

UNIDADE CENTRAL DE EDUCAÇÃO FAEM FACULDADE LTDA - UCEFF
FACULDADE EMPRESARIAL DE CHAPECÓ – FAEM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) APLICADA A ANÁLISE DE FARELO DE SOJA

Mateus Ransolin¹
Simone Merlini²
Keila Daiane Ferrari Orso³
Maria Regina Thomaz⁴

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal desenvolver e verificar curvas de calibração utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como uma alternativa rápida, não destrutiva e de baixo custo para a análise de parâmetros de qualidade no farelo de soja. A pesquisa foi motivada pela necessidade da indústria de processamento de soja ter métodos analíticos que possibilitem a determinação ágil e precisa de componentes críticos, como a proteína bruta, superando as limitações de tempo e custo das técnicas laboratoriais tradicionais. O estudo foi conduzido a partir da coleta e análise de um conjunto representativo de amostras de farelo de soja, cujos teores de referência de proteína bruta, umidade e extrato etéreo foram determinados por métodos convencionais. Posteriormente, os espectros das amostras foram obtidos por meio de equipamento NIR e processados com técnicas de quimiometria para o desenvolvimento das curvas de calibração. Os resultados foram altamente promissores, revelando modelos de calibração robustos que alcançaram elevados coeficientes de determinação R^2 e baixos valores de erro de predição. Isso comprova a precisão e a confiabilidade das estimativas realizadas pelo equipamento. Em última análise, concluiu-se que a espectroscopia NIR é uma ferramenta analítica de grande valor para o controle de qualidade do farelo de soja, entregando resultados rápidos e consistentes que são cruciais para otimizar os processos industriais e dar suporte à tomada de decisões estratégicas em toda a cadeia produtiva.

Palavras-chave: Espectroscopia NIR. Farelo de Soja. Curvas de Calibração.

1 INTRODUÇÃO

A busca por métodos analíticos rápidos e eficientes para a quantificação de diferentes componentes em alimentos tem impulsionado o interesse pelo uso de técnicas ópticas (Bevilacqua *et al.*, 2013). Essas técnicas oferecem diversas vantagens, como menor custo quando consideradas em médio e longo prazo, facilidade de operação e preservação das

¹ Graduando em Engenharia de Produção (UCEFF, 2025). E-mail: mateus.ransolin7@gmail.com

² Mestra em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - E-mail: simonemerlini@uceff.edu.br

³ Docente da UCEFF Faculdades. E-mail: keila@uceff.edu.br

⁴ Docente da UCEFF Faculdades.

amostras, já que não exigem sua destruição. Além disso, permitem análises ágeis, com pouco ou nenhum preparo prévio, possuem caráter não invasivo e não geram resíduos durante o processo (Pasquini, 2003; Paula *et al.*, 2013).

De acordo com Botelho (2014), a análise de alimentos é desafiadora devido à complexidade de sua composição, o que geralmente demanda etapas de extração e pré-tratamento demoradas e que utilizam reagentes potencialmente tóxicos. Por isso, destaca-se a importância do desenvolvimento de métodos analíticos mais rápidos, simples, seguros e economicamente viáveis para o controle de qualidade de alimentos e bebidas.

A comercialização de produtos derivados da soja exige um controle rigoroso tanto da qualidade dos grãos quanto do atendimento aos padrões estabelecidos para sua negociação (Araujo, 2014). No entanto, as metodologias analíticas tradicionalmente empregadas nesse processo costumam ser mais lentas, caras e demandam profissionais especializados, além de destruírem parte das amostras avaliadas e produzirem resíduos químicos. Diante disso, torna-se essencial o desenvolvimento de técnicas que possibilitem análises mais rápidas, preservem a integridade das amostras e reduzam o uso de reagentes, contribuindo para processos mais eficientes e sustentáveis (Ma *et al.*, 2017).

Essa aplicabilidade torna-se especialmente relevante no setor de processamento da soja, onde o controle de qualidade é fundamental. A produção do farelo envolve diversas etapas industriais interligadas: desde a armazenagem em silos, seguida de limpeza e secagem dos grãos, até a quebra, cozimento, laminação e expansão. Posteriormente, ocorre a extração do óleo, a dessolventização com tostagem e, por fim, as etapas de secagem, peletização, moagem e expedição do produto final (Sartori, 2001; Paraíso, 2001). A aplicação de métodos rápidos e não destrutivos, como espectroscopia no infravermelho próximo nesse processo, representa um avanço significativo para garantir eficiência operacional e qualidade do farelo produzido.

A indústria de processamento de soja busca, cada vez mais, métodos rápidos e precisos para avaliar a qualidade do farelo de soja. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) se destaca por permitir análises instantâneas e não destrutivas, mas exige modelos de calibração adequados para cada matriz.

Neste sentido, foi desenvolvido o seguinte questionamento: uma curva de calibração NIR é capaz de estimar, com precisão, proteína bruta, extrato etéreo e umidade no farelo de soja?

O presente estudo teve por objetivo geral, desenvolver curvas de calibração pelo infravermelho próximo aplicadas ao farelo de soja, oferecendo à indústria uma ferramenta ágil

e confiável que reduza a dependência de métodos laboratoriais demorados.

Neste contexto, os objetivos específicos dividem-se em:

- a) Realizar a coleta das amostras de farelo de soja e os ensaios laboratoriais de referência para determinação dos parâmetros de interesse (proteína, umidade e extrato etéreo).
- b) Construir a curva de calibração utilizando os espectros NIR e os dados laboratoriais obtidos.
- c) Avaliar a precisão e a confiabilidade da curva de calibração desenvolvida comparando com os métodos tradicionais.

Dentre as tecnologias de sensoriamento eletrônico, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) atua como um analisador de processos promissor na abordagem PAT, devido à sua capacidade de identificar materiais e, simultaneamente, analisar diferentes fenômenos físico-químicos que ocorrem ao longo do processo (Grassi; Casiraghi, 2022, p. 1).

A espectroscopia NIR apresenta grandes vantagens em relação aos métodos de análises tradicionais para predição dos valores nutricionais de forrageiras, mas tem como fatores limitantes a necessidade de um grande número de amostras já analisadas pelos métodos de referências e a necessidade de ajuste de bons modelos de calibração. Cumpridas essas exigências o método poderá ser utilizado na rotina laboratorial para aumentar a capacidade de análises e reduzir o volume de reagentes e de resíduos gerados nas análises químicas convencionais (Rech; Werner, 2020).

Diante dessas vantagens, a utilização do NIR no controle de qualidade de produtos agroindustriais, como o farelo de soja, mostra-se estratégico. A soja e seus derivados representam parcela significativa da produção agropecuária nacional, com destaque para o farelo de soja: em 2024, aproximadamente 55% da produção foi destinada à exportação, evidenciando seu papel essencial na balança comercial brasileira (Embrapa, 2025).

Considerando a expressiva participação dos derivados da soja nas formulações de rações, especialmente o farelo, que pode compor até 35% da dieta de aves, torna-se evidente a importância de se avaliar cuidadosamente sua qualidade nutricional. Variações mesmo discretas na composição e na digestibilidade dos derivados da soja podem impactar de forma significativa o desempenho zootécnico dos animais e, consequentemente, os resultados econômicos da produção. Nesse contexto, o monitoramento rigoroso dos parâmetros de qualidade, desde o processamento adequado até a análise de seus principais indicadores como atividade ureática, inibidores de tripsina, solubilidade proteica e teor de lisina reativa é essencial. Investir em uma avaliação criteriosa dos derivados da soja não apenas assegura a eficiência nutricional das rações, mas também contribui para uma produção animal mais

sustentável, rentável e nutricionalmente eficiente (Agrocere Multimix, 2025).

Este estudo demonstra a viabilidade da espectroscopia NIR para a quantificação de proteína bruta, extrato etéreo e umidade no farelo de soja. Ao verificar a precisão de um método analítico rápido e não destrutivo, o trabalho oferece uma alternativa promissora aos métodos convencionais, que são mais lentos e geram resíduos. A adoção dessa tecnologia não apenas otimiza o controle de qualidade na indústria, mas também contribui para a sustentabilidade dos processos, alinhando-se às crescentes demandas por maior eficiência e menor impacto ambiental na cadeia de produção de alimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FARELO DE SOJA

A trajetória da soja (*Glycine max*) tem seu início há milhares de anos, com registros de cultivo na China que remontam ao período entre 2883 e 2838 a.C., onde era considerada um dos "grãos sagrados" (Embrapa, 2025). Essa longevidade, contudo, não se refletiu em uma expansão imediata para o Ocidente, onde a soja permaneceu restrita e, por vezes, esquecida após sua introdução inicial na Europa no final do século XV. A transformação da soja em uma commodity global e a consequente ascensão do farelo ocorreram apenas no século XX, impulsionadas pelo desenvolvimento tecnológico de extração de óleo. Foi o subproduto desse esmagamento, rico em proteínas, que estabeleceu a soja como um insumo estratégico e o farelo como a principal fonte de proteína vegetal para a pecuária mundial (Aprosoja Brasil, 2024).

