



AVALIAÇÃO DA ETAPA DE PURIFICAÇÃO DO LEITELHO ATRAVÉS DE COAGULANTE ORGÂNICO À BASE DE TANINO

GUSTAVO A. TEIXEIRA^{1*}, STEPHANY F. PIRES^{1,2}

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas,
Departamento de Engenharia de Alimentos

²GRAN COFFE, Departamento de Pesquisa & Desenvolvimento e Inovação

*e-mail: gustavo.teixeira@uftm.edu.br

RESUMO - Com uma estimativa crescente na produção de leite e derivados para a próxima década, o Brasil tem um grande potencial neste setor. No entanto, deve-se levar em consideração a grande quantidade de efluentes gerados, e logo, a maneira mais adequada de seu tratamento. O leitelho é o principal subproduto do processamento de manteiga, possui alto valor nutritivo e material orgânico, resultando em um elevado potencial poluidor. O processo de tratamento de resíduos envolve a coagulação das partículas coloidais e substâncias orgânicas dissolvidas por meio de coagulantes. Atualmente coagulantes naturais vêm sendo usados como uma alternativa nesta etapa de separação, por serem ambientalmente mais aceitáveis, biodegradáveis, mais baratos e com baixa produção de lodo residual. O presente trabalho objetivou avaliar o desempenho do coagulante natural na etapa de purificação do leitelho, através da avaliação de parâmetros físicos e químicos, visando o tratamento eficiente dos efluentes gerados. Através do Planejamento Composto Central foram avaliadas as variáveis significativas do processo, no qual notou-se uma maior influência do pH e da temperatura na etapa de purificação. Pôde-se obter um purificado mais límpido e livre de sólidos em solução e um concentrado capturando a maior parte dos sólidos presentes no leitelho inicial.

INTRODUÇÃO

Com uma estimativa crescente na produção de leite e derivados para a próxima década, o Brasil tem um grande potencial neste setor. A produção de leite deverá crescer nos próximos 10 anos a uma taxa entre 1,9 e 3,1%. Essas taxas correspondem a passar de uma produção de 36,3 bilhões de litros em 2021 para 43,9 bilhões em dez anos (MAPA, 2021). Porém deve-se levar em consideração que a geração de efluentes nas usinas de beneficiamento de leite é geralmente três vezes maior em relação à captação de leite. Sendo, esses resíduos, capazes de impactar o meio ambiente drasticamente (TEIXEIRA, 2011).

Independente do tamanho e potencial poluidor da indústria, a legislação ambiental

exige que todas as empresas tratem e disponham de forma adequada seus resíduos. A forma mais adequada de fazer o controle ambiental é reduzir a geração de resíduos pelo controle de processos e novas alternativas para seu tratamento, levando em consideração os custos envolvidos (SILVA, 2011).

O soro, o leitelho e o leite ácido são os principais subprodutos descartados, sendo muitas vezes misturados com os demais efluentes. Estes possuem um elevado potencial poluidor, devido aos seus valores nutritivos e pelas suas elevadas cargas orgânicas, sendo proibido seu descarte direto nos cursos de água. Devem ser conduzidos separadamente ao tratamento ou aproveitamento na produção de outros produtos (SILVA, 2011; MOREIRA *et al.*, 2020).

O leiteiro é um subproduto do processamento de manteiga a partir do creme. A relação é de 1,8 L de leiteiro para cada quilograma de manteiga produzida. O tratamento deste resíduo é de extrema importância, já que apresenta um grau poluidor duas vezes maior que o soro, e elevado conteúdo de matéria orgânica (ASSUMPCÃO; DE PAULA, 2013).

O processo de tratamento de resíduos envolve uma etapa conhecida como fase de clarificação, que representa a coagulação das partículas presentes por coagulantes químicos, constituídos de sais de alumínio e ferro. Estes são eficientes na remoção de uma ampla variedade de impurezas, incluindo partículas coloidais e substâncias orgânicas dissolvidas (TREVISAN, 2014).

