



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**PREDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE FORRAGEIRAS NO PONTO DE
ENSILAGEM POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIRS)**

TALIA DA CRUZ SILVA MANDINGA

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**PREDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE FORRAGEIRAS NO PONTO DE
ENSILAGEM POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIRS)**

Autora: Talia da Cruz Silva Mandinga
Orientador: Prof. D. Sc. Robério Rodrigues Silva

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
Julho de 2025

TALIA DA CRUZ SILVA MANDINGA

**PREDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE FORRAGEIRAS NO PONTO DE
ENSILAGEM POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIRS)**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre EM ZOOTECNIA, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Orientador: Prof. Dr. Robério Rodrigues Silva
Co-Orientador: Prof. Dr. Leandro Soares Santos

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL

Julho de 2025

633.2 Mandinga, Talia da Cruz Silva.
M238p Predição da composição de forrageiras no ponto de ensilagem por meio de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). / Talia da Cruz Silva Mandinga. - Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2025.

85fl.

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre EM ZOOTECNIA, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Sob a orientação do Prof. D. Sc. Robério Rodrigues Silva e coorientação do Prof. D. Sc. Leandro Soares Santos.

1. Forrageiras – Bromatologia – Estatística multivariada. 2. Forrageiras – Composição bromatológica – Análise Quimiométrica. 3. Forrageiras - Ponto de ensilagem - Tecnologia. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. II. Silva, Robério Rodrigues. III. Santos, Leandro Soares. IV. Título.

CDD (21): 633.2

Catálogo na fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB/5-535

Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para Desdobramento por Assunto:

1. Forrageiras – Alimentação animal - Composição bromatológica

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB

Recredenciada pelo Decreto Estadual
Nº 16.825, de 04.07.2016

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: “Predição da composição de forrageiras no ponto de ensilagem por meio de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS)”

Autora: Talia da Cruz Silva Mandinga

Orientador: Prof. Dr. Robério Rodrigues

Silva Coorientador: Prof. Dr. Leandro Soares
Santos

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ZOOTECNIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO PRODUÇÃO DE RUMINANTES, pela Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente

gov.br

AMANDA BEATRIZ SALES DE LIMA

Data: 28/07/2025 15:53:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Amanda Beatriz Sales de Lima – UESB

Documento assinado digitalmente

gov.br

DORGIVAL MORAIS DE LIMA JUNIOR

Data: 28/07/2025 16:44:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Dorgival Moraes de Lima Júnior – UFRSA

Data de realização: 25 de julho de 2025.

Campus de Itapetinga

(77) 3261-8628 | ppz@uesb.edu.br

Campus de Itapetinga
Praça da Primavera, 40
Bairro Primavera
CEP 45.700-000
PABX.: (77) 3261 - 8600

Campus de Jequié
Rua José Moreira Sobrinho, s/n
Bairro Jequezinho
CEP 45.200 - 000
PABX.: (73) 3528 - 9600

Campus de Vitória da Conquista
Estrada do Bem Querer, km 4
Bairro Universitário
CEP: 45031 - 300
PABX.: (77) 3424 - 8600

Feliz é o homem que persevera na provação, porque depois de aprovado receberá a coroa da vida que Deus prometeu aos que o amam.

Tiago 1:12

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

Porque Deus tanto amou o mundo que deu o seu Filho Unigênito, para que todo o que nele crer não pereça, mas tenha a vida eterna.

João 3:16

À Deus,

pois sem Ele nada sou.

Aos

meus pais, minha mãe Janete e ao
meu pai Luiz, que, debaixo do sol, me
fizeram chegar à sombra.

Aos

meu irmão, Luiz Henrique; às
minhas avós Josefa e Alexandrina;
aos meus avôs, João e Franciso; e
à minha amiga Juliana,
por todo apoio e incentivo;

Ao

meu namorado Bruno
por todo amor, aconchego e por
acreditar em mim.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me permitir conquistar os meus sonhos debaixo da Sua presença e por me dar a vida.

Aos meus pais, Luiz Guedes Mandinga e Janete da Cruz Silva Mandinga, por serem colo, consolo, amor e proteção durante essa trajetória.

Ao meu irmão, Luiz Henrique Mandinga, e à minha prima Juliana Silva de Melo, por todo apoio e ajuda.

Às minhas avós, Alexandrina Guedes de Almeida e Josefa da Cruz Silva, por cada oração e carinho.

Aos meus avôs, João Bispo Mandinga e Francisco Nunes da Silva (in memoriam), por todo carinho dedicado a mim.

Ao meu namorado, Bruno, pela ajuda, por me ouvir e por me impulsionar todos os dias a perseverar em busca dos meus sonhos. Seu cuidado, amor e carinho foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Às minhas amigas Larah de Alcântara da Silva, Ariely da Silva Carvalho, Thaís Moares Lima e Monique, por tornarem os dias mais leves e alegres.

À doutora Laize Vieira Santos, pelo incentivo e colaboração.

À Joane, minha gratidão pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e pelas contribuições valiosas durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Jéssica e à Amanda pela disposição em contribuir sempre que precisei.

Ao meu orientador, doutor Robério Rodrigues Silva, e ao meu coorientador, doutor Leandro Soares Santos, pelo apoio e orientação.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa BPQL: Monique, Beatriz, Luan, Nicole, Maurício, Wenderson, Camile, Gustavo, Vinícius, Darly e Ionara pela ajuda nas coletas e análises.

Ao Laboratório de Métodos e Separações Químicas, pelo suporte e ajuda.

A José Queiroz (Zé) e Adailton (Dai), do Laboratório de Forragem, pela ajuda, apoio e conversas agradáveis nos dias corridos de análises.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e ao Programa de Pós-graduação em Zootecnia, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

A todos que contribuíram nesta jornada do mestrado, o meu muito obrigada!

BIOGRAFIA

TALIA DA CRUZ SILVA MANDINGA, filha de Luiz Guedes Mandinga e Janete da Cruz Silva Mandinga, nasceu em Itaberaba-BA, no dia 18 de julho de 1997.

Em dezembro de 2014 concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Joao XXIII em Itaberaba-BA.

Em julho de 2017, iniciou o curso de graduação em Zootecnia na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia no campus de Itapetinga-Ba, concluindo em dezembro de 2022.

Em março de 2023, iniciou o programa de Pós-graduação em Zootecnia, em nível de mestrado, concluindo-o em julho de 2025.

Sumário

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
I – REFERENCIAL TEÓRICO.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Forrageiras utilizadas na alimentação animal	3
1.2.1. Capim-elefante cultivar BRS capiaçu.....	3
1.2.2 Cultivares de milho para produção de silagem.....	4
1.3 Ponto de ensilagem das forrageiras.....	6
1.3.1 Teor de Matéria Seca e Ponto de Colheita.....	6
1.3.2 Tamanho das Partículas da Silagem e Vedação do Silo.....	7
1.3.3 Importância dos Carboidratos Solúveis e Capacidade Tampão.....	8
1.3.4 Temperatura e pH	9
1.4 Métodos para análises químicas das forragens.....	9
1.4.1 Limitações das técnicas convencionais de bancada	13
1.5 Espectroscopia de Refletância no Infravermelho Próximo (Near Infrared Reflectance spectroscopy –NIRS).....	14
1.5.1 Quimiometria e análise multivariada.....	16
1.5.1 O uso da tecnologia NIRS na avaliação de alimentos para animais.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
II- OBJETIVOS.....	34
2.1 Objetivo Geral	34
2.2 Objetivos específicos.....	34
III MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Local	35
3.3 Análises químicas	37
3.4 Obtenção dos espectros.....	37
3.5 Análise Quimiométrica	38
3.5. 1 Processamento dos dados.....	38
3.5.2 Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS)	39
3.5.3 Avaliação dos modelos preditivos	39

IV RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Resultados das Análises de Referências	41
4.2 Interpretação de espectros NIRS.....	50
4.3 Modelos de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS).....	52
V CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros analisados por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS)	19
Tabela 2- Valores mínimo, máximo, média, moda, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação e erro padrão das características bromatológicas do milho e do BRS Capiçu, obtidos pelos métodos tradicionais (n = 80 para cada forrageira).....	41
Tabela 3- Dados de ajustes para calibração e validação da composição bromatológica do milho e do BRS capiaçu usando o algoritmo PLS com espectroscopia do infravermelho próximo.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Principais regiões de absorção das ligações covalentes presentes nas frações orgânicas em nanômetros.	15
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Obtenção dos espectros.....	14
Figura 2- Refletância difusa.	15
Figura 3- Mapa das microrregiões da Bahia, elaborado com base na plataforma MapChart (2025).	35
Figura 4- Plantação de BRS capiaçu (A) e Milho (B).....	36
Figura 5- Processo de obtenção dos espectros das amostras de milho e Capim elefante BRS capiaçu no NIR	38
Figura 6- Espectros NIRS das amostras de milho (A) e do BRS capiaçu (B) estudadas, obtidos na faixa entre 1100 e 2500 nm.....	50
Figura. 7- Relação entre os valores mensurados e os valores previstos pelos modelos de calibração ajustados por PLS aplicando dados de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) do milho	56
Figura 8- Relação entre os valores mensurados e os valores previstos pelos modelos de calibração ajustados por PLS aplicando dados de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) do BRS capiaçu.....	58

RESUMO

MANDINGA, Talia da Cruz Silva. **Predição da composição de forrageiras no ponto de ensilagem por meio de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS)**. Itapetinga, BA: UESB, 2025. 90f. Dissertação. (Mestrado em Zootecnia, Área de Concentração em Produção de Ruminantes) *.

Objetivou-se avaliar a predição da composição bromatológica das forrageiras *Zea mays* L. e *Cenchrus purpureus* no ponto de ensilagem, por meio da Espectroscopia de Reflectância no Infravermelho Próximo (NIRS) associada à análise multivariada por Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS). Foram coletadas 80 amostras de cada espécie em propriedades rurais das regiões Sudoeste e Centro-Leste da Bahia. As amostras foram analisadas em laboratório para determinação de Matéria Seca (MS), Umidade (UMID), Matéria Mineral (MM), Fibra em Detergente Neutro (FDN) e corrigida para proteína e cinzas (FDNcp), Fibra em Detergente Ácido (FDA), Proteína Bruta (PB), Extrato Etéreo (EE) e Lignina (LIG), e escaneadas por NIRS. Os modelos de calibração e validação foram avaliados por coeficiente de correlação (R), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Desvio Preditivo Residual (RPD) e Razão entre o Intervalo e o Erro (RER). A técnica apresentou melhor desempenho para o milho, especialmente para FDNcp ($R = 0,89$ na calibração e $0,85$ na validação) e PB ($R = 0,92$ e $0,88$), com $RPD > 1,7$ e $RER > 6$, indicando boa capacidade preditiva. Para o BRS Capiapu, os melhores resultados foram para UMID ($R = 0,89$ e $0,70$) e PB, com RPD de até 1,3. Variáveis como LIG e EE no milho e FDN e EE no BRS Capiapu apresentaram baixo ajuste ($R < 0,66$), indicando limitações da técnica para esses parâmetros. Conclui-se que o uso do NIRS aliado ao PLS é promissor para análises rápidas e não destrutivas da composição bromatológica de forrageiras, embora o desempenho varie entre variáveis e espécies.

Palavras-chaves: Multivariada, NIR, quimiometria, tecnologia, forragens.

* Orientador: Dr. Robério Rodrigues Silva e Coorientador: Dr. Leandro Soares Santos-UESB

ABSTRACT

MANDINGA, Talia da Cruz Silva. **Prediction of Forage Composition at the Ensiling Stage Using Near-Infrared Spectroscopy (NIRS)**. Itapetinga, BA: UESB, 2025. 90 p. Dissertation (Master's in Animal Science, Concentration Area in Ruminant Production)*.

The objective of this study was to evaluate the prediction of the bromatological composition of *Zea mays* L. and *Cenchrus purpureus* at the ensiling stage using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) combined with multivariate analysis by Partial Least Squares regression (PLS). A total of 80 samples of each species were collected from rural properties in the Southwestern and Central-Eastern regions of Bahia, Brazil. The samples were analyzed in the laboratory to determine dry matter (DM), moisture (MOIST), ash (ASH), neutral detergent fiber (NDF) and ash- and protein-corrected NDF (NDFcp), acid detergent fiber (ADF), crude protein (CP), ether extract (EE), and lignin (LIG), and were scanned by NIRS. Calibration and validation models were evaluated based on the correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), residual predictive deviation (RPD), and range error ratio (RER). The technique showed better performance for corn, especially for NDFcp (R = 0.89 in calibration and 0.85 in validation) and CP (R = 0.92 and 0.88), with RPD > 1.7 and RER > 6, indicating good predictive ability. For BRS Capiaçú, the best results were obtained for MOIST (R = 0.89 and 0.70) and CP, with RPD up to 1.3. Variables such as LIG and EE in corn, and NDF and EE in BRS Capiaçú, showed low adjustment (R < 0.66), indicating limitations of the technique for these parameters. It is concluded that the use of NIRS combined with PLS is promising for rapid and non-destructive analyses of the bromatological composition of forages, although performance varies between variables and species. **Keywords:** Multivariate analysis, NIR, chemometrics, technology, forages.

* Advisor: Dr. Robério Rodrigues Silva and Co-supervisor: Dr. Leandro Soares Santos-UESB

I – REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Introdução

O Brasil é um país tropical, característica que facilita a criação de ruminantes em pastejo, suprimindo todas as fases de produção, como cria, recria e terminação. A área de pastagem atual corresponde a 153,79 milhões de hectares (Abiec, 2023). Porém, a escassez de alimentos provocada pela sazonalidade climática, sobretudo durante a estiagem, constitui um dos principais entraves à criação desses animais (Voltolini et al., 2014). Dessa forma, torna-se fundamental empregar técnicas que promovam uma produção eficaz e viável.

A ensilagem constitui um método consolidado e de ampla adoção para a conservação de alimentos destinados à nutrição animal por períodos prolongados, destacando-se pelo baixo custo e simplicidade operacional (Chen et al., 2024).

Entre os volumosos comumente utilizados para a produção de silagem, destacam-se o capim-elefante, cultivar BRS Capiacu, e o milho, especialmente na região Nordeste. Essas opções são adaptadas às condições climáticas locais, podendo também ser fornecidas aos animais na forma *in natura*. Lucas et al., 2010; Rosa et al., 2019; Zopollatto, 2020).

Segundo Pereira et al. (2016), o capim-elefante cultivar BRS Capiacu apresenta bom valor nutricional, alto potencial de produção de matéria verde e fácil manejo utilizando máquinas agrícolas. O milho, por sua vez, é um cereal utilizado tanto na alimentação humana quanto animal, destacando-se o grão pelas características energéticas. Contudo, conforme Cruz et al. (2016), a oferta da planta inteira aos animais vem ganhando espaço, devido à excelente aceitabilidade e ao elevado valor nutricional.

A composição físico-química dos alimentos é um ponto chave na nutrição animal, pois, a partir dela, obtêm-se dados para o cálculo das dietas, controlando a qualidade e a quantidade dos nutrientes fornecidos (Almeida et al., 2018). Assim, conhecer o alimento e seu valor nutricional é imprescindível, sendo realizadas análises bromatológicas utilizando o sistema de Van Soest (Salman et al., 2010).

Segundo Silva; Oliveira, 2017, para o milho, o teor ideal de Matéria Seca (MS) situa-se entre 30 % e 35 %, enquanto, para o capim-elefante BRS Capiacu, o ideal é em torno de 23 % de MS, garantindo melhor compactação, fermentação mais rápida e redução dos riscos de perdas.

A quantificação das forragens pelo método analítico envolve parâmetros como fibra insolúvel em detergente neutro (FDN), fibra insolúvel em detergente ácido (FDA), proteína bruta (PB), matéria mineral (MM), lignina, extrato etéreo (EE), umidade, entre outros (Arzani et al., 2015). Esses parâmetros estão diretamente relacionados com a produção forrageira e o desempenho dos animais (Van Soest, 1994). A diminuição da qualidade, do consumo e da digestibilidade das forragens afeta o aproveitamento pelo animal, gerando prejuízos econômicos. Assim, a monitoração da qualidade torna-se indispensável (Serafim, 2021).

As análises laboratoriais são custosas, demandam laboratórios altamente equipados, reagentes químicos, pessoal treinado e descarte cuidadoso dos resíduos químicos gerados (MAPA, 2017).

Contudo, a Espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) tem sido utilizada para quantificar diversos compostos, em uma ampla variedade de produtos alimentícios, por exemplo, vinho, laticínios, frutas, vegetais, especiarias e cereais (McGoverin et al., 2010; Ignat et al., 2001; Bittner et al., 2013).

O NIRS é uma tecnologia altamente precisa, necessitando elaborar modelos de calibração específicos para cada material e componente analisado, a fim de garantir resultados confiáveis (Rech; Werner, 2020). O modelo matemático utilizado para aplicar ao conjunto de variáveis determina a precisão do modelo calibrado, contribuindo para a validação do método (Pereira, 2019). Entre os métodos de calibração multivariada mais empregados, destaca-se a técnica de mínimos quadrados parciais (PLS – *partial least squares*) (Pérez-Marín et al., 2007).

O NIRS é reconhecido como uma técnica analítica eficiente, ágil e que preserva a integridade da amostra, podendo ser utilizada em substituição às análises químicas convencionais (Cozzolino, 2015). Além disso, requer pouca preparação das amostras, o que tem contribuído para sua ampla adoção em diversas áreas (Shi et al., 2019). Uma vez que otimiza o tempo no laboratório, produzindo resultados mais rápidos, não danifica a

amostra, pois não utiliza reagentes químicos, se destacando como uma alternativa sustentável.

1.2 Forrageiras utilizadas na alimentação animal

1.2.1. Capim-elefante cultivar BRS capiaçu

O capim-elefante tem origem africana e, no Brasil, é encontrado nas regiões subtropicais e tropicais, sendo muito utilizado pelos produtores por se adaptar a quase todos os tipos de solo (Lima et al., 2020), uma vez que seu metabolismo C4 permite essa inclusão (Chaves et al., 2013). Porquanto, pertence à família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Paniceae, gênero *Pennisetum*, espécie *Pennisetum purpureum* Schumacher e seção *Penicillaria* (Pereira et al., 2001).

A Embrapa Gado de Leite, por meio do programa de melhoramento do capim-elefante, desenvolveu a cultivar BRS Capiaçu com o intuito de ofertar uma forragem que pode ser ensilada ou fornecida in natura, possuindo bom valor nutricional e alta produção de massa verde. Trata-se de uma cultura perene, capaz de produzir anualmente até 300 toneladas por hectare, sendo necessária mão de obra intensa no momento do plantio, pois sua propagação é feita por colmos (Pereira et al., 2016).

Segundo Aguiar et al. (2024) a cultivar BRS Capiaçu é uma alternativa para suplementação alimentar animal na época da seca, destacando-se por sua alta produtividade de matéria seca com baixo custo em relação ao milho e à cana-de-açúcar. É de fácil colheita mecânica; suas touceiras são eretas e densas, e ela apresenta boa resistência ao tombamento quando comparada a outras cultivares de *Pennisetum purpureum* (Schumach.) (Pereira et al., 2016).

Segundo Bernardes e Rêgo (2020), as forrageiras contêm muita umidade, o que é o principal fator que define a qualidade do material armazenado, pois, no momento da fermentação no silo, quanto mais úmido o material, maiores as chances de ocorrer perdas por efluentes. Contudo, essa alta umidade pode promover fermentações indesejadas e perdas nutricionais, reduzindo o valor da silagem (Rigueira et al., 2017).

De acordo com Dias et al. (2014), o material verde armazenado com umidade acima de 75 % proporciona um ambiente ideal para o desenvolvimento de microrganismos do gênero *Clostridium*, causando sua deterioração, pois consomem o

ácido láctico, essencial para a queda do pH do material ensilado, degradam as proteínas e aumentam o nitrogênio amoniacal. Sendo assim, é adequado esperar a plantação atingir entre 90 e 110 dias de idade, com altura entre 3,5 e 4,0 metros, quando o valor nutricional está elevado e o teor de matéria seca varia de 16,5 % a 19,7 % (Pereira et al., 2016).

Fatores como adubação, idade de corte, entrada e saída dos animais e manejo das pastagens podem influenciar a composição bromatológica das forragens. A adubação nitrogenada, por exemplo, proporciona maior produção de massa verde por hectare e aumenta a área foliar (Costa et al., 2016). Além disso, a composição química, a digestibilidade e os fatores antinutricionais também interferem no valor nutricional (Reis et al., 2016).

Pereira et al. (2016) avaliaram os parâmetros bromatológicos do BRS Capiaçú em diferentes idades de corte (50, 70, 90 e 110 dias) e observaram variações significativas na composição nutricional. Conforme a idade do corte aumenta, verifica-se um aumento gradual do teor de matéria seca (MS), passando de 9,3% a 19,7%. Simultaneamente, houve redução progressiva na concentração de proteína bruta (PB), que variou de 9,7% a 5,6%, e um aumento no conteúdo de fibras, evidenciado pelos valores crescentes de fibra em detergente neutro (FDN), de 60,5% a 68,6%, e lignina, que aumentou de 3,8% para 7,7%. O aumento da idade do BRS Capiaçú está associado à maior lignificação e acúmulo de fibras, reduzindo a digestibilidade e o teor de proteína. Assim, cortes mais precoces garantem melhor valor nutritivo, enquanto cortes tardios elevam a matéria seca, mas diminuem a qualidade da forragem.