No Brasil, o início da sojicultura foi mais lento, permanecendo por cerca de 70 anos (1882 a 1950) com produção modesta, destinada principalmente à forragem ou ao engorde de suínos em pequenas unidades produtoras. A grande revolução e expansão se deram a partir da década de 1960 e, principalmente, em 1975, com a criação da Embrapa Soja. As pesquisas focadas no desenvolvimento de cultivares adaptadas ao clima tropical e o domínio tecnológico para o manejo em baixas latitudes foram essenciais para levar a soja além do Sul e consolidá-la no Cerrado. Essa expansão geográfica, aliada ao crescimento da avicultura e suinocultura, impulsionou a demanda por ração e cimentou o papel do farelo de soja na economia do agronegócio, fazendo do Brasil uma potência em produção e processamento (Embrapa, 2025).

O farelo de soja é amplamente reconhecido como o principal subproduto do processamento do grão e uma das fontes de proteína mais importantes e utilizadas na indústria de rações para animais em todo o mundo, como suínos e aves. Conforme ressaltam Gaffield *et*

al. (2024), o farelo e o óleo de soja são os produtos majoritários obtidos desse processamento, e a qualidade da soja recebida afeta diretamente o teor de proteína bruta do farelo, um fator determinante para sua comercialização. É fundamental notar, ainda, que a qualidade do farelo é uma característica crucial influenciada tanto pelo genótipo do grão quanto pelo processo industrial de produção (Demarco; Gibon, 2020).

O farelo de soja é reconhecido como a matéria-prima essencial e mais expressiva na nutrição animal, servindo como o principal ingrediente para a indústria de rações. Seu uso é predominante em setores de animais monogástricos, notadamente na avicultura e na suinocultura, onde o farelo pode contribuir com até 70% da proteína bruta total da dieta (Alves, 2023). No cenário brasileiro, o consumo interno de farelo está majoritariamente distribuído entre a avicultura (60%), a suinocultura (25%) e a bovinocultura de corte e leite (13%), o que evidencia sua importância e versatilidade para a produção de proteína animal no país (Fagundes, 2022).

Conforme a publicação de Frank George Guimarães Cruz e João Paulo Ferreira Rufino (2017), o farelo de soja é a principal fonte de proteína vegetal usada na alimentação de aves, suínos e peixes. Sua composição, que varia entre 37% e 48% de proteína, oferece um perfil completo de aminoácidos. Esse subproduto é obtido a partir do processo de extração do óleo dos grãos de soja. O documento também aponta a presença de fatores antinutricionais na soja, como os inibidores de tripsina e quimiotripsina, que podem ser inativados por tratamento térmico. A publicação ainda destaca que o teor de proteína do farelo de soja está relacionado à presença ou ausência da casca. O texto menciona que o farelo integral tostado, apesar de ter menos proteína (37%), possui maior energia metabolizável. O farelo de soja costuma representar de 15% a 25% do total da ração para esses animais.

A qualidade do farelo de soja, que é um subproduto obtido após a extração do óleo, não se restringe à sua alta concentração proteica. É fundamental o controle de outras características físico-químicas, sendo a umidade uma das análises bromatológicas que deve ser avaliada para monitorar o padrão nutricional do ingrediente (Runho, 2001). Outro fator relevante é o teor de fibra bruta, que está diretamente relacionado à presença ou remoção da casca do grão. O teor de proteína bruta varia no mercado e pode ser ajustado através da retirada ou adição de casca; por isso, o controle do teor de proteína bruta e fibra é importante para a qualidade do ingrediente (Covalente, 2018).

O segmento de farelo de soja no Brasil confirma seu dinamismo estratégico por meio da contínua expansão de sua infraestrutura industrial. A capacidade total de processamento de oleaginosas atingiu 76,4 milhões de toneladas em 2025, representando um avanço de 5,7% em

relação ao ano anterior. Essa expansão é liderada pela região Centro-Oeste, responsável por 44,4% da capacidade nacional, com destaque para Mato Grosso, que concentra 23% do total (Abiove, 2025). O diretor Daniel Furlan Amaral reforça que essa concentração se deve à proximidade com a produção agrícola e ressalta a importância estratégica do setor para a economia brasileira. A confiança no mercado é sustentada por R\$ 5,9 bilhões em investimentos projetados para os próximos 12 meses, o que garantirá a competitividade da cadeia e a capacidade do país de atender à crescente demanda global por farelo e óleo de soja (Amaral, 2025). Desse modo, o Brasil mantém sua relevância como potência na produção e processamento de farelo de soja.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FARELO DE SOJA

De acordo com Johnson, White e Galloway (2008), a fabricação do óleo de soja é baseada em dois métodos amplamente utilizados: a prensagem mecânica e a extração por solvente. Eles destacam que a técnica padrão em modernas instalações de processamento é a extração por solvente, que requer o uso de hexano.

O processo de produção do farelo de soja está intrinsecamente ligado à extração do óleo do grão (Demarco; Gibon, 2020). Conforme descrito por Cheng e Rosentrater (2019), a prensagem mecânica é uma técnica comum e antiga para a produção de óleo e farelo. A extração por solvente é um método comum e eficiente (Wang *et al.*, 2022) que se inicia com a preparação do grão e segue para a extração do óleo, resultando em um farelo com baixo teor de óleo residual.

Gunstone (2011) explica que o processo de extração por solvente é dividido em três fases cruciais: a preparação das sementes, a extração do óleo em si e a eliminação do solvente presente no farelo e no óleo. As etapas convencionais para a preparação das sementes incluem limpeza, secagem, trituração, condicionamento, laminação e a eventual retirada das cascas. O autor ressalta que a expansão após a laminação é uma prática opcional que melhora o escoamento e a percolação do solvente, otimizando a extração do óleo e aumentando substancialmente a capacidade produtiva.

2.2.1 Preparação do Grão

A etapa de limpeza de sementes pode ser simplificada caso o material já tenha sido limpo antes do armazenamento. O processo inicial envolve a separação de metais por meio de

um equipamento magnético rotativo, seguido da utilização de peneiras perfuradas para eliminar detritos maiores e areia. Além disso, é crucial que essas peneiras possuam um canal de aspiração para remover as partículas mais leves, como cascas e poeira (Chemat, 2017).

A primeira etapa, e a mais importante para uma extração eficiente por solvente, é a preparação do grão (Demarco; Gibon, 2020). Essa fase envolve uma série de processos. A soja chega à planta de processamento e passa por uma série de etapas, incluindo limpeza e secagem (Gaffield *et al.*, 2024). A secagem é fundamental para reduzir a umidade, o que garante um recolhimento seguro e a manutenção da qualidade proteica do produto (Alban, 2018).

O grão é quebrado e, em seguida, passa pelo descascamento, que é considerado essencial para maximizar o teor de proteína no farelo de soja e aumentar a eficiência do processamento. A laminação das sementes pode ser complementada pela expansão, que permite a ruptura de uma porção mais eficiente das paredes celulares (Demarco; Gibon, 2020).

2.2.2 Extração por Solvente

Vadke (2023) enfatiza a importância de uma remoção eficiente do hexano dos flocos de soja, um processo que é afetado por parâmetros como tempo, umidade e temperatura. O autor destaca que a utilização de vapor vivo em quantidade suficiente na dessolventização é crucial para assegurar uma tostagem ideal. Além disso, a eficiência da dessolventização foi aprimorada graças ao projeto do Dessolventizador e Tostador (DT) Schumacher, que apresenta um fundo duplo com orifícios. Por fim, ele sugere que a temperatura dos gases que saem do DT serve como indicador de que a injeção de vapor está adequada.

