

EFEITOS DO PROCESSAMENTO DO LEITE BOVINO SOBRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ESTRUTURA MOLECULAR AVALIADOS POR ESPECTROSCOPIA FTIR

Mariane Wolf¹;

¹Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite (NCTI)/Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química (DEAQ), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/8711783303286696>

Larissa Karla Monteiro²;

²Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite (NCTI)/Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira, Paraná.

<http://lattes.cnpq.br/6575243577701104>

Leticia Knakiewicz³;

³Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite (NCTI)/Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira, Paraná.

<http://lattes.cnpq.br/5704842454118238>

Andréia Zilio Dinon⁴.

⁴Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite (NCTI)/Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química (DEAQ), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Pinhalzinho, Santa Catarina, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/3603845531003036>

RESUMO: O leite possui elevada densidade nutricional e composição complexa, formada por água, lipídios, proteínas, lactose e minerais. Processos industriais, como padronização do teor de gordura, homogeneização e hidrólise da lactose, podem alterar a organização estrutural da matriz láctea e suas propriedades físico-químicas. Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) destaca-se como técnica rápida e não destrutiva para caracterização de alimentos. Este estudo comparou leites bovinos *in natura*, integral, semidesnatado, desnatado e zero lactose por FTIR, avaliando a influência do processamento nos perfis espectrais e sua relação com

a composição química. Os espectros foram obtidos na região do infravermelho médio, permitindo identificar bandas associadas a lipídios, proteínas e carboidratos. Observou-se redução da intensidade das bandas lipídicas em aproximadamente 2920 e 2850 cm^{-1} nos leites com menor teor de gordura, além de alterações na região de carboidratos do leite zero lactose, com redução da banda em torno de 1118 cm^{-1} e maior contribuição próxima a 1040 cm^{-1} , atribuídas à hidrólise da lactose. A região proteica apresentou perfis semelhantes entre as amostras, sem deslocamentos significativos das bandas de Amida I e II. Conclui-se que a FTIR foi eficaz na diferenciação dos leites e na avaliação dos efeitos do processamento.

PALAVRAS-CHAVE: Espectroscopia FTIR. Leite. Composição Química.

EFFECTS OF BOVINE MILK PROCESSING ON CHEMICAL COMPOSITION AND MOLECULAR STRUCTURE EVALUATED BY FTIR SPECTROSCOPY

ABSTRACT: Milk has high nutritional density and a complex composition consisting of water, lipids, proteins, lactose, and minerals. Industrial processes such as fat standardization, homogenization, and lactose hydrolysis can alter the structural organization of the milk matrix and its physicochemical properties. In this context, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) stands out as a rapid and non-destructive technique for food characterization. This study compared different types of bovine milk (raw, whole, semi-skimmed, skimmed, and lactose-free) using FTIR, evaluating the influence of processing on spectral profiles and their relationship with chemical composition. Spectra were obtained in the mid-infrared region, allowing the identification of bands associated with lipids, proteins, and carbohydrates. A reduction in the intensity of lipid bands at approximately 2920 and 2850 cm^{-1} was observed in samples with lower fat content, as well as changes in the carbohydrate region of lactose-free milk, including reduced intensity around 1118 cm^{-1} and greater contribution near 1040 cm^{-1} , attributed to lactose hydrolysis. The protein region showed similar profiles among samples, without significant shifts in the Amide I and II bands. FTIR proved effective in differentiating milk types and evaluating processing effects.

KEY-WORDS: FTIR Spectroscopy. Milk. Chemical Composition.

INTRODUÇÃO

O leite é um alimento de elevado valor nutricional, amplamente consumido em diferentes faixas etárias, devido à sua composição rica em água, lipídios, proteínas, lactose e minerais (WITARD et al., 2022; CENITI et al., 2023). Essa matriz complexa confere propriedades funcionais, tecnológicas e nutricionais de grande interesse para a indústria de alimentos. No entanto, sua composição pode variar em função de fatores como a espécie animal, a alimentação, o estágio de lactação e as condições ambientais (SILVA et al., 2012).

