

Desenvolvimento de modelos matemáticos para a determinação do extrato seco total do soro de leite

Development of mathematical models for the determination of total solids in whey

Desarrollo de modelos matemáticos para la determinación del extracto seco total de lactosuero

Recebido: 05/05/2022 | Revisado: 14/05/2022 | Aceito: 28/05/2022 | Publicado: 04/06/2022

Mariana Leite Simões e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4178-3051>
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
E-mail: marianaleitesimoes@gmail.com

Álvaro Augusto Pereira Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9843-5579>
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
E-mail: alvaroaps2013@gmail.com

Alan Wolfschoon Pombo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8198-7059>
Inovaleite – Grupo de Pesquisa Multicêntrico, Brasil
E-mail: awolfschoon@googlemail.com

Ítalo Tuler Perrone

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3393-4876>
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
E-mail: italotulerperrone@gmail.com

Rodrigo Stephani

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0237-8325>
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
E-mail: rodrigo.stephani@ufjf.edu.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos matemáticos para o cálculo do extrato seco total do soro de leite de maneira indireta. A determinação indireta do extrato seco é mais rápida, necessita de análises menos complexas e apresenta dados aproximados ao método direto de referência (gravimétrico), em estufa. O extrato seco do soro contém gordura, proteínas, minerais e lactose, as quais possuem alto valor tecnológico e tornam a quantificação do extrato seco importante para analisar o valor do soro e verificar se o soro está dentro das normas. Para desenvolver os modelos matemáticos, foram analisadas dezessete amostras de soro obtidas pela coagulação de leite integral e dezessete obtidas pela coagulação de leite desnatado. As amostras de soro foram analisadas quanto ao pH, gordura, densidade, sólidos solúveis e extrato seco pelo método direto. Assim, desenvolveram-se três equações para o cálculo do extrato seco total do soro de leite através dos dados de gordura, densidade e umidade: uma para soro de leite integral, uma para soro de leite desnatado e uma que abrangeu os dois tipos de soro. Verificou-se que não houve diferença significativa entre as médias de extrato seco total obtidas pelos métodos direto e indireto para os três grupos de soro considerados, pelo teste t de Student ao nível de 5% de significância. Logo, conclui-se que o método indireto é uma alternativa a ser empregada para o soro doce, considerando a confiabilidade dos resultados e o menor tempo gasto para a obtenção desses resultados em comparação ao método direto.

Palavras-chave: Lácteos; Soro, Sólidos totais; Modelo matemático.

Abstract

The objective of this study was to develop mathematical models for the indirect calculation of the dry matter content of whey. The indirect determination of the dry matter is faster, requires less complex analysis and presents data similar to the gravimetric reference method (oven drying). The dry matter of whey contains fat, proteins, minerals and lactose, which have a high technological value and make the quantification of the dry extract important to quantify the (techno-economical) value of the whey and verify that the whey is within the norms. To develop the mathematical models, seventeen samples of whey obtained by coagulation of pasteurized whole milk and seventeen obtained by coagulation of pasteurized skim milk were analyzed. The whey samples were analyzed for pH, fat, density, soluble solids and total solids by the direct method. Thus, three equations were developed for calculating the dry matter of whey through fat, density and moisture data: one for whey from whole milk, one for whey from skimmed milk and one that covered both types of whey. It was found that there was no significant difference between the means of dry matter obtained by direct and indirect methods for the three groups of whey considered a Student's t test at a 5%

significance level. It was concluded that the indirect method is an alternative to be used for sweet whey, considering the reliability of the results and the shorter time required to obtain those results compared to the direct method.

Keywords: Dairy; Whey; Total solids; Mathematical model.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar modelos matemáticos para el cálculo indirecto del extracto seco total de suero. La determinación indirecta del extracto seco es más rápida, requiere análisis menos complejos y presenta datos similares al método de referencia directa (gravimetría, secado en horno). El extracto de suero seco contiene grasa, proteínas, minerales y lactosa, que tienen un alto valor tecnológico y hacen que la cuantificación del extracto seco sea importante para analizar el valor (técnico-económico) del suero y verificar que el suero esté dentro de las normas. Para desarrollar los modelos matemáticos se analizaron diecisiete muestras de suero obtenido por coagulación de leche entera y diecisiete obtenidos por coagulación de leche descremada. Las muestras de suero se analizaron para pH, grasa, densidad, sólidos solubles y extracto seco por el método directo. Así, se desarrollaron tres ecuaciones para calcular el extracto seco total de suero a través de datos de grasa, densidad y humedad: una para suero de leche entera, otra para suero de leche descremada y otra que abarcaba ambos tipos de suero. Se verificó que no hubo diferencia significativa entre las medias de extracto seco total obtenidas por los métodos directo e indirecto para los tres grupos de sueros considerados, mediante la prueba t de Student al 5% de significación. Por lo tanto, se concluye que el método indirecto es una alternativa a utilizar para el suero dulce, considerando la confiabilidad de los resultados y el menor tiempo empleado para obtener estos resultados en comparación con el método directo.

Palabras clave: Productos lácteos; Suero; Sólidos totales; Modelo matemático.

