

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 16/01/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until Jan. 16, 2027

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTRÔMETRO NIR PORTÁTIL
COM ANÁLISE DE MICOTOXINAS POR QUIMIOMETRIA

MARIANE ZABOTTO EVANGELISTA

Tese apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Zootecnia como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutor em Zootecnia

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTRÔMETRO NIR PORTÁTIL
COM ANÁLISE DE MICOTOXINAS POR QUIMIOMETRIA

MARIANE ZABOTTO EVANGELISTA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Livio Panhoza Tse

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Zootecnia como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Zootecnia

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2025

E92d

Evangelista, Mariane Zabotto

Desenvolvimento de um protótipo de espectrômetro NIR portátil
com análise de micotoxinas por quimiometria / Mariane Zabotto
Evangelista. -- Botucatu, 2025

106 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu
Orientador: Marcos Livio Panhoza Tse

1. Micotoxícoses. 2. Suínos Alimentação e rações. 3. Análise
espectral Instrumentos. 4. Engenharia de protótipos. 5. Quimiometria.
I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



ATESTADO DE APROVAÇÃO - DEFESA

Atestamos que **MARIANE ZABOTTO EVANGELISTA**, RA nº: ZNP210145, RG nº 480516030, expedido pela SSP-SP/SP, defendeu, no dia 16/01/2025, a tese intitulada **DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESPECTRÔMETRO NIR PORTÁTIL COM ANÁLISE DE MICOTOXINAS POR QUIMIOMETRIA**, junto ao Programa de Pós Graduação em Zootecnia, Curso de Doutorado, tendo sido 'APROVADA'.

Atestamos ainda que a obtenção do título dependerá de homologação pelo Órgão Colegiado competente.

Botucatu, 16 de janeiro de 2025



Documento assinado digitalmente
CLAUDIA CRISTINA MORECI
Data: 28/01/2025 11:20:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

BIOGRAFIA DO AUTOR

Mariane Zabotto Evangelista, nascida em 02 de dezembro de 1991, na cidade de São José do Rio Pardo/SP, filha de Vera Lúcia Zabotto Evangelista e Francisco Donizetti Evangelista, ingressou no curso de Agronegócio da Faculdade de Tecnologia (FATEC), campus de Mococa/SP em março de 2010, e graduou-se em junho de 2013. Em maio de 2016, iniciou curso de especialização (MBA) em Agronegócios da Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), concluindo em julho de 2018. Em março de 2019 iniciou o curso de Mestrado em Produção Animal da Universidade Brasil (UB), campus de Descalvado/SP, concluindo em junho de 2021. Em agosto de 2021, iniciou o curso de Doutorado em Zootecnia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ), campus de Botucatu/SP, na qual é bolsista pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Durante a pós-graduação, atuou na área de tecnologias para qualidade de ingredientes destinados a animais monogástricos e realizou estágio de pesquisa na Universität für Bodenkultur Wien - University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Bioanalytics and Agro-Metabolomics, sob supervisão do Dr. Stephan Freitag. Na área de nutrição de suínos, atuou no desenvolvimento de equipamentos laboratoriais para avaliar micotoxinas em grãos.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Vera Lúcia e Francisco, pela educação amorosa que recebi; e ao meu noivo José Tadeu, pelo apoio em minha caminhada pessoal e profissional.

DEDICO !

AGRADECIMENTOS

À Jesus Cristo, principal companheiro que levo comigo e para o qual dou os primeiros e todos os agradecimentos possíveis por tudo que passei durante esta caminhada acadêmica.

À minha família, pai, mãe e irmãos, pelo alicerce de apoio, parceria e amor para seguir com meus objetivos de vida. Ao meu noivo José Tadeu Aldrigue, pelo amor, ajuda psicológica e parceria técnica no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ - UNESP) e ao Departamento de Produção Animal e Medicina Veterinária Preventiva pelo ensino, estrutura física e humana disponibilizada.

Ao Professor Dr. Marcos Livio Panhoza Tse, pela orientação durante o doutorado, ensinamentos e pela ajuda em todos os processos de execução deste trabalho, desde o projeto inicial até o término.