Além das variações naturais, os processos tecnológicos aplicados após a ordenha influenciam significativamente as características físico-químicas do leite. Nesse contexto, diferentes tipos de leite têm sido disponibilizados ao consumidor, como integral, semidesnatado e desnatado, que se diferenciam principalmente pelo teor de gordura (BRASIL, 2018), além do leite zero lactose, obtido por hidrólise enzimática da lactose (SANTOMAURO et al., 2025).

Entre as tecnologias empregadas, o tratamento térmico por Ultra Alta Temperatura (UHT) é amplamente utilizado para garantir segurança microbiológica e aumentar a vida útil do produto (BRASIL, 2018; BRASIL, 2025). Embora eficaz na inativação de microrganismos (QIAN et al., 2017), esse processo pode induzir alterações estruturais na matriz láctea, como desnaturação e agregação proteica, além de promover interações entre proteínas do soro e micelas de caseína, impactando as propriedades físico-químicas e tecnológicas do leite (LI et al., 2021; KRISHNA et al., 2021; ČURLEJ et al., 2022; HAYES et al., 2025).

Nesse cenário, a caracterização analítica do leite é essencial para garantir a qualidade e a autenticidade. A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) destaca-se como uma técnica rápida, não destrutiva e eficiente, capaz de fornecer informações sobre a composição química a partir das vibrações moleculares dos constituintes da amostra (CENITI et al., 2023; DARWESH et al., 2025).

Em sistemas lácteos, essa técnica permite identificar regiões espectrais associadas a lipídios (estiramento C–H), proteínas (Amida I e II) e carboidratos (região de impressão digital), possibilitando a detecção de alterações decorrentes do processamento (AERNOUTS et al., 2011; ACUÑA-NELSON et al., 2024). Apesar do avanço dessas aplicações, ainda são limitados os estudos que comparam, de forma integrada, diferentes tipos de leite comercial, considerando simultaneamente suas variações composicionais e os efeitos do processamento sobre seus perfis espectrais.

OBJETIVO

O presente capítulo tem como objetivo comparar diferentes tipos de leite (*in natura*, integral, semidesnatado, desnatado e zero lactose) por meio da espectroscopia FTIR, avaliando as variações espectrais associadas aos principais constituintes e discutindo a influência dos processos industriais na composição química desses produtos.

METODOLOGIA

Amostras

Foram analisadas amostras de leite bovino dos tipos *in natura*, integral, semidesnatado, desnatado e zero lactose. As amostras processadas, submetidas ao tratamento térmico UHT, foram adquiridas no comércio local, enquanto o leite *in natura* foi obtido diretamente

de uma propriedade rural localizada no oeste de Santa Catarina, Brasil. As amostras foram mantidas sob refrigeração (4 °C) e analisadas em até 48 horas após a coleta ou aquisição. Antes das análises espectroscópicas, as amostras foram homogeneizadas em agitador magnético (IKA C-MAG HS 7) por 5 min, sem aquecimento, visando garantir maior uniformidade da matriz e minimizar possíveis variações associadas à separação de fases.

Aquisição dos espectros FTIR e Delineamento experimental

Os espectros foram obtidos em um espectrômetro FTIR Spectrum Two (PerkinElmer®, EUA), equipado com acessório ATR, na região de 4000–550 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 16 varreduras. As análises foram realizadas à temperatura ambiente, com limpeza do cristal de ATR entre as amostras. O experimento foi conduzido em delineamento com três réplicas independentes por tipo de amostra de leite. Os resultados espectrais correspondem à média das réplicas.

Tratamento dos dados espectrais

Os espectros obtidos foram submetidos a pré-processamentos para melhorar a qualidade dos dados e possibilitar comparações mais robustas entre as amostras. As análises foram realizadas considerando regiões espectrais específicas associadas aos principais constituintes do leite, como lipídios, proteínas e carboidratos, o que permitiu interpretar as variações observadas em função do tipo de leite.

