

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THAINÁ HARRIS VIEIRA

**COLORÍMETRO E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA NA
QUANTIFICAÇÃO DE CINZAS EM FARINHA DE TRIGO**

CAMPO MOURÃO

2025

THAINÁ HARRIS VIEIRA

**COLORÍMETRO E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA NA QUANTIFICAÇÃO DE
CINZAS EM FARINHA DE TRIGO**

**Colorimeter and multiple linear regression in the quantification of ash in wheat
flour**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Tecnologia em
Alimentos/PPGTA da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof. Dra. Patrícia Valderrama

CAMPO MOURÃO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira



THAINA HARRIS VIEIRA

COLORÍMETRO E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA NA QUANTIFICAÇÃO DE CINZAS EM FARINHA DE TRIGO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Tecnologia De Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologia De Alimentos.

Data de aprovação: 27 de Novembro de 2025

Dra. Patricia Valderrama, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Juliana Luna Bilheiro Peixoto, Doutorado - Centro Universitário Ingá

Dra. Larissa Naida Rosa, Doutorado - Faculdade Integrado de Campo Mourão (Cei)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/11/2025.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha eterna gratidão a Deus, fonte de força, saúde e coragem, que me permitiu iniciar e concluir este mestrado, mesmo diante das adversidades. Toda honra e glória a Ele.

Agradeço profundamente ao meu esposo Felipe pelo apoio incondicional, pelo amor e por acreditar em mim mesmo quando eu mesma duvidava. Sem você, não teria sido possível concluir esta etapa.

A minha pequena Isabella, meu bem mais precioso, você esteve no meu ventre no início dessa jornada e agora concluímos ela com você no meu colo.

Não poderia deixar de expressar minha imensa gratidão à minha orientadora, Professora Patrícia Valderrama. Sua orientação foi muito mais do que um acompanhamento acadêmico; foi um verdadeiro amparo em momentos decisivos. Sua competência, empatia e dedicação me marcaram profundamente. Para sempre levarei comigo sua generosidade e o carinho de ter tido, além de uma excelente orientadora, uma inspiração.

Registro meu sincero agradecimento à CAPES pelo incentivo à formação acadêmica e científica no país e pelo compromisso com o desenvolvimento da educação de qualidade.

Também agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela estrutura, acolhimento e ambiente propício à pesquisa, que tanto contribuíram para minha trajetória.

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

RESUMO

A farinha de trigo é amplamente consumida e utilizada em diversas aplicações alimentícias, sendo a determinação do teor de cinzas um parâmetro essencial para sua classificação e destinação industrial. Tradicionalmente, essa análise é realizada por meio de métodos laboratoriais consagrados, que demandam elevado tempo. Neste trabalho, desenvolveu-se um método alternativo para a determinação do teor de cinzas em farinha de trigo, baseado em medidas de cor obtidas por colorimetria associadas a modelos de calibração multivariada por regressão linear múltipla (MLR). Foram analisadas amostras com teores de cinzas entre 0,38% e 1,39%, utilizando os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* como variáveis preditoras. A calibração e a validação externa do modelo foram realizadas considerando os parâmetros de mérito: erro médio quadrático de calibração (RMSEC) e de validação (RMSEP), coeficiente de correlação e razão de desempenho do desvio (RPD). Os resultados obtidos demonstraram desempenho satisfatório do modelo, com coeficiente de correlação de 0,958, valores de RMSEC e RMSEP em torno de 0,061 e RPD superior a 4,9. A elipse de confiança indicou, com 95% de confiança, que não há diferença significativa entre as determinações de cinzas realizadas pelo método laboratorial tradicional e pelo método alternativo desenvolvido, o que evidencia a exatidão da proposta. Assim, o método apresentado mostra-se como uma alternativa rápida, de baixo custo e sustentável para a determinação do teor de cinzas em farinha de trigo, contribuindo para a otimização dos processos de controle de qualidade na indústria de moagem.

Palavras-chave: Farinha de Trigo; Colorimetria; Regressão Linear Múltipla; Quimiometria; Cinzas; Controle de Qualidade.