A extração por solvente, especialmente com hexano, é uma das técnicas industriais mais típicas que pode alcançar uma taxa de recuperação de óleo superior a 99% (Cheng; Rozentrater, 2017). Após a preparação, o material é submetido ao processo de extração, o processo por solvente consiste em lavar o material preparado em um processo de múltiplas etapas para que uma quantidade razoável de solvente extraia uma quantidade máxima de óleo (Demarco; Gibon, 2020). O objetivo de uma planta de extração moderna e eficiente é atingir um conteúdo de óleo residual no farelo de soja de no máximo 0,5% (Gaffield *et al.*, 2024).

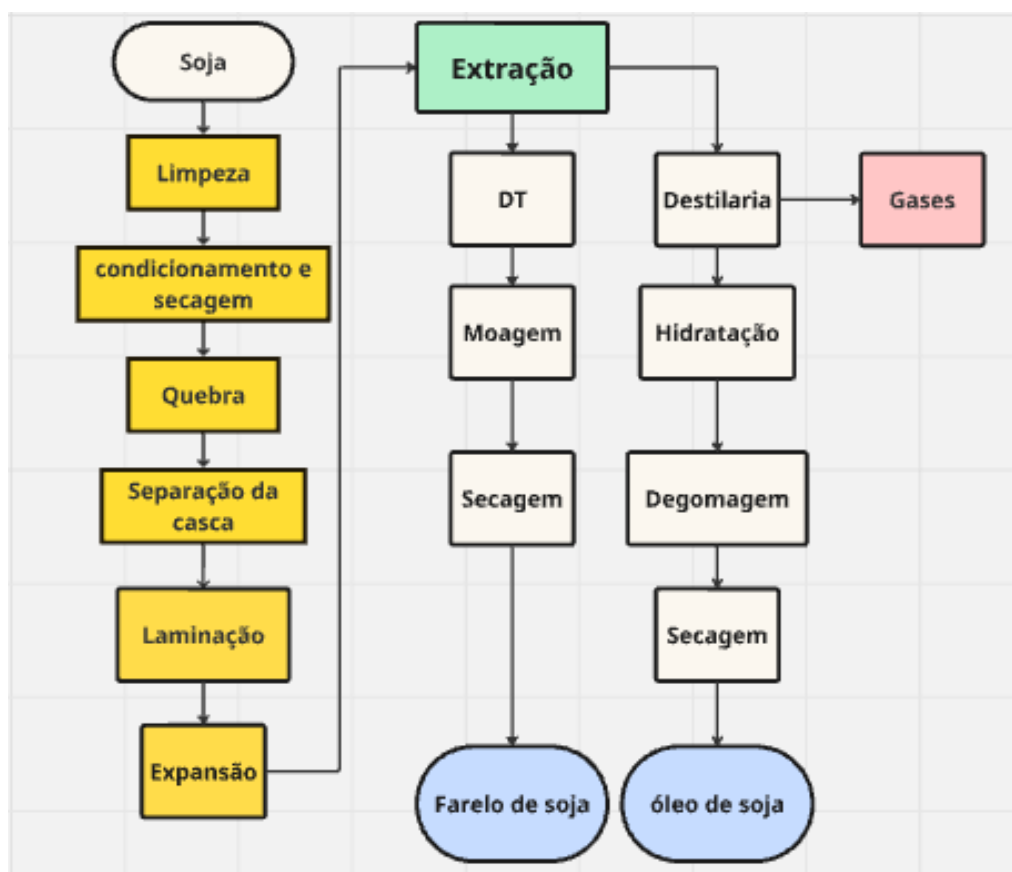
2.2.3 Pós-Extração

O farelo de soja é um subproduto obtido após a extração do óleo por imersão e tratamento térmico apropriado (Demarco; Gibon, 2020). Após a extração, o farelo é submetido a uma etapa de secagem e tratamento térmico, que garante sua qualidade e valor nutricional. A

alta qualidade do farelo de soja e sua composição nutricional, incluindo o teor de proteína bruta, são fatores determinantes para a sua comercialização (Gaffield *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2018).

O processo de produção do farelo de soja envolve diversas etapas interdependentes, que vão desde a recepção e preparo do grão até a extração do óleo e o tratamento do subproduto final. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado dessas etapas, destacando os principais pontos do processamento industrial.

Figura 1 – Representação esquemática do processamento da soja e obtenção de seus produtos.



Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 1, o processo inicia-se com a limpeza, secagem e preparo dos grãos, seguido pela extração do óleo, geralmente por solvente. O farelo obtido passa então por etapas de dessolventização, tostagem e secagem, garantindo a qualidade nutricional e a segurança do produto final. Esse fluxo evidencia a importância de um controle rigoroso em cada etapa, uma vez que variações no processamento podem impactar diretamente a composição e o valor nutricional do farelo (Demarco; Gibon, 2020; Gaffield *et al.*, 2024).

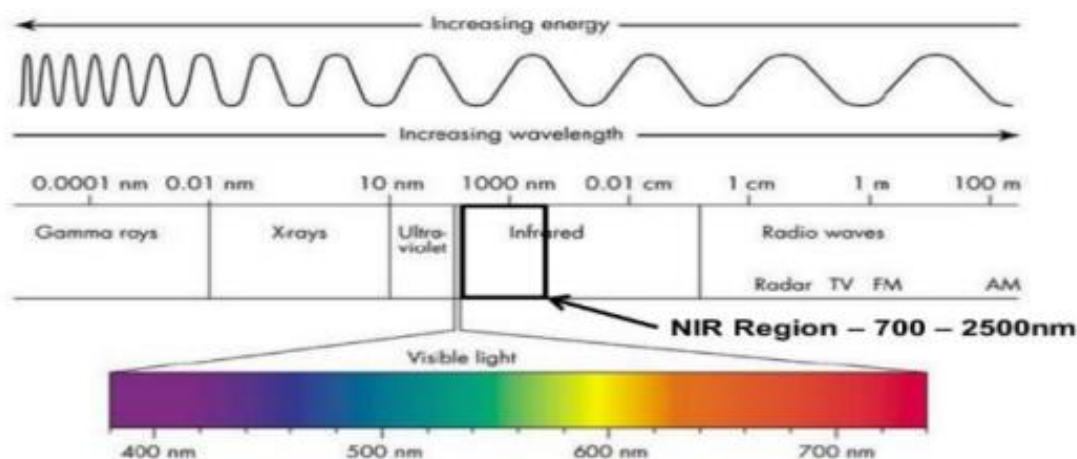
2.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)

A Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR) é uma técnica analítica poderosa e de alto potencial. Um dos seus principais benefícios é permitir a quantificação de múltiplos parâmetros em uma única análise e de forma rápida, sem a necessidade de reagentes químicos e com preparação de amostra mínima ou inexistente (Tibola *et al.*, 2018). Ela é amplamente utilizada em diversas áreas, como a indústria alimentícia e agrícola (Gaffield *et al.*, 2024).

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) é uma ferramenta eficaz para obter resultados analíticos rápidos e de baixo custo, sendo comumente utilizada nas indústrias de alimentos, química e farmacêutica para a quantificação e identificação qualitativa da composição de amostras. A técnica mede a absorção de luz NIR por substâncias orgânicas em relação às suas propriedades químicas e físicas. Por meio da aplicação de estatísticas multivariadas (quimiometria), é possível calibrar um modelo capaz de traduzir o espectro NIR de uma amostra em informações significativas, como o teor de proteína, umidade ou gordura. A aplicação de modelos NIR permite a predição dessas propriedades em amostras novas e desconhecidas, evitando análises laboratoriais tradicionais que são demoradas e caras (Buchi, 2020).

O NIR corresponde à região do espectro eletromagnético situada entre aproximadamente 750 e 2500 nm, abrangendo transições vibracionais relacionadas a grupos funcionais como O-H, C-H e N-H (Pasquini, 2003). Para melhor compreensão, a Figura 2 apresenta a posição da faixa de infravermelho próximo dentro do espectro eletromagnético.

Figura 2 – Posição do infravermelho próximo no espectro eletromagnético



Fonte: Buchi (2020).

Observa-se que a faixa do NIR ocupa uma região intermediária entre a luz visível e o infravermelho médio, o que possibilita sua aplicação em análises não destrutivas de amostras orgânicas. Essa característica explica o potencial da técnica para aplicações na indústria de alimentos e rações, incluindo o farelo de soja.

Considerando que cada etapa do processamento do grão de soja pode impactar diretamente a composição final do farelo, torna-se essencial aplicar métodos analíticos que garantam rapidez, confiabilidade e não destruam as amostras. Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como uma tecnologia estratégica para o monitoramento e controle da qualidade do farelo, atendendo às crescentes demandas da indústria por métodos ágeis e sustentáveis.