Atualmente os coagulantes naturais vêm sendo usados como uma alternativa aos químicos. São ambientalmente mais aceitáveis, biodegradáveis, mais baratos e com baixa produção de lodo residual. Dentre os coagulantes naturais existentes, a utilização de compostos derivados de taninos vegetais tem se mostrado eficiente no tratamento de efluentes e águas destinadas ao consumo humano. O Tanfloc SG é um polímero orgânico-catiônico, produzido a partir de tanino de acácia negra, um coagulante de origem vegetal, que apresenta habilidade em reagir e precipitar proteínas. Este coagulante vegetal é efetivo em uma ampla faixa de pH, não acrescenta metais ao processo e proporciona uma redução no volume de lodo a ser descartado (TREVISAN, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo geral avaliar o desempenho do coagulante natural Tanfloc SG na etapa de purificação de um subproduto da indústria de laticínios, através da avaliação de parâmetros físicos e químicos, visando o tratamento eficiente dos efluentes gerados.

Os objetivos específicos do estudo foram:

- Estudar a etapa de purificação do leiteiro, utilizando coagulante orgânico, através de um planejamento composto central (PCC);

- Realizar a construção de um modelo de previsão de respostas;
- Avaliar as variáveis significativas na purificação do leiteiro, utilizando as respostas turbidez do purificado (*TP*), sólidos totais do purificado (*STP*) e sólidos totais do concentrado (*STC*);
- Analisar as superfícies de resposta geradas através dos modelos;
- Realizar a otimização operacional do processo, com relação às respostas acompanhadas, para a faixa experimental adotada.

MATERIAL E MÉTODOS

Testes preliminares

Os testes preliminares foram realizados com o intuito de determinar se os parâmetros selecionados – pH, concentração de Tanfloc e temperatura – têm influência na operação de purificação do leiteiro, e assim determinar uma faixa experimental desses fatores, nas quais os testes posteriores seriam conduzidos.

Amostras de leiteiro, da última lavagem da produção de manteiga (Figura 1), foram recolhidas em laticínios locais da cidade de Uberaba/MG, em diferentes meses do ano.

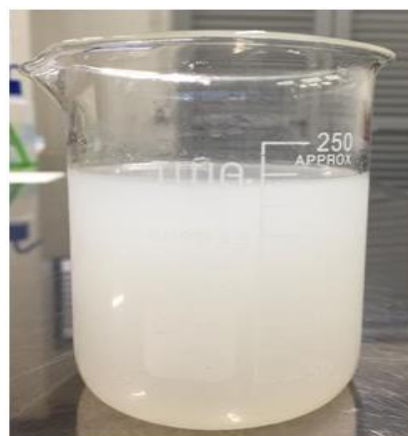


Figura 1: Amostra de leiteiro

Foram realizados três testes com o subproduto:

1. Testes de pH;
2. Testes da concentração de Tanfloc;
3. Testes de temperatura.

Testes de pH: Em um béquer de 250 mL, foi colocado uma amostra de 100 mL de leiteiro à temperatura ambiente. Sobre um agitador magnético foi colocado o béquer, juntamente com uma barra de agitação

magnética e a velocidade ajustada para aproximadamente 1800 rpm.

Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3) foi adicionado à solução, conforme requerido em cada experimento. O pH medido através de um pHmetro (Technopon, modelo PA 210).

Com o auxílio de uma pipeta de 1 mL, 0,2 mL do coagulante Tanfloc foi adicionado ao béquer e então deu-se início à contagem de 10 minutos. Esse volume de coagulante foi utilizado em todos os testes de pH.

Após esse período, a velocidade de agitação foi reduzida para 1500 rpm e aguardou-se mais 5 minutos.

Após o término da agitação, a amostra foi colocada em um balão de decantação de 250 mL até a completa separação em: um sobrenadante translúcido (Purificado) e um decantado turvo de cor marrom (Concentrado). Essa etapa teve duração média de 2 horas. Este procedimento foi realizado para todas as amostras do Lote B.

A massa da solução concentrada foi medida após separação, sendo posteriormente levada à estufa (marca Ethik), a uma temperatura de 90°C , até a completa secagem.

A turbidez da fase purificada foi medida através de um turbidímetro (Technopon, modelo TB 1000). Com o auxílio de uma pipeta, 10 mL da amostra da solução purificada foi depositada em uma placa de Petri, previamente pesada. Em seguida levada à estufa a 90°C para secagem.