A todos os funcionários da fábrica de rações, da secretaria de pós-graduação, do setor de suinocultura e do departamento, por todo apoio em todas as atividades que realizei durante o curso.

À Universidade de São Paulo, Escola Superior de “Agricultura Luiz de Queiroz” (ESALQ – USP), Departamento de Ciência do Solo, ao professor Dr. José Alexandre Melo Demattê, aos pós-graduandos de sua equipe e aos funcionários do departamento, pela parceria na coleta de dados para este trabalho, pelo aprendizado e pelo coleguismo.

À University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Áustria, Institute of Bioanalytics and Agro-Metabolomics, Department of Agrobiotechnology, ao Dr. Stephan Freitag, aos pós-graduandos de sua equipe e aos funcionários dos laboratórios e departamento, pela receptividade generosa durante meu estágio no exterior, e por tudo que me ensinaram neste período de 150 dias em que conduzi parte de minha pesquisa.

Aos amigos de grupo de pesquisa, Geyssane de Oliveira, Letícia Ribeiro, Thallyson Taumaturgo, Eduardo Rodrigues, Bernadette Rossiti, Juliana Pereira, Allan Alves e Thais Zullo, pela amizade, aprendizados e ajuda nas atividades experimentais.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos que, direta ou indiretamente colaboraram, meu muito obrigado !

EPÍGRAFE

“O esforço só é expresso em recompensa, quando uma pessoa se recusa a desistir”.

Napoleon Hill

RESUMO GERAL

Micotoxinas são metabólitos tóxicos que ocorrem em diversos grãos e cereais e causam danos à saúde pública e na produção animal, assim como na suinocultura. As técnicas laboratoriais mais utilizadas para analisar micotoxinas são caras e demoradas e métodos/técnicas alternativos podem ser uma opção mais rápida e acessível. O presente trabalho teve o objetivo de desenvolver um protótipo de espectrômetro portátil que utiliza a região do infravermelho próximo (NIR) para analisar micotoxinas em milho moído naturalmente contaminado por meio do modelo quimiométrico, classificando para suínos, as micotoxinas zearalenona (ZEA), deoxinivalenol (DON) e fumonisinas B1+B2 (FUMO) em alta e baixa contaminação (AC, BC, respectivamente). Duzentas e cinquenta e nove amostras de milho de 300 g cada foram utilizadas, sendo que cada uma foi subdividida em cinco subamostras de aproximadamente 15 gramas, resultando em cinco repetições. Os espectros médios foram submetidos ao pré-processamento *Standard Normal Variate* (SNV) e primeira derivada (filtro Savitzky–Golay) e um modelo de análise discriminatória *Partial Least Squares Discriminant Analysis* (PLS-DA) foi desenvolvido para classificar ZEA, DON e FUMO em AC e BC. As amostras foram analisadas em cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS) e os resultados foram utilizados como referência para um modelo de regressão *Partial Least Squares Regression* (PLS-R) desenvolvido. Os limites máximos tolerados (LMT's) utilizados para classificar como AC e BC foram 400 µg/kg para ZEA, 2.000 µg/kg para DON e 5.000 µg/kg para FUMO, segundo IN 160/2022 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA); e 150 ou 100 µg/kg para ZEA (leitões e porcas), 300 µg/kg para DON e 1000 µg/kg para FUMO, segundo níveis praticados a campo para suínos. O modelo apresentou bom desempenho com boa acurácia para ZEA 100 µg/kg, DON 300 µg/kg e FUMO 1000 µg/kg (89,6, 70,3 e 80,3%, respectivamente), boas predições (RMSEP = 5,173, 70,53 e 39,54, respectivamente) e correlação alta e positiva com a técnica LC-MS/MS ($R^2 = 99,59\%$, $95,61\%$ e $99,15\%$, respectivamente). Conclui-se que o modelo possui exatidão elevada para classificar ZEA 100 µg/kg, DON 300 µg/kg e FUMO 1000 µg/kg, atende aos LMT's praticados a campo na suinocultura e pode ser usado na calibração do protótipo e no desenvolvimento de um software para visualização de resultados.

Palavras-chave: espectrômetro portátil; micotoxinas; NIR; quimiometria; suinocultura.