ABSTRACT

Wheat flour is widely consumed and used in various food applications, and the determination of ash content is an essential parameter for its classification and industrial destination. Traditionally, this analysis is performed using established laboratory methods, which are time-consuming and labor-intensive. In this work, an alternative method for determining the ash content in wheat flour was developed, based on color measurements obtained by colorimetry associated with multivariate calibration models using multiple linear regression (MLR). Samples with ash contents ranging from 0.38% to 1.39% were analyzed, using the colorimetric parameters L^* , a^* , and b^* as predictor variables. The calibration and external validation of the model were performed using the merit parameters: mean squared calibration error (RMSEC), validation error (RMSEP), correlation coefficient, and deviation performance ratio (RPD). The results obtained demonstrated satisfactory model performance, with a correlation coefficient of 0.958, RMSEC and RMSEP values around 0.061, and an RPD greater than 4.9. The confidence ellipse indicates, with 95% confidence, that there is no significant difference between the ash determinations obtained using the traditional laboratory method and the developed alternative method, highlighting the accuracy of the proposed method. Thus, the presented method proves to be a fast, low-cost, and sustainable alternative for determining the ash content in wheat flour, contributing to the optimization of quality control processes in the milling industry.

Keywords: Wheat Flour; Colorimetry; Multiple Linear Regression; Chemometrics; Quality control.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo geral	10
2.2	Objetivos específicos	10
3	REVISÃO DA LITERATURA	11
3.1	Farinha de trigo.....	11
3.2	Teor de cinzas na farinha de trigo	12
3.3	Métodos analíticos tradicionais e suas limitações	13
3.4	Colorimetria aplicada a alimentos.....	13
3.5	Quimiometria e regressão linear múltipla (MLR).....	14
4	METODOLOGIA	15
4.1	Coleta de amostras.....	15
4.2	Determinação de cinzas	15
4.3	Determinação da cor.....	15
4.4	Calibração multivariada e validação.....	16
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
6	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	22

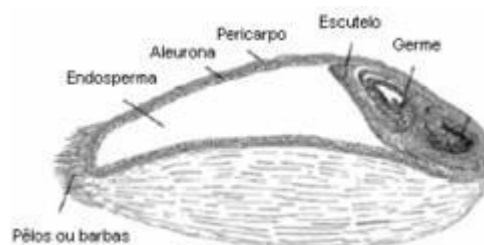
1 INTRODUÇÃO

Os cereais são culturas essenciais para a segurança alimentar mundial, desempenhando um papel estratégico na economia global. Entre eles, o trigo (*Triticum aestivum* L.) destaca-se como um dos alimentos mais cultivados e consumidos, responsável por cerca de 30% da produção de cereais no mundo (FAO, 2023). A farinha de trigo, resultante da moagem do grão, é um ingrediente básico na fabricação de pães, massas, biscoitos e outros produtos de panificação, caracterizando-se por sua composição rica em amido, proteínas, fibras, lipídios e minerais (SHEWRY; HEY, 2015).

A qualidade da farinha de trigo é determinada por uma série de atributos físico-químicos e reológicos, que impactam diretamente as propriedades tecnológicas e sensoriais dos produtos finais (BEKES; WATSON, 2021). Entre esses atributos, o teor de cinzas é um dos principais parâmetros utilizados na classificação da farinha, pois reflete a quantidade de matéria mineral residual após a incineração controlada da amostra (AACC INTERNATIONAL, 2020).

Um teor de cinzas mais elevado está associado a farinhas de extração mais completa, com maior proporção de pericarpo e aleurona, o que influencia a cor, o sabor e o desempenho na panificação (DEFINA *et al.*, 2022; ABDEL-AAL *et al.*, 2011). Conforme ilustrado na Figura 1, a estrutura geral da semente de trigo evidencia camadas externas mais ricas em minerais, o que explica sua relação direta com o teor de cinzas.

Figura 1 - Estrutura geral da semente de trigo



Fonte: Adaptado de McKevith (2004)

O método tradicional de determinação do teor de cinzas, baseado na gravimetria após incineração em mufla a altas temperaturas, demanda tempo, equipamento especializado e mão de obra qualificada, o que limita sua

aplicabilidade em rotinas industriais (CZARRA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2018). Com o avanço tecnológico, alternativas mais rápidas e econômicas vêm sendo estudadas, como a espectroscopia Raman e a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), ambas acopladas a métodos quimiométricos multivariados para predição de parâmetros de qualidade (BARBON JUNIOR *et al.*, 2020; GARCIA *et al.*, 2019).