Finalizada a secagem das amostras de purificado e concentrado, estas foram pesadas em uma balança analítica (EduTec, modelo 02001002). A quantificação de sólidos totais (ST) foi realizada conforme Equação 1.

$$ST = \frac{m_{\text{sólidos}}}{m_{\text{solução}}} \quad (1)$$

Testes da concentração de Tanfloc: Uma amostra de 100 mL de leite, à temperatura ambiente, foi preparada e colocada sobre um agitador magnético, sendo sua velocidade de agitação ajustada para aproximadamente 1800 rpm.

O pH da solução foi ajustado com Bicarbonato de Sódio para atingir o valor estabelecido pelo teste de pH. Em seguida, o coagulante Tanfloc foi adicionado à solução, em diferentes concentrações, permanecendo

sob intensa agitação por um intervalo de 10 minutos.

Após esse período, a velocidade de agitação foi reduzida para 1500 rpm, permanecendo assim por 5 minutos.

Após o término da agitação, a amostra foi colocada no balão de decantação para separação das fases por 2 h. Este procedimento foi realizado para todas as amostras.

A turbidez do purificado foi medida através de um turbidímetro e os sólidos totais de ambas as fases foram calculados utilizando a Equação 1.

Testes de temperatura: Para o controle da temperatura empregada, utilizou-se um vaso encamisado construído em borosilicato, conectado a um banho ultratermostático Solab, modelo SL 152. A Figura 2 ilustra a unidade utilizada, no qual o vaso está conectado ao banho e sobre o agitador magnético.

No vaso, foi colocado uma porção de 100 mL de leite, inicialmente à temperatura ambiente e pH previamente estabelecido pelo teste de pH. O mesmo foi então colocado sobre o agitador magnético e a velocidade foi ajustada para alta agitação (1800 rpm).

A temperatura do banho foi ajustada para os diferentes experimentos, variando de 15 a 50°C .

Em seguida, o coagulante Tanfloc foi adicionado à amostra, com uma concentração pré-estabelecida através do teste de concentração de Tanfloc. Após um período de 10 minutos, a velocidade de agitação foi reduzida para 1500 rpm, permanecendo nessa condição por 5 minutos.



Figura 2: Unidade experimental.

Imediatamente após o término de agitação, a amostra foi colocada no balão de decantação por aproximadamente 2 h. Este procedimento foi realizado para todas as amostras.

Para determinar quais amostras obtiveram as melhores purificações foram analisados a turbidez do purificado, os sólidos totais do purificado e do concentrado.

Planejamento Composto Central

O Planejamento Composto Central (PCC), utilizando leiteiro, foi realizado com o objetivo de estudar a etapa de purificação do mesmo, levando em consideração os testes preliminares de pH, concentração de Tanfloc e temperatura. O procedimento é similar ao realizado nos testes preliminares, respeitando o planejamento proposto. O PCC foi realizado pelo programa Statistica 7.

O planejamento composto central realizado neste estudo foi formado por um planejamento fatorial em dois níveis, acrescido de três réplicas no ponto central e seis experimentos nos pontos axiais (α), totalizando 17 experimentos. O valor utilizado para o nível extremo deste planejamento (α) foi o de ortogonalidade, que, para o planejamento adotado, tem valor 1,353.

O planejamento objetivou o estudo do processo de purificação quanto às variáveis significativas e obtenção das melhores condições operacionais para a operação, a partir de um modelo de previsão de respostas, tendo como variáveis dependentes a turbidez do purificado (TP), sólidos totais do purificado (STP) e do concentrado (STC). Foram três as variáveis codificadas (x_1 , x_2 e x_3), mostradas nas Equações 2, 3 e 4 em termos das variáveis originais (P , C e T), sendo P o potencial hidrogeniônico (pH), C a concentração de Tanfloc (mL/L leiteiro) e T a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$x_1 = \frac{P-8,0}{0,3} \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{C-0,45}{0,15} \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{T-22,5}{7,5} \quad (4)$$

A Tabela 1 mostra os níveis utilizados para as variáveis independentes codificadas e seus respectivos intervalos.