Análise estatística

Os espectros foram pré-processados e analisados em regiões características associadas a lipídios, proteínas e carboidratos. As análises foram realizadas no software OriginPro 2024b (OriginLab, EUA), sendo calculados médias e coeficientes de variação para avaliação da reprodutibilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

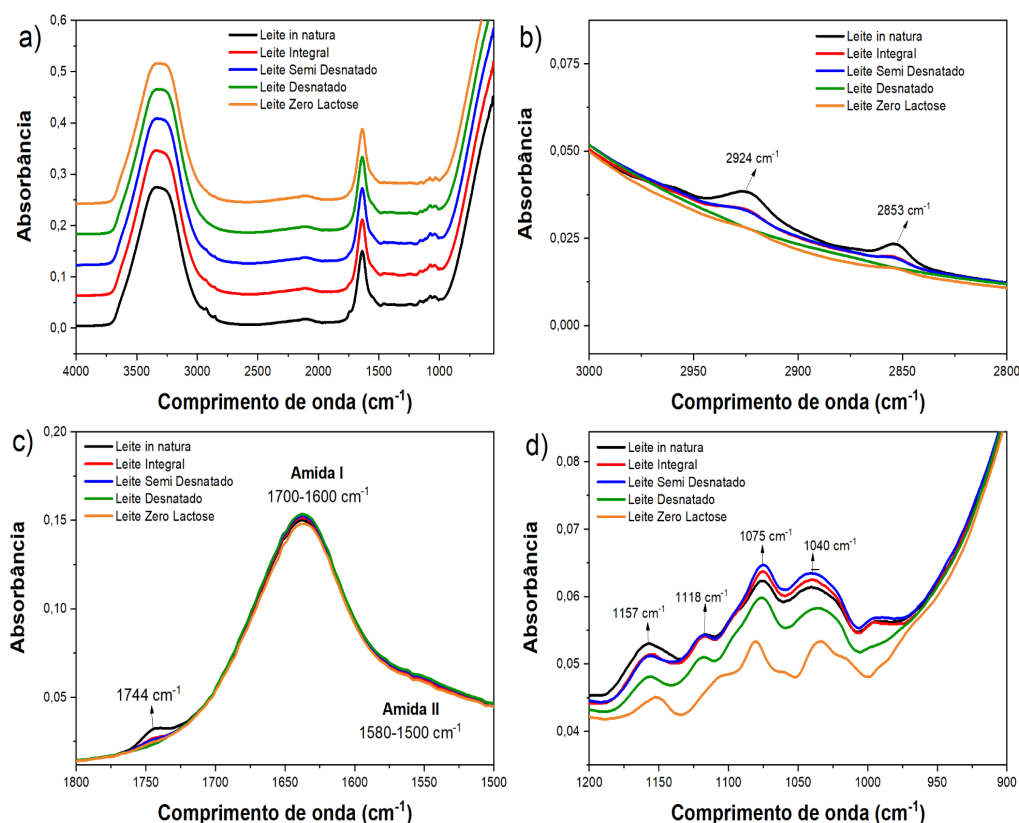
Discriminação entre os espectros de leites

A análise dos espectros FTIR (Figura 1) evidencia que as principais diferenças entre os tipos de leite estão associadas à composição química e às modificações estruturais induzidas pelo processamento. A interpretação das regiões espectrais permitiu avaliar, de forma integrada, o comportamento das frações lipídicas, proteicas e de carboidratos, destacando diferentes níveis de sensibilidade às variações composicionais e estruturais. A reprodutibilidade dos dados foi confirmada por baixos coeficientes de variação, com valores médios de 1,26% entre as réplicas, indicando elevada consistência experimental.

A região de 3000–2800 cm^{-1} (Figura 1b), associada às vibrações de estiramento das ligações C–H de grupos metila (CH_3) e metileno (CH_2), apresentou perfis espectrais semelhantes entre as amostras, indicando a presença consistente de cadeias alifáticas características dos lipídios do leite. As bandas observadas em aproximadamente 2924 e 2853 cm^{-1} são atribuídas aos estiramentos assimétricos e simétricos dos grupos CH_2 , respectivamente, com possíveis contribuições de grupos CH_3 sobrepostas, características da fração lipídica do leite (GRELET et al., 2017). Apesar da similaridade na forma dos espectros, foram observadas diferenças marcantes na intensidade das bandas, o que reflete diretamente o teor de gordura dos diferentes tipos de leite. Os leites integral e semidesnatado apresentaram maiores intensidades de absorção, enquanto os leites desnatados e zero lactose exibiram menor contribuição espectral nessa região, devido à redução da fração lipídica.