1. Introdução

O soro de leite é um coproduto da fabricação de queijos, obtido após a remoção da coalhada de caseína do leite. De acordo com a técnica utilizada para a coagulação do leite, obtém-se o soro de leite doce ou ácido (Tavares, 2020, Tsermoula, et al., 2021). O soro ácido é produzido pela coagulação ácida do leite, por meio da adição de ácido ou de cultura de bactérias lácticas. Já o soro doce é produzido através da coagulação enzimática do leite pela adição de coalho, tipicamente composto por renina e pepsina, isto é, proteases (enzimas) com função de coagular a caseína (Schuck, et al., 2004). As principais diferenças entre os soros ácido e doce consistem nos valores de pH, no perfil mineral, na quantidade de lactose e ácido láctico e no teor de proteínas. O soro ácido é caracterizado por valores mais baixos de pH (pH~4,6-4,7) em comparação ao soro doce (pH~5,9-6,4) e contém maior quantidade de íons cálcio, ânions fosfato e ácido láctico (Pires, et al., 2021, Merkel et al., 2021, Zhao et al., 2022).

Em uma composição aproximada, o soro de leite apresenta 93 a 94% de umidade e 6 a 7% de sólidos totais, sendo que dentre os principais constituintes dos sólidos totais, a lactose (4,5 a 5%) e as proteínas (0,7 a 0,9%) se destacam, junto com os minerais e a gordura, por serem compostos valiosos para a indústria. As proteínas do soro de leite, além de fornecerem aminoácidos com benefícios relacionados a aspectos nutricionais, contêm algumas propriedades funcionais (gelificação, emulsificação e formação de espuma). Tais fatores fizeram com que o soro de leite ganhasse atenção de vários setores industriais, tendo em vista suas potencialidades energéticas, farmacêuticas e nutricionais (Duarte, et al., 2020, Setiowati et al., 2020, Pires, et al., 2021, Zhang, et al., 2021).

Atualmente, as proteínas do soro de leite são comumente concentradas e secas para produzir concentrados ou isolados proteicos, os quais são amplamente usados na fabricação de outros alimentos. Dessa forma, ao utilizar componentes dos sólidos totais do soro de leite para a geração de outros produtos, passa a ser importante quantificar esses sólidos, também chamados de extrato seco, matéria seca ou sólidos totais. O extrato seco total (EST) compreende a totalidade dos componentes do soro de leite, exceto água e gases dissolvidos. A quantificação do EST objetiva analisar o valor do soro que será usado na geração de outros produtos, além de ser importante para comprovar se o soro está dentro das normas preconizadas (Paolone, 1957, Wherry et al., 2019).

A determinação do extrato seco total pode ser realizada através de dois métodos distintos, denominados direto e indireto. A determinação direta é precisa, exata e rigorosa, porém é demorada e trabalhosa de ser executada. Já a determinação

indireta é rápida, necessita de análises menos complexas e apresenta dados bastante aproximados ao método direto (Corrêa et al., 2016). Logo, pesquisadores como Fleischmann, Pien, Niklas, Quensville e Furtado desenvolveram métodos indiretos para calcular o extrato seco, até então, do leite, com bastante aproximação em comparação ao método direto. A fórmula de Fleischmann, inclusive, foi suficientemente precisa para ser aceita e utilizada em muitos países até os dias atuais (Paolone, 1957, Pereira, 1979, Wolfschoon Pombo, et al., 2021).

Os métodos indiretos desenvolvidos para o cálculo do extrato seco total do leite, no entanto, não expressam resultados satisfatórios quando aplicados ao soro de leite, visto que a composição de ambos é distinta. Logo, para a obtenção de uma fórmula que expresse resultados exatos e confiáveis para o soro, o desenvolvimento do modelo matemático deve ser fundamentado em dados físico-químicos e na composição desse produto em específico. No estudo realizado por Wolfschoon-Pombo, et al. (2021), desenvolveu-se uma equação para o cálculo do extrato seco do soro de leite doce, a qual possibilita o cálculo do teor de extrato seco total desse produto em g.100g⁻¹. Nesse trabalho, a equação apresentada gerou resultados satisfatórios para o cálculo do extrato seco total do soro, quando estes foram comparados ao método de referência. Isso corrobora com os estudos já realizados para o leite, que demonstraram a confiabilidade dos resultados obtidos através das fórmulas destinadas ao cálculo do extrato seco total do leite (Wolfschoon Pombo, et al., 2021).

Com o desenvolvimento de um método indireto para determinar o extrato seco total do soro de leite, espera-se que seja possível obter esse resultado utilizando, somente, um termolactodensímetro, para determinar a densidade, e um butirômetro de Gerber, para determinar o teor de gordura. Isso porque, para calcular o extrato seco total por meio dos modelos matemáticos, necessita-se apenas do valor da densidade e do teor de gordura do soro, o que demonstra a importância do desenvolvimento desses modelos para otimizar a determinação dos sólidos totais.

