capim-Tanzânia considerando as diferentes áreas e períodos experimentais.

Fonte: Autoria própria.

A análise do gráfico, considerando simultaneamente a área experimental e os períodos avaliados, mostrou-se predominância do NDVI sobre o NDRE na relação de produtividade da rebrota e produtividade pré-corte. Os índices de Maio_NDVI e Dez_NDVI os valores mais representativos foram de importância média foi de 0,59 e 0,56, respectivamente, já os índices de Maio_NDRE e Dez_NDRE os valores foram de 0,41 e 0,44.

Apesar do NDVI ter tido maior contribuição, nota-se aumento relativo da importância do NDRE em comparação com as análises feitas individualmente por tratamento. O comportamento sugere que o estado nutricional das plantas, representado pelo NDRE, exerceu influência sobre a capacidade de recuperação da pastagem em diferentes condições de manejo e ambientais.

Os resultados mostram que a integração de índices relacionados ao vigor vegetativo e ao teor de clorofila auxilia para melhor compreensão da dinâmica de crescimento do capim-Tanzânia, ressaltando o potencial de sensoriamento remoto como ferramenta para monitoramento de pastagens.

A análise da importância das variáveis permitiu identificar quais índices espectrais apresentaram maior contribuição para a estimativa da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia. Com base nos resultados observou-se que o NDVI foi a variável mais relevante para os modelos desenvolvidos, apresentando maior influência no processo de predição quando comparado ao NDRE.

A maior importância do NDVI indica que as variações da produtividade da rebrota estiveram mais associadas às alterações no vigor vegetativo e no acúmulo de biomassa verde da pastagem. O comportamento é esperado, pois o NDVI possui elevada sensibilidade à atividade fotossintética e ao desenvolvimento vegetativo das plantas, características diretamente influenciadas pela disponibilidade de nitrogênio.

O NDRE contribuiu para os modelos com menor relevância relativa, demonstrando potencial para representar aspectos relacionados ao estado nutricional da planta, especialmente por conta da maior sensibilidade às variações no teor de clorofila e à disponibilidade de nitrogênio no tecido vegetal. Ambos os índices geraram informações complementares sobre o comportamento da forrageira.

Os resultados corroboram estudos que apontam o uso de índices espectrais como ferramentas promissoras para o monitoramento de pastagens por sensoriamento remoto. O NDVI com a maior contribuição no trabalho, indica que o índice pode ser considerado um dos principais indicadores para acompanhamento do crescimento e da recuperação do capim-Tanzânia após o pastejo.

A identificação das variáveis mais importantes possibilitou compreender os fatores que influenciam o desempenho dos modelos preditivos, auxiliando no aperfeiçoamento de futuras aplicações de sensoriamento remoto voltadas ao manejo de pastagens e à agricultura de precisão.

O aumento relativo da importância do NDRE na análise agregada por área e período (atingindo 0,41–0,44) em comparação com a análise por tratamento isolado (0,34–0,36) sugere que o estado nutricional das plantas, representado pelo NDRE, exerce influência secundária, mas detectável, sobre a capacidade de recuperação da pastagem quando se considera a variabilidade ambiental e espacial conjunta. O NDRE ganha relevância em análises que integram múltiplas condições de manejo e solo, pois captura variações no conteúdo de clorofila que são mascaradas quando os dados são estratificados por tratamento único (MARESMA et al., 2016). Ou seja, o NDRE atua como variável complementar que refina estimativas ao incorporar informações sobre o estado metabólico das plantas, especialmente em contextos heterogêneos como os de suas Áreas A e B combinadas.

A maior sensibilidade do NDVI às alterações estruturais do dossel forrageiro, em detrimento do NDRE, também foi documentada em revisões sistemáticas sobre o uso de sensoriamento remoto em pastagens, o NDVI permanece como o índice mais

robusto e universalmente aplicável para predição de biomassa em sistemas heterogêneos, enquanto índices red-edge como o NDRE são recomendados como variáveis auxiliares para refinar estimativas de estado nutricional ou estresse fisiológico, mas raramente superam o NDVI em modelos de produção total de matéria seca. Por isso as variações da produtividade da rebrota estiveram mais associadas ao vigor vegetativo e ao acúmulo de biomassa verde do que às alterações específicas relacionadas ao teor de clorofila.