2.3.1 Fundamentos e Vantagens da Técnica

A tecnologia NIR é uma forma de espectroscopia vibracional que emprega energia de fótons na região do infravermelho próximo (Pasquini, 2003). De acordo com Pasquini (2003), as análises em laboratório realizadas com essa técnica são rápidas, levando um minuto ou menos por amostra, e são consideradas não-destrutivas e não-poluente, pois não usam reagentes. A espectroscopia NIR se baseia na interação da radiação com as amostras (Tibola *et al.*, 2018), e o espectro resultante funciona como uma "impressão digital" da sua composição química (Wang *et al.*, 2022).

De acordo com D'Oca (2021), a espectrometria infravermelha utiliza a luz infravermelha para analisar substâncias químicas, pois a absorção de energia por uma molécula resulta em uma mudança energética que causa vibrações ou rotações entre os átomos. É importante notar que uma molécula orgânica pode conter várias ligações diferentes, e cada uma vibrará naturalmente em uma energia específica, fazendo com que diferentes ligações vibrem em frequências distintas. Essa propriedade é fundamental para a identificação e quantificação dos componentes na amostra.

A Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR) se estabelece como um método analítico moderno que oferece diversas vantagens significativas para a análise de materiais. É classificada como uma técnica rápida, fácil de usar, não destrutiva, confiável e versátil. Entre seus benefícios práticos, destacam-se a rapidez das determinações e a fácil preparação da amostra. Além disso, a natureza não destrutiva da análise permite que a amostra seja preservada para outros usos, e o método ainda oferece a capacidade de realizar vários tipos de análise em uma única operação (Doldán, 2011).

Segundo Reich (2005), uma das vantagens da técnica reside na sua ampla aplicabilidade a uma grande variedade de amostras, pois as moléculas em análise necessitam somente de uma variação no momento dipolar para serem detectadas e influenciarem a produção do espectro.

No setor agrícola, uma das ferramentas mais versáteis e promissoras é a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR). Sua aplicação é diversificada, incluindo a caracterização de material genético de caju, a análise de compostos em plantas medicinais e a agilização da seleção e do controle de qualidade de frutas. Tais aplicações demonstram uma velocidade significativamente maior em comparação com os métodos convencionais, pois o NIR permite ampliar a produtividade de seleção para mais de 50 frutas por segundo, ao passo que um profissional consegue selecionar apenas uma por segundo (Embrapa, 2018).

No Brasil, o NIR encontra suas principais aplicações nas indústrias farmacêutica, de combustíveis, de polímeros e na agricultura. Na Embrapa Trigo, o NIR é empregado para analisar a qualidade tecnológica de grãos e derivados, avaliando características como umidade, proteína, glúten úmido, teor de óleo, aminoácidos e ácidos graxos. Além disso, a unidade adquiriu um equipamento NIR hiperespectral para detectar grãos com sintomas de giberela, permitindo a predição dos níveis de micotoxinas, bem como a identificação de fragmentos de insetos e grãos germinados (Embrapa, 2016).

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) é uma alternativa eficiente para a avaliação da qualidade de grãos de soja. Conforme Leal *et al.* (2025), essa técnica possibilita a determinação rápida da composição química de uma amostra a partir da absorção e vibração da matéria orgânica na região do infravermelho. Quando o método é combinado com a modelagem multivariada, é possível avaliar rapidamente a qualidade do grão de soja em tempo real, otimizando, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência dos processos pós-colheita.

A aplicação da tecnologia NIR tem sido extensivamente estudada e é vantajosa para a indústria do farelo de soja. A técnica permite a determinação da umidade, proteína bruta e outros componentes nutricionais de forma rápida e não invasiva. A combinação da espectroscopia NIR com a quimiometria é um método alternativo para prever a qualidade do farelo de soja, otimizando o controle de qualidade (Santos *et al.*, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa científica, embora se inicie com a curiosidade como qualquer outra forma de investigação, se diferencia do senso comum e de outras áreas como a filosofia, a arte e a religião, pelo seu maior rigor em relação ao método. O conhecimento científico é uma

construção mais cautelosa que exige um caminho (método) mais definido, um projeto a ser seguido e a aplicação de técnicas (Matos, 2017). No entanto, não existe conhecimento científico sem a base do senso comum.

De acordo com Gil (2006) nas pesquisas com abordagem quantitativa tudo passa a ser contável; para o autor, são geradas informações a partir de números para, a partir daí, classificá-los e analisá-los. Já nas pesquisas com abordagens qualitativas o foco é a coleta de dados por meio de observação, relato, entrevista, análise bibliográfica, criando uma dinâmica humana que não pode ser traduzida por números.

No que tange os objetivos da pesquisa, Vergara (2000, p. 47) afirma que a pesquisa descritiva expõe as características de determinado fenômeno, estabelece correlações entre variáveis e define sua natureza. "Não têm o compromisso de explicar os fenômenos que descreve, embora sirva de base para tal explicação".

Ao traçar os procedimentos adotados, Vergara (2000), pontua que a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído, principalmente, de livros e artigos científicos, destacando assim a sua importância para o levantamento de informações básicas sobre os aspectos direta e indiretamente ligados ao assunto estudado, proporcionando ao pesquisador um instrumental analítico para qualquer outro tipo de pesquisa.

Ademais, o uso de pesquisas experimentais complementa as pesquisas bibliográficas. De acordo com Gil (2006), o experimento é considerado o melhor exemplo de pesquisa científica, pois consiste na determinação de um objeto de estudo, na eleição das variáveis capazes de influenciá-lo e na demarcação das normas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

A natureza da pesquisa é definida como aplicada, que conforme Marconi (2022), o objetivo de uma pesquisa aplicada é adquirir conhecimento para a solução de um problema específico. Nesse caso, otimizar/ diminuir o tempo para fornecimento dos resultados dos ensaios laboratoriais em uma indústria de farelo de soja.

Nesta seção são descritos os procedimentos utilizados para o desenvolvimento do estudo, contemplando desde a coleta e preparo das amostras até a realização das análises laboratoriais de referência e a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). A metodologia foi estruturada de forma a garantir a confiabilidade dos resultados, possibilitando a construção e validação de curvas de calibração para os parâmetros de interesse: proteína bruta, extrato etéreo e umidade. O capítulo está organizado em quatro etapas principais:

1. **Amostras** – caracterização e origem do farelo de soja utilizado;
2. **Preparo das amostras** – procedimentos de moagem e homogeneização;

3. **Análises laboratoriais de referência** – metodologias oficiais empregadas para determinação de cada parâmetro;
4. **Espectroscopia NIR** – coleta dos espectros e desenvolvimento das curvas de calibração.

3.1 AMOSTRAS

A pesquisa utilizou amostras de farelo de soja obtidas de uma agroindústria localizada em Chapecó - SC. As amostras foram preparadas e analisadas para umidade, extrato etéreo e proteína bruta conforme metodologia oficial para cada parâmetro.

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para as análises laboratoriais e para a espectroscopia NIR, as amostras de farelo de soja foram moídas e homogeneizadas. Para a determinação de extrato etéreo e proteína bruta, que exigem uma granulometria mais fina, as amostras foram trituradas utilizando o moinho centrífugo Retsch ZM 200 com peneira de 0,5 mm, conforme ilustrado na Figura 3. Diferente dos demais parâmetros, a análise de umidade demandou a utilização de um moinho de facas (Tipo Willey) com peneira de 1,7 mm, a fim de evitar o aquecimento excessivo da amostra. O equipamento utilizado nesta etapa foi o Marconi MA340, conforme a Figura 4. Após a moagem, as amostras foram transferidas para embalagens e mantidas fechadas para evitar trocas de umidade com o ambiente.

Figura 3 – Moinho Centrífugo (Retsch ZM 200) empregado na obtenção de granulometria de 0,5 mm para as análises de extrato etéreo e proteína bruta.



Fonte: Autor (2025).

Figura 4 – Moinho de Facas (Marconi MA340) configurado com peneira de 1,7 mm, utilizado no preparo das amostras para a determinação de umidade e leitura no NIR.



Fonte: Autor (2025).

3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS (MÉTODOS DE REFERÊNCIA)

Os parâmetros de referência para a calibração do equipamento NIR foram obtidos por meio das seguintes metodologias laboratoriais:

3.3.1 Umidade

O método gravimétrico de secagem exige um controle rigoroso de temperatura e ventilação para a volatilização completa da água. Para isso, foi utilizada a Estufa com circulação de ar forçada da marca Quimis, crucial para manter as condições de 130 °C exigidas pelo método AOCS, conforme ilustrado na Figura 5.

