
Modelagem matemática do crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo

| Ariellen Nascimento de **Oliveira**
IF Goiano

| Dayana Silva Batista **Soares**
IF Goiano

| Luciano Carlos Ribeiro da **Silva**
IF Goiano

| Danielle de Sousa **Severo**
UFSC

| Ellen Godinho **Pinto**
IF Goiano

| Ana Paula Stort **Fernandes**
IF Goiano

| Wiaslan Figueiredo **Martins**
IF Goiano

RESUMO

Objetivo: modelar o crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo (PCF) sob diferentes condições isotérmicas e não isotérmicas. **Método:** os dados de crescimento de *B. thermosphacta* em PCF nas temperaturas entre 4 e 12 °C de armazenamento foram adquiridos do trabalho de Hwang e Sheen (2011), disponíveis na base de dados *Combase* e o modelo de Baranyi e Roberts foi ajustado às curvas de crescimento. **Resultados:** pode-se afirmar que o modelo apresentou ótimo desempenho para descrever o crescimento de *B. thermosphacta* em PCF nas cinco temperaturas avaliadas, com valores de $R^2 \geq 0,99$ e Erros Padrão dos ajustes próximos de zero. O modelo da raiz quadrada foi selecionado para gerar as previsões do crescimento em condições de oscilação de temperatura, destacando a importância na manutenção da cadeia do frio, pois uma mínima alteração nessas condições pode provocar um aumento expressivo no crescimento de microrganismos deteriorantes. **Conclusão:** conclui-se que a aplicação de modelos preditivos e *softwares* de fácil utilização pode auxiliar às indústrias de carnes na determinação da vida útil de alimentos, sem a necessidade de realização de vários experimentos para determinar a qualidade e a segurança dos produtos.

Palavras-chave: Produtos Cárneos, Refrigeração, Deterioração, Vida Útil, Microbiologia Preditiva.

■ INTRODUÇÃO

A produção e consumo de carne suína e seus produtos está cada vez maior dentre todo o mundo, o Brasil se encontra em quarto lugar no ranque de produção de carne suína, seu consumo per capita é de 15,3 kg por habitante. A carne suína pode ser consumida de diversas formas, como in natura, ou seja, sem passar por qualquer processo de industrialização, diretamente de açougues ou por meio do consumo de seus produtos, como os embutidos, os fermentados, os defumados e/ou cozidos e os fatiados, como presuntos entre outros produtos (ABPA, 2020).

Os produtos cárneos em sua grande maioria apresentam-se como uma forma de facilitar a correria do dia a dia dos consumidores, dentre esses podemos citar o presunto cozido e fatiado. Geitenes *et al.* (2013) apresentaram em seus estudos as características que dão origem ao produto cárneo, sendo ela o preparado por meio do pernil do suíno, onde ele é desossado e acrescido de outros ingredientes para obter as suas características sensoriais e nutricionais. Porém, assim como as carnes, os produtos cárneos também são susceptíveis a deterioração por microrganismos, tornando os produtos impróprios ao consumo.

Alcantara *et al.* (2012) realizaram um estudo abordando os principais microrganismos considerados deteriorantes de produtos cárneos, como *Pseudomonas* spp., bactérias ácido-láticas (BAL), *Shewanella putrefaciens* e *B. thermosphacta*. Segundo os autores, deve-se considerar que cada microrganismo possui as suas condições ótimas de desenvolvimento.

A carne e os produtos cárneos possuem em sua composição condições favoráveis que auxiliam no desenvolvimento de microrganismos deteriorantes, como atividade de água (*aw*), pH e nutrientes. Além disso, a temperatura é um importante fator extrínseco que influencia diretamente na velocidade de crescimento dos microrganismos e, para estudar os parâmetros de crescimento, destaca-se a ferramenta da microbiologia preditiva (MATHIAS, 2008).

A microbiologia preditiva engloba conceitos de microbiologia de alimentos, matemática, estatística e informática para estudar a dinâmica de crescimento de microrganismos. Ela baseia-se em análise de todas as fases de crescimento do microrganismo, desde a fase *lag*, em que o microrganismo se encontra em adaptação no ambiente, a fase exponencial, que é caracterizada pelo crescimento acelerado dos microrganismos, predominando as células mais jovens e a fase estacionária, que se caracteriza por possuir o mesmo número de células viáveis e não viáveis (SCHLEI, 2018).