Portanto, é pertinente conhecer a composição bromatológica dos alimentos fornecidos aos animais para garantir um processo de armazenagem adequado, formulação eficiente das dietas e fornecimento apropriado, evitando perdas e assegurando os nutrientes necessários para a manutenção e produção.

1.2.2 Cultivares de milho para produção de silagem

O milho tem sua origem na América Latina, sendo uma das gramíneas mais produzidas devido ao seu alto valor nutricional dos seus grãos, sendo ricos em amido, sais minerais e vitaminas do complexo B1 e E (Jardine e Barros, 2021). Sendo do gênero *Zea mays L.* e pertence à família Gramineae/ Poaceae, de hábito anual, ereta, robusta,

podendo atingir até quatro metros de altura, formando espigas e dando origem ao milho (Magalhães et al. 2002).

Na produção de milho, os Estados Unidos e China ocupam a primeira e segunda posição, seguidos do Brasil, ocupando o terceiro lugar no ranking mundial (Guaraldo, 2023).

Segundo Cruz et al. (2021b) a época ideal de plantio é aquela que deve compatibilizar o período de floração da planta para aproveitar os dias mais longos e a fase de preenchimento das espigas com os grãos nos períodos de altas temperaturas e alta disponibilidade de luz solar, além disso a exigência de água que a planta requer deve ser atendida, pois cada região produtora tem suas próprias limitações. Uma vez que, nas condições tropicais o fator determinante da época da semeadura é a distribuição de chuvas.

O milho é utilizado para a produção de silagem, pois é um material de alta qualidade e bom rendimento de matéria verde, sendo uma cultura economicamente viável em razão do seu baixo custo operacional e alta aceitabilidade pelos animais, fatores que contribuem para maiores taxas de produção (Cruz et al, 2021c).

Segundo Pereira Filho et al. (2021) o milho verde após a retirada das espigas pode render até 25 t/ha de matéria verde, podendo ser ofertado aos animais. Esse material pode ser ensilado e posteriormente fornecido. Porém, a ensilagem pode ser feita do pé de milho completo (contendo as espigas), tornando o material ensilado nutricionalmente mais rico, aumentando o teor de amido.

Silva et al., 2023 avaliando a qualidade nutricional da planta de milho encontraram valores bromatológicos de MS 31,48%, PB 7,28%, MM 4,83%, FDN 49,15%, FDA 28,51% e Lignina 5,29%, sendo bons teores nutricionais.

Existem muitas cultivares de milho no Brasil, porém Cruz et al. 2021c diz que 104 espécies de milho são indicadas para a realização da silagem feita da planta inteira, e que a qualidade do material ensilado varia de região para região, de como essa cultura foi manejada e o ponto ideal de corte quando a planta atinge 30% a 35% de matéria seca.

Sendo que, esse cereal é importante para a agricultura e pecuária na produção de grão e silagem, tanto para a economia quanto para o âmbito social do país (Galvão et al. 2014).

1.3 Ponto de ensilagem das forrageiras

A conservação das forragens é uma técnica utilizada e bem difundida entre as propriedades, buscando suprir as necessidades alimentares dos animais durante todo o ano, principalmente nos períodos secos, quando diminui ou falta alimentos. Dessa forma, é necessário um planejamento alimentar das forragens, mantendo a eficiência dos sistemas produtivos, garantindo alimentação em alta quantidade e de boa qualidade para os animais (Macêdo et al., 2019).

A ensilagem consiste em um método de conservação de forragens baseado na fermentação anaeróbia, que ocorre em ambiente sem oxigênio dentro do silo, o qual as bactérias ácido lácticas se beneficiam desse ambiente para seu desenvolvimento, pois reduzem o pH, desenvolvendo um ambiente acidificado o qual entrava o surgimento de microrganismos prejudiciais, como por exemplo os do gênero *clostridium* que provocam a deterioração da silagem (Silva, 2024).

1.3.1 Teor de Matéria Seca e Ponto de Colheita

O primeiro passo para determinar o ponto de ensilagem é o teor de Matéria Seca (MS) da planta, pois caso se realize a colheita com o material muito úmido ocorrerão perdas na quantidade de MS ensilada, menor valor energético, alta produção de efluentes, favorecendo a presença de bactérias do gênero *clorostidium*, ocorrendo uma queda lenta do pH, causando a baixa ingestão do material pelos animais. Se os grãos forem colhidos em um período após o tempo ideal as palhas ficarão mais secas, dificultando a moagem, a compactação, perda de material no campo, seleção pelos animais, maiores chances de morfos e fungos (Silva e Oliveira. 2017).

Segundo a Revista Cultivar (2015), teores de MS abaixo de 25% criam condições propícias ao desenvolvimento de bactérias indesejáveis, como as produtoras de ácido butírico, além de favorecerem perdas de nutrientes essenciais por lixiviação e promoverem intensa degradação proteica. A faixa ideal de teor de matéria seca situa-se entre 30% e 35%, favorecendo tanto o valor nutritivo para o consumo quanto a eficiência

na produção e conservação da silagem. Por outro lado, colheitas realizadas com MS superiores a 40% também são desaconselhadas, pois aumentam a resistência da forragem à compactação, resultando em menor densidade por metro cúbico de silo e dificultando a manutenção da granulometria ideal das partículas, o que compromete a compactação e a fermentação adequadas. Dessa forma, pode haver sobra de ar dentro do silo, provocando a deterioração da silagem.

O ponto ideal de ensilagem para pastagens ou capineiras é quando atingem 70 a 80 dias de rebrota com mais ou menos 23% de MS e o milho 30 a 35% de MS, Silva e Oliveira. 2017) e Neres et al 2023b) afirmam que a idade ideal de corte do BRS capiaçu é entre 50 e 75 dias de idade, onde a planta pode conter 18 a 20% de MS.

De acordo com Oliveira (2014), ao se considerar a conservação de forrageiras úmidas, o milho destaca-se como a forrageira mais tradicional. Isso ocorre devido às características próprias da planta, que apresenta condições ideais para a produção de uma silagem de qualidade, como teor de matéria seca entre 30 e 35% no momento da ensilagem, mais de 10% de carboidratos solúveis na matéria original e poder tampão inferior a 3%.

Segundo o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (2019) quando o BRS capiaçu completar 3,5 a 4 metros de altura deve realizar o corte, podendo realizar a pré murcha do capim após cortado, reduzindo o teor de água, deixando o material exposto ao sol por volta de 6 a 8 horas, revolvendo de tempo em tempo auxiliando na desidratação da capineira.

Embora o cultivar BRS capiaçu apresente alta produtividade, Retore et al., 2022 evidenciam a elevada presença de colmos suculentos, o que gera uma forragem com teor reduzido de matéria seca, podendo resultar em grande produção de efluentes e fermentação indesejada durante a ensilagem. Segundo Monteiro et al., 2011, com o objetivo de aprimorar a silagem e diminuir as perdas durante a fermentação, a utilização de aditivos como casca de soja e fubá de milho pode ajudar a reduzir a umidade da massa ensilada.

1.3.2 Tamanho das Partículas da Silagem e Vedação do Silo

O tamanho das partículas da silagem impacta tanto o consumo quanto a velocidade de trânsito pelo trato digestivo, variando bastante conforme o tipo de equipamento de colher. Quando as partículas apresentam dimensões ideais, entre 0,8 e 1,5 centímetros, a compactação é facilitada, a ruminação pelo animal melhora, elevando a palatabilidade da silagem e, conseqüentemente, seu aproveitamento nutricional. Por outro lado, partículas fora do tamanho adequado resultam em ruminação prolongada e sobras no cocho, indicando desperdício de nutrientes e desempenho energético aquém do esperado (Mieth, 2021).

A vedação correta do silo é essencial para impedir a entrada de ar e animais, protegendo a fermentação e a qualidade da silagem. A compactação adequada elimina o oxigênio, favorecendo os microrganismos anaeróbicos que produzem ácido láctico, reduzindo o pH e controlando a temperatura interna, garantindo uma silagem nutritiva semelhante à forragem verde (Mieth, 2021).

1.3.3 Importância dos Carboidratos Solúveis e Capacidade Tampão

Para garantir uma fermentação eficiente e a adequada conservação da silagem, é indicado que a forragem possua no mínimo, 8% de carboidratos solúveis (Figueredo et al., 2012). Sendo que os carboidratos solúveis mais comuns são a sacarose, a frutose e a glicose, que constituem a principal fonte energética para a multiplicação dos microrganismos durante a ensilagem (McDonald, 1991).

O milho é amplamente reconhecido como uma cultura de referência para a produção de silagem, em razão de suas características favoráveis, como o teor de matéria seca entre 30 e 35%, elevado conteúdo de carboidratos solúveis (acima de 13%) e baixa capacidade tampão (Caetano et al., 2011).

Conforme Neres et al. (2014)a, várias gramíneas tropicais não possuem teores adequados de matéria seca ou de açúcares solúveis, o que compromete a eficácia da fermentação. Como consequência, podem ocorrer perdas associadas a fermentações indesejáveis, produção de efluente e deterioração em condições aeróbicas, afetando negativamente a qualidade final da silagem. Além disso, essas forrageiras apresentam alta capacidade tampão, o que dificulta a queda do pH para níveis ideais, favorecendo o

desenvolvimento de microrganismos indesejados, especialmente bactérias do gênero *Clostridium*.

De acordo com Bernardes et al., 2018, esses microrganismos, por sua vez, liberam nitrogênio amoniacal e ácido butírico, compostos que prejudicam a conservação da forragem, resultando em consideráveis perdas de matéria seca e de energia do material ensilado.

1.3.4 Temperatura e pH

Segundo Neumann (2010)a, a elevação da temperatura pode ser considerada um indicador confiável da deterioração aeróbia da silagem, uma vez que está diretamente relacionada à oxidação da matéria seca, além de estar associada à degradação de compostos como os ácidos orgânicos e os carboidratos solúveis.

Conforme França (2011), silagens de boa qualidade devem apresentar valores de pH entre 3,7 e 4,2, enquanto aquelas de qualidade inferior apresentam pH variando de 5,0 a 7,0. Esses valores mais altos podem estar associados aos baixos teores de matéria seca, os quais favorecem a perda de açúcares solúveis através dos efluentes e dificultam sua conversão em ácido lático, responsável pela redução do pH da silagem. Sendo que, para as silagens com capim cortado aos 110 dias, já havia maior MS no próprio capim, o que contribuiu para a queda do pH nas mesmas (Aguirre et al., 2024).

Na fase de desabastecimento da silagem, a exposição do material ao ar pode ocasionar perdas de matéria seca e comprometer a qualidade do alimento (Borreani et al., 2018). Isso permite a ativação e proliferação de diversos microrganismos responsáveis pela decomposição, o que resulta na deterioração da silagem e em perdas econômicas significativas (Pahlow, 2003).

1.4 Métodos para análises químicas das forragens

No âmbito da ciência, a análise de alimentos compreende uma importante área, estudando os alimentos e fornecendo informações para futuras tomadas de decisões sobre o controle de qualidade, composição nutricional, processamento e armazenamento desses insumos (Detmann et al., 2012).

Para quantificar o valor nutricional dos alimentos, como de uma espécie forrageira ou outra qualquer, precisa de uma análise completa da sua composição química, sendo a análise analítica eficiente para obtenção desses dados, utilizando os parâmetros como a PB (Proteína bruta), MS (Matéria seca), MM (Matéria mineral), FDA (Fibra em detergente neutro), FDN (Fibra em detergente ácido, lignina), N (Nitrogênio total), digestibilidade, dentre outros (Carvalho et al., 2021).

Esses parâmetros são validados através de alguns métodos muito conhecidos no mundo da alimentação animal, como: Weende (1864), conhecido como centesimal ou proximal, o método de Van Soest (1964), o sistema de nutrientes digestíveis totais (NDT), os métodos biológicos de digestibilidade, os quais podem ser indiretos como o *in situ*, além do uso de indicadores internos e externos, e os diretos como a técnica da digestibilidade verdadeira *in vitro* proposto por Van Soest (1994), digestibilidade aparente *in vivo*, digestibilidade *in vitro* com a técnica de dois estágios, de acordo com Tilley e Terry (1963) e a produção de gás *in vitro* (Theodorou et al., 1994).

Para que essas análises sejam feitas em laboratório é realizado uma coleta a campo, garantindo amostras físicas que representem o material analisado, posteriormente são realizadas as análises tradicionais de laboratório (Silva e Queiroz, 2005). Esse processo demanda tempo, pois é necessário aguardar a planta atingir a idade ideal para avaliação, além do período consumido pelas análises de bancada, que são demoradas e requerem reagentes e equipamentos específicos para a execução dos métodos mencionados.

Atualmente, dois métodos principais são empregados para a determinação da composição química dos alimentos: o método de Weende (1864), também conhecido como análise proximal ou centesimal, e o método de Van Soest (1964).

A análise de Weende consiste na separação dos alimentos em seis frações fundamentais: umidade, matéria seca (MS), extrato etéreo (EE), proteína bruta (PB), fibra bruta (FB) e matéria mineral (MM). Apesar de amplamente adotada por sua simplicidade, essa metodologia apresenta limitações, especialmente na caracterização das frações fibrosas (Grana, 2014; Carvalho et al., 2021).

Dentre os métodos utilizados para a determinação da proteína bruta, destaca-se o método de Kjeldahl (1883), a determinação da proteína bruta (PB) ocorre indiretamente a partir do valor de nitrogênio total (N) da amostra, o qual se baseia em três fases, sendo elas: digestão, destilação e titulação (Campos et al., 2004).

Já o método proposto por Van Soest (1964) representa um avanço importante na análise da fração fibrosa, pois distingue entre fibra em detergente neutro (FDN) – que corresponde à parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) – e fibra em detergente ácido (FDA), que abrange principalmente celulose e lignina. Essa metodologia permite uma avaliação mais precisa da digestibilidade da fibra presente nas forragens.

Os parâmetros permitem ao produtor um conhecimento sobre o alimento ofertado, incluindo as forrageiras, a qual a análise da MS consegue apurar a produção e maturidade da planta (Crespo et al., 2007). A matéria seca é a fração do alimento menos a água, ou seja, menos a sua umidade natural (Salman et al., 2010). É um parâmetro importante, pois é através dela que obtém os resultados das outras análises, pois as quantidades dos nutrientes são expressas na base seca do alimento, sendo uma medida padronizada (Detmann et al., 2012).

Além dos métodos tradicionais, atualmente existem variações e técnicas analíticas mais modernas, como o sistema Detmann et al. (2021), adaptado à realidade das forragens tropicais, e a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS), que permite a estimativa simultânea de vários componentes com rapidez e precisão (VALENTE et al., 2011).

Segundo Detmann et al., 2012 a MM é obtida após a queima da MO (matéria orgânica), representada pelo resíduo inorgânico. Uma vez que, é visto como um método indireto para estimar o teor de MO do alimento, pois a MS é composta por frações inorgânicas e orgânicas, fazendo com que para quantificar os CNF (carboidratos não fibrosos) é necessário saber o teor de MM (Pereira., 2019). A matéria mineral também é chamada de cinzas.

A determinação da proteína bruta (PB) ocorre indiretamente através do método de Kjeldahl (1883), que quantifica o nitrogênio total presente na amostra. Parte-se do pressuposto de que a maior parte do nitrogênio está associada às proteínas, sendo comum utilizar-se o fator de conversão 6,25 para estimar o teor proteico (Grana, 2014; Carvalho et al., 2021).

O nitrogênio é encontrado na clorofila, proteínas, ácidos nucleicos, crescimento e desenvolvimento das plantas, tanto na parte das folhas quanto nas raízes (Taiz e Zeiger, 2012). Sendo assim, é um mineral essencial, requerido em alta quantidades (Costa et al., 2012). Esse mineral atua na composição química das plantas, influenciando na fração fibrosa, aumentando ou diminuindo o teor e a digestibilidade do FDN. Além de influenciar na composição física (Neumann et al., 2017). Sendo a qualidade dos alimentos

avaliados pelo teor de PB, uma medida que abrange o nitrogênio não proteico (NNP) e a proteína verdadeira (Thulin et al., 2014).

Segundo Salaman et al., 2010 a fibra bruta passou a ser dividida em duas frações, conhecidas como FDN (Fibra em detergente neutro) e FDA (Fibra em detergente ácido), se diferenciando assim do método de Weende. Van Soest (1994) diz que as plantas possuem um conteúdo celular vasto, como: Gorduras, lipídios, compostos nitrogenados, amido, e outros componentes que são dissolvidos em água. Visto que, possuem componentes que pertencem a parede celular, como: Celulose, hemicelulose, lignina e proteína insolúvel. Sendo assim, todos o aglomerado que faz parte da parede celular da planta é representado pela solução de FDN, e para quantificar a lignina e celulose, utiliza-se o método mais rápido que é a solução de FDA, onde após o processo resta a lignina (Van Soest & Robertson., 1991).

A lignina é uma macromolécula que permite a planta se autodefenda de ataques de pragas, conferindo-lhe rigidez e impermeabilidade. Diferentemente de outros compostos encontrados em resíduos de plantas, a lignina possui baixa degradabilidade biológica, por causa da sua estrutura química, como por exemplo a celulose e a hemicelulose (Wagner e Wolf., 1999). A quantidade de lignina encontrado indica se o alimento fornecido será ou não bem aproveitado, sendo essa considerada a fração indigestível da planta.

Os lipídios são compostos orgânicos insolúveis em água, mas solúveis em solventes orgânicos. São responsáveis pelo transporte das vitaminas lipossolúveis A, D, E e K, e são fonte de ácidos graxos essenciais, além disso servem de reserva energética para os animais (Medeiros et al., 2015). Os métodos mais usados para determinação são o de Goldfish e Soxhlet, que empregam de 4 a 6 horas de extração (Gomes e Simeone, 2012), sendo mais comum nos laboratórios o segundo método, respectivamente.

O método de Soxhlet é dividido em três fases: A- Extração da gordura da amostra do alimento com solvente; B- Eliminação do solvente por evaporação; e C- O extrato é determinado por pesagem. O solvente utilizado para realização da análise depende da natureza da gordura presente e das características do alimento analisado, devendo a amostra esta seca, facilitando a ação do solvente, obtendo mais eficiência (Cecchi, 2003). O resíduo extraído é denominado gordura bruta (Barbosa et al., 2017). Para a extração de gordura em forragens e leguminosas, o éter de petróleo é o reagente mais comumente utilizado, por sua alta eficiência.

A quantificação dos componentes nutricionais das forragens é realizada com métodos tradicionais, como o de Weende (1864) e Van Soest (1994), além de alguns outros métodos que existem atualmente, os quais gastam reagentes químicos, são poluentes e as vezes não se tem o descarte correto, requererem mão de obra especializada e tempo, pois são análises demoradas. Sendo que, quando calibrado corretamente, o NIRS pode fornecer resultados precisos e confiáveis para uma grande quantidade de componentes nutricionais, permitindo a análise de vários componentes simultaneamente.

1.4.1 Limitações das técnicas convencionais de bancada

As técnicas convencionais de bancada utilizadas para avaliação da composição bromatológica de forragens e alimentos, como o método de Kjeldahl (para determinação de proteína bruta), os métodos de fibra (para determinação de FDN, FDA, FDNcp) e a extração com éter de petróleo (para determinar extrato etéreo), constituem o alicerce das análises químicas tradicionais. Embora amplamente consolidadas, essas metodologias apresentam diversas limitações que impactam a eficiência, a sustentabilidade e a aplicabilidade dos resultados em sistemas produtivos modernos (Chemat et al., 2020; Cao et al., 2025).

Atualmente, os métodos predominantes na extração de produtos vegetais na indústria continuam sendo as técnicas tradicionais baseadas em solventes orgânicos. Porém, esses solventes possuem desvantagens, como o longo tempo de extração, o alto gasto energético e a toxicidade significativa, a qual têm gerado preocupação (Chen et al., 2018).

Apesar das análises químicas laboratoriais serem confiáveis, porém, de modo geral, são trabalhosas, caras e demoradas, enquanto as decisões no manejo alimentar animal exigem resultados rápidos e de baixo custo (Rahman et al., 2015). Dessa forma, avanços importantes estão sendo alcançados através de pesquisas utilizando solventes alternativos e novas tecnologias de extração ecológicas (Chemat et al., 2020).

Em decorrência disso, surge a química verde a qual é guiada pelos doze princípios propostos por (Anastas e Warner., 1998). Esses princípios devem ser considerados com seriedade por todos os cientistas ao projetarem seus experimentos, desenvolvendo novos compostos, técnicas ou metodologias de pesquisas, visando substituir totalmente ou parcialmente reagentes ou substâncias perigosas, processos ineficientes e matérias-primas que não sejam sustentáveis (Chemat et al., 2020).