Tabela 1: Níveis codificados do PCC.

x_i	-1,353	-1	0	1	1,353
$P(x_1)$	7,6	7,7	8,0	8,3	8,4
$C(x_2)$	0,25	0,3	0,45	0,6	0,65
$T(x_3)$	12,3	15	22,5	30	32,6

O procedimento experimental do PCC seguiu o utilizado nos testes preliminares. Para determinar quais amostras obtiveram as melhores purificações foram analisados a TP , como os STP e STC . Os testes do planejamento foram realizados em duplicata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes Preliminares

Os resultados obtidos nos testes preliminares foram utilizados como base para o Planejamento Composto Central realizado posteriormente. A seguir estão descritos os resultados dos respectivos ensaios.

Teste de pH: De acordo com Teixeira (2014), no qual foi utilizado o coagulante Tanfloc em soro de leite, foi estabelecido que o tratamento com concentração de 2 mL de Tanfloc para cada litro de soro era o mais eficiente para o processo de purificação. O soro do leite é um subproduto obtido na produção de queijo, com composição similar a do leiteiro. Dessa forma, foi pré-estabelecida uma quantidade fixa de 2 mL/L de leiteiro. Para que fosse obtido diferentes faixas de pH, foram adicionadas quantidades específicas de bicarbonato de sódio, como mostrado na Tabela 6, variando os pHs entre 4,90 a 8,35.

Os resultados para os testes do pH estão descritos na Tabela 2.

Através dos resultados apresentados na Tabela 2 foi possível verificar que melhores resultados foram obtidos nos testes das amostras 2B, 3B, 4B e 5B, pois apresentaram menores valores para TP e STP , e melhores resultados para STC , ou seja, resultaram em uma melhor separação das fases.

Tabela 2: Resultados da purificação do leiteiro para os testes de pH.

Exp.	Tan *	Bic ₁	pH	TP ₂	STP ₃	STC ₃
1B	2,0	0,00	4,90	1641	4,32	4,48
2B	2,0	0,10	7,73	5,9	3,44	8,20
3B	2,0	0,30	8,05	4,9	7,02	10,83
4B	2,0	0,50	8,29	4,8	9,53	14,90
5B	2,0	0,70	8,30	5,3	13,14	14,40
6B	2,0	0,90	8,35	10,2	16,78	15,02

*(mL/L leiteiro) 1 (10E-3 kg/L) 2 (NTU) 3 (10E-3 kg sol/kg solução)

Através dos testes de pH, pode-se concluir que a faixa de pH que proporcionaria melhores resultados na purificação seria em torno de 7,7 e 8,3.

Teste de concentração de Tanfloc: Os testes realizados para avaliação da concentração de coagulante adicionado, lote C, apresentaram os resultados descritos na Tabela 3.

Como foi estabelecido anteriormente uma faixa de pH desejada, adicionou-se uma média de $0,50 \times 10^{-3}$ kg de bicarbonato de sódio em cada experimento, que estavam a temperatura ambiente, e então adicionado diferentes quantidades de Tanfloc, desde 1,0 até 6,0 mL/L leiteiro, em amostras de 100 mL.

Tabela 3: Resultados da purificação do leiteiro para os testes de concentração de Tanfloc.

Exp.	Tan *	Bic ₁	pH	TP ₂	STP ₃	STC ₃
1C	1,0	0,50	8,07	8,8	3,43	11,50
2C	2,0	0,50	8,08	4,6	3,55	12,00
3C	3,0	0,50	8,12	6,5	3,43	11,50
4C	4,0	0,50	8,10	10,1	3,60	8,78
5C	5,0	0,50	8,18	6,6	3,55	8,78
6C	6,0	0,50	8,15	2,5	3,23	8,51

*(mL/L leiteiro) 1 (10E-3 kg/L) 2 (NTU) 3 (10E-3 kg sol/kg solução)

A turbidez e os sólidos totais do purificado e do concentrado foram obtidos como resultados e então analisados. Foi possível verificar que todos os experimentos obtiveram boa separação, assim como seus respectivos resultados.