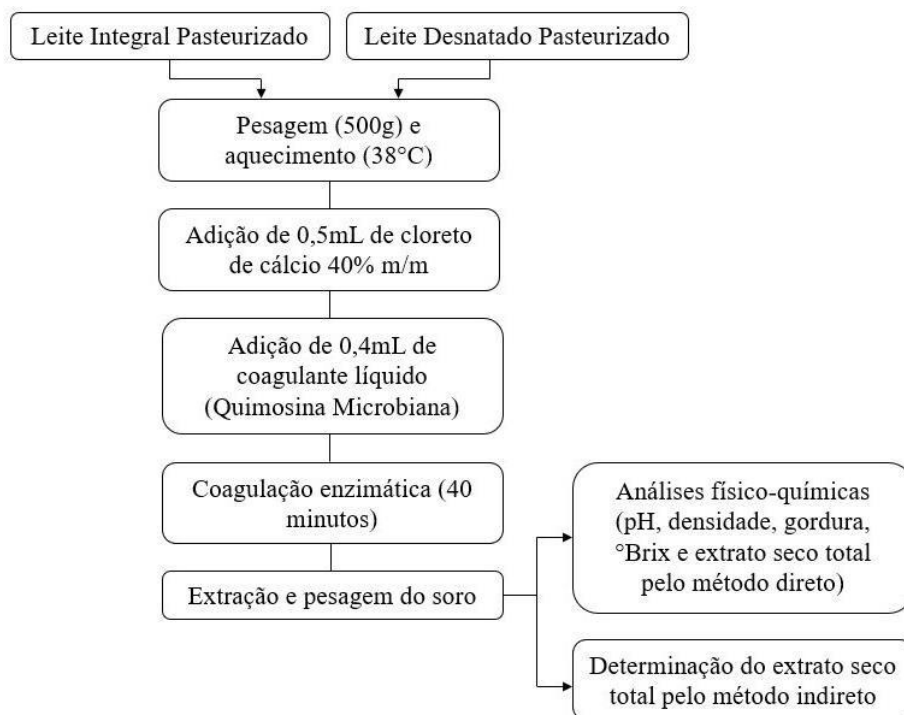
Dessa forma, o presente trabalho objetivou o desenvolvimento de três modelos matemáticos para calcular, de maneira indireta, o extrato seco total do soro de leite doce em g.100mL⁻¹. Além disso, o estudo teve como propósito a elaboração de um modelo matemático simplificado e dinâmico, que possibilita a elaboração de outras equações para o cálculo do extrato seco total de produtos que não apresentem composição igual a do soro de leite doce produzido neste trabalho.

2. Metodologia

O trabalho baseia-se em uma pesquisa experimental, na qual os soros produzidos a partir de leite integral e leite desnatado foram utilizados para desenvolver modelos matemáticos para calcular, de maneira confiável, o teor de extrato seco total das amostras. Na pesquisa experimental, os investigadores selecionam as variáveis que serão estudadas, definem a forma de controle sobre elas e observam os efeitos sobre o objeto de estudo, em condições pré-estabelecidas. Nesse contexto, visto que as variáveis podem ser manipuladas pelo pesquisador, equívocos e vieses praticamente desaparecem, o que proporciona maior confiabilidade nos resultados (Fontelles, et al., 2009, Severino, 2013).

Os experimentos desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Química e Tecnologia (QUIMTEC) do Departamento de Química da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). A Figura 1 apresenta um fluxograma dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

Figura 1. Delineamento experimental da produção e das análises dos soros de leite.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.1 Amostras de soro de leite

Foram analisadas 34 diferentes amostras de soros, 17 obtidas a partir da coagulação enzimática de leites integrais pasteurizados e 17 obtidas a partir da coagulação enzimática de leites desnatados pasteurizados, obtidos no mercado local.

Para a produção do soro de leite doce, 500g de leite eram pesados e aquecidos até a temperatura de 38°C. Posteriormente, adicionava-se ao leite 0.5mL de cloreto de cálcio 40% m/m e 0.4mL de coagulante líquido (Quimosina Microbiana – HA-LA®). Assim, o leite era mantido a uma temperatura de 38°C ± 2°C por 40 minutos e, passado esse tempo, o corte da massa era feito. Finalmente, um dessorador era utilizado para extrair o soro e, feito isso, realizava-se a pesagem do soro. Com isso, as análises físico-químicas eram executadas.

2.2 Análises físico-químicas

2.2.1 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

As análises dos soros para determinar o pH foram realizadas a 25°C com um pHmetro digital GEHAKA (PG 1400), devidamente calibrado com as soluções-padrão de pH iguais a 4.0 e 7.0.

2.2.2 Determinação de densidade

A determinação da densidade dos soros, realizada com termolactodensímetro, consistiu em preencher uma proveta com o soro do leite e mergulhar o termolactodensímetro, suavemente, com o cuidado de evitar que o termolactodensímetro encostasse nas paredes da proveta. As leituras de densidade e temperatura foram realizadas ao nível do soro, no menisco superior, após a estabilização do termolactodensímetro. Após esse procedimento, foi utilizada uma tabela de correção para que todos os valores de densidade fossem expressos a 15°C (Instituto Adolfo Lutz, 2005). No presente trabalho, utilizou-se g.mL⁻¹ como unidade para a densidade.

2.2.3 Determinação do teor de gordura

O teor de gordura foi determinado pelo método butirométrico de Gerber. Esse método é baseado na propriedade que o ácido sulfúrico possui de digerir (hidrolisar) as proteínas do leite, sem atacar a matéria gorda. A separação da gordura ocorre por diferença de densidade durante a centrifugação, uma vez que o componente mais leve (a gordura) se acumula na parte superior do equipamento, isto é, na haste graduada do butirômetro (Brasil, 2019).