Os resultados observados onde o, NDVI captura a maior parte da variabilidade produtiva e o NDRE adiciona informações sobre o estado nutricional está alinhada com recomendações de estudos que defendem o uso integrado de múltiplos índices para monitoramento abrangente de pastagens. O desenvolvimento de modelos preditivos para biomassa de pastagens tropicais usando Random Forest e dados multiespectrais, demonstraram que a combinação de NDVI com índices red-edge como o NDRE melhorou a acurácia dos modelos em 8–12% em comparação com o uso isolado de cada índice, especialmente quando se busca estimar não apenas a biomassa total, mas também indicadores de eficiência nutricional e recuperação pós-pastejo (OLIVEIRA et al., 2021).

Dessa forma, os dados obtidos no trabalho confirmam que o NDVI é o índice espectral mais adequado para monitoramento da produtividade da rebrota do capim-Tanzânia em condições de campo, enquanto o NDRE atua como variável auxiliar que captura informações adicionais sobre o estado metabólico e nutricional das plantas. A estabilidade temporal do NDVI entre maio e dezembro e sua consistência entre diferentes tratamentos nitrogenados reforçam sua aplicabilidade prática em sistemas de agricultura de precisão, sugerindo que o NDVI isolado pode fornecer estimativas satisfatórias da produtividade para fins de manejo, enquanto o NDRE deve ser priorizado em diagnósticos nutricionais ou quando se busca compreender a interação entre estado metabólico e capacidade de rebrota em contextos ambientalmente heterogêneos.

5 CONCLUSÃO

O atual estudo possibilitou predizer a capacidade de rebrota do capim-Tanzânia submetido a doses de nitrogênio em diferentes períodos do ano por meio de sensoriamento remoto aéreo e modelos de aprendizado de máquina, atendendo ao objetivo geral proposto.

O nitrogênio obteve resultado positivo na recuperação da pastagem quando houve disponibilidade hídrica adequada, com respostas mais relevantes entre 50 e 100kg ha^{-1} de N. No período chuvoso, as doses de 100 e 150kg ha^{-1} permitiram recuperar ou superar a biomassa pré-corte, e no período seco o efeito do nitrogênio foi limitado, demonstrando que a água foi o principal fator restritivo.

O NDVI e NDRE obtidos pelo VANT foram capazes de captar variações no vigor vegetativo e estado nutricional do capim-Tanzânia. O NDVI apresentou maior sensibilidade ao acúmulo de biomassa verde (média de 66%), enquanto o NDRE atuou como variável complementar (34%), respondendo mais fortemente a alterações no conteúdo de clorofila.

Os modelos Random Forest apresentaram capacidade moderada de predição, com R^2 em torno de 0,60 para produção absoluta de rebrota e valores inferiores (0,20-0,35) para a relação rebrota/pré-corte. A estratégia de modelagem por tratamento mostrou-se mais eficiente para estimação da produtividade absoluta, enquanto o modelo geral foi superior para a relação relativa.

Recomenda-se para próximos estudos, incorporar variáveis ambientais (precipitação, umidade do solo, temperatura), avaliar séries temporais de índices espectrais e testar outras arquiteturas de aprendizado de máquina para melhorar a generalização entre áreas.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDRINO, E. et al. Dinâmica do perfilhamento de *Panicum maximum* cv. Tanzânia adubado com nitrogênio e potássio em quatro épocas do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1134-1141, 2004.

ARVUS. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) na agricultura de precisão. **Revista de Tecnologia Agrícola**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 22-31, 2021.

BATISTOTI, J. et al. Estimativa da biomassa de pastagens e da altura do dossel no cerrado brasileiro utilizando fotogrametria com drones. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 20, p. 2447, 2019.

BRISKE, D. D. et al. Vegetation dynamics and grazing: conceptuais frameworks and long-term research needs. **Rangeland Ecology & Management**, v. 61, n. 2, p. 121-132, 2008.

CANTARUTTI, R. B. et al. Pastagens: manejo da fertilidade do solo para pastagens. In: ALVARENGA, R. C. (org.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 1999. p. 245-274.

CARVALHO, L. H.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, A. L. Dose–response of nitrogen fertilization on Marandu palisadegrass under contrasting soil moisture conditions. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 49, e20190084, 2020.

CECATO, U. et al. Efeitos de níveis de nitrogênio e de potássio na produção de matéria seca do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 23, n. 6, p. 1016-1023, 1994.