Além da intensidade, a organização estrutural dos lipídios também influencia a resposta espectral. Nesse contexto, a banda em 1744 cm^{-1} (Figura 1c), atribuída ao estiramento da ligação C=O de grupos éster presentes nos triglicerídeos, mostrou-se particularmente sensível às diferenças entre as amostras. O leite *in natura* apresentou comportamento distinto em relação aos leites processados, sugerindo maior preservação da estrutura dos glóbulos de gordura e da organização lipídica original. Em sistemas não processados, os lipídios encontram-se organizados em glóbulos revestidos por uma membrana biológica complexa, o que influencia o ambiente químico das ligações carbonila (AERNOUTS et al., 2011).

Figura 1: (a) Espectros FTIR representativos dos diferentes tipos de leite (*in natura*, integral, semidesnatado, desnatado e zero lactose) na região do infravermelho médio; (b) ampliação da região de estiramento C–H (3000–2800 cm^{-1}), associada aos lipídios; (c) ampliação da região de Amida I ($\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$), relacionada às proteínas; e (d) ampliação da região de impressão digital (1200–900 cm^{-1}), associada principalmente aos carboidratos. As diferenças observadas entre os espectros refletem variações na composição química e nos efeitos do processamento.



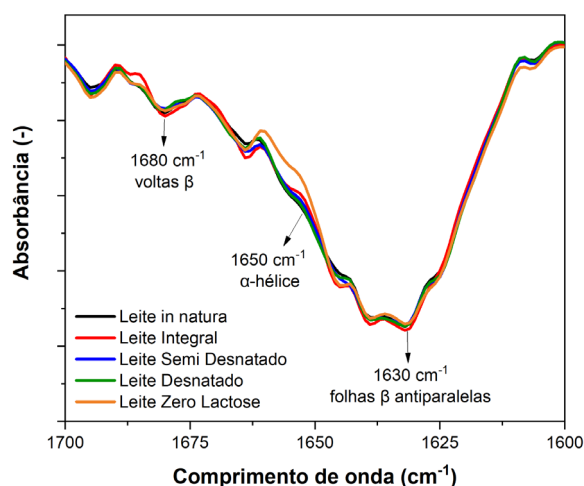
Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, o processamento industrial, especialmente a homogeneização e o tratamento térmico, promove a redução do tamanho dos glóbulos de gordura e o aumento da área interfacial, favorecendo interações com proteínas e outros constituintes da matriz. Essas alterações estruturais podem modificar o microambiente químico dos grupos funcionais e, conseqüentemente, a resposta espectral observada, refletindo não apenas diferenças quantitativas, mas também mudanças na organização da matriz láctea (ACUÑA-NELSON et al., 2024; LI et al., 2021; KRISHNA et al., 2021).

Em contraste, a região de 1800–1500 cm^{-1} (Figura 1c), correspondente às bandas de Amida I e II, apresentou elevada similaridade entre as amostras, com pouca variação na posição das bandas e apenas diferenças sutis de intensidade. Embora essa região seja sensível à estrutura secundária das proteínas, os resultados indicam que as alterações decorrentes do processamento não foram suficientemente expressivas para provocar mudanças detectáveis na análise direta por FTIR.