2.2.4 Determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix)

As análises do teor de sólidos solúveis (°Brix) foram realizadas por dois refratômetros distintos, o refratômetro digital (Ma871) e o refratômetro de bancada analógico tipo Abbe (AAKER). O refratômetro digital, em poucos segundos, fixa a temperatura e mede o índice de refração, convertendo-o em °Brix. Enquanto isso, a leitura dos sólidos solúveis (°Brix) no refratômetro de Abbe, em uma escala graduada, é realizada quando a divisão entre as duas partes visíveis no campo de observação da ocular, uma clara e uma escura, coincide com a interseção das linhas do retículo (Ribeiro, 2010).

2.2.5 Determinação do extrato seco total por gravimetria (método direto)

A determinação do extrato seco total foi realizada através de método gravimétrico e por perda por dessecação. O método gravimétrico foi realizado em estufa, a uma temperatura de 100 ± 1 °C (Método Oficial 925.23; AOAC, 2019). A perda por dessecação foi executada em uma balança de infravermelho (MA150) a 150°C, sendo que a análise se encerrava quando três valores consecutivos obtinham diferença máxima de $0.05 \text{ g} \cdot 100\text{g}^{-1}$.

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização físico-química dos soros

As análises físico-químicas realizadas com os soros podem ser observadas nas Tabelas 1 e 2. Nessas tabelas, são apresentadas as médias e os respectivos desvios padrões de cada uma das análises correspondentes aos soros produzidos a partir de leite pasteurizado integral ($n = 17$) e aos soros produzidos a partir de leite pasteurizado desnatado ($n = 17$).

Tabela 1. Médias e desvios padrões obtidos através das análises físico-químicas realizadas com os soros integrais e desnatados.

Parâmetros determinados	Tipo de soro analisado	
	Integral	Desnatado
Potencial hidrogeniônico (pH)	6.52 ± 0.09	6.51 ± 0.06
Gordura ($\text{g} \cdot 100\text{mL}^{-1}$)	0.66 ± 0.24	0.06 ± 0.05
Densidade a 15°C ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	1.0280 ± 0.0007	1.0288 ± 0.0005

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com a proposta submetida à consulta pública em 2013 para a definição de um Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Soro de Leite, o pH do soro de leite deve estar entre 6.00 e 6.80 (Brasil, 2013). Nesse sentido, pode-se afirmar que os dois tipos de soro de leite analisados se encontram de acordo com a legislação vigente.

Em ambos os tipos de soro, o teor de gordura foi baixo e próximo de valores já mencionados na literatura, em que se obtiveram teores de 0% de gordura para soros desnatados e cerca de 0.5% para soros integrais (Venturoso, et al., 2007). O baixo teor de gordura no soro indica que não houve grande perda de gordura do leite para o soro, o que implica em um bom rendimento (na fabricação de queijos).

Os valores de densidade a 15°C obtidos pelas análises foram de 1.0280 g.mL⁻¹ para o soro integral e de 1.0288 g.mL⁻¹ para o soro desnatado. Esses valores encontram-se próximos de outros já observados na literatura, como no estudo realizado por Venturoso, et al. (2007), no qual obtiveram-se valores de densidade a 15°C para o soro de leite entre 1.0250 e 1.030 g.mL⁻¹.

Tabela 2. Médias e desvios padrões obtidos através das análises de sólidos solúveis e extrato seco total realizadas com os soros integrais e desnatados.

Parâmetros determinados	Metodologia	Tipo de soro analisado	
		Integral	Desnatado
Sólidos solúveis (°Brix)	Refratômetro de Abbe	7.15 ± 0.24 ^a	7.18 ± 0.25 ^a
	Refratômetro digital	6.88 ± 0.14 ^b	6.88 ± 0.23 ^b
Extrato seco total pelo método direto (g.100g ⁻¹)	Estufa	7.04 ± 0.27 ^a	6.48 ± 0.14 ^a
	Balança de infravermelho	7.38 ± 0.31 ^b	6.95 ± 0.21 ^b

* Médias seguidas da mesma letra, na mesma coluna, para o mesmo parâmetro analisado, no mesmo tipo de soro, não diferem entre si pelo teste t de Student, ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pelos autores.

O teor de sólidos solúveis dos soros integral e desnatado foi determinado através do refratômetro de Abbe e do refratômetro digital. Nos dois tipos de soro, a média obtida pelo refratômetro de Abbe diferiu-se significativamente da média obtida pelo refratômetro digital ($p < 0.05$). Na tabela 2, observa-se que os extratos secos determinados com a balança de infravermelho foram muito maiores, o que poderia ser atribuído à calibração da mesma, ou à presença da gordura. Esses são pontos para posteriores pesquisas.

Quanto ao extrato seco total, para o soro integral e para o soro desnatado, houve diferença significativa entre as médias obtidas pelos dois métodos de secagem empregados no estudo ($p < 0.05$). Apesar da diferença significativa entre os métodos, observa-se que as médias obtidas para os soros integral e desnatado estão próximas de outros valores já reportados na literatura, em que se estima uma faixa de 6.3 a 7% de extrato seco total no soro (Tavares, 2020, Zhao, Chen & Ashaolu, 2022).