A colorimetria tem-se mostrado eficaz na caracterização visual e instrumental de alimentos em pó, como a farinha de trigo, permitindo a correlação entre parâmetros cromáticos e compostos presentes nessas amostras. Essa abordagem tem sido aplicada com sucesso em estudos recentes (RAMOS *et al.*, 2021), o que aponta para a possibilidade de estimar o teor de cinzas de forma rápida, prática e de menor custo, quando comparada aos métodos oficiais. Entretanto, no estudo citado empregou-se a estatística univariada.

Para reforçar a confiabilidade dessa técnica, o modelo estatístico multivariado de Regressão Linear Múltipla (MLR – *Multiple Linear Regression*) será empregado. Esse tipo de regressão permite correlacionar múltiplas variáveis independentes (neste caso, os parâmetros de cor) com uma variável dependente (teor de cinzas), gerando equações preditivas úteis para a calibração de métodos analíticos (HAIR *et al.*, 2009). Esse tipo de modelo estatístico faz parte do que se conhece como calibração multivariada, um ramo da quimiometria.

A quimiometria é uma área interdisciplinar que combina matemática, estatística e química para extrair informações relevantes a partir de dados analíticos complexos. Ela permite o desenvolvimento de modelos robustos, a otimização de processos analíticos e a ampliação da aplicabilidade de técnicas instrumentais (ARAÚJO *et al.*, 2009; MASSART *et al.*, 2005).

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da colorimetria associada à regressão linear múltipla como método alternativo para estimar o teor de cinzas da farinha de trigo. A proposta justifica-se pela necessidade de técnicas analíticas mais acessíveis, rápidas e confiáveis para controle de qualidade em ambientes industriais, contribuindo para o aprimoramento dos processos de classificação e padronização de farinhas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um método alternativo para estimar o teor de cinzas em farinhas de trigo utilizando parâmetros colorimétricos e calibração multivariada por regressão linear múltipla.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo preditivo baseado em parâmetros colorimétricos e regressão linear múltipla (MLR) para estimar o teor de cinzas em farinha de trigo;
- Validar o modelo com um conjunto de amostras externas ao processo de desenvolvimento.
- Estimar os parâmetros de mérito RMSEC, RMSEP, RPD, coeficiente de correlação e elipse de confiança.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Farinha de trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos cereais mais cultivados e consumidos mundialmente, sendo a principal matéria-prima para a produção de farinha utilizada na fabricação de diversos produtos alimentícios, como pães, massas e bolos (Silva *et al.*, 2018). A qualidade da farinha de trigo é determinada por características físico-químicas, incluindo teor de umidade, proteína, glúten e cinzas, que influenciam diretamente nas propriedades reológicas da massa e na qualidade do produto final (Cerqueira, 2012). Além disso, fatores como a variedade do trigo, as condições de cultivo e os processos de moagem afetam significativamente as propriedades da farinha (Ferreira *et al.*, 2020).

Conforme estabelece a Instrução Normativa nº 8, de 2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a produção de farinhas de trigo deve ser realizada a partir de grãos do gênero *Triticum aestivum* L. ou de outras espécies do gênero *Triticum*. A mesma normativa define os critérios de classificação da farinha com base em parâmetros como teor de cinzas, granulometria, teor de proteína, acidez graxa e umidade. As farinhas que não atendem aos limites estabelecidos para esses parâmetros são consideradas fora de tipo (Brasil, 2005). Os critérios definidos para a classificação da farinha de trigo, conforme estabelecido pela Instrução Normativa nº 8/2005 do MAPA, estão sistematizados na Tabela 1, que apresenta os limites exigidos para os parâmetros físico-químicos mencionados.

Tabela 1 - Limites de tolerância para a farinha de trigo.

Tipos	Teor de Cinzas* (Máximo)	Granulometria	Teor de Proteína* (Mínimo)	Acidez mg de KOH. 100g-1 (máximo)	Teor de Umidade (Máximo)
Tipo 1	0,80%	95% do produto deve passar pela	7,50%	100	15%
Tipo 2	1,40%	peneira com		-	-
Integral	2,50%	abertura de malha de 250	8,00%	-	-

* Os teores de cinzas e de proteína deverão ser expressos em base seca.