A aplicação da segunda derivada na região da Amida I (Figura 2) permitiu uma melhor resolução das bandas sobrepostas, evidenciando contribuições associadas a diferentes estruturas secundárias, como folhas β ($\sim 1620\text{--}1635\text{ cm}^{-1}$), estruturas desordenadas ($\sim 1640\text{--}1645\text{ cm}^{-1}$), hélices α ($\sim 1650\text{--}1655\text{ cm}^{-1}$) e voltas β ($\sim 1680\text{ cm}^{-1}$) (ACUÑA-NELSON et al., 2024; MARKOSKA et al., 2019). Apesar do aumento da resolução espectral, os perfis permaneceram semelhantes entre as amostras, com variações discretas na intensidade relativa das bandas, sugerindo que a estrutura secundária das proteínas foi amplamente preservada. Esse comportamento difere parcialmente da literatura, na qual tratamentos térmicos e variações composicionais promovem mudanças estruturais mais evidentes (ACUÑA-NELSON et al., 2024). No presente estudo, tais alterações não foram significativas, havendo apenas concordância na identificação das bandas da Amida I (MARKOSKA et al., 2019), porém, com variações sutis de intensidade. Assim, a fração proteica mostrou-se mais conservada e menos sensível ao processamento, reforçando o uso da segunda derivada como ferramenta complementar na análise estrutural.

Figura 2: Picos característicos da segunda derivada dos espectros FTIR de amostras de leites.



Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a região de $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ (Figura 1d), característica de carboidratos, apresentou maior sensibilidade às variações composicionais e estruturais entre as amostras. Essa região está associada principalmente às vibrações de estiramento das ligações C–O, C–C e C–O–H, sendo representativa da lactose presente no leite. Os espectros das amostras de leite integral, semidesnatado e *in natura* apresentaram bandas mais intensas e bem definidas nessa faixa, indicando maior contribuição da fração de carboidratos e maior conteúdo relativo de sólidos totais.

Observou-se que a intensidade dos picos em aproximadamente 1160 , 1118 , 1075 e 1040 cm^{-1} diminuiu concomitantemente à redução dos sólidos totais presentes nas amostras, com destaque para os leites desnatados e zero lactose (Figura 1d). Essa tendência está

associada à redução da contribuição relativa dos constituintes orgânicos que absorvem nesta região do espectro (MARKOSKA et al., 2019).

Para o leite zero lactose, verificaram-se não apenas reduções na intensidade das bandas, mas também alterações no formato espectral, indicando modificações estruturais nos carboidratos. Esse comportamento está relacionado à hidrólise enzimática da lactose em glicose e galactose, que resulta na ruptura das ligações glicosídicas entre esses monossacarídeos. Como consequência, observa-se a redução da banda em torno de 1118 cm^{-1} , menor intensidade em aproximadamente 1157 cm^{-1} e maior contribuição relativa na região de 1040 cm^{-1} . Essas bandas estão associadas, respectivamente, às vibrações de estiramento C–O–C do éter e de C–O, sendo características de carboidratos e de seus produtos de degradação (GRELET et al., 2015; PINTO et al., 2021).

Adicionalmente, o pico em torno de 1075 cm^{-1} tem sido associado à presença de grupos fosfato ligados covalentemente à caseína (JAISWAL et al., 2015; MARKOSKA et al., 2019). A variação na intensidade dessa banda pode estar associada a alterações na organização das micelas de caseína e na interação com fosfatos de cálcio, especialmente em sistemas com diferentes concentrações de sólidos.

De modo geral, os resultados evidenciam que diferentes regiões espectrais apresentam níveis distintos de sensibilidade às modificações impostas pelo processamento do leite. Enquanto a fração lipídica se destaca pela alta sensibilidade estrutural e composicional, a fração proteica apresenta comportamento mais conservado, e a região de carboidratos demonstra elevada capacidade de discriminação, especialmente em sistemas submetidos à hidrólise da lactose.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que a espectroscopia FTIR é uma ferramenta eficiente para a caracterização e diferenciação de diferentes tipos de leite, permitindo identificar variações associadas à composição química e aos efeitos do processamento. As regiões espectrais analisadas evidenciaram comportamentos distintos entre os constituintes da matriz láctea, sendo a fração lipídica a mais sensível às modificações decorrentes de etapas industriais, como a homogeneização e o tratamento térmico.

Por outro lado, a fração proteica apresentou maior estabilidade estrutural entre as amostras, com variações predominantemente relacionadas à intensidade das bandas, enquanto a região de carboidratos mostrou-se particularmente sensível à hidrólise da lactose, o que permitiu distinguir claramente o leite zero lactose dos demais.