O experimento 1C mostrou uma eficiência de separação inferior e o experimento 6C mostrou uma coloração mais escura que as demais, devido obviamente à maior adição do coagulante, que possui coloração marrom escuro, porém eficiente. Assim, pode-se concluir que a faixa de concentração entre 2,0 e 5,0 mL de Tanfloc/L de leiteiro apresentou os melhores resultados para a purificação, resultando em uma média de 3,5 mL/L de leiteiro.

Teste de temperatura: O teste de temperatura do sistema, nomeado como lote E, foi realizado para avaliar a melhor faixa de temperatura para purificação do leiteiro. Os resultados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da purificação do leiteiro para os testes de temperatura.

Exp.	Tan *	Bic ₁	pH	TP ₂	STP ₃	STC ₃
1E	15	3,5	8,00	4,0	6,53	9,71
2E	25	3,5	8,00	8,0	6,91	9,51
3E	30	3,5	8,00	2,5	6,58	10,03
4E	35	3,5	8,00	1,86	6,72	9,67
5E	40	3,5	8,00	2,7	6,54	9,70
6E	50	3,5	8,00	4,7	7,62	9,83

*(mL/L leiteiro) 1 (10E-3 kg/L) 2 (NTU) 3 (10E-3 kg sol/kg solução)

A partir dos resultados dos testes anteriores, estabeleceu-se uma condição operacional fixa de 3,5 mL de coagulante/L leiteiro e de 8,0 para o pH, sendo então somente alterada a temperatura do sistema de 15 a 50°C, através de um banho ultratermostático conectado a um vaso encamisado de aproximadamente 250 mL.

Foi possível observar uma rápida separação de fases e uma pequena mudança na coloração conforme o aumento da temperatura. Em relação a TP foram obtidos excelentes resultados e purificados límpidos. Já os STP e STC resultaram em valores muito próximos, não sendo possível destacar nenhuma amostra discrepante.

Concluiu-se então que as melhores temperaturas para a realização do processo estariam em torno da temperatura ambiente,

não havendo necessidade de aquecimento ou resfriamento do sistema.

Planejamento Composto Central

Foram avaliados no Planejamento as variáveis significativas do processo e o ponto de máximas respostas, dentro da faixa experimental estudada.

A Tabela 5 apresenta a matriz do planejamento experimental e as respostas médias de turbidez do purificado (*TP*), sólidos totais no purificado (*STP*) e sólidos totais no concentrado (*STC*).

Alguns fatores podem interferir nos resultados deste estudo, como por exemplo: as características do creme de leite utilizado no processamento da manteiga; o tempo necessário para a bateção do creme até sua transformação; a quantidade de água utilizada na etapa de lavagem do leite; a temperatura de armazenamento do mesmo; entre outros.

É notável que as respostas obtidas no planejamento para *TP* foram baixas, ou seja, os purificados eram límpidos na maioria dos experimentos como desejável. A turbidez inicial do leite puro era de aproximadamente 765 NTU e após o tratamento a *TP* ficou entre 1,15 e 4,65 NTU para 14 amostras. A coloração dos purificados variou principalmente devido à proporção de coagulante adicionado.

Em relação à *STP* foi possível observar uma tendência entre 8,00 e 10,00 x 10⁻³ kg sólidos/kg solução. Estes resultados se mostraram satisfatórios, já que quanto menor a quantidade de sólidos presentes no purificado melhor a purificação. Os sólidos totais do leite puro foi de 1,10 x 10⁻³ kg sólidos/kg solução.

Por outro lado, quanto maior for a quantidade de sólidos totais no concentrado, melhor será o processo de purificação. Os *STC* apresentaram uma ampla faixa de resultados, sendo difícil observar uma tendência entre eles. O motivo se deve principalmente aos fatores listados acima no qual interferem nas características do leite. Os melhores resultados obtidos foram nos experimentos que apresentaram sólidos acima de 16,00 x 10⁻³ g sólidos/g solução, que foram os experimentos 6, 12 e os pontos centrais 15, 16 e 17.

Tabela 5: Respostas do Planejamento.