A utilização de modelos matemáticos auxilia na obtenção de dados sobre o comportamento dos microrganismos, tanto na sua inativação ou no seu crescimento. Os modelos a serem utilizados são divididos em modelos primários, secundários e terciários. Os modelos primários representam a dinâmica dos microrganismos em condições constantes, em função do tempo. Já os secundários descrevem a influência dos fatores intrínsecos ou extrínsecos



sobre o crescimento dos microrganismos e, por fim, os modelos terciários se detêm na utilização de *softwares* capazes de realizarem a consolidação dos dados obtidos nos modelos primários e secundários (ROBAZZA, 2010).

■ MÉTODO

Dados de crescimento

Os dados de crescimento em diferentes temperaturas foram obtidos no banco de dados *Combase* (www.combase.cc), utilizando a categoria de alimento “*meat products*”, o microrganismo “*Brochothrix thermosphacta*”, e faixa de temperatura entre 2 e 20 °C. Foram selecionados dados do crescimento (\log_{10} UFC/g) de *B. thermosphacta* (em quadruplicata) em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo em cinco temperaturas de armazenamento: 4 °C, 6 °C, 8 °C, 10 °C e 12 °C. Os dados foram reportados da pesquisa de Hwang e Sheen (2011), intitulada “*Growth characteristics of Listeria monocytogenes as affected by a native microflora in cooked ham under refrigerated and temperature abuse conditions*”, publicada no periódico “*Food Microbiology*”. Os autores, nessa pesquisa, avaliaram o processo de desenvolvimento da *L. monocytogenes* em diversas condições, como por exemplo, o crescimento misto de *L. monocytogenes* e *B. thermosphacta*. No entanto, os dados do crescimento de *B. thermosphacta* em cultura pura não foram apresentados pelos autores, apenas disponibilizados no *Combase*.

Modelagem primária

Para uma avaliação mais biológica sob a presença de microrganismos e as consequências que eles desencadeiam no alimento armazenado foi utilizado o modelo matemático primário. Ele analisa a dinâmica do microrganismo em função do tempo, o modelo matemático primário sigmoidal com função de ajuste, Baranyi e Roberts (BARANYI; ROBERTS, 1994) (Equações 1, 2 e 3) que foi ajustado às curvas experimentais de *B. thermosphacta* em (PCF) em diferentes temperaturas.



$$y(t) = y_0 + \mu_{m\acute{a}x}F(t) - \ln \left\{ 1 + \frac{e^{\mu_{m\acute{a}x}F(t)} - 1}{e^{y_{m\acute{a}x} - y_0}} \right\} \quad (1)$$

$$F(t) = t + \left(\frac{1}{\mu_{m\acute{a}x}} \right) \ln [e^{(-\mu_{m\acute{a}x}t)} + e^{(-h_0)} - e^{(-\mu_{m\acute{a}x}t - h_0)}] \quad (2)$$

$$h_0 = \mu_{m\acute{a}x}\lambda \quad (3)$$

Nas equações, $y(t)$ é o logaritmo da concentração microbiana N (UFC/g) no tempo t (horas), ou seja, $y(t) = \log [N(t)]$. O parâmetro $\mu_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima específica de crescimento (h^{-1}); λ é a duração da fase de latência (h); y_0 é o logaritmo da concentração microbiana inicial, $y_0 = \log (N_0)$; $y_{m\acute{a}x}$ é o logaritmo da população máxima, $y_{m\acute{a}x} = \log (N_{m\acute{a}x})$; h_0 é o parâmetro relacionado ao estado fisiológico das células (adimensional); $F(t)$ é a função do modelo Baranyi e Roberts.

Modelagem secundária

Os modelos secundários linear, potência, exponencial, logarítmico, raiz quadrada e tipo Arrhenius (Equações 4, 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente) foram usados para descrever o efeito da temperatura na velocidade máxima específica de crescimento ($\mu_{m\acute{a}x}$), em que a e b são parâmetros empíricos, T é a temperatura de armazenamento ($^{\circ}C$) e T_{min} é a temperatura teórica mínima de crescimento ($^{\circ}C$).