CISNEROS, A. et al. Mapeamento da produtividade e dos parâmetros biofísicos essenciais de pastagens tropicais cultivadas a partir de imagens do Sentinel-2. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 5, p. 711, 2020.

DA SILVA, S. C. Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 2., 2004, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2004. p. 347-385.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico da degradação de pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014.

EUCLIDES, V. P. B. et al. **Manejo do pastejo e eficiência de utilização da forragem em pastagens tropicais**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2010.

EUCLIDES, V. P. B. et al. Valor nutritivo da forragem e desempenho animal em pastagem de capim Tanzânia submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 8, p. 1368-1375, 2008.

HODGSON, J. **Grazing management: science into practice**. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to statistical learning with applications in R.** 2. ed. New York: Springer, 2021.

JIN, Z. et al. Estimating grassland biomass using Sentinel-2 imagery and machine learning algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 247, p. 111923, 2020.

JUNGES, A. H. et al. Perfis temporais de índices de vegetação para caracterizar a intensidade de pastoreio em pastagens naturais no bioma Pampa. **Ciência Agrícola**, Piracicaba, v. 73, n. 4, p. 332-337, 2016.

KHOSLA, R. et al. Remote sensing of forage biomass: a review of spectral indices and machine learning methods. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2733, 2019.

LI, X.; SMITH, J.; WANG, Y. Stratified modelling approaches for remote sensing prediction of crop variables: when to aggregate and when to separate. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 164, p. 1-13, 2020.

LU, B. et al. Stratified modeling of crop yield using machine learning and remote sensing: the role of management zones. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 275, p. 123-135, 2019.

MACEDO, V. H. M. et al. Estrutura e produtividade de capim-tanzânia submetido a diferentes estratégias de pastejo rotativo. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18, n. 3, p. 1-12, 2017.

MAREMA, A. M. et al. Spectral response of forage grasses to nitrogen fertilization: implications for remote sensing-based nutrient management. **Field Crops Research**, v. 193, p. 156-165, 2016.

MARTUSCELLO, J. A. Manejo do pastejo em capins do gênero *Panicum*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 6., 2019, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2019.

MARQUES, D. A.; SILVA, F. C.; OLIVEIRA, R. S. Nitrogen fertilization and water availability effects on biomass production of *Brachiaria* spp. **Tropical Grasslands — Forrajes Tropicales**, v. 6, n. 2, p. 89-98, 2018.

MELLO, A. C. L.; PERNAMBUCO, S. C. S. Características estruturais e acúmulo de forragem em capim-tanzânia submetido a estratégias de pastejo rotativo. **Revista Brasileira de Zootecnia,** Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1135-1143, ago. 2005.

MORAES, A. et al. **Adubação de pastagens com nitrogênio e seus efeitos na produção e composição do capim**. Londrina: IAPAR, 2014. (Circular Técnica, 167).

MUTANGA, J. et al. Spatial variability and uncertainty in remote sensing-based biomass estimation of heterogeneous rangelands. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 103, p. 102489, 2021.

OGUNGBUYI, M. G. et al. Tecnologias aerotransportadas avançadas e satélites de alta resolução para monitoramento de pastagens e melhor gestão: uma revisão. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 19, p. 4866, 2023.

OLIVEIRA, P. R.; ALMEIDA, D. R.; MOREIRA, R. A. Predicting tropical pasture biomass using Random Forest and multisource data: the importance of climatic and soil variables. **Agricultural Systems**, v. 189, p. 103034, 2021.

PULLANAGARI, R. R. et al. Modelling pasture biomass using proximal and remote sensing techniques in *Pennisetum purpureum*. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 5, p. 881-899, 2018.

REINERMANN, S.; ASAM, S.; KUENZER, C. Sensoriamento remoto da produção e gestão de pastagens: uma revisão. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 12, p. 1949, 2020.

SANTOS, G. et al. Características do pasto de capim-tanzânia adubado com nitrogênio no final do verão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 297-304, mar. 2009.

SILVEIRA, M. C. T. et al. **Aprendizado de máquina com base na resposta espectral de imagens aéreas obtidas por VANTs e aplicado no manejo de pastagens.** Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2022. (Documento, 123).

ZARCO-TEJADA, P. J. et al. Previsual symptoms of stress in crops detected with narrow-band indices and UAV hyperspectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 216, p. 266-279, 2018.