3.2 Determinação do extrato seco total através dos modelos matemáticos (método indireto)

O extrato seco total constitui-se por gordura, cuja densidade é inferior à da água, e por substâncias não gordurosas, cujas densidades são superiores à da água. Em suma, pode-se dizer que o extrato seco total é composto por gordura e extrato seco desengordurado. Dessa maneira, é necessário separar esses dois tipos de componentes e, assim, fazer com que cada um interfira de modo distinto nos cálculos. Logo, para iniciar o desenvolvimento dos modelos matemáticos, é preciso conhecer os valores de densidade da gordura do soro e do extrato seco desengordurado do soro (Paolone, 1957, Wolfschoon Pombo, et al., 2021).

O valor da densidade da gordura do soro a 15°C, utilizado para iniciar e desenvolver os cálculos, é igual a 0.938 g.mL⁻¹ (Paolone, 1957, Pereira, 1978). Já a densidade do extrato seco desengordurado depende da densidade do soro e dos teores de umidade e gordura, a qual pode ser calculada através da expressão matemática de densidade, que representa a relação entre massa e volume. Para isso, é necessário conhecer o valor da massa de extrato seco desengordurado e o volume do extrato seco desengordurado, os quais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios de massa e volume determinados e de densidade calculada para o extrato seco desengordurado (ESD) do soro.

Tipos de soro avaliados	Massa de ESD em 100 mL de soro fluido (g)	Volume de ESD em 100 mL de soro fluido (mL)	Densidade calculada do ESD (g.mL ⁻¹)
Integral	6.57 ± 0.24	3.73 ± 0.21	1.766 ± 0.042
Desnatado	6.60 ± 0.15	3.72 ± 0.14	1.774 ± 0.033
Integral e desnatado	6.59 ± 0.20	3.73 ± 0.18	1.770 ± 0.038

* ESD – Extrato seco desengordurado. Fonte: Elaborado pelos autores.

Os modelos matemáticos desenvolvidos expressam a massa de extrato seco total (g) em 100 mL de soro fluido e, por isso, calculou-se a massa e o volume de extrato seco desengordurado em 100 mL de soro fluido. Uma vez que o extrato seco desengordurado é constituído pela totalidade dos componentes do soro, exceto água e gordura, a massa de extrato seco desengordurado foi calculada subtraindo-se a massa de água somada à massa de gordura da massa total de soro, enquanto o volume de extrato seco desengordurado foi calculado subtraindo-se o volume de água somado ao volume de gordura do volume total de soro.

A massa total de soro foi calculada através da multiplicação do volume total de soro considerado (100 mL) pela densidade medida para cada um dos soros (g.mL⁻¹). Já a massa total de água foi calculada por meio dos valores de umidade obtidos pela dessecação em estufa (Pereira, et al., 2001). Esses valores de umidade foram calculados por diferença, através dos resultados de extrato seco total apresentados na Tabela 2. Visto que os resultados de extrato seco total são expressos em g.100g⁻¹, os de umidade calculados por diferença também foram obtidos na mesma unidade de medida (g.100g⁻¹). A partir disso, foi possível fazer a conversão para g.100mL⁻¹ multiplicando-se o valor de umidade pela densidade obtida através das análises (g.100mL⁻¹) e, em seguida, multiplicando por 100 mL, o volume total de soro fluido considerado. Por fim, a massa total de gordura corresponde aos resultados dos teores de gordura obtidos pelas análises dos soros, apresentados na Tabela 1, uma vez que se obtém esses resultados em g.100mL⁻¹.

Em relação ao volume total de soro, como já mencionado, considerou-se 100 mL. O volume total de água foi calculado através da divisão da massa total de água pela densidade da água (1.0 g.mL⁻¹). Já o volume total de foi calculado por meio da divisão da massa total de gordura pela densidade da gordura do soro (0.938 g.mL⁻¹).

Dessa forma, após conhecer as médias dos valores da massa e do volume de extrato seco desengordurado para os três grupos de dados considerados, foi possível calcular os valores de densidade do extrato seco desengordurado por meio da divisão da massa de extrato seco desengordurado pelo volume de extrato seco desengordurado. Assim, foi realizado o desenvolvimento dos cálculos para determinar os três modelos matemáticos objetivados.

O desenvolvimento do primeiro modelo matemático para o cálculo do extrato seco total considerou os soros provenientes de leite integral (n = 17); o segundo modelo matemático abrangeu os soros provenientes de leite desnatado (n = 17); o terceiro modelo matemático considerou todos os soros produzidos, isto é, os soros provenientes de leite integral e os soros provenientes de leite desnatado (n = 34). Para o desenvolvimento de todos os modelos matemáticos apresentados neste trabalho, foram consideradas as seguintes relações:

$$m_G = \text{Gordura (\%)} = \text{massa de gordura (g.100mL}^{-1}\text{)};$$

$$V_G = \text{volume de gordura (mL.100mL}^{-1}\text{)};$$

$$D_G = \text{densidade da gordura (g.mL}^{-1}\text{)};$$

$$m_A = \text{massa de água (g.100mL}^{-1}\text{)};$$

V_A = volume de água ($\text{mL} \cdot 100\text{mL}^{-1}$);

m_{ESD} = massa de extrato seco desengordurado ($\text{g} \cdot 100\text{mL}^{-1}$);

V_{ESD} = volume de extrato seco desengordurado ($\text{mL} \cdot 100\text{mL}^{-1}$);

D_{ESD} = densidade média do extrato seco desengordurado ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$);

m_{EST} = EST (%) = massa de extrato seco total ($\text{g} \cdot 100\text{mL}^{-1}$);

D = densidade a 15°C ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$);

0.938 = densidade média da gordura do soro a 15°C ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$).