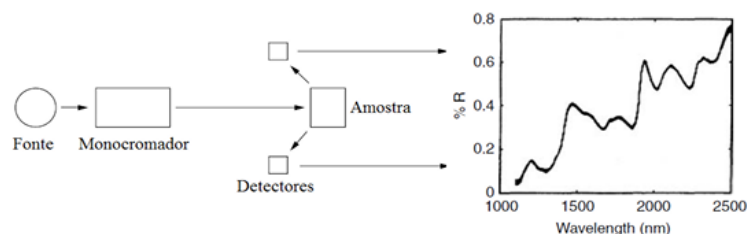
Diante desses desafios, surgem como opções promissoras as técnicas modernas de análise rápida e não destrutiva, aumentando a taxa de extração por meio de ultrassom e pressão, micro-ondas, os quais reduzem o tempo de extração, o consumo de solventes e energia (CAO et al.,2025). Com destaque para a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS – Near Infrared Reflectance Spectroscopy). Essa tecnologia permite a determinação simultânea de diversos parâmetros químicos, como matéria seca, proteína bruta, FDN, FDA, lignina, extrato etéreo e até mesmo digestibilidade, sem a necessidade de reagentes ou etapas destrutivas (Simoni et al., 2021; Cao et al., 2025).

A incorporação de tecnologias como o NIRS representa um avanço estratégico, e quando realizado os modelos de calibração corretamente, pode substituir as análises químicas rotineiras dos laboratórios, produzindo resultados rápidos, além de ser uma técnica sustentável (Paranhos et al.,2021; Jancewicz, Swift et al., 2017).

1.5 Espectroscopia de Refletância no Infravermelho Próximo (Near Infrared Reflectance spectroscopy –NIRS)

Segundo Skoog et al., (2017) o NIRS possui o espectrofotômetro que compreende a energia na faixa de 780 a 2500nm (Figura 1), analisando substâncias orgânicas através da absorção de energia eletromagnética propagada, sendo os comprimentos das ondas localizados na região do infravermelho próximo, que podem ser captados por meio de ligações covalentes ao penetrar a amostra, pois essas ligações existem entre os compostos orgânicos que compõe a amostra, vibrando em certo comprimento de ondas.

Figura 1. Obtenção dos espectros.

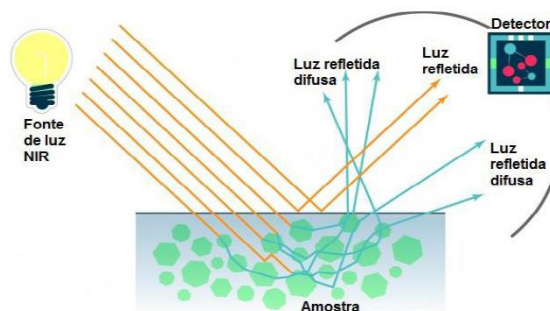


Adaptado Burns & Ciurczak (2008) e Fernandes (2015).

A obtenção dos espectros NIRS baseia-se principalmente em dois fenômenos: a absorção e o espalhamento da radiação (Pasquini, 2018). O espalhamento ocorre em

várias direções ao penetrar a amostra (Figura 2), sendo influenciado pelas características físicas da matriz, como o tamanho de partícula e a densidade (Macdonald, 2016).

Figura 2- Refletância difusa.



Fonte: Macdonald, 2016.

Os alimentos, como outras amostras orgânicas possuem bandas de absorção únicas na região espectral do NIRS, sendo utilizadas para predição quantitativas e qualitativas. As quais estão relacionadas com as bandas de combinação de vibrações moleculares e harmônicos dos grupos funcionais C–H, N–H, O–H e S–H, identificadas na região do infravermelho (Metrohm, 2014). Essas bandas O-H, N-H e C-H são predominantes, devido à baixa massa atômica (Barbosa, 2007). As principais regiões de absorção dessas ligações estão descritas no Quadro 1 (Pereira, 2019).

Quadro 1: Principais regiões de absorção das ligações covalentes presentes nas frações orgânicas em nanômetros.

O-H	N-H	C-H
1900-2000nm	2100-2200nm	2300-2350nm
Umidade	Proteína	Gordura
Álcool	Aminoácidos	Amido
Açúcar		Fibra
		Cinzas

Adaptado de (Pereira, 2019).

O NIRS é eficaz para prognosticar o que compõe as amostras, sendo necessário construção de modelos de calibração específicos para cada nutriente e para cada tipo de alimento (Marten et al., 1985). Após a leitura espectral, os dados são comparados aos resultados obtidos por análises laboratoriais, obtidas por método de análises de bancadas, a fim de validar a acurácia do modelo preditivo (Lana, 2007).

Atualmente, o NIRS tem se consolidado como uma ferramenta de grande utilidade em diversas áreas, incluindo o controle de qualidade de alimentos, na nutrição animal e na área da medicina (Campestrini, 2005).

1.5.1 Quimiometria e análise multivariada

Conceitua-se como análise multivariada um aglomerado de métodos estatísticos que torna possível a análise simultânea de múltiplas medidas para cada objeto, indivíduo ou fenômeno observado (Neto, 2024). A quimiometria, por sua vez, surgiu da necessidade de extrair informações a partir de dados complexos, sendo caracterizada como uma técnica que aplica ferramentas matemáticas e estatísticas em dados de origem química. O uso desses tratamentos permite a separação física de determinadas espécies por meio da separação quimiométrica de seus sinais analíticos (Dias, 2011).

Dessa forma, a quimiometria abrange métodos multivariados aplicados à modelagem de informações químicas, permitindo que a espectroscopia trate os dados de absorvência espectral associados a uma ou mais frequências (Souza e Ferrão, 2006). Essas técnicas são fundamentais para o tratamento dos dados obtidos, especialmente por se tratar de grandes volumes de informações complexas, cuja interpretação direta seria dificultada (Calegari, 2018).

Atualmente, para interpretar esse volume de dados, utilizam-se técnicas como a Análise de Componentes Principais (ACP) simplifica o conjunto de dados ao transformá-lo em novos índices lineares, chamados componentes principais (CPs), que concentram e resumem as informações das variáveis originais, permitindo representar as observações com a menor perda possível de informação (Pearson, 1901; Feng, Xu e Yan, 2012; Jolliffe & Cadima, 2016). Além disso, a regressão linear múltipla (RLM) permite compreender

ou prever uma variável dependente com base em duas ou mais independentes, analisando seus efeitos individualmente (Montgomery et al., 2021; Roustaei, 2024).

Entretanto, dentre os métodos utilizados para dados espectrais, a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) é amplamente empregada, superando técnicas como ACP e RLM na construção de modelos de calibração (Shi et al., 2012). A PLS se destaca por não apresentar problemas com colinearidade, comum nos espectros de infravermelho (Morgano et al., 2005; Chen et al., 2024), e por possibilitar a redução dimensional dos dados, facilitando a compreensão dos resultados (Varmuza e Filzmoser, 2016).

A PLS reduz a dimensionalidade das variáveis preditoras (X) e estabelece correlações com as respostas (Y) por meio de componentes latentes, que explicam melhor a variabilidade de Y (Varmuza; Filzmoser, 2016; Souza et al., 2013). Entretanto, antes da modelagem, recomenda-se aplicar pré-tratamentos espectrais para reduzir ruídos e variações indesejadas (Siesler et al., 2008; Falla Sotelo, 2006).

Essa modelagem envolve calibração e validação, que pode ser validação cruzada ou externa. Para validação externa, usa-se um novo conjunto de amostras, também analisado por métodos convencionais, separando-se 70% das amostras para calibração e 30% para validação (Falla Sotelo, 2006).

A quimiometria e o NIRS estão associados, pois o NIRS apresenta bandas largas e sobrepostas, cabendo à quimiometria desvendar informações ocultas e permitir a identificação e quantificação das matrizes (Souza et al., 2013). Dessa forma, os valores dos métodos convencionais podem ser equiparados aos do NIRS graças aos tratamentos matemáticos aplicados (Massignani, 2021).

Segundo Pereira (2019) e Valderrama (2005), a calibração determina a relação matemática entre parâmetros físicos ou químicos e os dados espectrais. Após a escolha do modelo adequado, testa-se sua precisão e acurácia, dividindo o processo em calibração (treinamento) e validação (Naes et al., 2002).

Assim, o processo se repete até que todas as amostras sejam corretamente preditas, permitindo o cálculo do RMSECV (*Root Mean Square Error*) (Brereton, 2000). Quanto menor o RMSECV, melhor o desempenho do modelo (Pereira, 2019). Outros parâmetros importantes incluem o R, que avalia a correlação entre os valores preditos e os reais, sendo ideal quando se aproxima de 1 (Williams & Sobering, 1993; Landau et al., 2006).

Além disso, utiliza-se o RPD (*Residual Prediction Deviation*), calculado pela razão entre o desvio padrão e o erro padrão da validação cruzada. Quanto maior o RPD, melhor a qualidade do modelo preditivo (Massignani, 2021; Williams & Sobering, 1993).

Outro parâmetro importante na avaliação de modelos preditivos é o RER (*Ratio of Performance to Range*), que representa a razão entre a amplitude dos valores reais da propriedade avaliada e o erro de predição do modelo (RMSEP). Conforme destacado por Williams e Sobering (1993), quando o RER é inferior a 3, o modelo é considerado inadequado para fins preditivos. Já valores situados entre 3 e 10 indicam um desempenho aceitável, especialmente para aplicações de triagem.

O NIRS, após a construção dos modelos de calibração, torna-se capaz de prever propriedades analíticas de novos dados com base em seus espectros (Souza et al., 2013). Para garantir a confiabilidade desses modelos, os pré-tratamentos espectrais ajudam a reduzir variações que comprometem os resultados (Siesler et al., 2008).

Esses pré-tratamentos são úteis especialmente quando os dados apresentam comportamento anormal, sem comprometer a integridade espectral. A granulometria, os ruídos do detector e o armazenamento da amostra podem afetar a qualidade dos espectros, sendo possível corrigir tais efeitos com cuidados adequados (Falla Sotelo, 2006).

Portanto, a escolha do método multivariado depende dos objetivos específicos da pesquisa, já que diferentes abordagens estatísticas são aplicáveis conforme o tipo de dado e a finalidade da análise (Hair et al., 2005). Assim, o NIRS pode prever propriedades analíticas com base em seus sinais espectrais após a realização dos modelos de calibração multivariada (Souza et al., 2013).

1.5.1 O uso da tecnologia NIRS na avaliação de alimentos para animais.

Atualmente, existe vários modelos de NIRS, desde aparelhos portáteis, leves e fáceis de serem transportados, a aparelhos mais robustos que precisam ficar em bancadas, muito utilizados em laboratórios.

O NIRS vem sendo utilizado desde a década de 1960 nas indústrias de alimentação, farmacêuticas, neurologia e na avaliação das forrageiras. Essa técnica não

exige que as amostras sejam necessariamente processadas, possibilitando analisar várias amostras em um curto período (Stuth et al., 2003), pois pode-se triturar o alimento ou deixar ele no seu estado natural. Sendo que, não destrói o material analisado e o resultado é quase instantâneo (Tassone et al., 2014).

Tabela 1- Parâmetros analisados por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS).

Parâmetros avaliados	Autor(es)
Dietas, alimentos para animais, forragens	Rahman et al., 2015
Alimentos para pets	Goi et al., 2019; Goi, Manuelian, et al., 2020; Goi, Simoni, et al., 2020
Carnes	De Marchi et al., 2007; De Marchi, 2013; Prieto et al., 2017
Leite e produtos lácteos	Visentin et al., 2015
Amostras fecais - consumo alimentar, qualidade da dieta, digestibilidade	Dixon e Coates, 2009; Tran et al., 2010; Decruyenaere et al., 2012; Tolleson e Schafer, 2014; Lyons et al., 2016; Núñez-Sanchez et al., 2016; Jancewicz, Penner, et al., 2017; Johnson et al., 2017; Brogna et al., 2018
Digestibilidade (MS, MO, PB, FDN, FDA, ADL, amido) em fezes	Boval et al., 2004; Jancewicz et al., 2016; Jancewicz, Swift, et al., 2017
Composição química da dieta e fezes, ttaD	Simoni et al., 2021

MS= Matéria seca; MO= Matéria Orgânica; PB= Proteína Bruta; FDN= Fibra em Detergente neutro; FDA= Fibra em Detergente Ácido; ADL Lignina em Detergente Ácido; Nitrogênio ligado à fibra e digestibilidade aparente total.

Tabela adaptada de Simoni et al., 2021

Segundo Rabelo et al. (2017), ao avaliarem o número mínimo de espectros necessários para representar adequadamente a variabilidade amostral de forrageiras in natura, os autores analisaram três conjuntos espectrais referentes às cultivares de *Brachiaria brizantha*: Brasiliki, Piatã e Xaraés. Utilizando o equipamento portátil DLP® NIRscan™ Nano (Texas Instruments), foram adquiridos aleatoriamente 60 espectros por amostra, cobrindo a faixa espectral de 900 a 1700 nm. Através de análise estatística os autores concluíram que a partir de 10 espectros a variabilidade amostral é suficientemente

representada, sugerindo este número como o mínimo necessário para garantir a precisão das análises em campo.

Segundo Fontaneli et al (2002), objetivaram desenvolver curvas de calibração para silagem de milho, utilizando 246 amostras, provenientes de diversas regiões do Rio Grande do Sul. Na predição de PB, FDN, FDA, e MS de silagem de milho seca, o NIRS é eficaz, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,99 para esses parâmetros, assim como para os minerais Ca, K, Mg e P, os valores de R^2 variaram entre 0,92 e 0,94, indicando boa correlação, mas sugerindo a necessidade de estudos adicionais para entender melhor o comportamento espectral desses constituintes.

Segundo Trópia et al (2023) avaliando modelos de regressão para prever a composição química do farelo de soja, fubá de milho e cana de açúcar no NIRS portátil junto as técnicas quimiométricas. Utilizou-se 92 amostras de farelo de soja, 120 amostras de fubá de milho e 95 amostras de cana-de-açúcar. Os resultados mostraram que os modelos predizem com elevada acurácia e precisão diversos constituintes químicos, incluindo matéria seca, FDN, FDA, PB, CNF e NDT, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,50 e concordância substancial ($CCC \geq 0,60$). Entretanto, alguns parâmetros, como cinzas insolúveis em detergente neutro (CIDN) e EE, apesar de acurados, apresentaram menor precisão nos modelos. Concluindo que o NIRS portátil apurou corretamente através dos modelos de regressão, podendo ser recomendados para quantificar a composição química do farelo de soja, fubá de milho e cana de açúcar.

Segundo Simoni et al. (2021) avaliaram o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) para prever a composição química da dieta total (TMR) e das fezes de bovinos Charolês, bem como a digestibilidade aparente total (ttd), utilizando a fibra em detergente neutro indigestível (uNDF) como marcador interno. Foram analisadas 164 amostras de TMR e 172 amostras de fezes por métodos laboratoriais e por NIRS. Os modelos de calibração foram construídos por regressão PLS modificada e validados por validação cruzada leave-one-out. Os resultados mostraram que o NIRS apresentou boa acurácia para estimar o teor de FDA, nitrogênio e cinzas nas dietas com Coeficiente de Determinação na Validação Cruzada ($R^2_{CrV} = 0,66$ e $RPD = 1,71$), enquanto nas fezes apenas a predição do FDA foi considerada aceitável. A digestibilidade aparente total e a digestibilidade verdadeira do nitrogênio foram preditas com baixa precisão, tanto nas dietas quanto nas fezes.

Segundo Massignani et al (2021) aplicaram uma curva ampla de calibração utilizando a técnica NIRS para predizer os valores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e proteína bruta (PB) de forragens simples e consorciadas. Os modelos apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) para a calibração de 0,94%, 0,95% e 0,98% e para a validação de 0,94%, 0,95% e 0,97% para os parâmetros FDN, FDA e PB, respectivamente. Esses resultados indicam que os modelos de calibração multivariada desenvolvidos são adequados para avaliar a qualidade de forragens de múltiplas espécies e podem ser utilizados na rotina laboratorial sem a necessidade de produtos químicos, como alternativa aos métodos convencionais.

O método NIRS segundo Del Santo et al (2010) para ser aplicado para diferentes forragens, é necessário a calibração multivariada, com o auxílio os dados analíticos que obtidos através dos métodos químicos como referência. Portanto, a técnica NIRS pode ser empregada no dia a dia dos laboratórios, pois não danifica a amostra analisada, não tem gastos com reagentes químicos, o resultado é obtido imediatamente e não polui o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. BEEF REPORT 2024: Perfil da pecuária no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/>. Acesso em: 28 set. 2024.

ALMEIDA, M. T. C. et al. Predições da espectroscopia no infravermelho próximo podem determinar a digestibilidade e o consumo alimentar de cordeiros confinados. *Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 70, n. 2, p. 597-605, 2018.

Anastas e JC Warner, *Química Verde: Teoria e Prática*, Oxford University Press, Nova York, 1998, p. 30.

AGUIRRE, P.F et al. Qualidade bromatológica da silagem do capim BRS Capiaçú com o uso de aditivos sob diferentes intervalos de corte. *Revista Foco*, v. 17, n. 12, p. 109, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n12-109. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/7240/5191>. Acesso em: 29 jul. 2025.

AGUIAR, M. H. S., PERSEGIL, E. O., & CATALANI, G. C. (2024). Adubação foliar na cultura do capim-elefante BRS Capiaçú. *Revista Científica da União das Faculdades dos Grandes Lagos*, 1(1), 1-9. Recuperado de revistas.unilago.edu.br.

ARZANI, Hossein et al. Estimating Nitrogen and Acid Detergent Fiber Contents of Grass Species using Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). *Journal of Rangeland Science*, v. 5, n. 4, p. 238-245, 2015.

BARBOSA, L. C. A. *Espectroscopia no Infravermelho*. 1. ed. 189 p. Viçosa: Editora UFV, 2007.

BARBOSA, Marcília M. et al. Evaluation of methods for the quantification of ether extract contents in forage and cattle feces. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 89, n. 2, p. 1295-1303, 2017.

BERNARDES TF, DANIEL JLP, ADESOGAN AT, MCALLISTER TA, DROUIN P, NUSSIO, HUHTANEN P, TREMBLAY GF, BÉLANGER G, CAI, Y (2018) Silage review: Unique challenges of silages made in hot and cold regions. *J Dairy Sci*. 101(5):4001-4019.

BERNARDES, T. F., & RÊGO, A. C. DO. (2020). Implicações no uso da técnica de realocação de silagens: uma revisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(6), 413–420. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p413-420>.

BRETON, Richard G. Introduction to multivariate calibration in analytical chemistry. *Analyst*, v. 125, n. 11, p. 2125-2154, 2000. Disponível em: <http://www.rsc.org/suppdata/an/b0/b003805i>. Acesso em: 05 mar. 2025.

BITTNER, L.K.; SCHOENBICHLER, S.A.; BONN, G.K.; HUCK, C.W. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a tool to analyze phenolic compounds in plants. *Curr. Anal. Chem.* 2013, 9, 417–423.

BURNS, D. A.; CIURCZAK, E. W. Handbook of near-infrared analysis. 3. ed. Boca Raton: CRC, 2008. 808 p.

Brogna N, Palmonari A, Canestrari G, Mammi L, Dal Pra A, Formigoni A. 2018. Technical note: near infrared reflectance spectroscopy to predict fecal indigestible neutral detergent fiber for dairy cows. *J Dairy Sci.* 101(2): 1234–1239.

BORREANI, G. et al. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, v. 101, n. 5, p. 3952–3979, 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13837. Disponível em: [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(18\)30236-6/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(18)30236-6/fulltext). Acesso em: 29 jul. 2025.

BOVAL M, COATES DB, LECOMTE P, DECRUYENAERE V, ARCHIMEDE H. 2004. Faecal near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess chemical composition, in vivo digestibility and intake of tropical grass by Creole cattle. *Anim Feed Sci Technol.* 114(1–4):19–29.

CAMPOS, F. P. de; NUSSIO, C. M. B.; NUSSIO, L. G. Métodos de análise de alimentos. Piracicaba: FEALQ, [2004]. 135 p.

CALEGARI, M. A. Espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) e calibração multivariada: desenvolvimento de modelos PLS para a determinação da atividade antioxidante em amostras de própolis. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

CAMPESTRINI, E. Utilização de equipamento NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy) nos estudos de valores nutricionais (composição química e digestibilidade) de alimentos para não ruminantes. *Revista Eletrônica Nutritime*, Maringá, v. 2, n. 5, art. 25, p. 240-251, 2009.

CARVALHO, C. B. N. et al. Métodos de análise da composição química e valor nutricional de alimentos para ruminantes. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10, e523101019047, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19047>.

- Caetano H, Oliveira MDS, Freitas-Júnior JE, Rêgo AC, Rennó FP, Carvalho MV (2011) Evaluation of corn cultivars harvested at two cutting heights for ensilage. *Rev Bras Zootec.* 40(1):12–19.
- CAO, J. et al. Comparative analysis of extraction technologies for plant extracts and absolutes. *Frontiers in Chemistry*, v. 13, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2025.1536590/full>. Acesso em: 2 ago. 2025.
- CECCHI, H. M. Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimento. 2003.
- CHAVES, C. S. et al. Forage production of elephant grass under intermittent stocking. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 48, n. 2, p. 234-240, 2013.
- CHEN, M., ZHANG, W. L., and YANG, S. Y. (2018). Research on quality of rosemary absolut oils extracted by different methods. *J. Anhui Agric. Sci.* 46 (5), 178–182. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2018.05.054
- CHEN, F.; WANG, J.; ZHANG, S.; CHAUDHRY, A.S.; KHANAKI, H. Assessing Fermentation Quality, Aerobic Stability, In Vitro Digestibility, and Rumen Degradation Characteristics of Silages Mixed with Sweet Sorghum and Aerial Parts of Licorice. *Agriculture* 2024, 14, 212.
- CHEMAT, F. et al. A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*, v. 22, p. 2325–2353, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/gc/c9gc03878g>. Acesso em: 2 ago. 2025.
- CRESPO, R. J. et al. Secado de forraje con el horno microondas: efecto sobre el análisis de calidad. *Agricultura Técnica*, [S. l.], 2007. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072007000200013>.
- CRUZ, L. T. et al. Qualidade e composição bromatológica do milho em diferentes épocas de corte. *Revista do Agronegócio – Reagro*, Jales, v. 5, n. esp., p. 67-75, dez. 2016.
- CRUZ, J. C. et al. Espaçamento e densidade do milho. *Embrapa Milho e Sorgo*, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021b. Acesso em: 21 jun. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/plantio/espacamento-e-densidade>.
- CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; GONTIJO NETO, M. M. Milho para silagem. *Embrapa*, 2021c. Acesso em: 28 jun. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo/milho-para-silagem>.
- COSTA, N. R. et al. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1038-1047, 2012.