$$\mu_{max} = aT + b \quad (4)$$

$$\mu_{max} = aT^{(b)} \quad (5)$$

$$\mu_{max} = ae^{(bT)} \quad (6)$$

$$\mu_{m\acute{a}x} = a \ln(T) + b \quad (7)$$

$$\sqrt{\mu_{max}} = a(T - T_{min}) \quad (8)$$

$$\ln \mu_{m\acute{a}x} = a(1/T) + b \quad (9)$$

Modelo não isotérmico

Para a predição do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF em condições de oscilações de temperaturas (condições não isotérmicas), foi utilizada a equação diferencial do modelo de Baranyi e Roberts (Equações 10 e 11).



$$\frac{dy(t)}{dt} = \mu_{m\acute{a}x} \left[\frac{1}{1 + e^{-Q(t)}} \right] \{1 - \exp[y(t) - y_{m\acute{a}x}]\} \quad (10)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \mu_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

Em que, $y(t)$ é o logaritmo da concentração microbiana N (UFC/g) no tempo t (horas), ou seja, $y(t) = \log [N(t)]$. $Q(t)$ é a função de ajuste, considerada como o estado fisiológico das células (BARANYI; ROBERTS, 1994).

As Equações 12 e 13 descrevem as condições iniciais utilizadas para resolver as Equações diferenciais 10 e 11.

$$Q(0) = Q_0 \quad (12)$$

$$y(0) = y_0 \quad (13)$$

Em que, y_0 representa o logaritmo da concentração microbiana inicial N_0 , ou seja, $y(0) = \log [N_0]$; Q_0 é considerado como o valor do estado fisiológico inicial das células, que relaciona-se com o parâmetro h_0 , por meio da Equação 14.

$$Q_0 = -\log[\exp(h_0) - 1] \quad (14)$$

As condições não isotérmicas utilizadas para a simulação do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições não isotérmicas utilizadas para a predição do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF.

Condição não isotérmica	Tempo e temperatura de simulação (°C)
CN ₁	10 °C [10 h], 8 °C [10 h], 6 °C [10 h] e 4 °C [10 h]
CN ₂	4 °C [10 h], 6 °C [10 h], 8 °C [10 h] e 10 °C [10 h]
CN ₃	4 °C [5 h], 6 °C [5 h] e 4 °C [30 h]
CN ₄	4 °C [5 h], 8 °C [5 h] e 4 °C [30 h]
CN ₅	4 °C [5 h], 10 °C [5 h] e 4 °C [30 h]
CN ₆	4 °C [5 h], 12 °C [5 h] e 4 °C [30 h]

Fonte: elaborada pelos autores (2021)

Análises numéricas

Os ajustes do modelo primário aos dados experimentais de crescimento de *B. thermosphacta* em PCF nas temperaturas de armazenamento entre 4 °C e 12 °C foram realizados no





DMFit online, na interface do *Combase*. O ajuste foi realizado em apenas uma etapa, obtendo os parâmetros $\mu_{m\acute{a}x}$, λ , y_0 e $y_{m\acute{a}x}$. O parâmetro h_0 foi calculado pela Equação 3. Em seguida, um valor médio aritmético do parâmetro h_0 foi calculado para todas as temperaturas.

Os modelos secundários foram ajustados no programa Microsoft Excel[®]. As equações dos modelos secundários e o valor médio de h_0 foram usados para a predição do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF em condições não isotérmicas, que foram realizadas em planilhas do Excel[®] pela resolução da equação diferencial do modelo de Baranyi e Roberts (Equações 10 e 11), pelo método de Runge-Kutta 4^a ordem (LONGHI *et al.*, 2017).

Avaliação do desempenho dos modelos

Para avaliar o desempenho do modelo primário, foram usados o Coeficiente de Determinação (R^2) e o Erro Padrão (EP) do ajuste, obtidos no DMFit. Um valor de $R^2 = 1$ e EP = 0 indica que existe uma concordância perfeita entre todos os dados experimentais e os valores do ajuste do modelo. Já o desempenho dos modelos secundários foi avaliado pelo R^2 , obtido do ajuste dos modelos aos dados de $\mu_{m\acute{a}x}$ em função da temperatura de armazenamento.