Umidade: A determinação de umidade em farelo de soja foi realizada pelo método de secagem em estufa de ar forçado a 130 ± 3 °C por 2 horas. Aproximadamente 5 g de amostra foram pesados em cápsulas de alumínio com tampa. A umidade foi calculada com base na perda de massa da amostra após a secagem. A metodologia segue o padrão AOCS Ba 2a-38. O cálculo do resultado foi realizado pela seguinte equação:

$$\text{Umidade (\%)} = m(P1 - P2) \times 100$$

Onde:

P1 = massa da cápsula vazia + amostra antes da secagem, em gramas;

P2 = massa da cápsula + amostra após a secagem, em gramas;

m = massa da amostra, em gramas.

Figura 5 – Estufa com circulação de ar forçada Quimis, utilizada na determinação gravimétrica de umidade.



Fonte: Autor (2025).

3.3.2 Extrato etéreo

O princípio da extração com solvente a quente requer um sistema eficiente e controlado. Para a otimização desta etapa gravimétrica, foi utilizado o Extrator de gordura Soxhlet semi-automático da marca Velp, que garante a extração exaustiva e controlada do óleo da amostra, conforme apresentado na Figura 6.

Extrato Etéreo: O teor de extrato etéreo foi determinado por extração exaustiva com solvente a quente. Foram pesados de 2 a 5 g de amostra em papel filtro, que em seguida foi inserido em um cartucho de celulose. A extração foi realizada com hexano por 3 horas, sendo 2 horas em imersão e 1 hora em refluxo. A massa de gordura extraída foi determinada gravimetricamente após a evaporação do solvente. A metodologia é baseada nos métodos AOCS Ac 3-44 e AACC 30-25. O cálculo do resultado foi realizado pela seguinte equação:

$$\% \text{Extrato etéreo} = m(P2 - P1) \times 100$$

Onde:

P1 = massa do copo coletor de gordura vazio;

P2 = massa do copo coletor de gordura + gordura extraída;

m = massa da amostra.

Figura 6 – Extrator de gordura Soxhlet semi-automático (Velp), essencial para a determinação de extrato etéreo no farelo de soja.



Fonte: Autor (2025).

3.3.3 Proteína bruta

A metodologia de Dumas é a escolhida por sua rapidez e precisão na quantificação do nitrogênio elementar. Para a execução desta análise, foi utilizado o analisador de proteína LECO FP828, que opera pelo princípio de combustão, sendo um equipamento central na obtenção dos valores de referência (*wet chemistry*), conforme detalhado na Figura 7.

Proteína Bruta: A determinação de proteína bruta foi realizada pelo método de combustão (Dumas). A amostra foi submetida a combustão em atmosfera de oxigênio a aproximadamente 900 °C. O nitrogênio elementar resultante da combustão foi detectado quantitativamente por um detector de condutividade térmica. O teor de nitrogênio obtido foi multiplicado por um fator de correção para se obter o teor de proteína bruta. A metodologia se baseia nos métodos do Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal (nº 2021.045) e AOCS Ba 4e-93.

Figura 7 – Analisador de proteína (LECO FP828) utilizado para a determinação de Proteína Bruta no farelo de soja pelo método de combustão (Dumas).



Fonte: Autor (2025).

3.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)

A análise por espectroscopia NIR foi realizada utilizando o espectrômetro ProxiMate da marca Buchi. O equipamento é capaz de determinar a concentração de diversos parâmetros em amostras de alimentos e rações de maneira não destrutiva. O ProxiMate opera gerando um feixe de luz que interage com a amostra, e a luz refletida é coletada por um detector de arranjo de diodos. O sinal do detector é processado para construir um espectro de refletância, que por sua vez é submetido a processamento matemático para calcular os constituintes de interesse.

O equipamento foi configurado para o modo de leitura up-view, que direciona e coleta a luz por baixo da amostra, através de uma placa de petri de vidro. A medição up-view proporciona uma superfície mais consistente para a análise, garantindo maior precisão. O modo de medição utilizado foi o de reflexão difusa, adequado para materiais não translúcidos, como o farelo de soja.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação eficaz da espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) é estabelecida pelo desenvolvimento de um modelo de calibração robusto, que permite a correlação precisa dos dados espectrais obtidos com os respectivos valores de referência laboratoriais. Neste estudo, o banco de dados de calibração foi construído a partir de ensaios laboratoriais de referência (métodos tradicionais) em amostras de farelo de soja, conforme detalhado na Tabela

1.

Para o desenvolvimento das curvas de calibração, foi empregado o software Autocal, uma ferramenta quimiométrica que automatiza os cálculos multivariados necessários para a modelagem preditiva do NIR. Este processo incluiu a aplicação de algoritmos quimiométricos para o tratamento de dados e a criação dos modelos, garantindo a rastreabilidade e a precisão do desenvolvimento.

O conjunto de amostras utilizado para a calibração foi dimensionado de acordo com a variabilidade dos parâmetros no farelo de soja:

- Para a determinação da proteína bruta, o modelo foi desenvolvido utilizando 380 amostras analisadas pelo método de combustão (Dumas).
- A calibração para o parâmetro umidade baseou-se em 203 amostras analisadas pelo método gravimétrico de secagem em estufa.
- O modelo para extrato etéreo foi construído a partir da análise de 131 amostras pelo método de extração exaustiva com solvente (Soxhlet).

A diversidade e o número de amostras utilizadas são cruciais para a validade do modelo, pois permitem que o algoritmo quimiométrico compreenda a maior variação possível da matriz de farelo de soja e das propriedades físico-químicas de cada componente, resultando em modelos preditivos mais precisos e aplicáveis à rotina industrial.

Tabela 1- Estatísticas Descritivas dos Dados de Referência

Parâmetros estatísticos	Umidade	Proteína bruta	Extrato etéreo
Número de amostras	203	380	131
Valor mínimo	11,22	42,74	0,59
Valor máximo	16,17	49,59	3,66
Desvio padrão	0,75	0,93	0,55

Fonte: Autor (2025).

Conforme apresentado na Tabela 1, a base de calibração para cada parâmetro foi desenvolvida utilizando um número substancial de amostras de farelo de soja, garantindo a representatividade da matriz e a variabilidade analítica intrínseca ao produto.

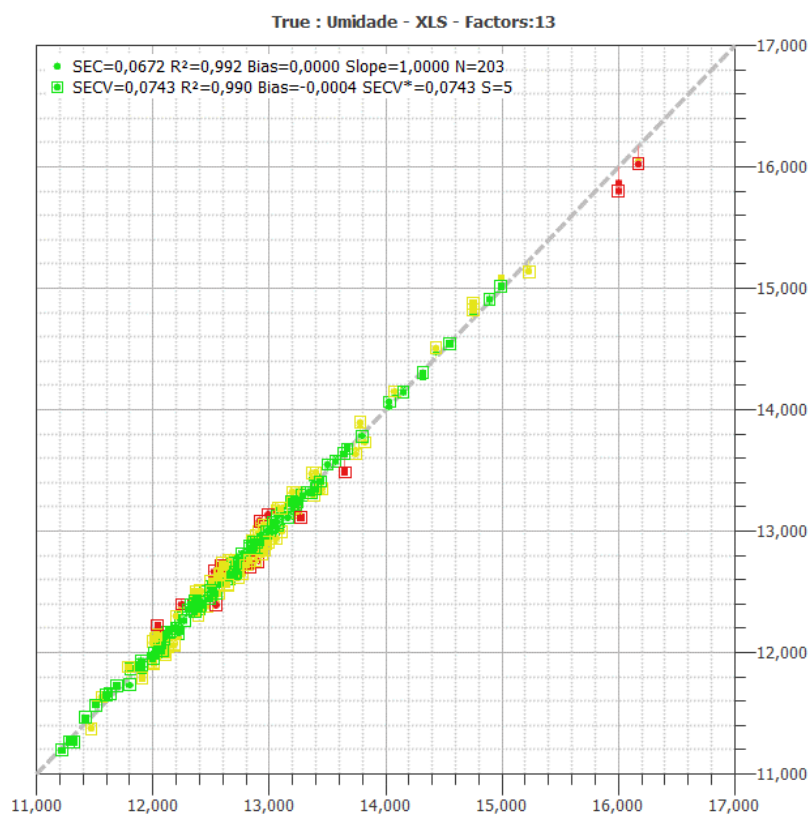
O dimensionamento do conjunto de calibração é um fator determinante para a robustez do modelo, uma vez que a espectroscopia NIR é uma técnica de calibração. Para a proteína bruta, a utilização de 380 amostras permitiu abranger uma ampla faixa de concentração (do valor mínimo ao máximo), essencial para que o algoritmo quimiométrico possa distinguir as

sutis variações espectrais ligadas às diferentes concentrações. O valor do Desvio Padrão (DP) para a proteína reflete essa variação natural e desejada no conjunto de dados.