COSTA, Newton L. et al. Produtividade de forragem e morfogênese de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob níveis de nitrogênio. *Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 10, n. 10, p. 731-735, 2016.

Cozzolino, D., & Morón, A. (2015). *Infrared Spectroscopy as a Versatile Analytical Tool for the Quantitative Determination of Antioxidants in Agricultural Products*. *Foods and Plants Antioxidants*, 4, 482–497.

DEL SANTO, V. R. et al. Calibração multivariada para determinação de componentes de forrageiras por meio de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). In: II Jornada Científica, 2010, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste e Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2010.

Decruyenaere V, Lecomte P, Demarquilly C, Aufrere J, Dardenne P, Stilmant D, Buldgen A. 2009. Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): developing a global calibration. *Anim Feed Sci Technol*. 148(2–4): 138–156.

DETMANN, E. et al. Métodos para análise de alimentos. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema, Atlas, 2012.

DETMANN, E. et al. Métodos alternativos para quantificação de fibra detergente neutro (FDN) em alimentos usando autoclave e saquinhos filtrantes. *INCT-Ciência Animal – Animal Science*, 2021. Métodos validados com autoclave a 105 °C por 60 min e uso de saquinhos de TNT como descrito em Detmann et al. (2021).

DIAS, Y. G. Espectroscopia NIR e calibração multivariada aplicadas ao controle de qualidade de gases combustíveis naturais e derivados do petróleo. 2011. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DIAS, A. M. et al. Ureia e glicerina bruta como aditivos na ensilagem de cana-de-açúcar. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, Belo Horizonte, v. 66, n. 6, p. 1874-1882, 2014.

De Marchi M, Berzaghi P, Boukha A, Mirisola M, Galol L. 2007. Use of near infrared spectroscopy for assessment of beef quality traits. *Ital J Anim Sci*. 6(1):421–423.

De Marchi M. 2013. On-line prediction of beef quality traits using near infrared spectroscopy. *Meat Sci*. 94(4):455–460.

Dixon R, Coates D. 2009. Review: near infrared spectroscopy of faeces to evaluate the nutrition and physiology of her bivores. *J Near Infrared Spectrosc*. 17(1):1–31.

FALLA SOTELO, Francisco. Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização de petróleo: simulação de uma unidade de destilação atmosférica. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FENG, Jiashi; XU, Huan; YAN, Shuicheng. Robust PCA in High-dimension: A Deterministic Approach. *arXiv preprint*, 2012. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1206.4628>. Acesso em: 04 ago. 2025.

FERNANDES, A. M. F. Uso da espectroscopia de reflectância do infravermelho próximo (NIRS) para previsão da composição bromatológica de vagens de algaroba e palma forrageira. 2015. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, CE, 2015.

FONTANELI, R. S. et al. Validação do método da reflectância no infravermelho proximal para análise de silagem de milho. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 31, n. 2, p. 594-598, 2002.

FRANÇA, A. F. S. et al. Características fermentativas da silagem de híbridos de sorgo sob doses de nitrogênio. *Brazilian Animal Science*, Goiânia, v. 12, n. 3, p. 384-391, 2011.

GUARALDO, M. C. Estudos socioeconômicos e ambientais. Brasil pode superar a Índia em 2023 na produção de grãos. *Embrapa*. Acesso em: 28 jun. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/73611968/brasil-pode-superar-a-india-em-2023-na-producao-de-graos>.

GOMES, C. P.; SIOEMONE, M. L. F. Determinação rápida de extrato etéreo utilizando extrator a alta temperatura. 2012.

GRANA, A. L. Análise de alimentos. *Ave-Porc Nutri*, 2014. Acesso em: 01 jul. 2025. Disponível em: <https://aveporcnutri.wixsite.com/aveporcnutri/single-post/2014/01/19/An%C3%A1lise-de-alimentos>.

Goi A, Manuelian CL, Curro S, De Marchi M. 2019. Prediction of mineral composition in commercial extruded dry dog food by near-infrared reflectance spectroscopy. *Animals* 9: 640.

Goi A, Manuelian CL, Righi F, De Marchi M. 2020. At-line prediction of gelatinized starch and fiber fractions in extruded dry dog food using different near-infrared spectroscopy technologies. *Animals*. 10(5):1–11.a.

Goi A, Simoni M, Righi F, Visentin G, De Marchi M. 2020. Application of a handheld near-infrared spectrometer to predict gelatinized starch, fiber fractions, and mineral content of ground and intact extruded dry dog food. *Animals*. 10(9):1660.b.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise multivariada de dados. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Silagem de capim elefante na alimentação animal. *Documentos n° 262*, Vitória, ES: INCAPER, 2019. ISSN 1519-2059.

IGNAT, I.V.; POPA, I.; VALENTIN I. A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food Chem*. 2001, 126, 1821–1835.

Jancewicz LJ, Penner GB, Swift ML, McKinnon JJ, Waldner CL, McAllister TA. 2016. Characterization of the variation in the daily excretion of faecal constituents and digestibility predictions in beef cattle fed feedlot diets using near infrared spectroscopy. *Can J Anim Sci.* 96(4):532–549.

Jancewicz LJ, Penner GB, Swift ML, Waldner CL, Koenig KM, Beauchemin KA, McAllister TA. 2017. Predicting fecal nutrient concentrations and digestibilities and growth performance in feedlot cattle by near-infrared spectroscopy. *J Anim Sci.* 95(1):455.

Jancewicz LJ, Swift ML, Penner GB, Beauchemin KA, Koenig KM, Chibisa GE, He ML, McKinnon JJ, Yang WZ, McAllister TA. 2017. Development of near-infrared spectroscopy calibrations to estimate fecal composition and nutrient digestibility in beef cattle. *Can J Anim Sci.* 97(1):51–64.

JARDINE, J. G.; BARROS, T. D. Agroenergia - Etanol. *Embrapa Territorial*. Acesso em: 18 jun. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/alcool/materias>.

JOLLIFFE, Ian T.; CADIMA, Jorge. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 374, n. 2065, 2016. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26953178/>. Acesso em: 4 ago. 2025.

Johnson JR, Carstens GE, Prince SD, Ominski KH, Wittenberg KM, Undi M, Forbes TDA, Hafla AN, Tolleson DR, Basarab JA. 2017. Application of fecal near-infrared reflectance spectroscopy profiling for the prediction of diet nutritional characteristics and voluntary intake in beef cattle. *J Anim Sci.* 95(1):447–454.

LANA, R. P. Nutrição e alimentação animal (mitos e realidades). 2. ed. revista. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, 2007.

LANDAU, S.; GLASSER, T.; DVASH, L. Monitoring nutrition in small ruminants with the aid of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technology: a review. *Small Ruminant Research*, v. 61, n. 1, p. 1-11, 2006.

LUCAS, F. T.; SEKITA, A. P. C.; SILVA, F. H.; FERNANDES, L. O. Produção e qualidade de híbridos de milho para silagem. *FAZU em Revista*, n. 06, p. 1-7, 2010.

LYONS G, SHARMA S, AUBRY A, CARMICHAEL E, ANNETT R. 2016. A preliminary evaluation of the use of mid infrared spectroscopy to develop calibration equations for determining faecal composition, intake and digestibility in sheep. *Anim Feed Sci Technol.* 221:44–53.

MACÊDO et al., *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal* (v.13, n.2) p. 320 – 337 abr – jun (2019).

MACDONALD, C. Canadian mills opt for FIT-NIR analyzers. *Pulp & Paper Canada*, 2016. Disponível em: <https://www.pulpandpaper-canada.com/news/canadian-mills-opt-for-fitnir-analyzers-1100000232/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. Fisiologia do milho. *Circular Técnica 22*, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (EMBRAPA), ISSN 1679-1150. Sete Lagoas-MG, 2002.

MARTEN, G. C.; SHENK, J. S.; BARTON II, F. E. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), analysis quality. Washington, D.C.: USDA, 1985. 110 p.

MASSIGNANI, C., DEL SANTO, V. R., SOUZA, G. B. DE, NOGUEIRA, A. R. DE A., PICCHI, C. M. C., & GARCIA, C. H. (2021). Calibração única em espectroscopia de infravermelho próximo para determinação da qualidade de forragem de múltiplas espécies. *Research, Society and Development*, 10(10), e548101018990. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18990>.

MCGOVERIN, C.M.; Weeranantanaphan, J.; Downey, G.; Manley, M. The application of near infrared spectroscopy to the measurement of bioactive compounds in food commodities J. *Near Infrared Spectrosc.* 2010, 18, 87–111.

MEDEIROS, S. R. de; ALBERTIN, T. Z.; MARINO, C. T. Lipídeos na nutrição de ruminantes. In: EMBRAPA GADO DE CORTE, 2015. Cap. 5.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília: MAPA, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 02/08/2025.

METROHM. NIR Spectroscopy. A guide to near-infrared spectroscopic analysis of industrial manufacturing processes. Printed in Switzerland by Metrohm AG, CH-9101 Herisau, Switzerland. 8.108.5026EN – 2014-02, 2014.

MIETH, F. PET Agronomia. Produção de silagem de qualidade. Universidade Federal de Santa Maria, 29 jun. 2021. Disponível em: https://ufsm.br/pet/agronomia/2021/06/29/producao-de-silagem-de-qualidade?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 28 jul. 2025.

MONTEIRO, I. J. G. et al. Silagem de capim-elefante aditivada com produtos alternativos. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, Maringá, v. 33, n.4, p. 347-352, 2011.

MONTGOMERY DC, Peck EA, Vining GG. 'Introduction to linear regression analysis'. John Wiley & Sons; 2021. pp. 1–114. ISBN: 978-1-119-57872-7.

MORGANO, M. A.; FARIA, C. G.; FERRÃO, M. F.; BRAGAGNOLO, N.; FERREIRA, M. C. C. Determinação de proteína em café cru por espectroscopia NIR e regressão PLS. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 25, n. 1, p. 25-31, jan.-mar. 2005.

- NAES, T.; ISAKSSON, T.; FEARN, T.; DAVIES, T. A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification. NIR Publications, 2002.
- NERES MA, HERMES PR, AMES JP, ZAMBOM MA, CASTAGNARA DD, SOUZA LC (2014) Use of additives and pre-wilting in Tifton 85 bermudagrass silage production. *Cienc e Agrotecnologia*. 38(1):85-93.a.
- NERES, R. P.; FIGUEIREDO, S. M.; GOMES, G. O.; VALE, L. F. S.; VIANA, M. F. R.; LIMA, J. B. M. P. Avaliação do teor de matéria seca do BRS-Capiaçu para determinação do momento de corte para ensilagem. Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG). *IF Integra*, 2023.b.
- NEUMANN, M.; OLIBONI, R.; OLIVEIRA, R.M.; FARIA, M.V.; UENO, R.K.; REINERH, L.L.; DURMAN, T. Aditivos químicos utilizados em silagens. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, v.3, n.2, p.187-208, 2010.a.
- NEUMANN, M.; NÖRNBERG, J. L.; LEÃO, G. F. M.; HORST, E. H.; FIGUEIRA, D. N. Chemical fractionation of carbohydrate and protein composition of corn silages fertilized with increasing doses of nitrogen. *Ciência Rural*, v. 47, n. 5, p. 01-07, 2017.b.
- NETO, M. M. J. Estatística multivariada. *Revista de Filosofia e Ensino*, 9 de maio de 2004. Disponível em: http://www.criticanarede.com/cien_estatistica.html. Acesso em: 25 jul. 2024.
- Nuñez-Sanchez N, Carrion D, Peña Blanco F, Domenech Garcia V, Garzon Sigler A, Martinez-Marin AL. 2016. Evaluation of botanical and chemical composition of sheep diet by using faecal near infrared spectroscopy. *Anim Feed Sci Technol*. 222:1–6.
- OLIVEIRA, P.C.S. et al. Qualidade na produção de silagem de milho. *Pubvet, Londrina*, v. 8, n. 4, ed. 253, art. 1672, 2014.
- PAHLOW, G.; MUCK, R. E.; DRIEHUIS, F.; ELFERINK, S. J. W.O. E.; SPOELSTRA, S. F. Microbiology of ensiling. In: BUXTON, D. R.; MUCK, R. E.; HARRISON, J. H. (Ed.). *Silage science and technology*. 1st ed. Madison: American Society of Agronomy, n.42, p.31-94, 2003.
- PARANHOS, L. R.; MENEZES, C. B.; SILVA, K. J.; JÚLIO, M. P. M.; JÚLIO, B. H. M.; CARVALHO, E. R. L.; CAMPOS, A. F.; SANTOS, C. V.; SCHAFFERT, R. E. Uso do espectrômetro portátil Micro-NIR para avaliar os teores de proteína e extrato etéreo em milho. XIX Seminário de Iniciação Científica PIBIC/CNPQ, Universidade Federal de São João del-Rei, 2021.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – A review. *Analytica Chimica Acta*, v. 1026, n. 5, p. 8-36, 2018.
- Pearson, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 1901.
- PEREIRA, A. V.; VALLE, C. B.; FERREIRA, R. P.; MILES, J. W. Melhoramento de forrageiras tropicais. In: NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. *Recursos genéticos e melhoramento de plantas*. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso, 2001. 1183 p.a.

PEREIRA, A. V.; LEDO, F. J. S.; MORENZ, M. J. F.; LEITE, J. L. B.; SANTOS, A. M. B.; MARTINS, C. E.; MACHADO, J. C. BRS Capiaçú: cultivar de capim-elefante de alto rendimento para produção de silagem. *Embrapa Gado de Leite-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*, 79, ISSN 1678-3131, Juiz de Fora, MG, out. 2016.

PEREIRA, M. M. S. Predição da composição físico-química de gramíneas tropicais e fezes bovinas por meio de NIRS. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga-BA, 2019.

PÉREZ-MARÍN, D., GARRIDO-VARO, A., DE PEDRO, E. & GUERRERO-GINEL, J. E. (2007). *Chemometric utilities to achieve robustness in liquid NIRS calibrations: application to pig fat analysis*. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 87, 241–246. scirp.org

PRIETO N, PAWLUCZYK O, RUSSELL DUGAN ME, AALHUS JL. 2017. A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. *Appl Spectrosc*. 71(7):1403–1426.

RABELO, M. D.; SIMEONE, M. L. F.; NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. Avaliação da variabilidade amostral de forrageiras in natura com NIR portátil. *Química Nova*, v. 40, n. 4, p. 418-426, 2017.

RAHMAN A, BAYRAM I, KHANUM S, ULLAH S. 2015. Use and calibration of near infrared reflectance spectroscopy in feed analysis: a mini review. *Pak J Life Soc Sci*. 13(1):1–7.

RECH, A. F.; WERNER, S. S. Utilização da tecnologia NIRS para predição dos valores nutricionais de forrageiras. *Agropecuária Catarinense*, Florianópolis, v. 33, n. 1, p. 11-14, jan./abr. 2020.

REIS, A. R.; BARBERO, R. P.; HOFFMANN, A. Impactos da qualidade da forragem em sistemas de produção de bovinos de corte. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 37, n. 292, p. 36-53, 2016.

RETORE, M.; ALVES, J. P.; JUNIOR, M. A. P. O.; GALEANO, E. S. J.; ORRICO, A. C. A.; FERNANDES, T.; VICENTE, E. F.; LOPES, L. S. Silagem de ração mista total com capim-elefante cv. BRS Capiaçú. ISSN 1679-0472. Dourados, MS. 2022.

REVISTA CULTIVAR. Efeito do teor de matéria seca na ocasião da colheita na quantidade e qualidade da silagem. *Revista Cultivar – Máquinas*, Pelotas, 2015. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/efeito-do-teor-de-materia-seca-na-ocasio-da-colheita-na-quantidade-e-na-qualidade-da-silagem>. Acesso em: 29 jul. 2025.

RIGUEIRA, J. P. S.; MONÇÃO, F. P.; SALES, E. C. J.; BRANT, L. M. S.; PIRES, D. A. A.; MATOS, A. M.; LEITE, G. D. O.; SILVA, J. T.; FONSECA, J. D. R.; MOURA, M. M. A.; ROCHA JÚNIOR, V. R. Níveis de glicerina bruta na ensilagem de capim Tifton 85 (*Cynodon dactylon*): perfil fermentativo e valor nutricional. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 40, n. 3, p. 654-663, 2017.

ROUSTAEI, Narges. *Application and interpretation of linear-regression analysis*. Medical Hypothesis Discovery and Innovation in Ophthalmology, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 151–159, 14 out. 2024. DOI: 10.51329/mehdiophthal1506. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11537238/>. Acesso em: 4 ago. 2025.

ROSA, P. P.; SILVA, P. M.; CHESINI, R. G.; OLIVEIRA, A. P. T.; SEDREZ, P. A.; FARIA, M. R.; LOPES, A. A.; ROLL, V. F. B.; ERREIRA, O. G. L. Características do Capim Elefante *Pennisetumpurpureum* (Schumach) e suas novas cultivares BRS Kurumi e BRS Capiaçú. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v. 25, n. 1/2, p. 70-84, 2019. DOI: <https://doi.org/10.36812/pag.2019251/270-84>.

SALMAN, A. K. D.; FERREIRA, A. C. D.; SOARES, J. P. G.; SOUZA, J. P. Metodologias para avaliação de alimentos para ruminantes domésticos. Documento 136. Embrapa, ISSN 0103-9865, maio, 2010. Porto Velho-RO.

SERAFIM, C. C.; GUERRA, G. L.; MIZUBUTI, I. Y.; CASTRO, F. A. B.; PRADO-CALIXTO, O. P.; GALBEIRO, S.; PARRA, A. R. P.; BUMBIERIS JUNIOR, V. H.; PÉRTILE, S. F. N.; REGO, F. C. A. Use of near-infrared spectroscopy for prediction of chemical composition of Tifton 85 grass. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 42, n. 3, p. 1287-1302, maio/jun. 2021. DOI: <10.5433/1679-0359.2021v42n3p1287>.

SIESLER, H. W.; OZAKI, Y.; KAWATA, S.; HEISE, H. M. Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. Wiley-VCH, 2008.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. de. *Análise de Alimentos: Métodos Químicos e Biológicos*. 2005.

SILVA E OLIVEIRA, J. *Produção de Silagem. Pastagem: Principal fonte de volumoso*

SILVA, N.V. *Ensilagem de dieta total contendo BRS Capiaçú ou canade-açúcar com ou sem ureia*. Itapetinga, BA: UESB, 2024. 29f. Dissertação. (Mestrado em Zootecnia, Área de Concentração em Produção de Ruminantes).

SILVA, V. J.; MURTA, R. M.; LIMA, M. B.; MOTA, E. T.; SANTOS, H. B.; LOPES, T. A. O. Composição bromatológica da lavoura de milho para silagem cultivada no norte de Minas Gerais. *Camous IFMG Salinas, IF Integra* 2023.

SIMONI, Marica; GOI, Arianna; DE MARCHI, Massimo; RIGHI, Federico. The use of visible/near-infrared spectroscopy to predict fibre fractions, fibre-bound nitrogen and total-tract apparent nutrients digestibility in beef cattle diets and faeces. *Italian Journal of Animal Science*, v. 20, n. 1, p. 814-825, 2021. DOI: 10.1080/1828051X.2021.1924884.

SHI, Ji-yong; et al. Determination of total flavonoids content in fresh Ginkgo biloba leaf with different colors using near infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 94, p. 271-276, 2012.

SHI, H. et al. Evaluation of near-infrared (NIR) and Fourier transform mid-infrared (ATRFT/MIR) spectroscopy techniques combined with chemometrics for the determination of crude protein and intestinal protein digestibility of wheat. *Food Chemistry*, v. 272, p. 507–513, 30 jan. 2019.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. *Principles of instrumental analysis*. 7. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

STUTH, J.; JAMA, A.; TOLLESON, D. Direct and indirect means of predicting forage quality through near infrared reflectance spectroscopy. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 84, p. 45-56, 2003. DOI: <10.1016/S0378-4290(03)00140-0>.

SOUZA, Simon de S.; FERRÃO, Marco F. Aplicações da espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de medicamentos contendo diclofenaco de potássio. Parte I: Dosagem por regressão multivariada. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 42, n. 3, jul./set. 2006.

SOUZA, A. M.; BREITKREITZ, M. C.; FILGUEIRAS, P. R.; ROHWEDDER, J. J. R.; POPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para calibração multivariada na determinação de paracetamol em comprimidos comerciais utilizando espectroscopia no infravermelho próximo: um tutorial, parte II. *Química Nova*, v. 36, n. 7, p. 1057-1065, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2012. 954 p.