Os cálculos se iniciam a partir de duas igualdades, as quais representam a composição do soro:

$$\text{Massa de 100 mL de soro} = m_G + m_{\text{ESD}} + m_A \quad (1)$$

$$\text{Volume de 100 mL de soro} = V_G + V_{\text{ESD}} + V_A \quad (2)$$

Se na equação (2) substituirmos V_G por $\frac{m_G}{D_G}$ e V_{ESD} por $\frac{m_{\text{ESD}}}{D_{\text{ESD}}}$, teremos:

$$\text{Massa de 100 mL de soro} = m_G + m_{\text{ESD}} + m_A \quad (1)$$

$$100 = \frac{m_G}{D_G} + \frac{m_{\text{ESD}}}{D_{\text{ESD}}} + V_A \quad (3)$$

Considerando o valor da densidade da água como $1.0 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, a massa de água é equivalente ao volume de água ($m_A \equiv V_A$).

Posto isso, subtraindo membro a membro (1) e (3), temos:

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \cdot \frac{m_G}{D_G} + m_{\text{ESD}} \cdot \frac{m_{\text{ESD}}}{D_{\text{ESD}}}$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G}\right) + m_{\text{ESD}} \left(1 - \frac{1}{D_{\text{ESD}}}\right) \quad (4)$$

Substituindo (massa de extrato seco desengordurado) por (massa de extrato seco total – massa de gordura), ou seja, fazendo $m_{\text{ESD}} = m_{\text{EST}} - m_G$, a equação (4) se tornará:

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G}\right) + (m_{\text{EST}} - m_G) \left(1 - \frac{1}{D_{\text{ESD}}}\right)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G}\right) + \left(m_{\text{EST}} \cdot \frac{m_{\text{EST}}}{D_{\text{ESD}}} - m_G + \frac{m_G}{D_{\text{ESD}}}\right)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G}\right) - m_G \left(1 - \frac{1}{D_{\text{ESD}}}\right) + m_{\text{EST}} \left(1 - \frac{1}{D_{\text{ESD}}}\right) \quad (5)$$

3.2.1 Desenvolvimento do modelo matemático para cálculo do extrato seco total (EST) dos soros integral e desnatado

Substituindo na equação (5) D_G por 0.938 (densidade média da gordura do soro) e D_{ESD} por 1.770 (densidade média do extrato seco desengordurado calculada para os soros integral e desnatado utilizados no presente estudo, veja Tabela 3), obtém-se o modelo matemático para o cálculo do extrato seco total dos soros integral e desnatado:

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{0.938}\right) - m_G \left(1 - \frac{1}{1.770}\right) + m_{\text{EST}} \left(1 - \frac{1}{1.770}\right)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G (-0.0661 - 0.4350) + m_{\text{EST}} (0.4350)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G (-0.5011) + m_{EST} (0.4350)$$

Logo,

$$m_{EST} = \frac{(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) + m_G (0.5011)}{0.4350}$$

$$m_{EST} = \frac{(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100)}{0.4350} + \frac{m_G (0.5011)}{0.4350}$$

$$m_{EST} = \frac{1}{0.4350} (\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) + \frac{0.5011}{0.4350} m_G$$

$$m_{EST} = 2.299 (\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) + 1.152 m_G$$

Sendo $(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = 100 \times D$, podemos escrever:

$$EST (\%) = 1.152 \times \text{Gordura} (\%) + 2.299 \times (100 D - 100)$$

$$EST (\%) = 1.152 \times \text{Gordura} (\%) + 2.299 \times 100 (D - 1)$$

Os outros dois modelos matemáticos obtidos para o cálculo do extrato seco total do soro integral e do soro desnatado foram desenvolvidos seguindo os mesmos cálculos demonstrados acima, mas com valores diferentes de densidade do extrato seco desengordurado (D_{ESD}). No caso do soro integral, a densidade do extrato seco desengordurado corresponde a 1.766 g.mL^{-1} e, para o soro desnatado, a densidade do extrato seco desengordurado corresponde a 1.774 g.mL^{-1} (Tabela 3). As três equações desenvolvidas para calcular o extrato seco total dos soros podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4. Equações desenvolvidas para o cálculo do extrato seco total (EST) dos três grupos de soro avaliados.

Tipos de soro avaliados	Equações para calcular o extrato seco total (EST)
Integral	$EST (\%) = 1.152 \times \text{Gordura} (\%) + 2.306 \times 100 (\text{Densidade} - 1)$
Desnatado	$EST (\%) = 1.152 \times \text{Gordura} (\%) + 2.292 \times 100 (\text{Densidade} - 1)$
Integral e desnatado	$EST (\%) = 1.152 \times \text{Gordura} (\%) + 2.299 \times 100 (\text{Densidade} - 1)$

* EST – Extrato seco total. Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Comparação entre os valores de extrato seco total (EST) obtidos pelos métodos direto e indireto

A partir da obtenção do extrato seco total pelo método direto de referência, ou seja, pela dessecação em estufa, e pelo método indireto, por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos, foi possível comparar ambos a fim de avaliar se houve diferença significativa entre os resultados.