■ RESULTADOS E DISCUSSÃO

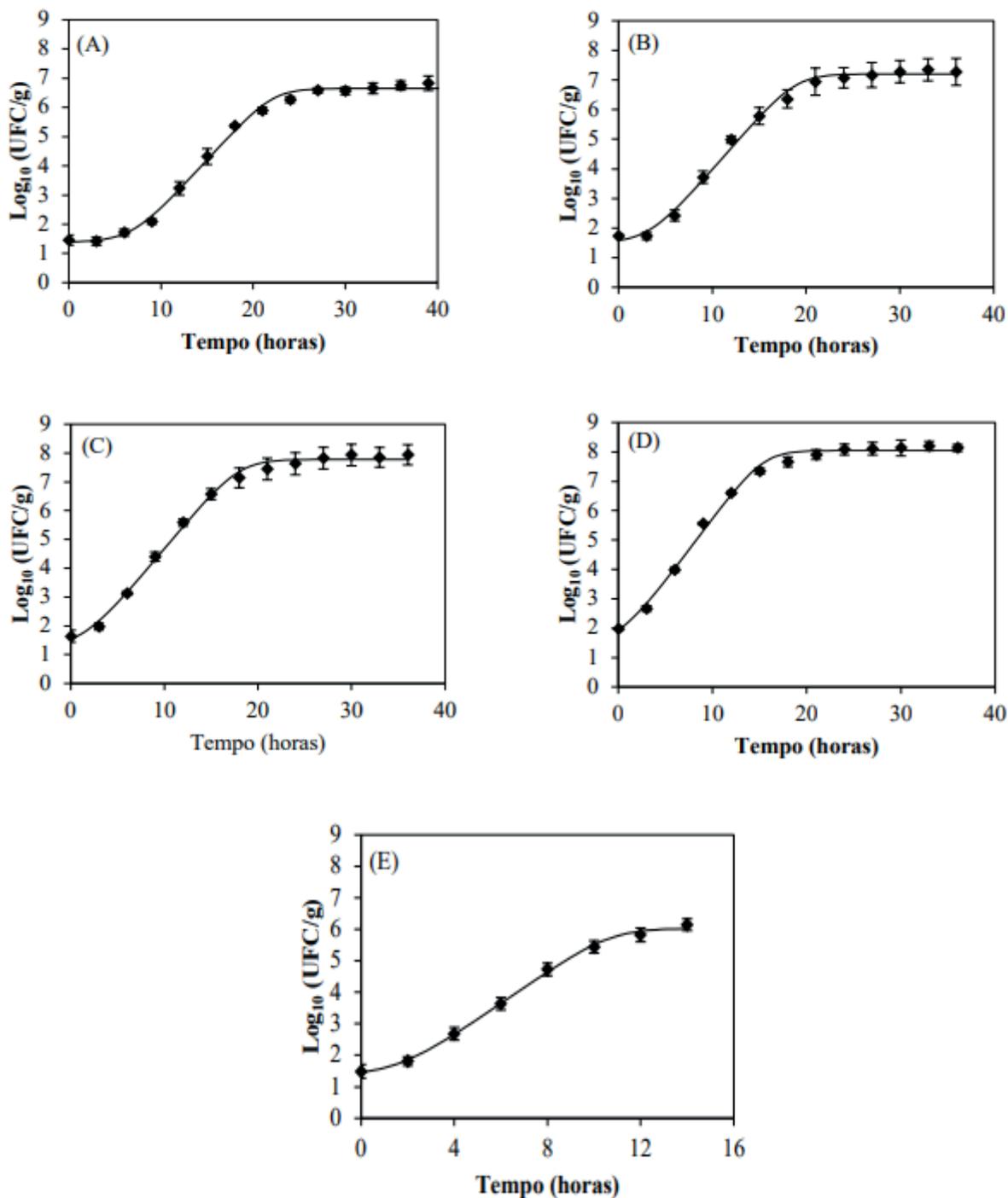
Os dados de crescimento utilizados neste trabalho foram obtidos do artigo de Hwang e Sheen (2011). Embora os autores tenham analisado o comportamento de *L. monocytogenes* no presunto, as curvas de crescimento da inoculação de uma segunda bactéria, a *B. thermosphacta*, foram disponibilizadas na base de dados do *ComBase*. Os autores realizaram o crescimento misto com o objetivo de simular uma microbiota natural e, assim, observar o comportamento de um microrganismo patogênico frente a um microrganismo deteriorante em uma matriz alimentar, que foi o presunto.

As curvas de crescimento de *B. thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e emba-lado a vácuo e os ajustes do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais nas temperaturas entre 4 °C e 12 °C de armazenamento estão representadas nas Figuras 1 e 2.