TASSONE, S.; MASOERO, G.; PEIRETTI, P. G. Vibrational spectroscopy to predict in vitro digestibility and the maturity index of different forage crops during the growing cycle and after freeze- or oven-drying treatment. *Animal Feed Science and Technology*, Amsterdam, v. 194, p. 12-25, 2014. DOI: <10.1016/j.anifeedsci.2014.04.019>.

THEODOROU, M. K.; WILLIAMS, B. A.; DHANOA, M. S.; MCALLAN, A. B.; FRANCE, J. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, v. 48, n. 3-4, p. 185-197, 1994.

THULIN, Susanne; HILL, Michael J.; HELD, Alex; JONES, Simon; WOODGATE, Peter. Predicting levels of crude protein, digestibility, lignin and cellulose in temperate pastures using hyperspectral image data. *American Journal of Plant Sciences*, v. 5, p. 997-1019, 2014.

Tolleson DR, Schafer DW. 2014. Application of fecal near infrared spectroscopy and nutritional balance software to monitor diet quality and body condition in beef cows grazing Arizona rangeland. *J Anim Sci*. 92(1):349–358.

Tran H, Salgado P, Tillard E, Dardenne P, Nguyen XT, Lecomte P. 2010. Global” and “local” predictions of dairy diet nutritional quality using near infrared reflectance spectroscopy. *J Dairy Sci*. 93(10):4961–4975.

TRÓPIA, N. V.; SILVA, F. A. S.; ANDRADE, D. R.; MATOS, E. M. A.; CIDRINI, F. A. A.; BORGES, K. M.; EBANI, Y. C.; ROQUE, J. V.; ZANETTI, D.; VALADARES FILHO, S. C. Construção e validação de modelos de regressão a partir de espectros NIR para predição da composição da cana-de-açúcar, farelo de soja e fubá de milho. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 44, n. 2, p. 859-880, mar./abr. 2023. DOI: <10.5433/1679-0359.2023v44n2p859>.

VALDERRAMA, Patrícia, et al. Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada na determinação de parâmetros de controle de qualidade em indústria alcooleira por espectroscopia no infravermelho próximo. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2005.

VALENTE, et al. Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) na análise de componentes de forragens e alimentos. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. [volume], p. [faixas], 2011.

VAN SOEST, P. J. Symposium on nutrition and forage and pastures: new chemical procedures for evaluating forages. *Journal of Animal Science*, v. 23, n. 3, p. 838-845, 1964.

VAN SOEST, P. J. Nutritional ecology of the ruminant. 2. ed. New York: Cornell University, 1994.

VAN SOEST, P. J.; ROERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Sciences*, v. 74, p. 3583, 1991.

VARMUZA, K.; FILZMOSER, P. Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics. CRC Press, 2016.

Visentin G, McDermott A, McParland S, Berry DP, Kenny OA, Brodkorb A, Fenelon MA, De Marchi M. 2015. Prediction of bovine milk technological traits from mid-infrared spec troscopy analysis in dairy cows. *J Dairy Sci.* 98(9): 6620–6629.

VOLTOLINI, T. V; ARAÚJO, G. G. L; SOUZA, R. A. *Alternativa para a alimentação de ruminantes na região semiárida*. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2014. 34 p. Disponível em: <https://infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1004196/1/SDC259.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

WAGNER, G. H.; WOLF, D. C. Carbon transformations and soil organic matter formation. In: SYLVIA, D. M.; FUHRMANN, J. J.; HARTEL, P. G.; ZUBERER, D. A. Principles and applications of soil microbiology. New Jersey: Prentice Hall, 1999. p. 218-256.

WILLIAMS, Ph. C.; SOBERING, D. C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 1, n. 1, p. 25-32, 1993.

ZOPOLLATTO, Maity. Conservação de forragens. Curitiba: SENAR AR-PR, 2020. 108 p.

II- OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver curvas de calibração para predição da composição químico-bromatológico das forrageiras milho e Capim Elefante BRS capiaçu, por Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIRS).

2.2 Objetivos específicos

Desenvolver modelos PLS para quantificar: Matéria Seca, Umidade, Matéria Mineral, Fibra em Detergente Neutro, Fibra em Detergente Neutro corrigido para cinzas e proteínas, Fibra em Detergente Ácido, Lignina, Proteína Bruta e Extrato Etéreo.

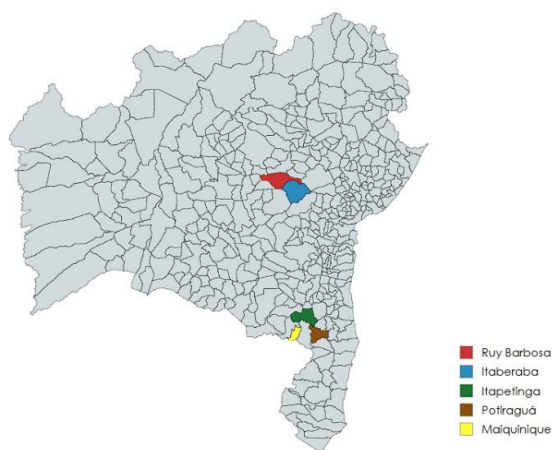
Comparar os modelos PLS com os valores das análises de bancada, avaliando a acurácia do NIRS.

III MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local

As amostras das forragens foram coletadas em fazendas localizadas em diferentes regiões do estado da Bahia, Brasil (Figura 3). No Sudoeste baiano, foram amostrados os municípios de Itapetinga (latitude: -15.2526; longitude: -40.2576), que apresenta clima tropical com estação seca no inverno, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual em torno de 23 °C e precipitação média de aproximadamente 800 mm; Maiquinique (latitude: -15.6164; longitude: -40.2452), com clima também tropical com estação seca no inverno, temperatura média anual de 23 °C e precipitação em torno de 800 mm; e Potiraguá (latitude: -15.5958; longitude: -39.8576), igualmente caracterizado por clima tropical com estação seca, temperatura média de 23 °C e precipitação média anual de 800 mm. Na região Centro-Leste da Bahia, as amostras foram coletadas nos municípios de Ruy Barbosa (latitude: -12.2883; longitude: -40.4931), que apresenta clima tropical do tipo Aw, com verões chuvosos e invernos secos, temperatura média anual de aproximadamente 25,5 °C e precipitação de cerca de 750 mm; e Itaberaba (latitude: -12.5242; longitude: -40.3056), cujo clima é classificado como semiárido quente, com temperatura média anual de 24,8 °C e precipitação média de 617,9 mm (Instituto Nacional de Meteorologia, 2020; Climate-data.org, 2025).

Figura 3- Mapa das microrregiões da Bahia, elaborado com base na plataforma MapChart (2025).



As análises químicas das amostras foram realizadas no Laboratório de Métodos e Separação Química (LABMESQ) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, campus Itapetinga – BA.

As amostras de forragens da planta inteira foram coletadas no período de cinco meses (fevereiro a julho de 2024). Foram coletadas 5 amostras por plantação de cada forrageira, sendo 80 amostras de milho (*Zea mays L.*) e 80 amostras de Capim elefante BRS capiaçu (*Cenchrus purpureus*), sendo que 5 amostras x 16 plantações = 80 amostras de cada, totalizando 160 amostras. É importante ressaltar que as amostras não foram coletadas com base no número de dias após o plantio, mas sim com base no ponto de colheita determinado pelo teor de matéria seca ideal para cada espécie. Todas as análises foram realizadas com base na matéria seca.

As coletas das amostras foram realizadas em diferentes regiões, plantações e fazendas, que apresentavam manejos e níveis tecnológicos distintos, como mostram as Figuras 4. Essa diversidade garantiu a heterogeneidade na composição das amostras, tornando os modelos de calibração mais eficientes e robustos, ao utilizar esses dados de referência na elaboração do modelo.

Figura 4- Plantação de BRS capiaçu (A) e Milho (B).



Fonte: Própria autora (2025).

Para proceder tal qualificação em cada unidade experimental, cada plantação foi dividida em 5 quadrantes (frente, meio, fundo, lateral esquerda e lateral direita) totalizando cinco amostras por plantação, realizando um zigue-zague na área predeterminada garantindo que todo o material colhido fosse ao acaso. No momento da avaliação as forragens foram cortadas a 20 cm do solo como recomenda Silva e Oliveira (2017), homogeneizadas e processadas na máquina de forragem (Ensiladeira EN-6600) equipamento utilizado para o corte e a picagem de forragens verdes, como milho e capim- elefante cultivar BRS Capiaçu, cuja redução do tamanho das partículas auxilia na pré-

secagem do material e na posterior moagem a 1 mm, conforme exigido para as análises laboratoriais.

Algumas amostras foram pré-secadas em estufa de circulação de ar forçada (60°C) após o corte imediato, até atingirem o peso constante, e outras tiveram que ser congeladas, posteriormente, foram descongeladas em temperatura ambiente e colocadas na estufa de circulação de ar forçada para serem pré-secadas até atingirem peso constante. Em seguida, foram moídas à 1 mm em moinho tipo Willey e armazenadas em potes plástico, vedados, colocados em ambiente seco, ventilado e em temperatura ambiente.

3.3 Análises químicas

As amostras foram analisadas quanto aos teores de matéria seca MS (INCT-CA G-003/1), matéria mineral (MM) (método INCT- CA M-001/1); fibra em detergente neutro (FDN) (método INCT-CA F-002/1); e correções para proteína e cinzas (FDNcp), (método INCT-CA N-004/1 e INCT-CA M-002/1); fibra em detergente ácido (FDA) (método INCT-CA F-004/1); proteína bruta (PB) (método INCT-CA N-001/1); extrato etéreo (EE) (método INCT-CA G-004/1); e lignina (H₂SO₄ 720 g.kg⁻¹; método INCT-CA F 005/1); conforme retratado por Detmann et al., (2021). Os valores obtidos pelos métodos tradicionais de análises de bancada foram usados para elaboração dos modelos de calibração multivariadas como valores referência.

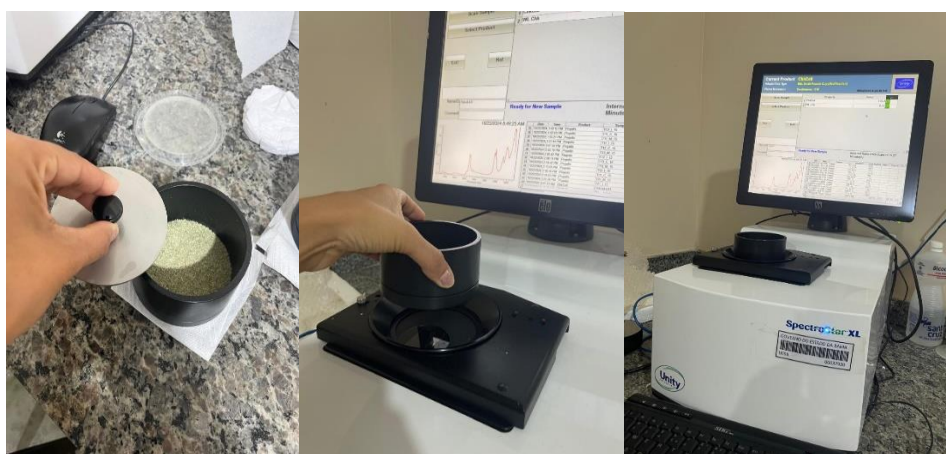
3.4 Obtenção dos espectros

As amostras após o processo de pré-secagem foram separadas por plantação e organizadas de um a cinco, identificadas, e com o auxílio de um espectrômetro de reflectância difusa de infravermelho próximo (NIRS) modelo *SpectraStar™ 2500 XL* (Unity Scientific, Brookfield, CT, EUA) foram exploradas (Figura 5), onde o aparelho opera na faixa de comprimento de onda de 1100-2500 nanômetros (nm) com intervalos de 1 nm. Dessa forma, cada ponto equivale à pontuação média de 64 varreduras. As placas com as amostras eram posicionadas, uma de cada vez, sobre o aparelho no local que emite o feixe de luz. Posteriormente, a cada leitura as placas eram limpas com o auxílio de

pinel de cerdas macias para retirada do excesso das amostras, papel higiênico dupla face macio e álcool isopropílico.

A temperatura do laboratório foi mantida em torno de 25 °C, o NIRS foi utilizado para controle e obtenção dos espectros analisados, sendo que cada análise teve a duração de aproximadamente 30 segundos (Figura 5). Os sinais foram criados no modo de refletância (%R) e modificados em absorbância utilizando a fórmula $\log 1/R$.

Figura 5. Processo de obtenção dos espectros das amostras de milho e Capim elefante BRS capiaçu no NIRS.



Fonte: Compilado pela autora (2025).

3.5 Análise Quimiométrica

3.5.1 Processamento dos dados

Os softwares utilizados foram o MATLAB r2024a (MathWorks, Natick, MA, EUA), o qual auxiliou na separação dos dados que seriam utilizados, na construção do modelo da multivariada PLS e no cálculo dos parâmetros estatísticos (R, RMSE, RPD e RER). Já o ChemoStat® V2 build 260821.ba3285e (Wageningen University & Research, Países Baixos), foi responsável pelos tratamentos de pré-processamento dos dados espectrais (normalização, 1 e 2 derivada e SNV), os quais, em alguns casos, foram necessários para diminuir os ruídos, ajustando os dados avaliados.

Inicialmente, os dados brutos de cada forrageira foram divididos em dois grupos: 56 amostras (70%) para calibração, utilizadas no treinamento do modelo, e 24 amostras

(30%) para validação externa, utilizadas para verificar sua capacidade preditiva, buscando representar a população amostral de forma equilibrada, por meio dos conjuntos de calibração e validação. Esse método escolhe as amostras levando em consideração a maior distância entre elas, assegurando que o conjunto de dados de calibração reflita a distribuição espacial de todo o conjunto de dados, contribuindo no aprimoramento de generalização e o desempenho preditivo do modelo (Yang et al. 2025).

3.5.2 Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS)

Os modelos de regressão PLS foram inicialmente ajustados utilizando os espectros sem tratamento prévio, com o auxílio do software MATLAB. Apenas quando, após diversas tentativas de redução do número de variáveis latentes, os resultados ainda se mostravam insatisfatórios em termos de qualidade preditiva, foi adotada a estratégia de pré-processamento dos dados por meio de filtros matemáticos disponibilizados pelo software ChemoStat®. Segundo HOU; WENTZELL. (2014), esses instrumentos de pré-processamento como normalizações, MSC etc., não prejudica na construção de um modelo, pois são ferramentas complementares ao ajuste dos dados.

Esses pré-processamentos têm a função de minimizar os efeitos de fatores físicos que podem camuflar os sinais químicos reais presentes nos espectros, garantindo que as informações químicas sejam enfatizadas, tornando o modelo robusto e confiável. Após essa etapa, os dados foram importados novamente para o MATLAB e submetidos à análise multivariada PLS, obtendo os valores dos parâmetros estatísticos R, RMSE, RPD e RER.

A matriz X sendo o primeiro conjunto de dados que detém as informações das 9 (nove) variáveis preditas por meio das análises de bancada, sendo elas FDN, FDA, FDNcp, MM, UMID, PB, EE, MS e Lignina, e o conjunto Y contém os dados de absorvância para todo o espectro de NIRS com 1400 variáveis.

3.5.3 Avaliação dos modelos preditivos

O desempenho dos modelos foi avaliado a partir dos parâmetros estatísticos obtidos. A Raiz quadrada do erro médio (RMSE) quanto mais próximo de zero (0)

melhor, pois significa que o modelo de calibração obteve um bom desempenho de previsão; valores de R próximos de 1 demonstram uma excelente previsão (Lima et al., 2022). Além disso, Sayes et al. (2005) consideram, valores de R a partir de 0,66 já como aceitáveis para a previsão do modelo.

O Desvio Preditivo Residual (RPD) igual ou menor a 1 indica que os modelos de calibração não são adequados para prever o produto analisado, valores de 1 a 1,4 são indicativos de que o modelo utilizado serve para prever as variáveis analisadas, valores de 1,4 a 2,0 indica que o modelo utilizado é bom, prevendo de maneira integrada e valores igual ou superior a 2,5 são previsões excelentes, indicando que o modelo de calibração é ideal (Viscarra et al., 2006).

Segundo Williams & Sobering (1993), outro indicador amplamente utilizado para avaliar a qualidade dos modelos é o Intervalo de Erro Relativo Valores (RER). Valores inferiores a 3 não é eficaz na previsão, valores entre 3 e 10, significa que o modelo é eficaz na previsão e valores acima de 10 indicam que o modelo possui excelente capacidade preditiva.

Os dados das análises convencionais ou também caracterizada de análises de bancada, foram calculados os valores mínimos, máximos, médias, moda, mediana, erro padrão, desvio padrão e coeficiente de variação. Sendo que, para as análises multivariadas, as amostras NIRS foram processadas separadamente, os modelos foram construídos e os resultados foram comparados para conhecer a exatidão de previsão do modelo escolhido (acurácia do NIRS) sobre as variáveis analisadas através das amostras na sua composição natural.

Dessa forma, demonstra se os valores obtidos por meio das multivariadas, ou seja, os valores calculados estão ou não próximos dos valores obtidos através das análises de bancadas (Geladi; Kowalski, 1986).

IV RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados das Análises de Referências

Foram calculados os valores mínimos, máximos, médias, moda, mediana, erro padrão, desvio padrão e coeficiente de variação da MS, Umidade, MM, FDN, FDNcp, FDA, Lignina, PB e EE, sendo apresentados na Tabela 2 para o milho e para o BRS capiaçu.

Tabela 2- Valores mínimo, máximo, média, moda, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação e erro padrão das características bromatológicas do milho e do BRS Capiáçu, obtidos pelos métodos tradicionais (n = 80 para cada forrageira).

Item	Minímo	Máximo	Média	Moda	Mediana	EP	Desvio	CV
MILHO								
MS(%)	30,00	33,43	38,27	30,01	31,23	0,11	0,98	3,15
Umid(%)	66,56	69,99	68,72	69,37	68,76	0,11	0,98	1,43
MM(%)	3,73	10,10	5,63	5,00	5,40	0,13	1,21	2,59
FDN(%)	41,93	71,40	55,81	60,80	55,65	0,61	5,46	9,79
FDNcp(%)	33,64	63,30	47,74	51,63	47,78	0,67	5,98	12,54
FDA(%)	35,00	63,59	48,04	44,28	48,04	0,65	5,83	12,15
LIG(%)	5,40	10,95	7,80	6,36	7,72	0,14	1,22	15,72
PB(%)	4,16	9,65	6,98	4,16	7,00	0,16	1,43	20,56
EE(%)	3,02	4,51	3,62	3,51	3,59	0,03	0,28	7,80
BRS CAPIAÇU								
MS(%)	18,06	34,82	24,07	23,00	23,28	0,43	3,78	16,23
Umid(%)	65,17	81,93	75,83	77,00	76,71	0,43	3,92	5,17
MM(%)	5,31	13,41	8,97	12,26	9,00	0,21	1,92	21,40
FDN(%)	51,41	83,68	76,32	76,37	76,65	0,46	4,15	5,44
FDNcp(%)	46,56	77,67	69,27	69,94	69,68	0,50	4,49	6,94
FDA(%)	45,79	75,23	68,46	66,93	68,94	0,44	3,94	5,75
LIG(%)	5,25	15,02	9,91	11,22	10,41	0,27	2,37	24,02
PB(%)	3,26	9,64	6,97	5,67	6,95	0,16	1,40	20,09
EE(%)	1,04	2,61	1,66	1,51	1,59	0,04	0,37	22,84

MS= Matéria seca; Umid= Umidade; MM= Matéria Mineral; FDN= Fibra insolúvel em detergente neutro; FDA= Fibra insolúvel em detergente ácido; FDNcp= Fibra insolúvel em detergente neutro corrigido para cinzas e proteínas; LIG= Lignina; PB= Proteína; EE= Extrato Etéreo; Desvio= Desvio padrão; Med= Mediana; EP= Erro padrão e CV= Coeficiente de variação.

Os resultados da análise da composição bromatológica da planta inteira de milho estão apresentados na Tabela 2. Para o milho, o teor de matéria seca foi presenciado valor mínimo de 30,00%, máximo de 33,43%, e médio de 31,27%, considerados valores ideais

no ponto de silagem. Esses valores decorrem do fato de as amostras terem sido coletadas em diversas regiões e propriedades com níveis tecnológicos diferentes.

Os resultados de MS obtidos são semelhantes aos valores observados por Zopollatto et al. (2009), que ao avaliarem diferentes estágios de maturação do milho, encontraram valores de MS de 32 a 35% atingida aos 98 a 112 dias, sendo recomendada para ensilagem. Resultados próximos também foram relatados por Silva et al. (2021), que observaram 31,48% de MS ao analisar plantas de milho destinadas à silagem.

A faixa ideal de MS do milho para a elaboração de silagem ou consumo é de 30% a 35%. Valores abaixo de 25% tornam o ambiente propício ao desenvolvimento de bactérias que produzem ácido butírico, provocando perdas (Cruz et al., 2021).

Silva et al. (2023), estudando a influência da altura de corte na qualidade bromatológica do milho (híbrido MG607 PWU), encontrou valores de matéria seca com a menor altura de corte (20 cm) de 45,21%. Quando a altura de corte foi aumentada (40, 60, 80 e 120 cm), houve redução no teor de MS (38,66%, 34,16%, 30,16% e 25,16%, respectivamente). Demonstrando que o teor de MS tem uma relação inversa com a altura de corte, pois quanto menor, melhor são as condições para preservação do alimento.