Para umidade (N=203) e extrato etéreo (N=131), apesar do número de amostras ser menor, o intervalo entre os valores mínimo e máximo também demonstrou ser suficiente para a construção de modelos preditivos eficazes. A variabilidade observada indicada pelo DP em cada um desses parâmetros assegura que a curva de calibração desenvolvida pelo software Autocal não estará sujeita a um sobreajuste, sendo capaz de prever de forma confiável amostras novas e desconhecidas que se enquadrem dentro desses limites.

Com o conjunto de calibração estabelecido e a variabilidade da matriz garantida, os resultados obtidos são apresentados por meio das curvas de calibração para os analitos de umidade, proteína bruta e extrato etéreo. A correlação estabelecida entre os valores de referência obtidos pela análise de química úmida e os valores preditos pelo modelo de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para a umidade é detalhada na Figura 8.

Figura 8 - Curva de calibração para umidade em farelo de soja



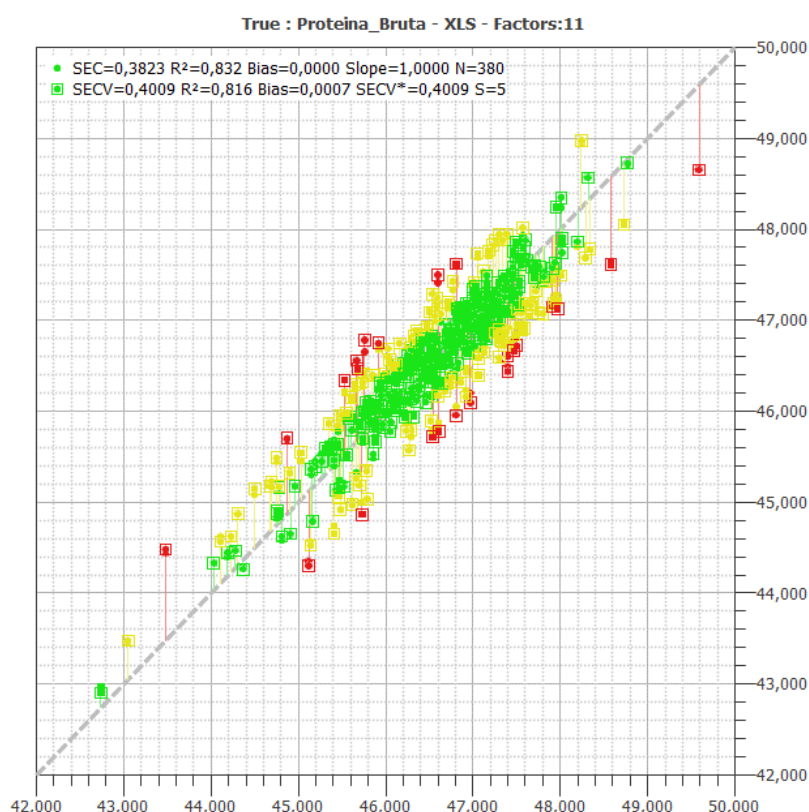
Fonte: Software NIRWise Plus (2025).

Ao analisarmos a Curva de Calibração apresentada na Figura 8, a primeira constatação é a excelente capacidade preditiva que o modelo quimiométrico de NIR alcançou para o

parâmetro de umidade. O coeficiente de determinação R^2 se mostrou consistentemente elevado, sinalizando que a variação nos resultados de referência é, em grande parte, perfeitamente rastreada e explicada pelo espectro NIR. Crucialmente, observa-se um erro padrão de validação cruzada (SECV) baixo e muito bem ajustado, o que assegura que o modelo é robusto e confiável na previsão de teores de umidade em amostras novas.

Seguindo a análise dos parâmetros, a correlação desenvolvida para a proteína bruta entre os valores de referência e os preditos pelo NIR é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Curva de calibração para proteína bruta em farelo de soja

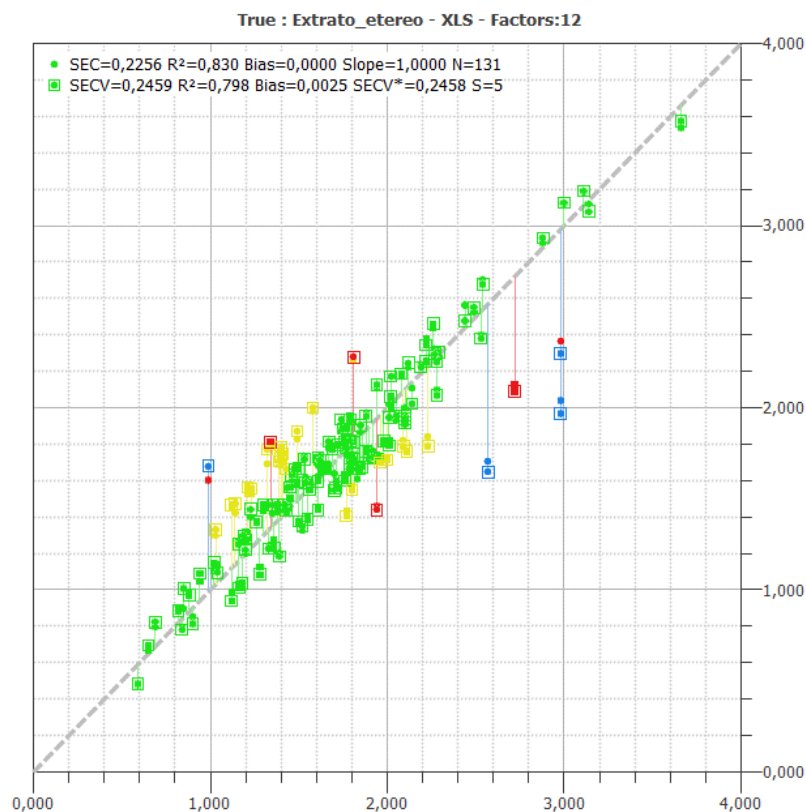


Fonte: Software NIRWise Plus (2025).

Conforme demonstrado na Figura 9, a capacidade preditiva do modelo quimiométrico para proteína bruta também se destaca. O elevado coeficiente de determinação R^2 é consistente com a expectativa de que o espectro NIR rastreie com sucesso a variação observada nos resultados de referência. Além disso, o baixo erro padrão de validação cruzada (SECV) confirma a robustez e a confiabilidade do modelo para prever o teor de proteína bruta em qualquer amostra nova que se enquadre nos limites da calibração.

Por fim, a Curva de Calibração para o extrato etéreo, que completa o conjunto de analitos do farelo de soja, é detalhada na Figura 10.

Figura 10 - Curva de calibração para extrato etéreo em farelo de soja



Fonte: Software NIRWise Plus (2025).

A Curva de Calibração para extrato etéreo Figura 10 reitera a excelência dos modelos NIR, apresentando uma forte capacidade preditiva. Assim como nos outros parâmetros, o coeficiente de determinação R^2 é consistentemente alto, indicando uma forte correlação entre o espectro NIR e os valores de referência obtidos por química úmida. O erro padrão de validação cruzada (SECV) bem ajustado confirma que o modelo é estatisticamente robusto para a predição do teor de extrato etéreo, validando o uso do NIR como uma alternativa ágil e não destrutiva.

Em síntese, a ampla gama de valores de referência (Range) e a dispersão dos dados (DP) para os três analitos (Proteína, Umidade e Extrato Etéreo) confirmam a validade e a diversidade estatística da população de amostras, estabelecendo uma fundação sólida para a próxima etapa, que é a avaliação do desempenho preditivo dos modelos quimiométricos gerados.

Para verificar a aplicabilidade prática e a precisão dos modelos de calibração construídos, foi realizado um ensaio de confirmação utilizando 10 amostras independentes de farelo de soja, analisadas em triplicata pela metodologia de referência. Essa etapa é crucial para confirmar a capacidade dos modelos de prever com acurácia amostras que nunca foram vistas durante o processo de calibração. Os resultados comparativos entre os valores obtidos pela

química úmida e os valores preditos pelo modelo NIR para os parâmetros de umidade, proteína bruta e extrato etéreo estão detalhados nas Tabelas 2, 3, 4 subsequentes.