Figura 1. Curvas de crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo e os ajustes do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais nas temperaturas de (A) 4 °C, (B) 6 °C, (C) 8 °C, (D) 10 °C e (E) 12 °C de armazenamento. Em todos os gráficos, os dados experimentais estão representados pelos símbolos em losango e a linha contínua representa o ajuste do modelo de Baranyi e Roberts. As barras representam os desvios-padrão.

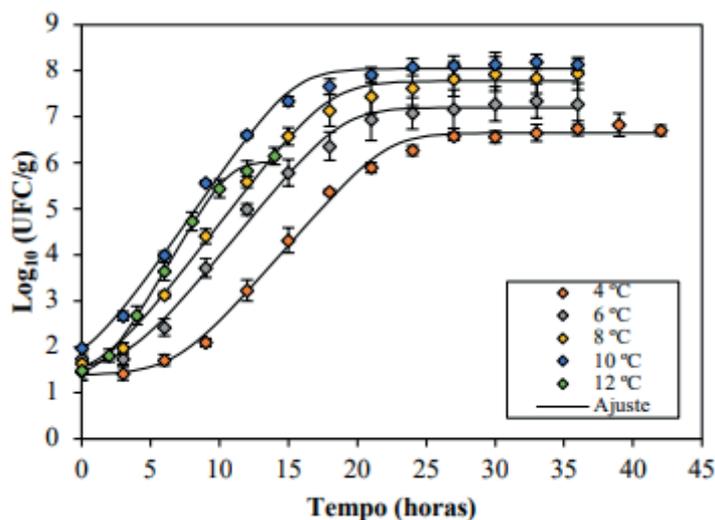


Fonte: elaborada pelos autores (2021).





Figura 2. Compilação das curvas de crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo, já apresentadas anteriormente, e os ajustes do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais nas temperaturas de 4 °C, 6 °C, 8 °C, 10 °C e 12 °C de armazenamento. As barras representam os desvios-padrão.



Fonte: elaborada pelos autores (2021).

Ao observar a Figura 1 é possível verificar o ótimo crescimento de *B. thermosphacta*, atingindo valores máximos de crescimento entre 6 e 7 \log_{10} (UFC/g), em aproximadamente 25 h, para todas as temperaturas avaliadas. Esses valores são considerados como o limite crítico de deterioração de produtos cárneos (SLONGO, 2008; DALCANTON, 2013; IRKIN *et al.*, 2011; PIOTROWSKA-CYP *et al.*, 2017; MENEZES *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2020). De acordo com Diez (2009), ao atingirem esse limite ocorre as primeiras alterações no produto, como na textura, odor ou sabor, tornando-o impróprio à comercialização e ao consumo. Assim, destaca-se a importância de manter toda a cadeia do frio, com a finalidade de aumentar a fase *lag* e de retardar ao máximo a fase exponencial de crescimento, evitando atingir o limite crítico de deterioração.

Na Figura 1E, que representa o crescimento de *B. thermosphacta* a 12 °C, considerando como uma temperatura de abuso, o crescimento atingiu valor máximo na ordem de 6 \log_{10} (UFC/g) em menos de 16 h. É possível verificar que a curva de crescimento não apresentou uma fase estacionária, pois ainda tinha uma tendência de continuidade da fase exponencial até a fase estacionária. Esse fato pode ter ocorrido devido interrupção do experimento, já que o foco dos autores dos dados foi estudar o comportamento de *L. monocytogenes* em cultura pura e em cultura mista com *B. thermosphacta*, e não a cultura pura dessa espécie deteriorante.

Para tornar a visualização da influência da temperatura no crescimento microbiano, todas as curvas foram plotadas em um único gráfico, representado na Figura 2, em que, foi possível observar o crescimento ótimo de *B. thermosphacta* em todas as temperaturas avaliadas. Esse fato pode ter ocorrido devido a sua capacidade de crescimento em condições





de refrigeração. Além disso, a bactéria foi inoculada em condições ótimas de cultivo, diretamente na matriz alimentar (presunto), que representa uma condição ótima para o seu desenvolvimento.

Tabela 2. Parâmetros de crescimento (\pm DP) estimados pelo ajuste do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais de *B. thermosphacta* PCF artificialmente inoculada a 4, 6, 8, 10 e 12 °C e os índices estatísticos de desempenho do modelo.