Os valores bromatológicos do BRS Capiacu se encontram na Tabela 2, sendo o teor de matéria seca encontrado neste trabalho com valores mínimos de 18,06%, máximos de 34,02%, e média de 24,07%. Esses resultados se assemelham aos valores encontrados por Pereira et al. (2021), que indica teor de MS entre 18% a 20% como ideal para boa qualidade da silagem.

Segundo Retore et al. (2020), o BRS Capiacu possui baixo teor de MS para ensilagem, chegando até 20%, longe do ponto ideal que seria de 28% a 34%. Neres et al. (2023), avaliando a idade ideal para o momento de ensilagem de acordo com o teor de matéria seca, observaram que a capineira aos 50 dias de idade do corte atingiu 17,8% de MS e aos 75 dias atingiu 29,6%.

Silva e Oliveira (2023), em ensaio na Embrapa Gado de Leite, identificaram que, sem aditivos ou murchamento, o teor ideal de MS do capiaçu é entre 20% e 22%, para reduzir perdas por efluentes.

Conforme relatado por Lopes (2021), observou que a porcentagem de matéria seca (MS) do BRS Capiacu variou consideravelmente mesmo sob condições de manejo semelhantes, com valores fluando entre 14% e 24% ao longo do ano, a depender do ciclo de rebrota avaliado. Esses dados evidenciam que a época do ano influencia

significativamente a composição da forragem, sendo que idades fisiológicas equivalentes não garantem teores constantes de MS.

O teor de MS no momento do corte é essencial para determinar o sucesso da ensilagem, pois teores de umidade maiores que 80% indicam que o processo de conservação será comprometido por alta produção de efluentes, gerando grandes perdas (Jobim et al., 2017).

O teor de matéria seca (MS) ideal para o BRS Capiaçú situa-se entre 20% e 22%, o que corresponde a uma umidade entre 78% e 80%, adequada para uma boa compactação e fermentação durante a ensilagem. Neste trabalho, os valores de umidade encontrados variaram entre 65,17% e 81,93%, com média de 75,83%, estando, portanto, próximos ou dentro da faixa recomendada para a produção de uma silagem de qualidade.

Para o milho, os valores de umidade encontrados no presente trabalho foram: valor mínimo de 66,56%, valor máximo de 69,99% e média de 68,72%, estão de acordo com Nussio et al. (2001), que afirmam que a cultura do milho está no ponto ideal de colheita quando o teor de MS atinge de 30% a 35%, correspondendo a cerca de 60% a 65% de umidade por 100 g de forragem.

Não foram utilizados os dias de plantado ou rebrota como ponto de corte ideal, devido à influência de fatores como tipo de solo, adubação, clima etc., que resultam em diferentes idades fisiológicas da capineira.

Segundo Silva e Oliveira (2023) pode-se realizar a ensilagem do BRS capiaçu com valores acima de 22% de MS o qual ele recomenda, porém sabemos que o capim assim como outras plantas forrageiras, diminuem o seu valor nutritivo de acordo com a sua maturação. Visto que, o material seco fica difícil de ensilar, pois dificulta a compactação da massa, gerando prejuízos a fermentação por conta do excesso de oxigênio dentro do silo. Afirma Pereira et al. (2016) que se a forrageira ultrapassar os 120 dias de rebrota, não é indicado para ensilagem, pois o seu valor nutricional é baixo.

Segundo Turco (2011) a determinação das cinzas ou matéria mineral é um indicativo da riqueza do material analisado em elementos minerais. O teor médio de Matéria Mineral (MM) do milho (Tabela 2) foi valor mínimo 5,40% e máximo de 10,95% e valor médio de 7,80%, semelhante aos valores encontrados por Tremea et al. (2021) estudando a produção de matéria verde e a qualidade bromatológica de milho silagem produzido sobre diferentes culturas antecessoras na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul com o auxílio do NIRS, quantificou valores de MM variando de 5,09 a 7,23%.

Nussio (1992) avaliando oito cultivares de milho encontrou valores de MM variando de 3,27% a 5,54%, e Silva et al. (2023) encontrou valor de MM de 4,83%.

A matéria mineral (MM) do capiaçu (Tabela 2) foram encontrado valor mínimo de 5,31% e máximo de 13,41%, e valor médio de 8,97% semelhante ao encontrado por Aguirre et al. (2024) que analisando a composição bromatológica de silagem de BRS Capiaçu ensilado em diferentes intervalos de crescimento e com uso de aditivos, encontrou valores de MM 13,83% e 11,08%. Aguirre et al. (2024) observaram 13,83% e 11,08. Lelis (2021) detectou 12,14% e 9,69%.

De acordo com Carvalho (2013), a FDN é um importante indicador da qualidade do alimento, pois representa a fração da parede celular que limita a capacidade dos ruminantes de ingerir e aproveitar os nutrientes. Os teores médios encontrados neste trabalho de FDN e FDA do milho (55,81; 48,04) apresentados na Tabela 2, estão de acordo aos valores encontrados por Cruz et al (2021) declararam níveis adequados para a produção de uma boa silagem de milho, sendo considerados bons níveis em torno de 50%.

Silva et al (2023) estudando o milho, encontrou valores de FDN variando de 21,12 a 33,98%.

O valor de FDN do capiaçu (Tabela 2) encontrado neste trabalho foi valor mínimo de 51,41% e máximo de 83,68% e valor média de 76,32% e valor mínimo de 45,79%, máximo de 75,23% e valor médio de 68,46% de FDA, assemelhando-se aos valores encontrados por Aguirre et al. (2024) que detectou valor de FDN de 63,2% e 74,65%, e para FDA valores de 47,43% e 61,2% para o capiaçu.

Essa alta variação entre o valor de FDN mínimo e máximo demonstra a variabilidade que ocorre no total de fibra do BRS capiaçu, sendo indicativo de plantas em diferentes estágios de maturação e plantações com níveis tecnológicos distintos. Um valor médio de 76,32% de FDN informa o alto teor de fibras na sua composição, podendo influenciar a digestibilidade dos animais e consequente o consumo voluntário por causa da sensação de enchimento. Visto que, Retore et al. (2020) afirmam que o bom funcionamento do rúmen a faixa ideal de FDN é 20% e 55%, assim não afeta o consumo dos animais.

Cruz et al (2021) diz que os valores de FDA são importantes pois está relacionado com a digestibilidade do alimento, logo quanto menor, mais adequado. Na média, um bom nível de FDA na silagem de milho fica em torno de 30%. Visto que, a FDA= FDN-hemicelulose, informando a digestibilidade da planta (Cruz et al., 2005). O valor médio de FDA encontrado no presente trabalho foi 48,04%, estando acima do recomendado,

sendo que, foi moído a planta inteira, logo, o sabugo do milho é altamente fibroso, contribuindo no aumento do teor de FDA e FDN do material analisado.

Silva et al (2023) encontraram valores de FDA no milho variando 23,05 % a 43,05%).

Segundo Velho et al. (2007), ao avaliarem a qualidade da silagem em relação ao material original do milho, observaram valores de FDN de 51,95%, FDA de 26,06% e FDNcp em torno de 49,45%. No presente trabalho, o valor de FDNcp obtido foi inferior, atingindo 47,74%.

O valor de FDNcp relatado por Mulligan et al. (2002) de 38,5% e ao de 41,3% reportado por Qiu et al. (2003), quando comparado ao valor de FDNcp do milho 47,74% encontrado neste trabalho (Tabela 2), diz que pode ser considerado um material de qualidade média em dietas para ruminantes. Porém, quando comparado aos valores encontrados por Cruz et al. (2004) avaliando determinar as características bromatológicas de cultivares de milho comerciais e em pré-lançamento, desenvolvidas pelo programa de melhoramento de plantas da Embrapa Milho e Sorgo, encontraram valores de FDN variando de 60,03% a 66,68%, verifica-se que os milhos utilizados nesse experimento apresentam valores satisfatórios.

Silva et al. (2021) encontrou valores semelhantes aos encontrados neste trabalho de 49,15% FDN e 28,51% de FDA, indicando ótimos resultados nutricionais para uma boa silagem de milho. Visto que, Cruz et al. (1998) diz que a fibra é essencial para o bom funcionamento ruminal, pois ela é responsável pela consistência ao bolo alimentar, regula a taxa de passagem pelo trato digestivo, sendo que quando em níveis muito elevados ocorre baixa ingestão de MS, pois a taxa de passagem fica lenta provocando baixa digestão e absorção dos nutrientes. Cruz et al. (2004) encontraram valores de FDN variando de 62,22% a 65,88% e FDA de 33,81% a 37,62%.

De acordo com Pereira (2019), o modelo de regressão multivariada PLS foi avaliado usando amostras de forrageiras (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria brizantha* cv. Piatã, *Brachiaria decumbens*, *Panicum maximum* cv. Colonião). No método PLS, houve bom desempenho na predição de proteína bruta, lignina e umidade para todas as matrizes avaliadas, enquanto frações fibrosas como FDA na *Brachiaria decumbens* e FDN nas fezes bovinas apresentaram menor acurácia.

O teor de FDN e FDA de uma planta é importante, pois está ligada diretamente com seu potencial digestível, sendo um indicativo de um bom material ou não. O valor de FDN do capiaçu (Tabela 2) encontrado neste trabalho foi valor mínimo de 51,41% e

máximo de 83,68% e valor média de 76,32% e valor mínimo de 45,79%, máximo de 75,23% e valor médio de 68,46% de FDA, assemelhando-se aos valores encontrados por Aguirre et al. (2024) que detectou valor de FDN de 63,2% e 74,65%, e para FDA valores de 47,43% e 61,2% para o capiaçu.

Essa alta variação entre o valor de FDN mínimo e máximo demonstra a variabilidade que ocorre no total de fibra do BRS capiaçu, sendo indicativo de plantas em diferentes estágios de maturação e níveis tecnológicos. Um valor médio de 76,32% de FDN informa o alto teor de fibras na sua composição, podendo influenciar a digestibilidade dos animais e consequente consumo voluntário por causa da sensação de enchimento.

Os valores de FDA se explicam, pois, estudos indicam que a FDA do BRS capiaçu varia entre 35% e 45% em capim jovem, sendo que em estágios mais maduros podem exceder 50% (Oliveira et al., 2016; Gomes et al., 2018). Os valores de FDA encontrado estava variando de 45,79% a 75,23%, informando que a planta possui uma grande quantidade de fibra menos digestível, sendo que, ao ultrapassar os 50% demonstram que a planta pode estar muito madura, provocando a queda da digestibilidade e reduzindo o consumo. Segundo Mertens, 1997 e Van Soest, 1994 o teor de FDA em capins idealmente deve estar entre 40% e 50% da matéria seca para garantir boa digestibilidade e consumo.

Alves (2021) que avaliando a composição química e digestibilidade in vitro da matéria seca da cultivar BRS Capiáçu, encontrou valores de FDN de 67,33%; 72,80% e 77,05%, e para FDA valores de 39,35%; 43,45% e 49,13%, respectivamente.

Pereira et al. (2016) observando a composição do capiaçu de acordo com sua idade de corte, verificou que em 50, 70 e 90 dias de corte, valores de FDN de 60,5%; 66,3% e 68,2%, respectivamente.

O teor de FDN_{cp} do capiaçu deste trabalho (Tabela 2) é de 69,27%, valores próximos do encontrado por Lelis (2021), sendo 63,4% e 69,78%. Sendo assim, os valores de FDN verificado neste trabalho estão acima do valor recomendado por Van Soest (1994) que para não ocorrer inibição do consumo e digestibilidade da MS, pois está diretamente correlacionado, o limite para forragens são 55% a 60% de FDN.

Silva et al., (2022) avaliando a produtividade e a digestibilidade do capim Elefante cv. BRS Capiáçu cultivado no Norte de Minas Gerais aos 60 dias de rebrota, encontrou valor de FDN de 75,55%. Sendo assim, demonstra que a idade de corte não pode ser o ponto de escolha exata para saber se o material está com os valores nutricionais ideais para um bom material de ensilagem, pois varia muito a cada corte realizado.

O teor de lignina do milho encontrado de valor mínimo 5,40% e valor máximo de 9,65% e valor médio de 7,80% (Tabela 2) se assemelha ao encontrado por Silva et al. (2023) de 5,29%, o que segundo Matos et al. (2021) são teores próximos do recomendado para uma silagem de milho de boa qualidade.

Gontijo Neto et al. (2020) avaliando a cultivar de milhos silageiros, encontraram valores de lignina variando de 4,3% a 5,2%.

O valor de Lignina do capiaçu detectado neste trabalho (Tabela 2) foi mínimo de 5,25% e máximo de 15,02%, e valor médio de 9,91%, próximo dos valores encontrado por Lelis (2021) valor de 5,25% e 7,25%, Alves (2021) encontrou valores de 5,50% e 7,68% e Pereira et al., (2016) encontraram valores de 5,8%; 7,0% e 7,7%. Monção et al., (2019) encontraram teor de lignina de 5,58%.

A proteína é o item mais caro da dieta dos animais, visto que segundo Medeiros e Marino (2015) diz que os pastos brasileiros possuem baixo valor nutricional na época seca do ano, sendo que o teor de PB encontrado é abaixo do valor mínimo que os ruminantes necessitam para um bom funcionamento da microbiota do rúmen (7%), ocasionando baixo consumo de matéria seca.

Os valores de Proteína bruta (PB) do milho quantificados nesse trabalho (Tabela 2) foram valor mínimo de 4,16% e valor máximo de 9,65% e valor médio de 6,98% sendo semelhante aos resultados encontrados por Pionner (1993), que diz que o nível proteico do milho forragem ou da silagem, varia de 6% a 9%, sendo a média em torno de 7% ou 7,5%.

Silva et al., (2023) encontraram valores de PB variando de 6,33% a 6,58%. Segundo Buso et al. (2018) avaliando a produção e composição químico- bromatológica da matéria original e da silagem de cinco híbridos de milho, encontraram valores de PB de 8,22% no material original.

Cruz et al. (2005) encontraram valores de PB no milho variando de 7,01% a 8,46%. Sendo que, Silva et al. (2023) encontraram valores de PB de 7,28% e Velho et al. (2007) encontraram valores de PB de 7,52%. Tremea et al. (2021) analisando a qualidade bromatológica de milho silagem produzido sobre diferentes culturas antecessoras, encontraram valores de PB variando de 5,09% a 7,43%.

Os valores de PB do BRS capiaçu (Tabela 2) de 6,97% se assemelham ao encontrado por Aguirre et al., (2024) de 12,24% de PB e 7,97%. Visto que, Lelis (2021) encontrou valores de 6,94% e 5,39%. Valores de PB abaixo de 7% podem estar associados

a plantas mais maduras, e podem comprometer a fermentação ruminal, caso não forneça uma suplementação adequada para suprir esse déficit.

Pereira et al. (2016) analisando a composição do capiaçu encontraram valores de PB variando de 6,2% a 9,7%, e Alves (2021) encontrou valores de PB variando de 4,52% a 8,98%.

O teor de Extrato etéreo (EE) do milho encontrado no presente trabalho (Tabela 2) é de 3,62%, valor considerado alto para o milho planta inteira, se assemelhando com os valores encontrados por Gontijo Neto et al. (2020) avaliando a cultivar de milho BRS 3046, obtiveram valores de EE variando de 2,5% a 2,8%. A alta concentração de EE pode estar relacionada com as condições de cultivo, com a presença de grãos e o estágio de maturação, pois plantas mais maduras tendem a ter mais milhos nas espigas. Teores elevados de EE são desejáveis, pois favorecem um melhor desempenho animal, reduzindo a demanda de suplementação energética por meio de outras fontes alimentares.

Segundo Jobim (2007) a quantidade de extrato etéreo na planta inteira do milho varia entre 1,5% e 3,0%. Velho et al. (2007) encontrou valores de EE de 2,20% e Tremea et al. (2021) encontraram valores de EE variando de 1,58% a 1,92%. Os níveis de EE na planta inteira do milho tende a ser baixo, pois oscilações como diferentes manejos, variedades e estágio de colheita interferem. Com isso, confirma-se os benefícios das boas práticas de manejo para obter um alimento com níveis bromatológicos maiores.

Os valores de Extrato etéreo de capiaçu (Tabela 2) valor mínimo de 1,04%, valor máximo de 2,61%, e médio de 1,66% se assemelha ao encontrado por Paula et al. (2022) 2,85% e Silva (2022) valor de EE de 2,08%, valores já esperados pois as gramíneas não possuem muito EE na sua composição. Gramíneas mais maduras apresentam valores de EE próximos de 1% e gramíneas jovens entre 2% a 3% (NRC, 2001).

A avaliação estatística dos componentes bromatológicos das forrageiras, milho (*Zea mays* L.) e BRS capiaçu (*Cenchrus purpureus*) evidenciou diferenças significativas na variabilidade dos dados, perceptíveis por meio das medidas de tendência central (média, mediana e moda) e de dispersão (desvio padrão, erro padrão da média e coeficiente de variação).

De modo geral, os valores de moda e mediana do milho mostraram-se mais distantes da média em comparação ao BRS capiaçu, especialmente para a matéria seca (MS), cuja moda foi de 30,00% e a média de 38,27%. Esse desvio sugere que os dados quando não são distribuídos de forma equilibrada em torno da média, um dos lados da distribuição pode ser maior que o outro, causando a assimetria. Por outro lado, no BRS

Capiaçu, os valores de moda e mediana para MS (23,00% e 23,28%, respectivamente) estiveram muito próximos da média (24,07%), indicando uma distribuição mais simétrica e centralizada, embora com maior amplitude dos dados. Observou-se ainda que a moda apresentou caráter bimodal ou multimodal em ambas as forrageiras, razão pela qual foi adotada a menor moda buscando um parâmetro mais representativo e conservador.

Quanto à dispersão, o desvio padrão e o erro padrão da média (EP) reforçam a maior homogeneidade das amostras de milho em relação às de BRS capiaçu. Para MS, por exemplo, o milho apresentou desvio padrão de apenas 0,98 e EP de 0,11, enquanto o BRS capiaçu apresentou desvio padrão de 3,78 e EP de 0,43. Esses resultados sugerem que as amostras de milho foram mais uniformes entre si, refletindo provavelmente um sistema de cultivo mais padronizado ou menor sensibilidade do milho às condições edafoclimáticas e de manejo das suas respectivas regiões.

O desvio padrão, quando relacionado à técnica NIRS, deve ser relativamente elevado, porém dentro dos limites considerados normais. Isso porque, durante a etapa de calibração (ensino) do modelo matemático, um maior desvio padrão indica maior heterogeneidade no conjunto amostral, o que contribui para a construção de um modelo mais robusto e eficaz. Por outro lado, desvios padrões baixos, como os observados para o extrato etéreo tanto no milho quanto no BRS capiaçu, tendem a resultar em modelos menos eficazes. Isso ocorre porque as amostras são muito semelhantes entre si, indicando baixa variabilidade genética. Consequentemente, o modelo gerado não é capaz de aprender e representar adequadamente a diversidade genética presente no material forrageiro analisado.

No milho, os coeficientes de variações (CVs) das variáveis analisadas foram baixos, destacando-se o valor de 3,15% para MS, o que indica alta precisão e baixa variabilidade relativa. Já o BRS capiaçu apresentou CVs elevados em diversas variáveis, como EE (22,84%), LIG (24,02%) e MM (21,40%), o que demonstra uma considerável heterogeneidade nas amostras. Essa maior variabilidade pode estar associada à sensibilidade do Capiaçu às condições ambientais, à época de colheita e à estrutura morfológica mais complexa da planta, que favorece variações químicas entre colmos e folhas.

Portanto, os resultados indicam que, as amostras de milho demonstraram maior uniformidade na composição bromatológica, enquanto o BRS capiaçu apresentou maior variabilidade. Essa característica requer maior cuidado durante o manejo, a coleta das

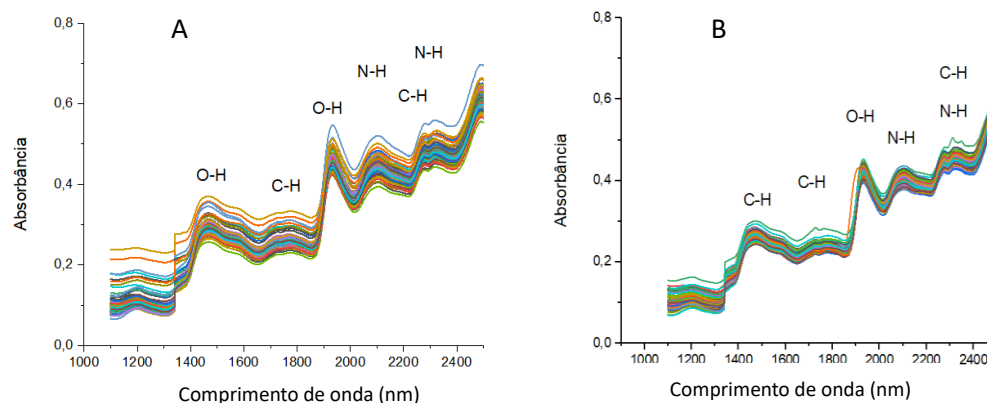
amostras e a formulação de dietas, a fim de assegurar consistência na qualidade nutricional fornecida aos animais.