ABSTRACT

Mycotoxins are toxic metabolites that occur in many grains and cereals and cause damage to public health and animal production, as in swine farming. The most common laboratory techniques used to analyze mycotoxins are expensive and time-consuming and alternative methods/techniques may be a faster and more affordable option. The present research aimed to develop a portable spectrometer prototype that uses the near infrared region (NIR) to analyze mycotoxins in maize milled naturally contaminated through chemometric model, classifying to swine, the mycotoxins zearalenone (ZON), deoxynivalenol (DON) and fumonisins B1+B2 (FUMO) as high and low contamination (HC, LC, respectively). Two hundred and fifty-nine maize samples of 300 g each were used, and each of it was subdivided into five subsamples of approximately 15 grams, resulting in five replications. The average spectra were subjected to Standard Normal Variate (SNV) and first derivative (Savitzky–Golay filter) preprocessing and a Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) model was developed to classify ZEA, DON and FUMO into AC and BC. Samples were analyzed in liquid chromatography coupled to mass spectrometry (LC-MS/MS) and the results were used as a reference for a Partial Least Squares Regression (PLS-R) model developed. The maximum tolerated limits (LMT's) used to classify HC and LC were 400 µg/kg for ZON, 2000 µg/kg for DON and 5000 µg/kg for FUMO, according to IN 160/2022 of the National Health Surveillance Agency (ANVISA); and 150 or 100 µg/kg for ZON (piglets and sows), 300 µg/kg for DON and 1000 µg/kg for FUMO, according field practice in swine farming. The model performed well with good accuracy for ZEA 100 µg/kg, DON 300 µg/kg and FUMO 1000 µg/kg (89,6, 70,3 and 80,3%, respectively), good predictions (RMSEP = 5.173, 70.53 and 39.54, respectively) and high and positive correlation with the LC-MS/MS technique ($R^2 = 99,59\%$, $95,61\%$ e $99,15\%$, respectively). In conclusion, the calibration model has high accuracy to classify ZEA 100 µg/kg, DON 300 µg/kg and FUMO 1000 µg/kg, it's agree with LMT's considered in the field in swine farming and it can be used in the prototype calibration and for development of a software to see the results.

Keywords: portable spectrometer; mycotoxins; NIR; chemometrics; swine farming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

Figura 1: Representação do espectro eletromagnético	34
Figura 2: Tratamento de espectros em módulos com matriz linear	39
Figura 3: Princípio de decodificação espectral eletro-óptica em espectrômetros	39
Figura 4: Módulo NIR-M-R3® com tecnologia DLP e matriz DMD: modelo e tamanho	40
Figura 5: Tratamento de espectros em módulos com matriz de micro espelhos (DMD)	41

CAPÍTULO 2

Figura 1: Desenho esquemático do protótipo de espectrômetro NIR portátil e suas partes funcionais	63
Figura 2: Configuração da posição do módulo NIR fixado dentro do protótipo	66
Figura 3: Espectros brutos (a) e espectros pré-tratados com normalização SNV e correção por primeira derivada (filtro Savitzky-Golay) (b), de 259 amostras de milho	74
Figura 4: Gráficos de taxa de classificação incorreta para ZEA-400 (a), ZEA-150 (b) e ZEA-100 (c)	77
Figura 5: Gráfico de dispersão de amostras em função das distâncias dos pontos no espaço das variáveis originais ao longo dos 17 componentes principais de ZEA-100	81
Figura 6: Gráfico de predições de AC e BC na validação cruzada do modelo PLS-DA para 17 componentes de ZEA-100	81
Figura 7: Correlação entre as variáveis preditoras (dados NIR) e variáveis resposta (dados de referência LC – MS/MS) de ZEA-100 para milho moído	84
Figura 8: Gráficos de taxa de classificação incorreta para DON-2000 (a) e DON-300 (b)	86
Figura 9: Gráfico de dispersão de amostras em função das distâncias dos pontos no espaço das variáveis originais ao longo dos 10 componentes principais de DON-300	89
Figura 10: Gráfico de predições de AC e BC na validação cruzada do modelo PLS-DA para 10 componentes de DON-300	90
Figura 11: Correlação entre as variáveis preditoras (dados NIR) e variáveis resposta (dados de referência LC – MS/MS) de DON-300 para milho moído	92
Figura 12: Gráficos de taxa de classificação incorreta para FUMO-5000 (a) e FUMO-1000 (b)	95
Figura 13: Gráfico de dispersão de amostras em função das distâncias dos pontos no espaço das variáveis originais ao longo dos 15 componentes principais de FUMO-1000	97
Figura 14: Gráfico de predições de AC e BC na validação cruzada do modelo PLS-DA para 15 componentes de FUMO-1000	98
Figura 15: Correlação entre as variáveis preditoras (dados NIR) e variáveis resposta (dados de referência LC – MS/MS) de FUMO-1000 para milho moído	101