Fonte: Brasil (2005)

No Brasil, a distribuição do uso da farinha de trigo ocorre principalmente nas seguintes proporções: 54,23% é destinada à panificação, 14,44% à fabricação de massas, 13,83% ao uso doméstico, 9,98% à produção de biscoitos e 7,51% a outros segmentos da indústria alimentícia. Dentre os cereais, o trigo se destaca especialmente na panificação. Esse protagonismo está relacionado à capacidade da farinha de trigo de formar massas com características reológicas favoráveis, como boa elasticidade e extensibilidade, fundamentais para a produção de pães (ABITRIGO, 2018).

Para assegurar que essa matéria-prima atenda aos requisitos necessários e proporcione desempenho adequado nos produtos finais, são realizadas diversas análises, dentre elas, a determinação do teor de cinzas, que auxilia no direcionamento correto da farinha para uso em panificação, massa, biscoitos, entre outros (ICTA, 2013; Zardo, 2010).

3.2 Teor de cinzas na farinha de trigo

O teor de cinzas na farinha de trigo é frequentemente utilizado como indicador da eficiência da separação entre o endosperma e o farelo durante o processo de moagem, dado que as camadas externas do grão, como a aleurona e o farelo, apresentam concentrações mais elevadas de minerais em comparação ao endosperma (Oliveira, 2018).

Além de indicar a eficiência na separação das partes do grão durante a moagem, o teor de cinzas na farinha de trigo reflete diretamente o teor de

minerais presentes, sendo considerado um parâmetro essencial para avaliar a pureza e o grau de extração do produto (Zardo, 2010).

Valores elevados de cinzas geralmente indicam maior presença de fragmentos do farelo, o que pode comprometer características como a cor, a textura e o desempenho tecnológico da farinha (Ferreira, 2019). De acordo com a legislação brasileira, os limites máximos de cinzas variam conforme o tipo de farinha: até 0,65% para farinha especial, 1,35% para a comum e 2,5% para a integral (Anvisa, 2005).

A análise desse parâmetro é realizada por meio da incineração controlada da amostra em forno tipo mufla, a temperaturas entre 550 °C e 600 °C, até restar apenas o resíduo mineral fixo (Zambiasi, 2010).

3.3 Métodos analíticos tradicionais e suas limitações

A determinação tradicional do teor de cinzas por incineração em forno mufla apresenta desvantagens, como o longo tempo de análise, o alto consumo de energia e a geração de resíduos, principalmente material carbonizado e resíduos minerais da amostra (Zambiasi, 2010). Além disso, esse método não permite a análise simultânea de múltiplos parâmetros, o que limita sua eficiência em processos industriais que demandam rapidez e sustentabilidade (Ferrão *et al.*, 2014). Essas limitações têm incentivado a busca por métodos alternativos mais rápidos, econômicos e ambientalmente mais amigáveis.

3.4 Colorimetria aplicada a alimentos

A colorimetria é uma técnica que permite quantificar a cor dos alimentos e é amplamente utilizada na avaliação da qualidade de produtos alimentícios. No caso da farinha de trigo, a cor está diretamente relacionada ao teor de cinzas, pois a presença de farelo confere à farinha uma coloração mais escura (Ferreira, 2019).

O sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*) é comumente utilizado para medir a cor, em que L^* indica a luminosidade, a^* representa o eixo vermelho-verde e b^* o eixo amarelo-azul. Além disso, estudos demonstram uma forte correlação entre os

parâmetros de cor e o teor de cinzas, permitindo estimar rapidamente e não destrutivamente esse teor por meio de análises colorimétricas (Ferreira, 2019).

Com relação às farinhas, os resultados de L^* , a^* e b^* permitem uma avaliação objetiva das características visuais da farinha, que podem estar relacionadas a fatores como o tipo de moagem, o grau de extração e a presença de partículas de farelo (McGuire & Behrens, 2011; Leon *et al.*, 2006).

3.5 Quimiometria e regressão linear múltipla (MLR)

A quimiometria aplica métodos estatísticos para extrair informações relevantes de dados químicos complexos, sendo a regressão linear múltipla (MLR) uma das ferramentas utilizadas na calibração multivariada (Ferreira, 2015). Estudos recentes mostram que métodos de regressão multivariada, incluindo a MLR, têm sido amplamente utilizados na modelagem preditiva em análises de alimentos, contribuindo para maior robustez e capacidade explicativa em conjuntos de dados complexos (Rohman; Windarsih, 2021).