Exp	x_1	x_2	x_3	<i>TP</i>	<i>STP</i>	<i>STC</i>
1	-1	-1	-1	3,40	8,05	11,14
2	-1	-1	1	1,73	8,87	12,02
3	-1	1	-1	5,40	8,00	10,39
4	-1	1	1	2,80	9,10	10,93
5	1	-1	-1	4,65	9,65	11,43
6	1	-1	1	3,05	12,68	16,80
7	1	1	-1	4,40	10,07	13,81
8	1	1	1	8,80	12,91	13,58
9	$-\alpha$	0	0	5,65	7,39	9,96
10	α	0	0	3,40	10,18	12,28
11	0	$-\alpha$	0	1,75	9,35	12,21
12	0	α	0	2,20	9,66	20,53
13	0	0	$-\alpha$	2,37	9,72	13,93
14	0	0	α	1,45	9,70	11,84
15	0	0	0	1,64	9,56	19,71
16	0	0	0	1,15	9,58	20,11
17	0	0	0	1,89	9,68	18,60

**TP* (NTU), *STP* (10⁻³ kg sol/kg solução), *STC* (10⁻³ kg sol/kg solução).

A construção de modelos de previsão de respostas dá abrangência ao processo, não sendo necessária a experimentação em todos os pontos possíveis para o procedimento, na faixa experimental adotada.

Através do PCC foram calculados os valores de regressão para construção de um modelo de previsão das respostas acompanhadas.

O ajuste com as variáveis codificadas, para a resposta de *TP* é representado pela Equação 5, cujo coeficiente de correlação quadrático (r^2) foi de 0,73133.

$$y_{TP} = 1,35 + 0,77x_1 + 3,74x_1^2 + 1,57x_2 + 0,96x_2^2 + 0,46x_3 + 0,89x_3^2 + 0,60x_1x_2 + 1,76x_1x_3 + 1,26x_2x_3 \quad (5)$$

O ajuste com as variáveis codificadas, para a reposta de *STP* é representado pela Equação 6, cujo coeficiente de correlação quadrático (r^2) foi de 0,88548.

$$y_{STP} = 9,37 + 2,58x_1 + 0,32x_1^2 + 0,21x_2 + 0,45x_2^2 + 1,33x_3 + 0,68x_3^2 + 0,11x_1x_2 + 0,98x_1x_3 + 0,02x_2x_3 \quad (6)$$

O ajuste com as variáveis codificadas, para a reposta de *STC* é representado pela Equação 7, cujo coeficiente de correlação quadrático (r^2) foi de 0,74963.

$$y_{STC} = 18,59 + 2,49x_1 - 6,93x_1^2 + 1,51x_2 - 1,19x_2^2 + 0,68x_3 + 5,00x_3^2 + 0,31x_1x_2 + 0,99x_1x_3 + 1,42x_2x_3 \quad (7)$$

Para um nível de significância p estipulado para o planejamento de 10%, foi realizada uma análise dos efeitos significativos do processo de purificação do leiteiro com coagulante natural a base de tanino, através do planejamento experimental.

Excluindo um a um os efeitos que apresentaram o maior valor de p observado dentre aqueles que estão fora do p estipulado, que para o planejamento foi de 10%, obtiveram-se as Tabelas 6, 7 e 8 que apresentam os efeitos principais e os de interação das variáveis, em que os termos lineares são associados à letra *L* e os quadráticos à letra *Q*, para as repostas *TP*, *STP* e *STC*, alcançando respectivamente os coeficientes de correlação quadráticos (r^2) de 0,58538, 0,83907 e 0,67015.

Para o modelo da resposta *TP* foi observada a grande influência da variável codificada x_2 (que reflete a concentração de Tanfloc) no processo, como também a combinação de x_1 (pH) e x_3 (temperatura), foram efeitos dominantes aos fatores lineares. Com relação às variáveis quadráticas, a variável codificada x_1 (pH) exerce também grande influência na resposta. Assim podemos concluir que as três variáveis estudadas tem influência direta ou associada na resposta turbidez do purificado (*TP*).

Tabela 6: Efeitos significativos principais e de interação para a resposta *TP*.

Fatores	Efeito	Nível p observado
Média	1,992179	0,001811
$x_1(Q)$	1,874733	0,004588
$x_2(L)$	0,787085	0,080955
x_1x_3	0,883750	0,101966

Tabela 7: Efeitos significativos principais e de interação para a resposta *STP*.