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1: Limites máximos tolerados (LMT's) de zearalenona, deoxinivalenol e fumonisinas B1+B2 no milho e seus subprodutos de acordo com a legislação da União Europeia, FAO e ANVISA, em µg/kg	26
--	----

CAPÍTULO 2

Tabela 1: Matérias-primas utilizadas na montagem do protótipo NIR portátil	64
Tabela 2: Parâmetros técnicos de alguns módulos ou espectrômetros miniaturizados disponíveis no mercado	65
Tabela 3: Resultado do modelo PLS-DA para as classes alta (AC) e baixa (BC) contaminação de zearalenona em milho moído, para os LMT's de 400, 150 e 100 µg/kg	79
Tabela 4: Erro de predição (RMSEP) e variância explicada para as variáveis preditora e resposta do modelo PLS-R aplicado para ZEA-100 em milho moído	83
Tabela 5: Resultado do modelo PLS-DA para as classes alta (AC) e baixa (BC) contaminação de deoxinivalenol em milho moído, para os LMT's de 2000 e 300 µg/kg	87
Tabela 6: Erro de predição (RMSEP) e variância explicada para as variáveis preditora e resposta do modelo PLS-R aplicado para DON-300 em milho moído	91
Tabela 7: Resultado do modelo PLS-DA para as classes alta (AC) e baixa (BC) contaminação de fumonisinas B1+B2 em milho moído, para os LMT's de 5000 e 1000 µg/kg	96
Tabela 8: Erro de predição (RMSEP) e variância explicada para as variáveis preditora e resposta do modelo PLS-R aplicado para FUMO-1000 em milho moído .	99

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AAS	Atomic Absorption Spectrometry - Espectroscopia de absorção atômica
AC	Alta contaminação
AMIS	Agricultural Market Information System
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ATP	Adenosina trifosfato
ATR	Attenuated Total Reflectance – Reflectância Total Atenuada
BC	Baixa contaminação
CCD	Cromatografia de camada delgada
C-C	Ligação carbono-carbono
CD	Conjunto de distâncias
CH	Grupo funcional hidrocarboneto
C-H	Ligação carbono-hidrogênio
CH ₂	Grupo funcional metileno
CH ₃	Grupo funcional metil
CHO	Grupo funcional aldeído
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
C-O	Ligação carbono-oxigênio
C=O	Ligação dupla carbono-oxigênio
COO	Grupo carboxilato (carboxila ionizada)
C-O-C	Ligação carbono-oxigênio-carbono
C-O-H	Ligação carbono-oxigênio-hidrogênio
DLP	Digital light processing
DMD	Digital micromirror device
DOM-1	Forma não tóxica de deoxinivalenol
DON	Deoxinivalenol
DRIFT	Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Reflexão Difusa
ELISA	Enzyme linked immunosorbent assay
FAO	Food and Agriculture Organization

FB1	Fumonisin B1
FB2	Fumonisin B2
FN	Falsos negativos
FP	Falsos positivos
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier
FUMO	Fumonisinas
HPLC	High performance liquid chromatography
HSD	Hidroxiesteroide desidrogenase
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry - Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente
IgG	Imunoglobulina G
IgM	Imunoglobulina M
IN	Instrução normativa
InGaAs	Indium Gallium Arsenide
IR	Infravermelho
KBr	Brometo de potássio
LC-MS/MS	Liquid chromatography coupled to mass spectrometry – Cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa
LED	Light Emitting Diodes
LMT	Limite máximo tolerado
LVF	Linear variable filter - Filtro variável linear
MEMS	MicroElectroMechanical Systems - Sistemas microeletromecânicos
MIR	Mid infrared
mRNA	RNA (ácido ribonucleico) mensageiro
NH	Grupo funcional amina
NIR	Near Infrared
NIV	Nivalenol
OH	Grupo funcional hidroxila
OTA	Ocratoxina
PLA	Ácido polilático
PLS-DA	Partial least squares discriminant analysis
PLS-R	Partial least squares regression