Como escrito anteriormente, os resultados de extrato seco total obtidos através de dessecação em estufa apresentam-se em g.100g^{-1} . Visto que os modelos matemáticos desenvolvidos expressam o resultado do extrato seco total em g.100mL^{-1} , fez-se uma conversão dos valores adquiridos pelo método direto para que fosse possível comparar os dois resultados. Para isso, multiplicou-se a massa de extrato seco total (g.100g^{-1}) pela densidade (g.mL^{-1}) de cada um dos soros e, em seguida, multiplicou-se o valor calculado por 100mL, que corresponde ao volume total de soro fluido considerado.

Por meio das equações desenvolvidas, os resultados de extrato seco total foram calculados através da substituição dos valores de gordura e densidade, os quais foram obtidos pelas análises físico-químicas realizadas com as amostras e apresentados na Tabela 1.

Tabela 5. Médias e desvios padrões das concentrações de extrato seco total (EST) do soro obtidas pelos métodos direto e indireto; diferenças calculadas entre os dois métodos para os três grupos de dados considerados.

Parâmetros	Tipos de soro		
	Integral	Desnatado	Integral e desnatado
Valor médio de EST das amostras pelo método direto (g.100.mL ⁻¹)	7.24 ± 0.28 ^a	6.66 ± 0.15 ^a	6.95 ± 0.36 ^a
Valor médio de EST calculado pelo método indireto (g.100.mL ⁻¹)	7.23 ± 0.26 ^a	6.66 ± 0.11 ^a	6.94 ± 0.33 ^a
Valor médio das diferenças entre o método direto e o indireto (g.100.mL ⁻¹)	0.01 ± 0.20	0.00 ± 0.15	0.01 ± 0.18

* EST – Extrato seco total; * Médias seguidas da mesma letra, na mesma coluna, para o mesmo tipo de soro, não diferem entre si pelo teste t de Student, ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir desses resultados, observa-se que não houve diferença significativa entre as médias de extrato seco total obtidas pelos métodos direto e indireto ($p > 0.05$) para os três grupos de soro considerados. Assim, é possível afirmar que os modelos matemáticos expressaram resultados bastante aproximados aos obtidos pelo método direto de referência. Entretanto, uma validação das equações deve ser feita com um número muito maior de amostras.

3.4 Desenvolvimento de um modelo matemático dinâmico para cálculo do extrato seco total de produtos com diferentes composições

Com base no desenvolvimento dos três modelos matemáticos demonstrados, observou-se a possibilidade da obtenção de um modelo matemático simplificado e dinâmico. A partir desse modelo dinâmico, é possível elaborar outros modelos matemáticos para cálculo do extrato seco total, de acordo com diferentes densidades do extrato seco desengordurado. Dessa forma, podem ser formadas expressões matemáticas que se adequam melhor a dados obtidos por diferentes tipos de soro de leite e com aplicação potencial aos permeados obtidos nas diferentes modalidades da tecnologia de filtração do leite.

Iniciando o desenvolvimento do modelo matemático com as equações (1), (2), (3), (4) e, continuando-o a partir da equação (5), pôde-se obter o modelo matemático final desejado:

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G}\right) - m_G \left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right) + m_{EST} \left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right) \quad (5)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(1 - \frac{1}{D_G} - 1 + \frac{1}{D_{ESD}}\right) + m_{EST} \left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)$$

$$(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) = m_G \left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right) + m_{EST} \left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)$$

Logo,

$$m_{EST} \left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right) = (\text{Massa de 100 mL de soro} - 100) - m_G \left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right)$$

$$m_{EST} = \frac{(\text{Massa de 100 mL de soro} - 100)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)} + \frac{m_G \left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)}$$

Sendo (Massa de 100 mL de soro de soro) = $100 \times D$, podemos escrever:

$$m_{EST} = \frac{(100D - 100)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)} + \frac{m_G \left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)}$$
$$m_{EST} = \frac{100(D - 1)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)} + \frac{m_G \left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)}$$
$$EST (\%) = \left((-1) \times \frac{\left(\frac{1}{D_{ESD}} - \frac{1}{D_G}\right)}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)} \times \text{Gordura} (\%) \right) + \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{1}{D_{ESD}}\right)} \times 100 (D - 1) \right) \quad (6)$$

Por meio da equação (6), é possível desenvolver um modelo matemático para o cálculo do extrato seco total com os dados de densidade da gordura (D_G) e densidade do extrato seco desengordurado (D_{ESD}) para soros obtidos da coagulação “doce” de leite integral ou desnatado. Após a substituição desses valores, o cálculo do extrato seco total — através do modelo matemático desenvolvido — é realizado a partir dos dados do teor de gordura (Gordura (%)) e da densidade a 15°C (D), assim como foi feito com os três modelos matemáticos propostos para os soros produzidos neste trabalho.

4. Conclusão

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização de modelos matemáticos para o cálculo do extrato seco do soro de leite é uma alternativa a ser empregada, levando em consideração a confiabilidade dos resultados obtidos, o menor tempo gasto para a obtenção desses resultados e a menor complexidade das análises necessárias, de gordura e densidade, em comparação ao método direto de referência.