Tabela 2 – Comparativo entre os valores de referência e NIR no parâmetro de umidade

	Referência	NIR	Diferença
	12,44	12,76	-0,32
	12,52	12,49	0,03
	12,62	12,88	-0,26
	12,42	12,44	-0,02
	12,46	12,51	-0,05
	12,78	12,67	0,12
	12,54	12,42	0,12
	12,14	12,17	-0,02
	12,18	12,12	0,06
	12,18	12,20	-0,02
Média	12,43	12,46	-0,03

Fonte: Autor (2025).

Conforme apresentado na Tabela 2, o modelo NIR demonstrou uma capacidade preditiva com desvios relativamente baixos em relação aos valores obtidos pelo método de referência para o teor de umidade. A umidade é um parâmetro crítico, pois impacta a conservação e a composição do farelo. A pequena variação observada entre as metodologias indica que a calibração NIR é adequada para monitorar este parâmetro na rotina industrial.

Após a análise da umidade, o desempenho para a quantificação da proteína bruta também foi avaliado, dado que este é o parâmetro de qualidade mais importante para a comercialização do farelo. A Tabela 3 apresenta os resultados comparativos obtidos pelo método de referência (Dumas) e pelo modelo NIR.

Tabela 3 – Comparativo entre os valores de referência e NIR no parâmetro de proteína bruta

	Referência	NIR	Diferença
	47,40	47,54	-0,14
	47,88	47,88	0,00
	47,73	47,73	0,00
	47,99	48,21	-0,21
	47,57	47,77	-0,20
	47,99	47,96	0,03
	47,68	47,79	-0,11
	47,55	47,67	-0,12
	47,15	47,05	0,10
	47,92	47,87	0,06
Média	47,69	47,74	-0,05

Fonte: Autor (2025).

Os dados da Tabela 3 evidenciam a alta concordância entre os valores de proteína bruta medidos pelo método padrão e os preditos pelo espectrômetro NIR. A precisão na predição da proteína é fundamental, pois variações no seu teor impactam diretamente a formulação de rações e o desempenho zootécnico dos animais. A eficácia do modelo para este analito reforça a viabilidade do NIR como uma ferramenta de controle de qualidade rápida na indústria de processamento de soja.

Por fim, o desempenho preditivo do modelo para extrato etéreo (óleo residual) foi avaliado no ensaio de confirmação, cujos resultados estão descritos na Tabela 4. O teor de óleo residual no farelo é um indicador importante da eficiência do processo de extração.

Tabela 4 – Comparativo entre os valores de referência e NIR no parâmetro de extrato etéreo

	Referência	NIR	Diferença
	2,21	2,47	-0,26
	2,49	2,55	-0,06
	2,29	2,44	-0,15
	1,77	1,87	-0,10
	2,54	2,48	0,06
	2,47	2,46	0,01
	1,93	1,93	0,00
	2,49	2,22	0,27
	2,52	2,32	0,21
	2,33	2,31	0,03
Média	2,30	2,30	0,00

Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos para o extrato etéreo Tabela 4 também demonstraram consistência, com a maioria das diferenças entre os métodos sendo pequenas, confirmando que o modelo NIR é capaz de prever com precisão o teor de óleo residual.

Para confirmar estatisticamente a equivalência entre as metodologias, foi realizado o Teste t pareado comparando as médias dos valores de referência e os valores preditos pelo modelo NIR para cada um dos analitos. Podemos verificar na Tabela 5 os valores de p obtidos em cada teste t realizado.

Tabela 5 – valores de p obtidos através de teste T duas amostras em par para médias

Dados estatísticos	Umidade	Proteína bruta	Extrato etéreo
Valor p	0,2222	0,0614	0,4987

Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstraram que, para umidade, proteína bruta e extrato etéreo, não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dois conjuntos de dados valor $p > 0,05$. Essa ausência de diferença comprova, de forma robusta, que o método preditivo baseado na Espectroscopia no Infravermelho Próximo é acurado, e que seus resultados podem ser considerados estatisticamente equivalentes aos obtidos pelo método tradicional de referência, validando a substituição da análise laboratorial demorada por uma predição rápida e não destrutiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como finalidade o desenvolvimento de curvas de calibração por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aplicadas à análise de farelo de soja, com foco nas propriedades de umidade, proteína bruta e extrato etéreo. A utilização de 380 amostras possibilitou a construção de modelos robustos e representativos, garantindo ampla variabilidade da matriz e assegurando a confiabilidade estatística dos resultados obtidos.

A pesquisa confirmou que o método de espectroscopia NIR é eficiente para estimar com precisão, os teores de umidade, proteína bruta e extrato etéreo no farelo de soja. As curvas de calibração apresentaram elevados coeficientes de determinação R^2 e baixos erros padrão de validação cruzada (SECV), demonstrando forte correlação entre os valores obtidos pelos métodos convencionais e aqueles estimados pelo modelo NIR. Além disso, o teste t pareado indicou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os resultados laboratoriais e os resultados apresentados pelo NIR ($p > 0,05$), o que comprova a equivalência analítica entre os métodos.

Esses resultados evidenciam que os objetivos propostos foram plenamente alcançados. Com isso, o problema de pesquisa cujo objetivo era avaliar se uma curva de calibração NIR seria capaz de estimar, com precisão, os parâmetros de qualidade do farelo de soja, foi confirmado. O modelo desenvolvido mostrou-se satisfatório e confiável, oferecendo à indústria um método rápido, não destrutivo e mais sustentável, capaz de reduzir o tempo de análise e o uso de reagentes químicos.

De maneira crítica, ressalta-se que, embora o desempenho dos modelos tenha sido consistente, a qualidade preditiva do NIR depende diretamente da manutenção e atualização periódica das calibrações. A ampliação da base de amostras e o controle rigoroso das condições de análise são fatores essenciais para garantir a estabilidade e aplicabilidade do modelo em diferentes lotes de produção e condições operacionais.

Como perspectivas para pesquisas futuras, recomenda-se a expansão do banco de calibração, incorporando amostras provenientes de diferentes origens e safras, o que pode aumentar a robustez e a abrangência dos modelos. Sugere-se também a avaliação de outros parâmetros de qualidade do farelo de soja, como atividade ureática, este parâmetro é de extrema importância para avaliar se o tratamento térmico industrial foi eficiente na desativação dos fatores antinutricionais presentes na soja, além da integração do NIR com sistemas de monitoramento em linha, permitindo medições em tempo real durante o processo industrial. Tais aprimoramentos podem consolidar ainda mais a espectroscopia NIR como uma ferramenta estratégica no controle de qualidade e na automação de processos agroindustriais.

REFERÊNCIAS

AACC. **American Association of Cereal Science. Método 30-25.** Crude Fat in Wheat, Corn, and Soy Flour, Feeds, and Mixed Feeds. 10 ed. 2003.

ABIOVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Capacidade de processamento cresce 5,7% e supera 76 milhões de toneladas em 2025.** [S. l.], 25 set. 2022. Disponível em: <https://abiove.org.br/capacidade-de-processamento-cresce-57-e-supera-76-milhoes-de-toneladas-em-2025/>. Acesso em: 29 set. 2025.

AGROCERES MULTIMIX. **Processamento da soja para obtenção de seus derivados e sua correta avaliação.** 2025. Disponível em: <https://agroceresmultimix.com.br/blog/processamento-da-soja-para-obtencao-de-seus-derivados-e-sua-correta-avaliacao/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ALBAN, Ana Paula Duarte. **Impacto da umidade do farelo de soja no resultado final da proteína bruta.** 2018. 99 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Qualidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23220/1/ENG_QUALI_2018_02.pdf. Acesso em: 18 ago. 2025.

ALVES, Warley. **Importância da qualidade do farelo de soja na indústria avícola.** Deheus, 2023. Disponível em: <https://www.deheus.com.br/explore-e-aprenda/artigos/importancia-da-qualidade-do-farelo-de-soja-na-industria-avicola>. Acesso em: 29 set. 2025.

AMARAL, Daniel Furlan. In: ABIOVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Capacidade de processamento cresce 5,7% e supera 76 milhões de toneladas em 2025.** [S. l.], 25 set. 2022. Disponível em: <https://abiove.org.br/capacidade-de-processamento-cresce-57-e-supera-76-milhoes-de-toneladas-em-2025/>. Acesso em: 29 set. 2025.