A calibração multivariada permite modelar relações entre múltiplas variáveis independentes e uma variável dependente (Ferreira, 2015), sendo eficiente na predição de parâmetros de qualidade da farinha de trigo, como o teor de cinzas a partir de técnicas espectroscópicas, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e a no infravermelho médio com refletância difusa (DRIFT) (Ferrão *et al.*, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta das amostras

Foram utilizadas, neste estudo, 336 amostras de farinhas dos tipos Tipo 1 (230) e Tipo 2 (106), coletadas em uma unidade moageira localizada na região Centro-Oeste do estado do Paraná. As análises foram realizadas nas dependências da própria unidade industrial ao longo de 2024.

4.2 Determinação de cinzas

A determinação do teor de cinzas nas amostras de farinha de trigo foi realizada por meio da incineração da matéria seca em forno de mufla, a 600 ± 5 °C, conforme descrito por Damodaran e Parkin (2017). Para a análise, aproximadamente 3 g de farinha foram pesados em cadinhos de porcelana previamente tarados, os quais foram então inseridos no forno até a completa combustão da matéria orgânica. O teor de cinzas obtido reflete o teor mineral da amostra e é utilizado como indicador indireto da presença de partículas de farelo e do grau de extração da farinha.

4.3 Determinação da cor

A determinação da cor das amostras de farinha de trigo foi realizada utilizando um colorímetro Konica Minolta, modelo CR-410, com iluminante tipo C D65. O dispositivo opera no sistema de coordenadas CIELAB, que permite a quantificação da cor a partir de medições espectrais de refletância. Para a análise, 15 g da farinha foram dispostos em um recipiente de 3,25 cm de diâmetro e 4 cm de altura. O sensor do colorímetro foi posicionado sobre a superfície da amostra, e a leitura foi efetuada por meio de um flash de luz de xenônio, permitindo a obtenção dos valores de L^* , a^* e b^* .

4.4 Calibração multivariada e validação

A calibração multivariada foi conduzida por meio de regressão linear múltipla (MLR), empregando o software Matlab R2007b e as ferramentas do PLS-Toolbox 5.2. A MLR foi aplicada para modelar a relação entre os parâmetros de cor da farinha e o teor de cinzas.

A validação do modelo MLR foi realizada com base em parâmetros de mérito, que permitiram avaliar a exatidão e a capacidade preditiva do modelo.

A exatidão do modelo de calibração multivariada foi avaliada por meio dos Erros Médios Quadráticos de Calibração (RMSEC) e de Predição (RMSEP). Esses parâmetros quantificam a média das diferenças quadráticas entre os valores preditos e os valores de referência, permitindo avaliar o grau de concordância entre eles. Valores mais baixos de RMSEC e RMSEP indicam maior exatidão do modelo (Ghnimi et al., 2022).

O ajuste do modelo foi verificado com base no coeficiente de correlação (R) entre os valores de referência e os valores preditos pelo modelo (Valderrama et al., 2009).

A relação de desempenho do desvio (RPD) foi utilizada para avaliar a eficácia do modelo na previsão do teor de cinzas, relacionando o desvio padrão dos dados de referência ao erro médio quadrático de predição (RMSEP) e ao erro médio quadrático de validação cruzada (RMSECV). Valores de RPD superiores a 3 são considerados satisfatórios para aplicações analíticas, enquanto valores acima de 4 indicam excelente desempenho do modelo (Geng et al., 2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da calibração multivariada por regressão linear múltipla (MLR), associada à análise colorimétrica dos parâmetros L^* , a^* e b^* , demonstrou-se eficiente na estimativa do teor de cinzas em amostras de farinha de trigo. A avaliação do desempenho do modelo foi conduzida com base em parâmetros de mérito amplamente reconhecidos na validação de estudos quimiométricos na área de alimentos, como o erro médio quadrático de calibração (RMSEC), o erro médio quadrático de predição (RMSEP), o coeficiente de correlação (R) e a relação de desempenho do desvio (RPD), e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de mérito.