Fatores	Efeito	Nível p observado
Média	9,655882	0,000000
$x_1(L)$	1,291832	0,000009
$x_3(L)$	0,665666	0,003051
x_1x_3	0,493750	0,043994

Tabela 8: Efeitos significativos principais e de interação para a resposta *STC*.

Fatores	Efeito	Nível p observado
Média	18,18344	0,000000
$x_1(L)$	1,24673	0,087898
$x_1(Q)$	-3,46557	0,001864
$x_3(Q)$	-2,50159	0,014818

No modelo da resposta *STP*, observou-se a influência das variáveis x_1 (pH) e x_3 (temperatura) lineares, como também a combinação dos mesmos. A variável x_2 (Tanfloc) não se mostrou significativa nos resultados, para a faixa operacional adotada, em comparação às demais.

Por fim, no modelo da resposta *STC*, observou-se a influência das variáveis x_1 (pH) linear e quadrática e x_3 (temperatura) quadrática. Porém a variável x_2 (Tanfloc) não se mostrou significativa nos resultados.

Através desse resultado conclui-se que os fatores – pH, concentração de Tanfloc e

temperatura – foram significativos na operação.

Otimização Operacional

Muitos fatores, incluindo o pH, temperatura, características do resíduo, têm impacto no processo de purificação. Usando modelos de previsão de resposta das variáveis independentes associadas, expressos pelas Equações 5, 6 e 7 e o programa Statistica 7, foi realizada a otimização do processo de purificação do leiteiro, para a faixa de operação utilizada.

Para o planejamento realizado, a maximização das respostas reflete diretamente na seleção do ponto ótimo operacional. Experimentos individualmente realizados não contemplam um modelo significativo de previsão de respostas, além de induzir a erros como assumir um ponto mais abrangente entre respostas como sendo o ponto ótimo de operação. Ao realizar esse procedimento pode-se obter um ponto próximo ao ponto ótimo, mas com desempenho muito abaixo deste, e até mesmo sobre um máximo local, que seria um falso ponto ótimo para o processo na faixa de operação trabalhada (MONTGOMERY; CALADO, 2003).

O sistema de otimização utiliza os três modelos de previsão de forma conjugada, resultando em um ponto de otimização simétrico e significativo para as três respostas acompanhadas, conforme apresenta Figura 3.

O modelo de otimização foi construído para obtenção de 100 pontos de simulação. O nível de desejabilidade utilizado foi de 0,0 para o ponto de máxima resposta, 0,5 para a média obtida e 1,0 para o menor valor obtido para as respostas *TP* e *STP*, buscando a minimização das respostas, e 1,0 para o ponto de máxima resposta, 0,5 para a média obtida e 0,0 para o menor valor obtido para a resposta *STC*, buscando a maximização desta resposta.

O processo de otimização, conforme apresentado na Figura 3, resultou nas respostas codificadas de -0,189 para o pH, -0,054 para a concentração de Tanfloc, e -0,054 para a temperatura, para a faixa de operação adotada.

As condições previstas como as geradoras de máximas respostas, em relação às variáveis reais, apresentam valores de $P=7,94$, $C=0,44$ mL/L leiteiro e $T=22,1$ °C.