AOCS. **Official methods and recommended practices of the AOCS.** Método Ba 4e-93. 7 ed. 2017

AOCS. **Official methods and recommended practices of the AOCS**. Método Ba 2a-38. 7 ed. 2017.

AOCS. **Official methods and recommended practices of the AOCS**. Método Ac 3-44. Oil in soybeans. 7 ed. 2017.

APROSOJA BRASIL. **A Soja: A origem do grão**. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de soja, 2024. Disponível em: <https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>. Acesso em: 29 set. 2025.

ARAUJO, M. M. V. **Indicadores de qualidade em grãos de soja submetidos a diferentes condições de armazenamento**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Cuiabá, 2014. Disponível em: <http://ri.ufmt.br/handle/1/543>. Acesso em: 18 ago. 2025.

BEVILACQUA, M. et al. Application of near infrared (NIR) spectroscopy coupled to chemometrics for dried egg-pasta characterization and egg content quantification. **Food Chemistry**, v. 140, n. 4, p. 726–734, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.018>. Acesso em: 19 ago. 2025.

BOTELHO, B. G. **Desenvolvimento e validação de métodos para análise direta de alimentos usando ferramentas quimiométricas, espectroscopia no infravermelho e imagens digitais**. 2014. 136 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-9TMH34>. Acesso em: 8 ago. 2025.

BUCHI. **ProxiMate™ Operation Manual**. Valinhos, SP: BUCHI Brasil Ltda.

BUCHI. **Guideline for development of NIR calibration models**. Application Note No. 394/2020.

CHEMAT, S. **Edible Oils: Extraction, Processing, and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

CHENG, Ming-Hsun; ROSENTRATER, Kurt A. **Techno-Economic Analysis of Extruding-Expelling of Soybeans to Produce Oil and Meal**. *Agriculture*, v. 9, n. 5, p. 87, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/9/5/87>. Acesso em: 19 ago. 2025.

CHENG, Ming-Hsun; ROSENTRATER, Kurt A. **Profitability Analysis of Soybean Oil Processes**. *Bioengineering*, v. 4, n. 4, p. 83, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bioengineering4040083>. Acesso em: 03 set. 2025.

COMPÊNDIO 2017. **Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal. Método nº 2021.045 – Proteína – método Dumas**. Sindirações: São Paulo, 2017.

COVALENTE. **Avaliando a qualidade do farelo de soja**. Blog Covalente Consultoria, 5 fev. 2018. Disponível em: <https://covalenteconsultoria.com.br/avaliando-a-qualidade-do-farelo-de-soja/>. Acesso em: 30 set. 2025.

CRUZ, Frank George Guimarães; RUFINO, João Paulo Ferreira. **Formulação e Fabricação de Rações (Aves, Suínos e Peixes)**. Manaus: EDUA, 2017.

DEMARCO, A.; GIBON, V. Overview of the soybean process in the crushing industry. **OCL - Oliseeds & fats Crops and Lipids**, v. 27, n. 60, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/pdf/2020/01/ocl200047s.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.

D'OCA, Caroline Da Ros Montes. **Ferramentas espectroscópicas na análise de compostos orgânicos: Uma aproximação descomplicada** [livro eletrônico]. Intersaberes, Curitiba, 2021.

DOLDÁN, Javier. **Una técnica para estudiar propiedades de la madera**. El País Agropecuario, Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideu, Uruguai, p. 10-11, dez. 2011.

EMBRAPA. **História da Soja**. Londrina: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia>. Acesso em: 29 set. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja no brasil: dados econômicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 8 ago. 2025.

EMBRAPA. **Infravermelho detecta contaminantes em grãos**. Portal Embrapa, Brasília, DF, 9 ago. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/15127084/infravermelho-detecta-contaminantes-em-graos>. Acesso em: 5 out. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologia NIR seleciona frutas, caracteriza caju e analisa compostos medicinais em plantas**. Portal Embrapa, Brasília, DF, 27 nov. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/39569166/tecnologia-nir-seleciona-frutas-caracteriza-caju-e-analisa-compostos-medicinais-em-plantas>. Acesso em: 5 out. 2025.

FAGUNDES, Kevin. **Cadeia produtiva do farelo de soja**. TriBlog, 2022. Disponível em: <https://www.3tentos.com.br/triblog/post/90>. Acesso em: 29 set. 2025.

GAFFIELD, Katelyn N. et al. **A review of soybean processing by-products and their use in swine and poultry diets**. Translational Animal Science, [s. l.], v. 8, p. 1-13, 13 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/tas/txae063>. Acesso em: 16 ago. 2025.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

GRASSI, Silvia; CASIRAGHI, Ernestina. **Advances in NIR Spectroscopy Analytical Technology in Food Industries**. Foods, v. 11, n. 1250, p. 1–3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods11091250>. Acesso em: 7 ago. 2025.

GUNSTONE, F. D. (ed.). **Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

JOHNSON, L. A.; WHITE, P. J.; GALLOWAY, R. **Soybeans: Chemistry, Production, Processing and Utilization**. Champaign: AOCS Press, 2008.

LEAL, Marisa Menezes; BILHALVA, Nairiane dos Santos; MORAES, Rosana Santos de; CORADI, Paulo Carteri. **Physical Classification of Soybean Grains Based on Physicochemical Characterization Using Near-Infrared Spectroscopy**. *AgriEngineering*, Basel, v. 7, n. 6, p. 194, jun. 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/6/194>. Acesso em: 3 set. 2025.

MA, H. et al. **Rapid authentication of starch adulterations in ultrafine granular powder of Shanyao by near-infrared spectroscopy coupled with chemometric methods**. *Food Chemistry*, v. 215, p. 108–115, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.156>. Acesso em: 7 ago. 2025.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Metodologia Científica**. Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9786559770670. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559770670/>. Acesso em: 03 out. 2025.

Matos, Hugo Allan. **Apostila da Disciplina de Metodologia da Pesquisa e do Trabalho Científico**. 2017.

PARAÍSO, P. R. **Modelagem e análise do processo de obtenção do óleo de soja**. 2001. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade de Campinas, Campinas, 2001. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/296777599.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2025.

PASQUINI, C. **Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications**. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 14, n. 2, p. 198–219, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/R8Z76mVbzwXk6RCYCLGkSnz/abstract/?lang=en>. Acesso em: 8 ago. 2025.

PAULA, E. F. E. et al. **Determinação da Qualidade da Carne com Uso da Espectroscopia de Reflectância**. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 12, n. 4, p. 301–307, 2013. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/download/5397/6845>. Acesso em: 8 ago. 2025.

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, 2020. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/rac/article/view/370>. Acesso em: 10 ago. 2025.

REICH, G. **Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications**. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 57, n. 8, p. 1109–1143, 2005.

RUNHO, Richard Cesar. **Farelo de soja: processamento e qualidade**. Departamento Técnico de Nutrição e Formulação – Polinutri Alimentos, jan. 2001.

SANTOS, L. R. et al. **Rapid non-invasive assessment of quality parameters in ground soybean using near-infrared spectroscopy**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 1, p. 74-78, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/ZBLsf73SDfv83J4HrDgJ9jK/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SARTORI, A.E.R. **Modelagem, simulação e controle de um secador rotativo industrial**. Maringá, 2001, 92 p. Dissertação (mestrado em Desenvolvimento de Processos), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá (UEM), agosto, 2001.

TIBOLA, Casiane Salete; MEDEIROS, E. P. de; SIMEONE, M. L. F.; OLIVEIRA, M. A. de; ROCHA, F. G. R.; DIXIT, P. M.; GONTIJO NETO, M. M. **Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Avaliar Indicadores de Qualidade Tecnológica e Contaminantes em Grãos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 38 p. (Circular Técnica, 134). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110706/1/PrincipiosEspectroscopiaCap7.2018.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

VADKE, Vivekanand S. **Principles of Vegetable Oil Extraction**. Boca Raton: CRC Press, 2023.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 3.ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.

WANG, Li-qi et al. **Estudo sobre a detecção de qualidade do farelo de soja por espectroscopia no infravermelho próximo baseada em PLS-GRNN**. Spectroscopy and Spectral Analysis, v. 42, p. 1433-1438, maio 2022. Disponível em: <https://m.researching.cn/articles/OJb7ad22d597c0a055>. Acesso em: 18 ago. 2025.