Parâmetros de mérito		Cinzas (%)
Exatidão	RMSEC	0.0611
	RMSEP	0.0613
Coeficiente de correlação		0.958
Faixa do modelo		0.38-1.39
RPDcal		5.0927
RPDval		4.9231

Fonte: Autoria Própria (2025).

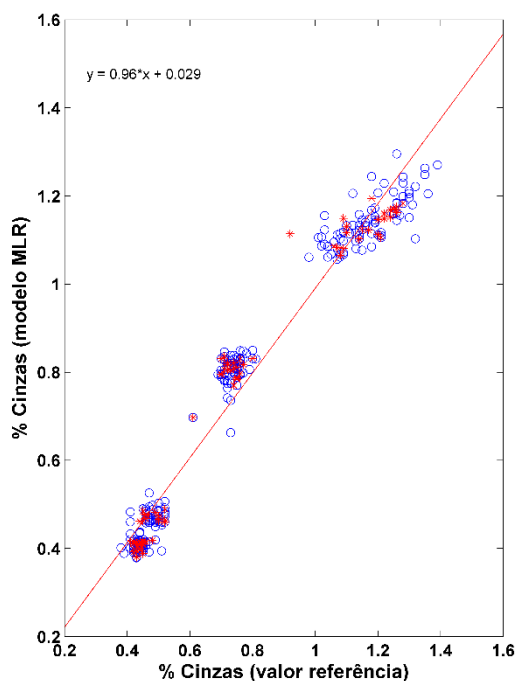
A calibração do modelo apresentou Erro Médio Quadrático de Calibração (RMSEC) de 0,0611, enquanto a validação externa resultou em Erro Médio Quadrático de Predição (RMSEP) de 0,0613. Esses valores indicam elevada exatidão do modelo preditivo, uma vez que erros inferiores a 0,1% são considerados baixos e aceitáveis em estudos similares (Ghnimi et al., 2022; Ferreira, 2019).

Os valores de RMSEP e RMSEC são parâmetros globais que incorporam tanto erros sistemáticos, relacionados a vieses do modelo ou a desvios constantes entre os valores previstos e os reais, quanto erros aleatórios, decorrentes de variações não controladas do sistema de medição ou de ruído

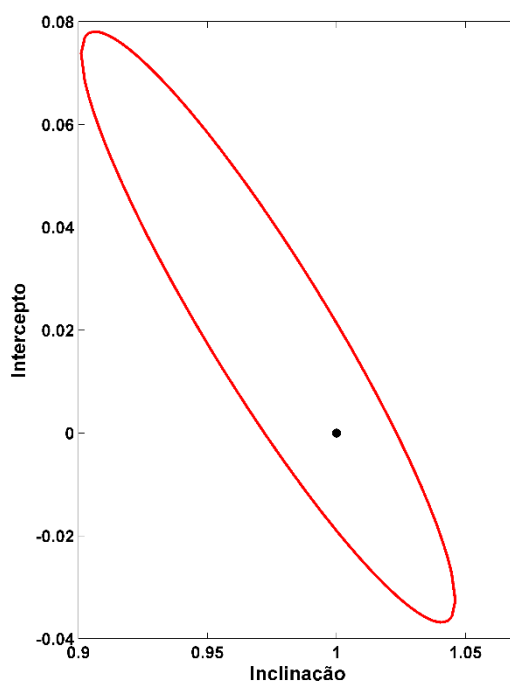
experimental. Sendo assim, outros indicadores de exatidão são o ajuste (Figura 2), avaliado pelo coeficiente de correlação, e a consideração da região da elipse de confiança (Figura 3).

O ajuste corresponde à regressão entre os valores de referência e os valores estimados pelo modelo. O coeficiente de correlação obtido no ajuste foi de 0,958, indicando uma forte correlação linear entre os valores preditos e os valores de referência obtidos por incineração em forno mufla. Isso reforça visualmente a exatidão e a fidelidade da predição (Cordeiro; Valderrama, 2021).

Figura 2 – Ajuste entre os valores de referência e os valores previstos pelo modelo MLR.
(○) Amostras na calibração; (*) amostras na validação.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 3 - Elipse de confiança.

Fonte: Autoria Própria (2025).