PTFE	Politetrafluoroetileno
RMSEP	Root mean square error of prediction
SNV	Standard Normal Variate
S/R	Relação sinal/ruído
TLC	Thin layer chromatography – Cromatografia de camada delgada
USB	Universal serial bus - Porta serial universal
USD	Dólar americano
UV	Ultravioleta
UV-Vis	Ultravioleta-Visível
UV-Vis-NIR	Ultravioleta-visível-infravermelho próximo
VC	Validação cruzada
VF	Verdadeiros falsos
VP	Verdadeiros positivos
WHO	World Health Organization – Organização Mundial da Saúde
ZEA	Zearalenona
ZOL	Zearalenol
ZON	Zearalenone
A	Amperes
Aw	Atividade de água
cm	Centímetros
3D	Tridimensional
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
mg/kg	Miligramas por quilo
MHz	Megahertz
mm	Milímetros
nm	Nanômetros
pH	Potencial hidrogeniônico
ppb	Partes por bilhão
V	Volts
VAC	Volts corrente alternada
VCC	Volts corrente contínua
W	Watts

ZnSe	Seleneto de zinco
µm	Micrômetros
µg/kg	Microgramas por quilo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
Considerações iniciais	18
1. Revisão de Literatura	19
1.1 Fungos	19
1.2 Fungos filamentosos e metabolismo	20
1.3 Micotoxinas	22
1.3.1 Zearalenona	26
1.3.2 Deoxinivalenol	28
1.3.3 Fumonisinias	29
1.4 Análise de micotoxinas	30
1.4.1 Espectroscopia	33
Referências	44
 CAPÍTULO 2 “Protótipo de espectrômetro NIR portátil tem alta exatidão para classificar em alta e baixa contaminação para suínos, as micotoxinas zearalenona, deoxinivalenol e fumonisinias B1 + B2 em milho moído naturalmente contaminado”	58
Resumo	60
Introdução	61
Materiais e Métodos	62
Construção do Protótipo	63
Obtenção de amostras	67
Obtenção dos espectros NIR	68
Quimiometria	69
Validação do modelo de calibração	72
Resultados e discussão	74
Zearalenona	76
Deoxinivalenol	85
Fumonisinias	93
Conclusão	101
Agradecimentos	102
Referências	102
IMPLICAÇÕES.....	106

CAPÍTULO 1

Considerações Iniciais

Micotoxinas são metabólitos secundários produzidos pela biossíntese de fungos filamentosos que acometem grãos e outros ingredientes, em condições favoráveis de temperatura e umidade (Silva et al., 2015). Em geral, a ocorrência das micotoxinas zearalenona, deoxinivalenol e fumonisinas B1 e B2 nas rações causa efeitos negativos nos animais de produção, como má absorção, lesões hepáticas, redução do crescimento, alterações no sistema imune e problemas reprodutivos (Bünzen e Haese, 2006).

Apesar de consolidados no mercado, os métodos de análise de micotoxinas possuem algumas desvantagens, como equipamentos caros e necessidade de equipe especialista para realizar as análises (Pascale e Visconti, 2008). Por isso, pequenos produtores têm dificuldade de acesso a estes testes laboratoriais, o que torna desejável o uso de soluções portáteis.

Nesse sentido, a técnica de espectroscopia de absorção na região infravermelho próximo (NIR – *Near Infrared Spectroscopy*) vem sendo estudada e parece ser uma solução eficiente na identificação de substâncias para diversas áreas, inclusive para a qualidade de ingredientes destinados à alimentação animal (Berardo et al., 2005; Sirisomboon et al., 2013; Wang et al., 2015).