4.2 Interpretação de espectros NIRS

Na Figura 6 o comportamento espectral das amostras demonstra a absorbância delas em diferentes comprimentos de onda, refletindo a presença de grupos funcionais específicos nos materiais estudados, o que corrobora com os resultados das análises de composição, demonstrando a variabilidade de constituintes. Observa-se para cada amostra o seu próprio espectro, os quais foram obtidos na faixa espectral entre 1100 e 2500 nm.

Observa-se a presença de bandas de absorção de ligações químicas dos grupos O-H, N-H e C-H. As bandas atribuídas às ligações O-H, são associadas à presença de água e surgem entre aproximadamente 1400 e 1500 nm e em torno de 1900 nm. As bandas N-H, relacionadas a compostos nitrogenados, como proteínas, estão localizadas entre 2050 e 2200 nm e as bandas C-H, são indicativas de ligações presentes em compostos orgânicos como lipídios e carboidratos, aparecendo nas faixas de 2300 a 2400 nm.

Figura 6. Espectros NIRS das amostras de milho (A) e do BRS capiaçu (B) estudadas, obtidos na faixa entre 1100 e 2500 nm.



Copilado pela autora.

O espectro do milho (Figura 6) contém bandas mais largas, mais dispersas e menos sobrepostas quando comparado ao espectro do BRS capiaçu (Figura 6), demonstrando uma maior variabilidade genética, fornecendo o modelo mais robusto no momento da calibração.

As diferenças espectrais entre o milho e o capim elefante *BRS capiaçu* sugerem variações na composição química entre os materiais, podendo analisar parâmetros nutricionais com o auxílio da multivariada.

Metrohm (2013) afirma que se pode encontrar bandas de ligações O-H em diversas regiões, sendo elas 1420-1600 e 1800-2200 nm. As regiões 800-1420; 1600-1800 e 2200-2500 encontra-se as ligações C-H e as ligações de N-H pode-se encontrar nas regiões 800-1100; 1420-1600 e 1800 a 2200 nm.

Segundo Ramos-Diaz et al. (2019), a região de 1450 e 1940 nm, possui bandas de ressonância das ligações O-H, estando ligadas à água e aos carboidratos. Além disso, Lima et al. (2022) também encontraram bandas de O-H na região de 1400-1500 nm.

Segundo Coqueiro et al. (2024) encontraram bandas de O-H nas regiões de 1400-1500 e 1900-2000 nm, bandas de C-H na região de 1800 nm e ligações de N-H nas regiões de 2200-2300 nm.

A região de comprimento de onda dos espectros, de 1000 a 2500 nm, possibilitou selecionar seis (6) bandas com absorbâncias máximas em 1420, 1800, 1900, 2100, 2200 e 2300 nm. De acordo com Cardoso (2024), espectros que apresentam bandas largas em formato de sino são indicativos de ligações associadas a lipídeos, proteínas e água.

As bandas localizadas entre 1920 e 1450 nm estão associadas às ligações oxigênio-hidrogênio, relacionadas à presença de carboidratos e água. Nas regiões de 1570-1500 nm e 2070-2050 nm, observa-se a presença de ligações nitrogênio hidrogênio, conforme relatado por Chakravartula et al. (2019), Ramos-Diaz, Rinnan e Jouppila (2019) e (Wang, Wu e Kamruzzaman., 2022).

Monrroy et al. (2017) identificaram bandas em 1168, 1216, 1436, 1472, 1608, 1680 e 1768 nm, e Arzani et al. (2015) observaram regiões entre 1400-1550 e 1500-1650 nm compostas por ligações C-H, associadas à presença de FDN. Ainda segundo Monrroy et al. (2017), as regiões 1504, 1590 e 1696 nm indicam a presença de FDA. Nousiainen et al. (2004) verificaram, nas bandas 1930 e 2200 nm, ligações C-H e O-H indicativas de lignina.

Badaró et al. (2022) e Lima et al. (2019) afirmam que os picos encontrados em 1730, 1770 e 2310 nm estão equivalentes aos lipídios, sendo relacionados ao primeiro harmônico do estiramento carbono-hidrogênio.

Conforme estabelecido por Skoong, Holler e Niemman (2009) geralmente as bandas espectrais ligadas ao NIRS são largas, exibindo sobreposições as quais são competentes na quantificação de compostos que detenham grupos funcionais com H-C,

N e O em substituição a sua identificação. Essa característica reforça a aplicabilidade do NIRS para análises de materiais com composição semelhante, mas variações sutis em constituintes.

Mediante os espectros originados pelo NIRS (Figura 6) constata-se que os espectros exibiram a mesma forma, porém com variações de absorbâncias. Dessa forma, a sobreposição das curvas de reflectância em um determinado comprimento de onda sugere que os materiais pertencem a uma mesma categoria, compartilhando características gerais como a sua composição química, as quais são semelhantes (Rodrigues, 2018). Essa similaridade ocorre porque os materiais analisados possuem a mesma composição bromatológica, se diferenciando em relação a quantidades de constituintes que cada alimento possui.

4.3 Modelos de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS)

A abordagem de regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) consiste em uma técnica estatística multivariada empregada para analisar as relações entre múltiplas variáveis independentes e uma ou mais variáveis dependentes (IBM CORPORATION, 2024). Visto que, é comumente utilizado para elaborar o modelo de multivariada selecionado tendo como pilar dois conjuntos de dados amostrais do mesmo material a ser estudado (Pereira, 2019). Essa correlação existe entre os dados de referências (dados de bancada) e os dados de calibração por PLS para determinação de MS, matéria mineral, Umidade, FDA, FDN, FDNcp, PB, EE e lignina das forragens podem ser visualizadas na Tabela 3 para o milho e para o BRS capiaçu.

Os ajustes dos modelos aprimorados, métodos de pré-processamento de dados estão expostos na Tabela 3 para milho e para capim elefante BRS capiaçu.

Tabela 3. Dados de ajustes para calibração e validação da composição bromatológica do milho e do BRS capiaçu usando o algoritmo PLS com espectroscopia do infravermelho próximo.

			Calibração (56 amostras)				Validação (24 amostras)			
Pré-			R	RMSE	RPD	RER	R	RMSE	RPD	RER
VL	processamento									
MILHO										
MS	6	Normalização	0,8931	0,4813	2,2233	7,1163	0,7711	0,6782	1,5457	5,0499
MM	5	Nenhum	0,7177	0,9719	1,4361	8,4688	0,8549	0,8535	1,4780	6,9594
Umid	4	1 derivada	0,7083	0,7321	1,4167	4,6781	0,6394	0,8080	1,0261	3,0699
FDN	5	Nenhum	0,7853	4,0044	1,6151	7,3602	0,8909	1,6824	2,0997	7,1236
FDNcp	5	Nenhum	0,8977	2,9999	2,2698	9,8877	0,8542	2,5687	1,7794	6,8108
FDA	4	Nenhum	0,8142	3,8903	1,7225	7,3496	0,8316	2,6359	1,5370	5,4393
LIG	3	Nenhum	0,6388	1,0463	1,2998	5,3032	0,7816	0,5834	1,5998	7,1527
PB	8	Nenhum	0,9292	0,6051	2,7055	9,0829	0,8859	0,5767	2,1510	9,1712
EE	5	Nenhum	0,5401	0,2613	1,1882	5,7219	0,6063	0,1983	1,2569	6,1197
BRS CAPIAÇU										
MS	5	2 derivada	0,8179	2,2433	1,7380	7,4125	0,7344	2,8923	1,4450	5,1769
MM	7	Nenhuma	0,7253	1,5450	1,4526	6,4381	0,7478	1,2825	1,3658	5,2990
Umid	7	2 derivada	0,8933	0,6755	2,2246	9,4399	0,7092	0,9972	1,3890	5,7763
FDN	1	Nenhum	0,0659	3,6792	1,0022	5,0093	0,0197	1,9374	0,9607	4,4726
FDNcp	1	Nenhum	0,0366	4,8638	1,0007	6,3966	0,2766	3,6173	1,0085	4,2555
FDA	1	2 derivada	0,5350	2,7634	1,1836	6,6135	0,5475	2,1322	1,0844	4,3794
LIG	8	Nenhum	0,7033	1,9660	1,4067	4,9727	0,6784	1,4033	1,3590	5,1723
PB	7	SNV	0,8933	0,6755	2,2246	9,4399	0,7092	0,9972	1,3890	5,7763
EE	1	SNV	0,2960	0,4001	1,0469	3,9087	0,3694	0,2589	1,0729	4,6527

VL: Variáveis latentes; R: Coeficiente de correlação; RMSE: erro quadrático médio; RPD: razão do desempenho para desvio; RER: Razão do Erro de Alcance; MS: Matéria seca; MM: Matéria mineral; Umid: Umidade; FDN: Fibra insolúvel em detergente neutro; FDNcp: Fibra insolúvel em detergente neutro corrigido para cinzas e proteínas; FDA: Fibra insolúvel em detergente ácido; LIG: Lignina; PB: Proteína bruta e EE: Extrato etéreo.

Os modelos de calibração tiveram sua precisão avaliada com base nos coeficientes de correlação (R), Erro quadrado médio (RMSE), Desvio predito residual (RPD) e Razão de Erro de Intervalo (RER), como mostra a Tabela 3.

Os valores de coeficientes de correlação (R) mais próximos de 1 e os baixos valores de erro quadrado médio (RMSE) demonstram que a predição do modelo foi eficiente para MS, MM, FDN, FDNcp, FDA e PB do milho (Tabela 3). Para o BRS

Capiaçú, a predição também foi eficiente para MS, MM, Umid, PB e LIG, sendo que para lignina os valores de R foram de 0,70 e 0,67, respectivamente (Tabela 3). Esses resultados estão de acordo com Sayes et al. (2005), que relatam que valores de R iguais ou superiores a 0,66 indicam que o modelo é aceitável.

Para o milho, os valores de R observados foram de 0,70 e 0,63; para a variável lignina 0,63 e 0,78 e 0,54 e 0,60 para extrato etéreo (EE), para calibração e validação, respectivamente. Já para o BRS Capiaçú, as variáveis apresentaram, para FDNcp, valores de R de 0,03 e 0,27; para EE de 0,29 e 0,36; para FDN, de 0,06 e 0,01; e para FDA, de 0,53 e 0,54, para calibração e validação, respectivamente, apresentando valores baixos, não resultando em um bom modelo de predição, conforme descrito por Sayes et al. (2005).

Lima et al. (2022) avaliando nova aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo e médio para prever constituintes fenólicos, flavonoides totais, ácido gálico, kaempferol, pirocatequina, quercetina e diferentes testes antioxidantes da própolis vermelha utilizando quimiometria encontraram valores de R iguais ou superiores a 0,7, indicando que o modelo predito era adequado.

Rech e Werner (2024) estudando modelos de calibração multivariada para a predição dos teores de proteína bruta (PB), fibra insolúvel em detergente neutro (FDN), fibra insolúvel em detergente ácido (FDA) e digestibilidade in vitro da matéria orgânica do azevém utilizando a técnica NIRS encontrou valores de $R > 0,9$ demonstrando que o modelo utilizado é ideal para predição.

A Umidade e a Lignina do milho, apresentaram bons valores para validação, mas não para calibração, podendo ter acontecido um fenômeno chamado de underfitting, que segundo Associação Brasileira de Ciência de dados (2020) diz que, a underfitting ocorre quando o modelo não aprende o suficiente sobre os dados estudados não conseguindo capturar a sua complexidade, ocasionando um erro nos dados de treinamento e validação.

O desvio predito residual (RPD) é outro indicador essencial para avaliar o desempenho dos modelos. No presente estudo, para o milho, as variáveis MS, MM, FDN, FDNcp, FDA, LIG, PB e EE do milho apresentaram valores de RPD entre 1,18 e 2,26, sendo considerados bons modelos de predição. Destaca-se que a PB do milho que atingiu valor de RPD de 2,70 na calibração e 2,15 na validação (Tabela 3), classificados como excelentes, de acordo com Viscarra et al (2006). Para o BRS Capiaçú (Tabela 3), as variáveis MS, MM, Umidade, LIG e PB também apresentaram valores de RPD dentro dessa faixa, indicando bom desempenho. Contudo, para FDN, FDNcp, FDA e EE do capiaçu, os valores de RPD variaram de 0,96 a 1,08 (Tabela 3), e, valores de $RPD \leq 1$

indicam que os modelos de calibração e validação não são adequados (Viscarra et al., 2006).

Rech e Werner (2024) utilizaram a espectroscopia no infravermelho próximo e calibração multivariada para determinação da composição nutricional de azevém, encontraram valores de RPD variando de 3,80 a 6,33, estando dentro dos valores considerados como bons modelos. Segundo Williams e Sobering (1993) valores de RPD iguais a 2 são satisfatórios e o valor igual ou maior a 10 é o ideal. Dado que, Chang et al. (2001) adotaram o Desvio predito residual (RPD) para analisar a desempenho de predição de espectros de NIRS, onde modelos com $RPD > 2$ podem ser considerados excelentes.

Um parâmetro fundamental de ajuste é a Razão de Erro de Intervalo (RER) sendo uma métrica utilizada para avaliar a qualidade preditiva dos modelos selecionados, sendo que neste trabalho os valores encontrados variam de 3,06 a 9,88 RER (Tabela 3), em concordância com os valores descritos por Williams & Sobering (1993) afirmando que $RER < 3$ não é eficaz para predizer, valores iguais > 3 e 10 o modelo é bom e valores > 10 o modelo é excelente.

Segundo Rech e Werner (2024) identificaram valores de RER variando de 3,80 a 6,33 sendo um modelo eficaz de predição.

No que se refere à variável Umidade do milho (Tabela 3), apesar de o coeficiente de correlação (R) apresentar um valor considerado satisfatório para a calibração, o desempenho do modelo na validação não foi eficiente. Além disso, o índice RPD na validação permaneceu abaixo do limiar mínimo recomendado para a utilização do modelo em aplicações preditivas ($RPD < 1,3$).

Já para a variável Extrato Etéreo do milho (Tabela 3), os valores obtidos nas etapas de calibração e validação não foram adequados. Esses resultados indicam que o modelo não é confiável, pois não apresenta robustez estatística suficiente para fins preditivos.

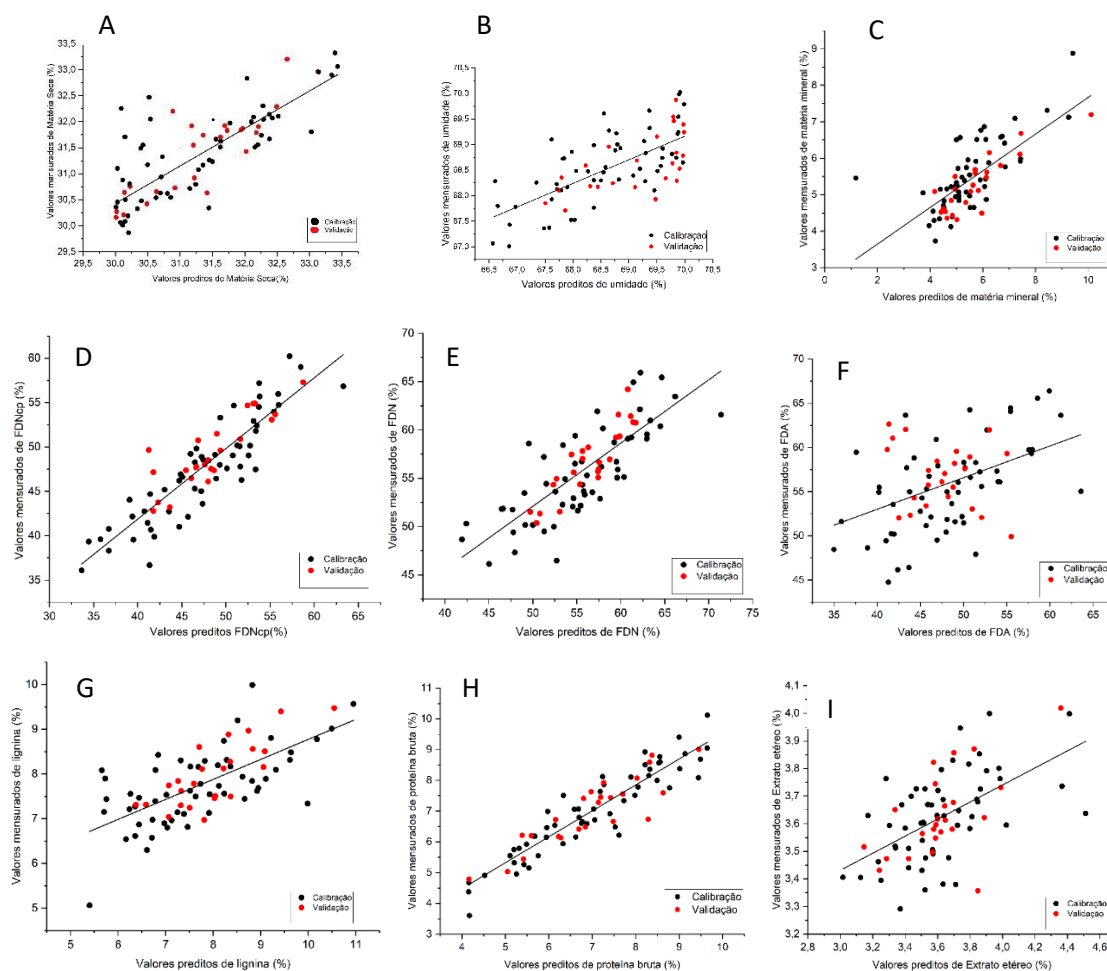
Ao analisar os resultados obtidos para o capiaçu (Tabela 3), observa-se que as variáveis FDN e EE apresentaram bons valores de RER tanto na calibração quanto na validação. Já a variável FDA demonstrou desempenho satisfatório, com bons valores de RPD e RER. No entanto, para os demais parâmetros, os resultados não foram consistentes, indicando que o modelo não foi eficiente na predição dessas variáveis.

Por fim, as variáveis MS, MM, FDN, FDNcp, FDA e PB do milho apresentaram resultados satisfatórios para todos os parâmetros de calibração e validação (R, RMSE, RPD e RER), demonstrando bons modelos de predição. Para o BRS Capiáçu, as variáveis

MS, MM, Umid, LIG e PB também obtiveram desempenho satisfatório nos mesmos parâmetros (Tabela 3).

A correlação entre os valores de referência e os valores previstos pelos modelos aprimorados é apresentada nos gráficos de dispersão das Figuras 7 (milho) e 8 (BRS Capiçu). Os gráficos de dispersão permitem avaliar a relação entre os valores previstos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente, fornecendo uma representação visual da qualidade dos modelos.

Figura 7: Relação entre os valores mensurados e os valores previstos pelos modelos de calibração ajustados por PLS aplicando dados de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) do milho.



O gráfico de dispersão evidencia a correlação entre os valores reais e previstos, sendo a reta de 1:1 o parâmetro ideal. Quanto mais próximos os pontos estiverem da reta, maior é a concordância entre o valor previsto e o valor real.

As variáveis que não possuem um bom modelo de predição, como a Umidade (Gráfico B), LIG (Gráfico G) e EE (Gráfico I) do milho (Figura 7), assim como para o FDN (Gráfico M), FDNcp (Gráfico N), FDA (Gráfico O) e o EE (Gráfico R) do capiaçu (Figura 8), os quais apresentaram maior complexidade no ajuste, embora para alguns parâmetros tenha atingido os valores ideais não conseguiu um bom modelo de calibração.

Nos gráficos M (FDN), N (FDNcp) e O (FDA) do capiaçu, observa-se que os pontos estão amplamente dispersos em relação à reta de referência 1:1, sem apresentar um padrão claro de correlação entre os valores previstos pelo NIRS e os valores mensurados em bancada. pois os pontos estão muito afastados da reta de tendência, indicando que o modelo pode estar subestimando ou superestimando alguns valores. Essa dispersão se reflete nos baixos valores de R, RPD e RER (Tabela 3), confirmando a limitação dos modelos na previsão precisa dessas variáveis.