De modo geral, os resultados reforçam o potencial da espectroscopia FTIR como técnica rápida, não destrutiva e aplicável ao controle de qualidade e à avaliação de autenticidade de produtos lácteos, contribuindo para a compreensão das alterações estruturais e composicionais induzidas pelo processamento.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio no Projeto FAPESC 2024TR002108, ao Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite (NCTI) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

REFERÊNCIAS

- ACUÑA-NELSON, S. M. et al. **Effect of UHT thermal treatment on the secondary structures of milk proteins: insights from FTIR analysis and potential allergenic activity.** *International Journal of Food Science*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/1880779>
- AERNOUTS, B. et al. **Mid-infrared spectrometry of milk for dairy metabolomics: a comparison of two sampling techniques and effect of homogenization.** *Analytica Chimica Acta*, v. 705, n. 1–2, p. 88–97, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.04.018>
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Portaria MAPA nº 783, de 4 de abril de 2025.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 4 abr. 2025. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-783-de-4-de-abril-de-2025-624604268>. Acesso em: 31 de mar. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 nov. 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/52750137. Acesso em: 31 de mar. 2026.
- CENITI, C. et al. **Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid-infrared spectroscopy.** *Foods*, v. 12, n. 15, p. 2917, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12152917>
- ČURLEJ, J. et al. **Effect of thermal treatment on protein profiles of cow's milk.** *Foods*, v. 11, n. 7, p. 1023, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11071023>
- DARWESH, O. M. et al. **Recent technologies for detection of milk contaminants: characterization and mechanism of action: a review article.** *Discover Food*, v. 5, p. 140, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00423-5>
- GRELET, C.; PIERNA, J. F.; DARDENNE, P.; BAETEN, V.; DEHARENG, F. **Standardization of milk mid-infrared spectra from a European dairy network.** *Journal of Dairy Science*, v. 98, n. 4, p. 2150–2160, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8764>
- HAYES, E. et al. **Real-time measurement of the thermal stability of skim milk using ATR-FTIR spectroscopy.** *International Journal of Dairy Technology*, v. 78, e13156, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.13156>
- JAISWAL, P.; JHA, S. N.; BORAH, A.; GAUTAM, A.; GREWAL, M. K.; JINDAL, G. **Detection**

- and quantification of soymilk in cow–buffalo milk using ATR–FTIR spectroscopy.** *Food Chemistry*, v. 168, p. 41–47, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.010>
- KRISHNA, T. C. et al. **Influence of ultra-heat treatment on properties of milk proteins.** *Polymers*, v. 13, n. 18, p. 3164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13183164>
- LI, H. et al. **Effect of heat treatment on the property, structure, and aggregation of skim milk proteins.** *Frontiers in Nutrition*, v. 8, p. 714869, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.714869>
- MARKOSKA, T.; HUPPERTZ, T.; GREWAL, M. K.; VASILJEVIC, T. **FTIR analysis of physicochemical changes in raw skim milk upon concentration.** *LWT*, v. 102, p. 64–70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.011>
- PINTO, P. A.; ANCONI, A. C. S. A.; DE ABREU, L. R.; MAGALHÃES, E. J.; NUNES, C. A. **Strategies to determine lactose in cow milk by mid infrared spectroscopy.** *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 104, p. 104176, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104176>
- QIAN, F. et al. **Experimental and modelling study of the denaturation of milk protein by heat treatment.** *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, v. 37, n. 1, p. 44–51, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.1.44>
- SANTOMAURO, R. A. et al. **Effect of lactose-free UHT milk macromolecules on the coligative property of cryometry.** *Food Science and Technology*, v. 45, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5327/fst.00510>
- SILVA, G.; SILVA, A. M. A. D.; FERREIRA, M. P. B. **Processamento de leite.** Recife: EDU-FRPE, 2012.
- WITARD, O. C. et al. **Dairy as a source of iodine and protein in the UK: implications for human health across the life course, and future policy and research.** *Frontiers in Nutrition*, v. 9, p. 800559, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.800559>