A técnica se baseia na medida de absorção de radiação eletromagnética de comprimentos de onda da região infravermelho próximo (700 a 2500 nm) (Elijah et al., 2018). Os espectrômetros NIR portáteis, em comparação aos NIR's de bancada tradicionais, apresentam menor custo e podem proporcionar curvas espectrais com boa resolução. Tais vantagens fazem dos espectrômetros NIR portáteis os mais escolhidos atualmente pelo mercado laboratorial (Elijah et al., 2018).

Assim como os espectrômetros NIR de bancada, os portáteis promovem análises não-destrutivas, porém com maior facilidade de uso, equipamentos e testes de mais baixo custo, são flexíveis quanto ao local de uso, podendo ser em laboratórios ou no campo (*in loco*), e geralmente não necessitam de pré-preparação de amostras. Além disso, tecnicamente possuem seletor de comprimento de ondas de micro espelhos digitais, que podem conferir maior precisão às leituras espectrais (Rego et al., 2020).

Ao contrário dos seletores de matriz linear, hipotetizamos que aqueles com micro espelhos possuem maior precisão nas leituras espectrais, além de critérios claros de seleção de comprimentos de onda, tornando essa ferramenta mais vantajosa para compor equipamentos de análise de micotoxinas. Hipotetizamos também que os espectros obtidos por meio de um protótipo de espectrômetro NIR portátil desenvolvido utilizando módulo com seletor DMD

1 podem ter qualidade aceitável para compor um modelo quimiométrico classificatório para
2 micotoxinas.

3 Assim, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um protótipo de espectrômetro NIR
4 portátil para análise de zearalenona (ZEA), deoxinivalenol (DON) e fumonisinas B1+B2
5 (FUMO) em milho moído, determinar as características técnicas; desenvolver um modelo
6 quimiométrico para análise classificatória de alta e baixa contaminação para alimentação de
7 suínos; analisar o desempenho do modelo por meio da precisão das leituras e fazer correlação
8 do modelo desenvolvido com o método de referência LC-MS/MS.

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 16/01/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until Jan. 16, 2027

IMPLICAÇÕES

O presente estudo trará contribuições para a comunidade de acadêmica das áreas de nutrição animal, suinocultura, qualidade de alimentos e ingredientes para diversos fins, além de produtores rurais e empresas de tecnologia. O trabalho demonstrou que a criação de um protótipo de espectrômetro NIR portátil com desenvolvimento de modelo quimiométrico para classificação de zearalenona, deoxinivalenol e fumonisinas B1+B2 em alta e baixa contaminação pode trazer uma opção mais acessível ao público interessado em análises de micotoxinas. Além disso, este trabalho permite que produtos tecnológicos para análise de qualidade de alimentos possam ser pensados pela indústria, para uso mais simples e atendimento de demandas pouco sofisticadas.

Na suinocultura, em específico, este trabalho representa um avanço significativo na garantia da segurança e qualidade da alimentação na produção de suínos, já que micotoxinas trazem grandes ameaças à saúde e à produtividade animal.

O uso de dispositivos NIR portáteis pode mitigar os desafios dos atuais métodos baseados em laboratório, que muitas vezes são caros, demorados e exigem equipamentos especializados. Uma solução portátil acelera a tomada de decisões na cadeia de produção de rações e também reduz os custos das análises. Além disso, poderia permitir aos produtores de suínos monitorar a qualidade da alimentação no local e em tempo real, reduzindo assim os riscos de contaminação que levam a perdas econômicas.

A análise rápida de micotoxinas está alinhada com as crescentes demandas regulatórias globais para segurança alimentar, principalmente em países produtores de carne suína. Assim, o protótipo relatado neste trabalho passará por modificações, a fim de melhorar a qualidade dos espectros coletados; e o modelo quimiométrico também passará por atualizações para quantificar (em $\mu\text{g/kg}$) cada micotoxina, a fim de tornar este modelo mais completo para representar a calibração do protótipo e ser usado no desenvolvimento de um software para visualização de resultados.

O protótipo desenvolvido pode ser aplicado ainda, para coleta de espectros em qualquer tipo de alimento, desde que moído. O modelo quimiométrico desenvolvido pode também ser adaptado a diversos limites máximos tolerados de micotoxinas para outras espécies animais. Também pode ser adaptado para outros analitos de interesse, como em análises bromatológicas.