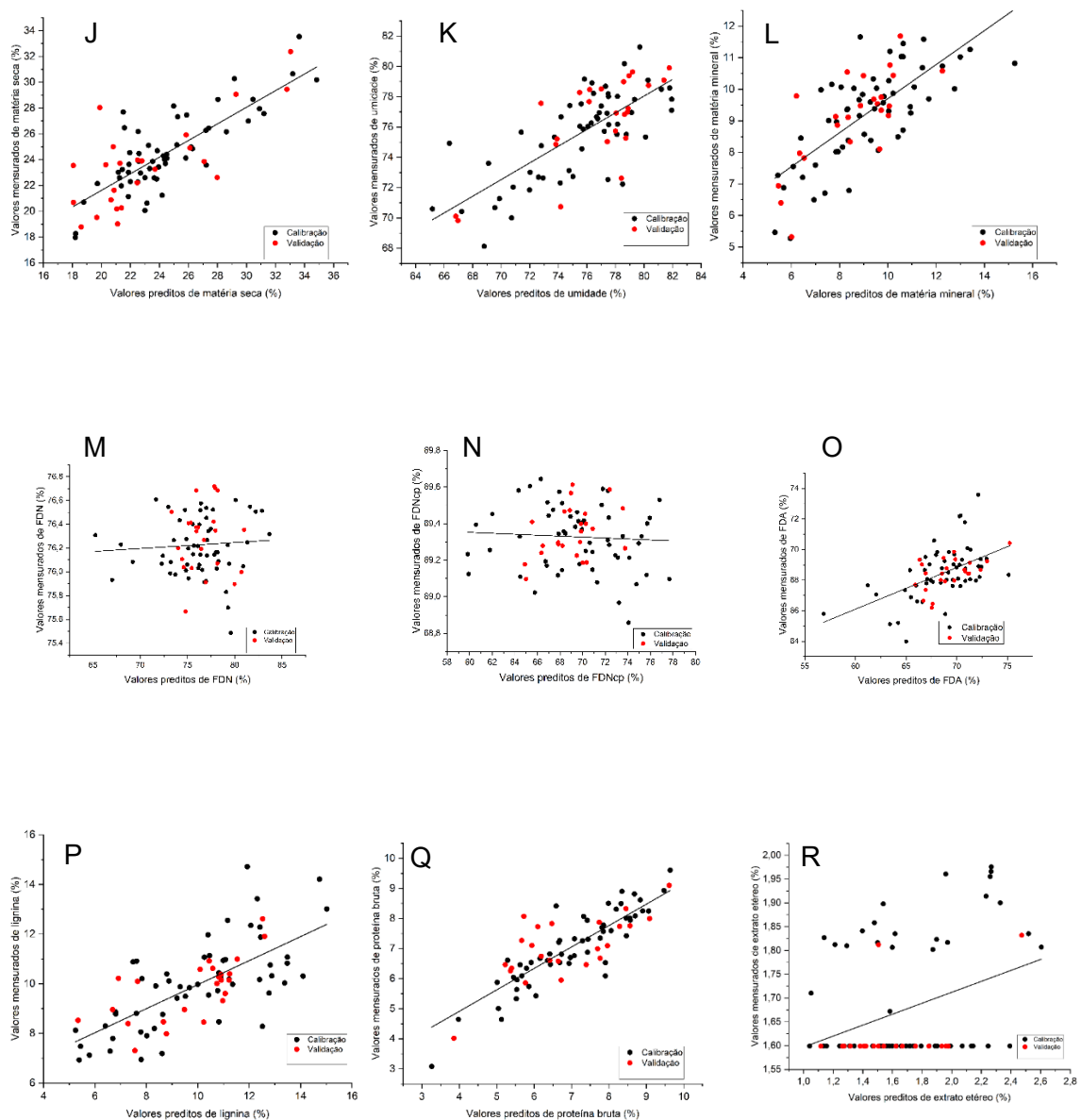
A dificuldade em prever os valores de FDN e FDA do capiaçu utilizando o modelo PLS associado ao NIRS pode estar relacionada às características intrínsecas da planta, que apresenta elevada fração fibrosa composta por celulose, hemicelulose e lignina. Esses constituintes variam conforme a idade de corte, o manejo e as condições ambientais, resultando em uma matriz altamente heterogênea. Além disso, a presença de contaminantes, como cinzas e proteínas, interfere na precisão da predição. Quanto ao FDNcp, embora os contaminantes de cinzas e proteínas sejam removidos, a própria heterogeneidade da fibra ainda pode justificar a baixa capacidade preditiva observada. Essa complexidade química e estrutural compromete a definição de uma assinatura espectral clara no NIR, dificultando a calibração e tornando o modelo menos robusto.

O extrato etéreo (EE), tanto no milho quanto no capiaçu, é um componente presente em baixa concentração nas amostras, independentemente da idade da planta, o que talvez tenha dificultado a sua quantificação por meio do NIRS. Sugerindo assim, um possível percalço para as técnicas que utilizam a estereoscopia de infravermelho próximo na calibração de compostos presentes nas amostras contendo menores proporções de alguns nutrientes como demonstrado neste estudo.

Ao observar a tendência dos dados (Figura 7 e Figura 8), demonstram como os valores mensurados e preditos estão correlacionados. Visto que, o modelo está ajustado quando os pontos estiverem mais próximo da reta, indicando uma maior previsão. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos que representam as seis variáveis que obtiveram um bom modelo de calibração do milho na Figura 7 (Gráficos A, C, D, E, F e H) e cinco variáveis do BRS capiaçu Figura 8 (Gráficos J, K, L, P e Q).

Os parâmetros de avaliação desses modelos indicaram que se pode realizar paralelamente três análises da composição do milho (Figura 7), indicando o valor de FDNcp do milho (Gráfico E), que manualmente só podem ser mensurados após várias etapas separadamente no laboratório, obtendo o valor real do FDNcp da amostra.

Figura 8: Relação entre os valores mensurados e os valores previstos pelos modelos de calibração ajustados por PLS aplicando dados de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) do capim elefante BRS capiaçu.



Esses gráficos de dispersão são essenciais nas análises dos modelos escolhidos, são cruciais na avaliação dos ajustes do modelo, verificando como os valores reais e os

preditos se comportam em relação a reta de tendencia. Os gráficos também auxiliam na identificação de possíveis tendencias e padrões que ocorrem em cada variável, facilitando a melhor compreensão dos dados quando comparado aos valores de R, RMSE, RER e RPD.

Os modelos escolhidos permitem que seis análises da composição bromatológica do milho Figura 7 (Gráficos A, C, D, E, F e H) e cinco variáveis do BRS capiaçu Figura 8 (Gráficos J, K, L, P e Q), os quais são indicadores de qualidade dos alimentos sejam quantificadas de forma ágil e simplificada por intermédio do uso de métodos de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). Dessa forma, os modelos quimiométricos podem ser implementados no dia a dia dos laboratórios de maneira eficiente como uma análise rotineira para verificar a qualidade do milho e do BRS capiaçu.

V CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) associada à PLS para prever parâmetros nutricionais do milho e do BRS Capiacu no ponto de ensilagem. Os modelos foram eficientes para prever MS, MM, FDN, FDNcp, FDA e PB no milho, e MS, MM, UMID, LIG e PB no capiaçu. Contudo, a predição de UMID, LIG e EE no milho foi insatisfatória, assim como FDN, FDNcp, FDA e EE no capiaçu.

A Umidade e a Lignina do milho, apresentaram bons resultados na validação, mas não na calibração, possivelmente em função do fenômeno conhecido como underfitting, quando o modelo não aprende adequadamente a complexidade dos dados, gerando erros no treinamento e validação.

As dificuldades de predição das frações FDN, FDNcp e FDA do BRS capiaçu podem decorrer da alta composição fibrosa, presença de contaminantes e heterogeneidade estrutural da planta, que prejudicam a modelagem, mesmo após remoção dos contaminantes cinzas e proteínas. A baixa concentração de EE dificultou sua quantificação em ambas as forragens.

Apesar do NIRS ter simplicidade da preparação e ser uma técnica ecológica, os modelos desenvolvidos são válidos apenas para milho e capiaçu no ponto de ensilagem, não podendo ser aplicados a outras forragens ou estágios de conservação.

Portanto, são necessários estudos complementares para o desenvolvimento de modelos mais robustos e abrangentes, capazes de prever com maior acurácia uma maior variedade de forragens e em diferentes pontos de maturação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, P. F. et al. Qualidade bromatológica da silagem do capim BRS Capiacu com o uso de aditivos sob diferentes intervalos de corte. *Revista Foco*, v. 17, n. 12, p. 1–19, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n12-109.
- ALVES, J. P. Potencial forrageiro das cultivares BRS Kurumi e BRS Capiacu. 2021. 95 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.
- ARZANI, H. et al. Estimating nitrogen and acid detergent fiber contents of grass species using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Journal of Rangeland Science*, v. 5, n. 4, p. 238–245, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DE DADOS. Overfitting e underfitting em machine learning, 2020. Disponível em: <https://abracd.org/2020/08/21/overfitting-e-underfitting-em-machine-learning/>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- BADARÓ, A. T. et al. Near infrared techniques applied to analysis of wheat-based products: recent advances and future trends. *Food Control*, p. 109115, 2022.
- BUSO, W. H. D. et al. Produção e composição bromatológica da silagem de híbridos de milho sob duas alturas de corte. *Revista de Agricultura Tropical, Cassilândia-MS*, v. 5, n. 4, p. 74–80, out./dez. 2018. ISSN 2358-6303.
- CARDOSO, K. L. R. Discriminação de queijos minas artesanais quanto à origem geográfica utilizando técnicas espectroscópicas e cromatográficas associadas à quimiometria. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2024.
- CARVALHO, A. F. G. Caracterização e relações entre caracteres agronômicos de milho e bromatológicos da silagem no Sudoeste do Paraná. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.
- CLIMATE-DATA.ORG. Clima Itapetinga: temperatura, tempo e dados climatológicos Itapetinga. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia/itapetinga-1071/>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- CLIMATEMPO. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Ruy Barbosa, BA. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/5516/ruybarbosa-ba>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- CLIMATEMPO. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Itaberaba, BA. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/914/itaberaba-ba>. Acesso em: 29 abr. 2025.

CHANG, C.-W. et al. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 480–490, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x>.

CHAKRAVARTULA, S. S. N. et al. Evaluation of drying of edible coating on bread using NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, v. 240, p. 29–37, 2019.

COQUEIRO, J. S. et al. Ensuring authenticity of cinnamon powder: Detection of adulteration with coffee husk and corn meal using NIR, MIR spectroscopy and chemometrics. *Food Control*, v. 166, p. 110681, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110681>.

CRUZ, J. C. Cultivares de milho para silagem. In: CONGRESSO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE ZOOTECNIA, 1998, Viçosa. Anais [...]. Viçosa: [s.n.], 1998.

CRUZ, J. C. et al. Produção e composição bromatológica de cultivares de milho para silagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 25., 2004, Cuiabá, MT. Anais [...]. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2004.

CRUZ, J. C. et al. Produção e composição bromatológica de cultivares de milho para silagem. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2005. (Comunicado Técnico, 117). ISSN 1679-0162.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; GONTIJO NETO, M. M. Milho para silagem. EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo/milho-para-silagem>. Acesso em: 4 jan. 2025.

DETMANN, E.; COSTA E SILVA, L. F.; CIPRIANO ROCHA, G.; PALMA, M. N. N.; RODRIGUES, J. P. P. Métodos para análise de alimentos. 2. ed. Viçosa: Produção Independente, 2021. 350 p.

GELADI, P., & KOWALSKI, B. R. (1986). Partial least-squares regression: a tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 185, 1–17. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(86\)80028-9](https://doi.org/10.1016/0003-2670(86)80028-9).

GOMES, L. M. et al. Avaliação química e digestibilidade do capim-elefante BRS Capiacu em diferentes estádios de corte. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 39, n. 4, p. 1601-1612, 2018. DOI: 10.5433/1679-0359.2018v39n4p1601.

GONTIJO NETO, M. M., PENNA, L. F. M., & ALVES, L. F. (2020). *Avaliação agrônômica de cultivares de milho para silagem*. Circular Técnica 262. Embrapa Milho e Sorgo. Recuperado de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1122233/1/Circ-262.pdf>

HOU, S.; WENTZELL, P. D. Regularized projection pursuit for data with a small sample-to-variable ratio. *Metabolomics*, v. 10, n. 4, p. 589–606, 2014.

IBM BRASIL. Overfitting: o que é e como evitar. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/overfitting>. Acesso em: 21 abr. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Médias climatológicas de Itaberaba - Bahia (1981–2010), 2020. Disponível em: <https://www.amantesdotempo.com.br/2020/11/medias-climatologicas-de-itaberaba.html>. Acesso em: 29 abr. 2025.

JOBIM, C. C. et al. Avaliação da qualidade da silagem. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, p. 32-44, 2007.

JOBIM, C. C., SILVA, S. C., & SILVA, F. C. (2017). Produção e qualidade da silagem de milho. *Embrapa Milho e Sorgo*. Recuperado de: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1130009/1/COT-261-2020.pdf>

KENNARD, R. W.; STONE, L. A. Computer aided design of experiments. *Technometrics*, v. 11, p. 137-148, 1969.

LELIS, D. L. Produção de silagens de capim-elefante BRS Capiaçú sob diferentes estratégias de manejo, tratadas com inoculantes microbianos. 2021. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

LIMA, A. B. S. de; LOPES, J. S.; BATISTA, A. S.; FERRÃO, S.; SANTOS, L. S. Espectroscopia no infravermelho próximo associada a redes neurais artificiais para detecção de fraude em canela em pó. In: ENCONTRO NACIONAL E CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ANALISTAS DE ALIMENTOS, 21., 2019, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: [s.n.], 2019.

LIMA, A. B. S. et al. Spectroscopy NIR and MIR toward predicting simultaneous phenolic contents and antioxidant in red propolis by multivariate analysis. *Food Chemistry*, v. 367, p. 130744, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130744>.

LOPES, R. A. G., PEREIRA, M. A., & SILVA, M. A. S. (2021). Produção de silagem de capim-elefante BRS Capiaçú: influência da idade de rebrota e altura de resíduo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(6), 413–420. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p413-420>

MAPCHART. Brazil municipalities – MapChart. Disponível em: <https://www.mapchart.net/brazil-municipalities.html>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MATOS, M. E. L. et al. Valor nutricional da lavoura de milho para silagem. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFNMG, 9., 2021, Teófilo Otoni. Anais [...]. Teófilo Otoni: Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <link>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MEDEIROS, S. R.; MARINO, C. T. Proteínas na nutrição de bovinos de corte. In: EMBRAPA GADO DE CORTE. Proteínas na nutrição de bovinos de corte. 3. cap. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 40.

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. *Agronomy Journal*, Madison, v. 89, n. 3, p. 129-137, 1997. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900030001x.

METROHM. Printed in Switzerland by Metrohm AG. CH-9101 Herisau, Switzerland. 8.108.5026EN – 2013-02.

MONÇÃO, F. P. et al. Productivity and nutritional value of BRS Capiapu grass (*Pennisetum purpureum*) managed at four regrowth ages in a semiarid region. *Tropical Animal Health and Production*, v. 52, n. 1, p. 235-241, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02012-y>.

MONRROY, M. et al. Determination of *Brachiaria* spp. forage quality by near-infrared spectroscopy and partial least squares regression. *Journal of the Chilean Chemical Society*, v. 62, n. 2, 2017.

MULLIGAN, F. J., O'MARA, F. P., & MURPHY, J. J. (2002). The effect of forage species and stage of maturity on the chemical composition and digestibility of silage. *Animal Feed Science and Technology*, 98(3–4), 233–246. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00035-0).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Nutrient requirements of dairy cattle. 7. ed. Washington, DC: National Academy Press, 2001. 381 p.

NERES, R. P.; FIGUEIREDO, S. M.; GOMES, G. O.; VALE, L. F. S.; VIANA, M. F. R.; LIMA, J. B. M. P. Avaliação do teor de matéria seca do BRS-Capiapu para determinação do momento de corte para ensilagem. Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG). *IF Integra*, 2023.

NOUSIAINEN, J.; AHVENJÄRVI, S.; RINNE, M.; HELLÄMÄKI, M.; HUHTANEN, P. Prediction of indigestible cell wall fraction of grass silage by near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Feed Science and Technology*, v. 115, p. 295-311, 2004.

NUSSIO, L. G. (1992). Composição bromatológica de cultivares de milho para silagem. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 21(3), 357–362. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/636/63621301007.pdf>.

NUSSIO, L. G., MANZANO, J. L., & EVANGELISTA, A. R. (2001). Silagem de milho: qualidade e manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 30(6), 1814–1823. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/636/63617120003.pdf>.

OLIVEIRA, C. A. et al. Produção e qualidade do capim-elefante BRS Capiapu em diferentes alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, MG, v. 45, n. 9, p. 512-520, 2016. DOI: 10.1590/S1806-92902016000900004.

PAULA, P.R.P; NEIVA JÚNIOR.A.P; SOUZA.W.L; ABREU.M.J.I; TEIXEIRA.R.M.A; CAPPELLE.E.R; TAVARES.V.B. Composição bromatológica da silagem de capim-elefante BRS Capiapu com inclusão de fubá de milho. *PUBVET*, v. 14, n. 10, p. 148, 2022. Disponível em: <https://ojs.pubvet.com.br/index.php/revista/article/view/354>. Acesso em: 10 ago. 2025.

PEREIRA, K. P., SILVA, M. A. S., & SANTOS, M. S. (2021). Avaliação do teor de matéria seca do capim BRS Capiapu para produção de silagem. *Revista Brasileira de*

Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(6), 413–420. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p413-420>.

Pioneer. (1993). Silagem de milho. 2. ed. Informe Técnico, 6.

QIU, X., LIU, J., & ZHANG, L. (2003). Effects of dietary neutral detergent fiber concentration and forage source on performance by dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2045–2053. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73823-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73823-3).

RAMOS-DIAZ, J. M.; RINNAN, Å.; JOUPPILA, K. Application of NIR imaging to the study of expanded snacks containing amaranth, quinoa and kañiwa. *Lwt*, v. 102, n. November 2018, p. 8–14, 2019.

RECH, Â. F., & WERNER, S. S. (2024). Utilização da espectroscopia no infravermelho próximo e calibração multivariada para determinação da composição nutricional de azevém. *Agropecuária Catarinense*, 37(1), 11–14. <https://doi.org/10.52945/rac.v37i1.1781>.

RETORE, M. A., SOUZA, G. B. DE, & PEREIRA, M. A. (2020). Qualidade da silagem do capim-elefante BRS Capiaçú. *Embrapa Gado de Leite*. Recuperado de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1130009/1/COT-261-2020.pdf>

RODRIGUES, G. Seleção de bandas espectrais apoiada pela metaheurística PSO para predição de alumínio trocável de amostras de solo. 2018. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Universidade Federal de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

PEREIRA, A. V.; LEDO, F. J. S.; MORENZ, M. J. F.; LEITE, J. L. B.; SANTOS, A. M. B.; MARTINS, C. E.; MACHADO, J. C. BRS Capiaçú: cultivar de capim-elefante de alto rendimento para produção de silagem. *Embrapa Gado de Leite-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*, 79, ISSN 1678-3131, Juiz de Fora, MG, out. 2016.

PEREIRA, M. M. S. Predição da composição físico-química de gramíneas tropicais e fezes bovinas por meio de NIRs. Itapetinga, BA: UESB, 2019. 55 p. Tese (Doutorado em Zootecnia, Área de Concentração em Produção de Ruminantes).

SAYES, W.; MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Biosystems Engineering*, v. 91, n. 4, p. 393-402, 2005.

SILVA, A. S. C. C. et al. Produtividade e digestibilidade da fibra em detergente neutro do capim-elefante cv. BRS Capiaçú aos 60 dias de rebrota. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA; SEMINÁRIO DA PÓS-GRADUAÇÃO, 10.; 2., 2022, Diamantina. Anais [...]. Diamantina: Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Diamantina, 2022.

SILVA E OLIVEIRA, J. Produção de silagem. In: PASTAGEM: principal fonte de volumoso para bovinos. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, Técnicos da OCB, abr. 2017.

SILVA E OLIVEIRA, J. BRS Capiaçú: qual o momento certo para fazer a silagem? Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2023. (Comunicado Técnico, 95). ISSN 1678-3123. e-ISSN 1678-3131.

SILVA, V. J. et al. Composição bromatológica da lavoura de milho para silagem cultivada no norte de Minas Gerais. IF Integra, Salinas, 2023. Instituto Federal do Norte de Minas, Campus Salinas, 2023.

SILVA, A. B. da; SANTOS, E. F. dos; MELO, M. C. Influência da altura de corte na qualidade bromatológica de híbrido de milho. Revista F&T, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 1–7, 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br/influencia-da-altura-de-corte-na-qualidade-bromatologica-de-hibrido-de-milho/>. DOI: 10.5281/zenodo.10358341. Acesso em: 21 maio 2025.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. Princípios de análise instrumental. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

TREMEA, M. G. et al. Produção e qualidade bromatológica de milho silagem produzido sobre diferentes coberturas de inverno. In: SALÃO DO CONHECIMENTO, 2021, Ijuí. Anais [...]. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, 2021.

TURCO, G. M. S. Produção e composição física da planta de milho para silagem, cultivado em dois níveis de adubação, dois espaçamentos entre linhas e duas densidades de plantio. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2011.

VAN SOEST, P. J. Nutritional ecology of the ruminant. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994. 476 p.

VELHO, J. P. et al. Composição bromatológica de silagens de milho produzidas com diferentes densidades de compactação. Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa, MG, v. 36, n. 5, supl., p. 1532-1538, 2007.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; McGLYNN, R. N.; McBRATNEY, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-VIS-NIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma, v. 137, n. 1, p. 70-82, 2006.

WANG, Z. et al. Portable NIR spectroscopy and PLS based variable selection for adulteration detection in quinoa flour. Food Control, v. 138, art. 108970, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108970>.

WILLIAMS, P. C.; SOBERING, D. C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. Journal of Near Infrared Spectroscopy, v. 1, n. 1, p. 25-32, 1993.

YANG, Q. et al. Optimizing near-infrared spectroscopy models for rapid and green detection of crude protein and fat in crop grains using sample set division. ACS Omega, Washington, DC, v. 10, n. 15, p. 14755-14769, 2025. Disponível em: <https://pubs.acs.org/journal/acsodf>. Acesso em: 29 maio 2025.

ZOPOLLATTO, M. et al. Alterações na composição morfológica em função do estágio de maturação em cultivares de milho para produção de silagem. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 38, n. 3, p. 452-461, 2009.