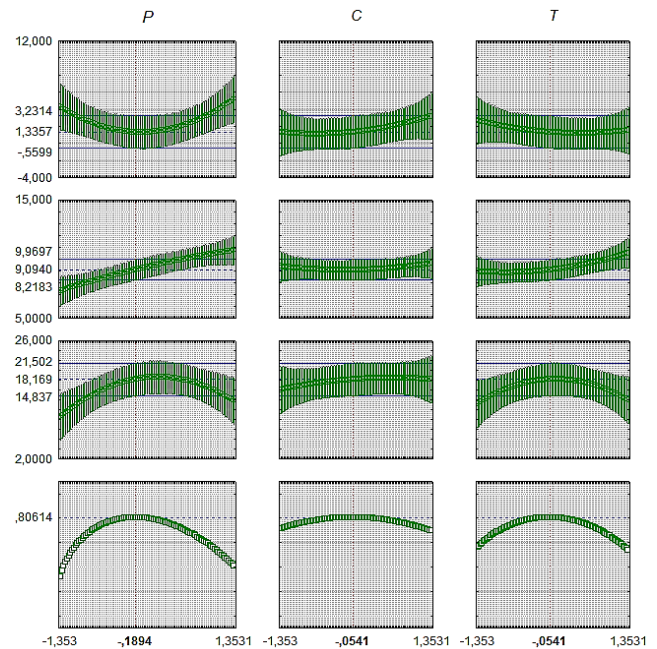


Figura 3: Esquema do processo de otimização

Os valores preditos para as respostas associadas, quando utilizadas as condições propostas pela otimização para as variáveis independentes, foram 1,33 NTU para *TP*, $9,09 \times 10^{-3}$ kg sol/kg solução para *STP* e $18,17 \times 10^{-3}$ kg sol/kg solução para *STC*.

As médias dos experimentos realizados nos testes do PCC foram de 3,28 NTU, $9,65 \times 10^{-3}$ kg sol/kg solução e $14,07 \times 10^{-3}$ kg sol/kg solução, para o *TP*, *STP* e *STC*, respectivamente. A otimização atingiu, portanto, seu objetivo, buscando uniformidade entre as respostas monitoradas, alcançando mínimas respostas para o *TP* e *STP* e maximizando o *STC*, ou seja, um purificado mais límpido e livre de sólidos em solução e um concentrado capturando a maior parte dos sólidos presentes no leiteiro inicial.

CONCLUSÃO

Como foi demonstrado neste estudo, o leiteiro pôde ser purificado através do coagulante natural a base de tanino extraído da casca da Acácia Negra, obtendo-se um purificado mais límpido e livre de sólidos em solução e um concentrado capturando a maior parte dos sólidos presentes no leiteiro inicial.

Foram encontrados os seguintes coeficientes de correlação quadráticos (r^2): 0,58; 0,84 e 0,67 para *TP*, *STP* e *STC*, respectivamente.

Com a otimização, pode-se concluir que o melhor resultado para a etapa de purificação do leite seria em: pH de 7,94, 0,44 mL de Tanfloc/L leite e em uma temperatura de 22,1°C, no qual era esperado.

Desta forma, sugere-se o adequado tratamento do resíduo em laticínios pelo uso do coagulante natural estudado. O material removido pode ser dessecado e então descartado como lixo orgânico, não poluindo ainda mais os corpos receptores de esgoto.

NOMENCLATURA

<i>ST</i>	Sólidos totais	kg sol/kg solução
<i>TP</i>	Turbidez do purificado	NTU
<i>STP</i>	Sólidos totais no purificado	kg sol/kg solução
<i>STC</i>	Sólidos totais no concentrado	kg sol/kg solução
<i>P</i>	pH	-
<i>C</i>	Concentração de Tanfloc	mL/L leite
<i>T</i>	Temperatura	°C

REFERÊNCIAS

- ASSUMPCÃO, G.M.P ; DE PAULA, A.A.A. (2013), Utilização do Leite na Fabricação da Ricota em Substituição ao Leite Desnatado, Retec, Rondonópolis, v. 6, n. 2, p. 17-30.
- MAPA (2021), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Projeções do Agronegócio, Brasília/DF.
- MONTGOMERY, D.C.; CALADO, V. (2003), Planejamento de experimentos usando o Statistica, Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.
- MOREIRA, F.D.; CERQUEIRA, V.D.; SARAYVA, C.B. (2020), Diagnóstico ambiental e avaliação de pontos críticos de indústria de laticínios de pequeno porte, Rev. Agro. Amb., v. 13, n.1, p. 319-332.

SILVA, D.J.P. (2011), Resíduos na Indústria de Laticínios. Universidade Federal de Viçosa –UFV, Viçosa/MG.

TEIXEIRA, C. O. (2011), Efluentes de Laticínios, Enquadramento Legal e a Representação dos Técnicos e Gerentes, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora/MG.

TEIXEIRA, G. A. (2014), Cristalização em leite vibrado: uso de soro de queijo purificado na separação de lactose, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

TREVISAN, T.S. (2014), Coagulante Tanfloc Sg como Alternativa ao Uso de Coagulantes Químicos no Tratamento de Água na ETA, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Londrina/PR.