Ainda, vale ressaltar que, com o desenvolvimento dos modelos matemáticos, a possibilidade de calcular o extrato seco total do soro de leite doce por meio da utilização de um termolactodensímetro para a determinação da densidade e de um butirômetro de Gerber para a determinação do teor de gordura tornou-se viável. Esse fator é de extrema importância considerando a rapidez e facilidade de execução das análises supracitadas, principalmente quando são comparadas à determinação direta do extrato seco total.

Por fim, com o objetivo de ampliar o conhecimento técnico e científico na linha de pesquisa deste estudo, trabalhos futuros podem ser desenvolvidos visando a comprovação da aplicabilidade do método proposto, o que pode ser realizado através da análise de um número maior de amostras. Ao mesmo tempo, é importante que, futuramente, cada laticínio confirme e/ou modifique os valores de densidade do extrato seco desengordurado apresentados neste trabalho utilizando os soros produzidos no próprio laticínio. Ainda, cabe pontuar que novos estudos podem adaptar o método proposto para outros fluidos lácteos como, por exemplo, soro concentrado por membranas, desde que se conheça a densidade do extrato seco desengordurado do produto em específico para proceder o desenvolvimento dos cálculos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora e aos órgãos de fomento CAPES, CNPq (307334/2020-1) e FAPEMIG.

Referências

AOAC. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st ed.). Maryland: AOAC International.

- Brasil. (2013). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal. *Instrução Normativa nº 53, de 10 de abril de 2013: Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade do Soro de Leite*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- Brasil. (2019). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Manual de métodos oficiais para análise de alimentos de origem animal* (2 ed.). Brasília: MAPA.
- Corrêa, F. T., Corrêa, P. T., & Abreu, L. R. (2016). Determinação do extrato seco de leite fermentado, leite UHT e creme de leite: avaliação de uma metodologia simplificada. *Revista Eletrônica de Extensão – Extensio*, 13(24), 83-93.
- Duarte, V. S., et al. (2020). Comparative evaluation of cheese whey microbial composition from four Italian cheese factories by viable counts and 16S rRNA gene amplicon sequencing. *International Dairy Journal*, 104, 104656.
- Fontelles, M. J., et al. (2009). Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. *Revista Paraense de Medicina*, 23(3).
- Instituto Adolfo Lutz. (2005). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos* (4A ed.). São Paulo: Instituto Adolfo Lutz.
- Merkel, A., Voropaeva, D., & Ondrušek, M. (2021). The impact of integrated nanofiltration and electro-dialytic processes on the chemical composition of sweet and acid whey streams. *Journal of Food Engineering*, 298, 110500.
- Tavares, G. M. (2020). Proteínas do soro de leite: aspectos físico-químicos e estruturais. In Carvalho, A. F., et al. (Org.), *Química e tecnologia do soro de leite* (1 ed., pp. 19-27). Juiz de Fora: Innóvite.
- Paolone, L. (1957). Tabela para a determinação do resíduo seco (extrato seco) do leite. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 17, 59-70.
- Pereira, J. F. (1978). Calculador de extrato seco e aguagem do leite. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, 13(200), 19-27.
- Pereira, J. F. (1979). Calculador de extrato seco e aguagem do leite. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, 14(201), 13-16.
- Pereira, D. B. C., et al. (2001). *Físico-química do leite e derivados: métodos analíticos* (2 ed.). Juiz de Fora: EPAMIG.
- Pires, A. F., et al. (2021). Dairy By-Products: A Review on the Valorization of Whey and Second Cheese Whey. *Foods*, 10, 1067.
- Ribeiro, R. A. S. (2010). *Refratômetro por ondas evanescentes em guias de ondas planares*. Dissertação de Mestrado em Ciência – Área de concentração: Física Aplicada – Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Schuck, P., et al. (2004). Drying of whey and derivatives: role of lactose and water dynamics. *Le lait*, 84(3), 243-268.
- Setiowati, A. D., Wijaya, W., & Meeren, P. V. (2020). Whey protein-polysaccharide conjugates obtained via dry heat treatment to improve the heat stability of whey protein stabilized emulsions. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 150-161.
- Severino, A. J. (2013). *Metodologia do trabalho científico*. Cortez.
- Tsermoula, P., et al. (2021). WHEY - The waste-stream that became more valuable than the food product. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 230-241.
- Venturoso, R. C., et al. (2007). Determinação da composição físico-química de produtos lácteos: estudo exploratório de comparação dos resultados obtidos por metodologia oficial e por ultrassom. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 43(4).
- Wherry, B., Barbano, D. M., & Drake, M. A. (2019). Use of acid whey protein concentrate as an ingrediente in nonfat cup set-style yogurt. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 8768-8784.
- Zhang, L., et al. (2021). Heat-induced denaturation and bioactivity changes of whey proteins. *International Dairy Journal*, 123, 105175.
- Zhao, C., Chen, N., & Ashaolu, T. J. (2022). Whey proteins and peptides in health-promoting functions – A review. *International Dairy Journal*, 126, 105269.
- Wolfschoon Pombo, A. F., et al. (2021). Modified Fleischmann's lactometer method for sweet whey total solids estimation. *International Dairy Journal*, 126, 105228.