A Figura 3 mostra a região da elipse de confiança para o intercepto e a inclinação da regressão entre os valores de teor de cinzas previstos pelo modelo MLR e os determinados pelo método de referência. Pode-se verificar que a região da elipse de confiança contém o ponto ideal (1,0) para a inclinação e o intercepto, respectivamente. Isto mostra que os valores de teor de cinzas determinados pela mufla e pelo modelo MLR não diferem significativamente, com 95% de confiança.

Os valores de RPD do modelo desenvolvido indicam que ele apresenta boa habilidade preditiva. De acordo com a literatura (Botelho; Mendes; Sena, 2013), consideram-se bons modelos de calibração aqueles que apresentam valores de RPD acima de 2,4. Os modelos com valores de RPD entre 2,4 e 1,5 são considerados satisfatórios.

Os achados deste estudo são consistentes com os reportados por Ferrão et al. (2014), que também empregaram calibrações multivariadas associadas a espectroscopias (NIR e DRIFT) para quantificar o teor de cinzas em farinhas e observaram desempenho semelhante do coeficiente de correlação no ajuste.

A faixa de variação do teor de cinzas nas amostras analisadas foi de 0,38% a 1,39%, abrangendo toda a extensão permitida pela Instrução Normativa n.º 8/2005 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece limites de até 0,80% para farinhas do Tipo 1 e de até 1,40% para farinhas do Tipo 2 (Brasil, 2005). Essa diversidade reforça a aplicabilidade do modelo proposto às diferentes categorias de farinha de trigo, conferindo-lhe maior versatilidade e representatividade em contextos reais de produção e de controle de qualidade.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que a associação entre a colorimetria e a regressão linear múltipla (MLR) é uma abordagem eficaz, rápida e de baixo custo para a estimativa do teor de cinzas em farinha de trigo. A partir da análise de farinhas dos tipos 1 e 2, o modelo desenvolvido apresentou desempenho satisfatório, evidenciado pelos valores de RMSEC (0,0611) e RMSEP (0,0613), pelo coeficiente de correlação ($R = 0,958$) e pelo RPD superior a 4,9, indicando alta capacidade preditiva. A elipse de confiança confirmou que não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores preditos pelo modelo e os obtidos pelo método oficial de incineração, o que atesta a exatidão da proposta com 95% de confiança. Esses resultados reforçam que o modelo colorimétrico-MLR pode ser adotado como alternativa viável para análises de rotina na indústria de moagem, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência dos processos de controle de qualidade.

REFERÊNCIAS

AACC INTERNATIONAL. **Approved Methods of Analysis**. 11th ed. St. Paul: AACC International, 2020.

ABDEL-AAL, E. S. M.; HUCL, P.; CHIBBAR, R. N. **Compositional and nutritional characteristics of spring einkorn and emmer wheats**. *Cereal Chemistry*, v. 78, n. 6, p. 658–664, 2001.

ABITRIGO. **Associação Brasileira de Trigo**. São Paulo, jan. 2013. Disponível em: <http://www.abitrigo.com.br/index.php?mpg=02.00.00> Acesso em: 15 set. 2020.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005**. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. *Diário Oficial da União*, Brasília, 23 set. 2005.

ARAÚJO, M. C. U. et al. Quimiometria: aplicações da estatística multivariada em calibração. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 682–688, 2009.

BARBON JUNIOR, S.; MASTELINI, S. M.; BARBON, A. P. A. C.; BARBIN, D. F.; CALVINI, R.; LOPES, J. F.; ULRICI, A. Multi-target prediction of wheat flour quality parameters with near infrared spectroscopy. **Information Processing in Agriculture**, v. 7, n.2, p. 342-354, 2020.

BEKES, F.; WATSON, B. **The science of gluten-free foods and beverages**. 2. ed. London: Academic Press, 2021.

BOTELHO, B. G.; MENDES, B. A. P.; SENA, M. M. Implementação de um método robusto para o controle fiscal de umidade em queijo Minas artesanal: abordagem metrológica multivariada. **Química Nova**, v. 36, n. 9, p. 1416–1422, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 8, de 2 de junho de 2005. Regulamento técnico de identidade e qualidade da farinha de trigo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 105, p. 91, 3 jun. 2005. Seção 1.

CERQUEIRA, M. M. O. Avaliação da qualidade de farinhas de trigo: aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 32, n. 1, p. 12–20, 2012.

CORDEIRO, L. D.; VALDERRAMA, P. Digital images and multivariate calibration in the determination of rheological and quality parameters of wheat flour. **Brazilian Journal of Analytical Chemistry**, v. 8, n. 32, p. 62–77, 2021.

CZARRA, J. R. et al. Evaluation of rapid ash determination methods in flour. **Journal of Cereal Science**, v. 94, p. 102894, 2020.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. **Fennema's Food Chemistry**. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

DEFINA, R. R. et al. Influência do teor de cinzas na qualidade da farinha de trigo. **Revista de Tecnologia e Alimentos**, v. 18, n. 2, p. 48–54, 2022.

FAO. FAOSTAT – **Crops and livestock products**. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/289563/> Acesso em: 6 maio 2025.

FERRÃO, M. F. et al. Determinação simultânea dos teores de cinza e proteína em farinha de trigo empregando NIR-PLS e DRIFT-PLS. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 34, n. 1, p. 1–9, 2014.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria: Conceitos Métodos e Aplicações**. Campinas: Unicamp, 2015.

FERREIRA, E. G. **Estudo para estabelecer os parâmetros de relação entre o teor de sais minerais e a colorimetria na farinha de trigo**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

FERREIRA, M. S.; OLIVEIRA, F. C.; SILVA, D. C. Avaliação da qualidade de farinhas de trigo disponíveis no mercado brasileiro. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 14, n. 2, p. 45–56, 2020.

GARCIA, L. M. T. et al. Near Infrared Spectroscopy and multivariate analysis to determine ash content in wheat flour. **Food Analytical Methods**, v. 12, p. 112–118, 2019.

GENG, W. et al. A novel colorimetric sensor array coupled multivariate calibration analysis for predicting freshness in chicken meat: a comparison of linear and nonlinear regression algorithms. **Foods**, v. 12, n. 4, p. 720, 2023.

GHNIMI, S. et al. Use of front face fluorescence spectroscopy coupled with multivariate data analysis for monitoring biscuits' quality during aging. **Food Science & Nutrition**, v. 10, n. 1, p. 3032, 2022.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ICTA – Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos. **Manual de métodos analíticos para avaliação da qualidade de farinhas**. Porto Alegre: UFRGS, 2013.

LEÓN, K.; MOYANO, P.; KÜNZEL, R.; ZÚÑIGA, R. Color measurement in food and biological samples: A review. **Food Bioprocess Technology**, v. 1, n. 6, p. 464–476, 2006.

MASSART, D. L. et al. **Chemometrics: a textbook**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

McGUIRE, R. G.; BEHRENS, R. Color Measurement in Horticulture. **HortScience**, v. 46, n. 5, p. 565–569, 2011.

MCKEVITH, B. Nutritional aspects of cereals. **Nutrition Bulletin**, v. 29, p. 111–142, 2004.

OLIVEIRA, A. L. de. Caracterização físico-química e tecnológica de farinhas de trigo comercializadas no Brasil. **Revista de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 38, n. 2, p. 123–130, 2018.

RAMOS, G. L. et al. Avaliação colorimétrica da farinha de trigo como ferramenta para inferência de qualidade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 23, n. 1, p. 88–94, 2021.

ROHMAN, A.; WINDARSIH, A. Review on chemometrics methods for food authentication. *Food Research International*, v. 139, p. 109989, 2021.

SHEWRY, P. R.; HEY, S. J. The contribution of wheat to human diet and health. **Food and Energy Security**, v. 4, n. 3, p. 178–202, 2015.

SILVA, F. M. et al. Avaliação de métodos alternativos para determinação de cinzas em farinha de trigo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 2, p. 211–217, 2018.

VALDERRAMA, P.; BRAGA, J. W. B.; POPPI, R. J. Estado da arte de figuras de mérito em calibração multivariada. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p. 1278–1287, 2009.

ZAMBIAZI, R. C. Composição química e propriedades funcionais de farinhas de trigo: implicações na panificação. **Alimentos e Nutrição**, v. 21, n. 3, p. 389–396, 2010.

ZARDO, R. A. Análise físico-química de farinhas de trigo e sua relação com a panificação. **Boletim Técnico da Embrapa Trigo**, n. 45, 2010.