Temperatura (°C)	Parâmetros de crescimento			Índices estatísticos	
	λ (h)	$\mu_{m\acute{a}x}$ (h ⁻¹)	$y_{m\acute{a}x}$ (log ₁₀)	R ²	Erro padrão
4	6,86 \pm 0,64	0,34 \pm 0,02	6,65 \pm 0,06	0,996	0,145
6	3,43 \pm 0,87	0,36 \pm 0,02	7,20 \pm 0,08	0,993	0,188
8	1,94 \pm 0,75	0,39 \pm 0,02	7,78 \pm 0,07	0,995	0,170
10	1,15 \pm 0,62	0,43 \pm 0,03	8,05 \pm 0,07	0,995	0,171
12	1,71 \pm 0,20	0,51 \pm 0,01	6,04 \pm 0,07	0,998	0,078

Fonte: elaborada pelos autores (2021)

Independente da temperatura de crescimento, as contagens iniciais obtidas foram, em média, de 1,6 log₁₀, indicando que as curvas de crescimento foram construídas partindo aproximadamente do mesmo ponto.

Como presumido, a temperatura é um fator importante no crescimento dos microrganismos, com um aumento da velocidade específica máxima de crescimento e, consequentemente, diminuição da fase *lag*. Foi possível observar que os valores de do parâmetro λ diminuíram com o aumento da temperatura, com valores variando entre 1,15 h e 6,86 h, com exceção da temperatura de 12 °C, que atingiu valor de 1,71 h, valor maior do que o encontrado para 10 °C (1,15 h). Essa diferença pode ter ocorrido devido ao formato não sigmoidal da curva de 12 °C (Figura 1E). O contrário ocorreu com a velocidade de crescimento, em que foi possível observar um aumento em temperaturas mais elevadas, variando de 0,34 (h⁻¹) a 0,51 (h⁻¹) nas temperaturas de 4 °C a 12 °C, respectivamente.

Com relação ao parâmetro $y_{m\acute{a}x}$, *B. thermosphacta* atingiu maior valor na temperatura de 10 °C (8,05 log₁₀) e valores próximos ao limite crítico de deterioração (7 log₁₀) nas temperaturas de 6 °C e 8 °C. Porém, nas temperaturas de 4 °C e 12 °C, os valores de $y_{m\acute{a}x}$ não ultrapassaram 6 log₁₀.

Ao avaliar os índices estatísticos do desempenho do modelo de Baranyi e Roberts, pode-se afirmar que o modelo apresentou ótimo desempenho para descrever o crescimento de *B. thermosphacta* em PCF nas cinco temperaturas avaliadas, com valores de R² \geq 0,99 e Erros Padrão dos ajustes próximos de zero. No entanto, um melhor desempenho pode ser observado para a curva de 12 °C, com valor de R² de 0,998 e Erro Padrão de 0,078.



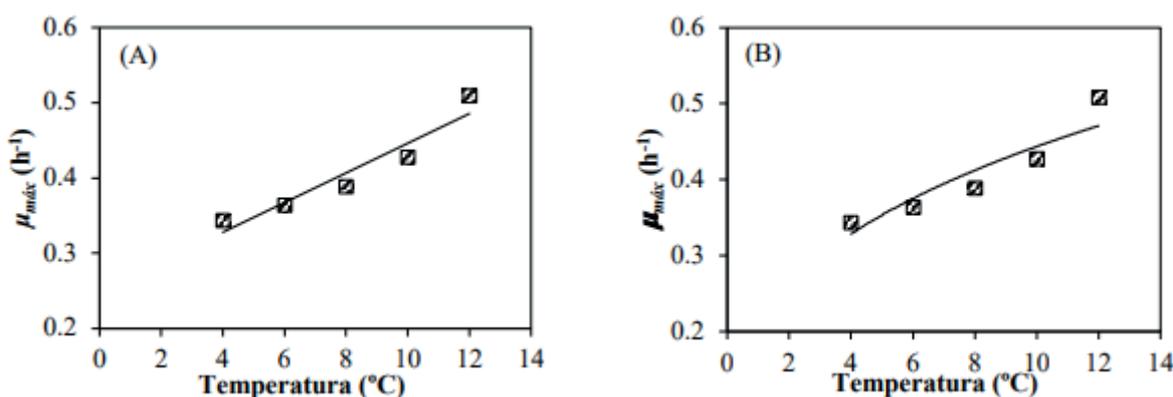


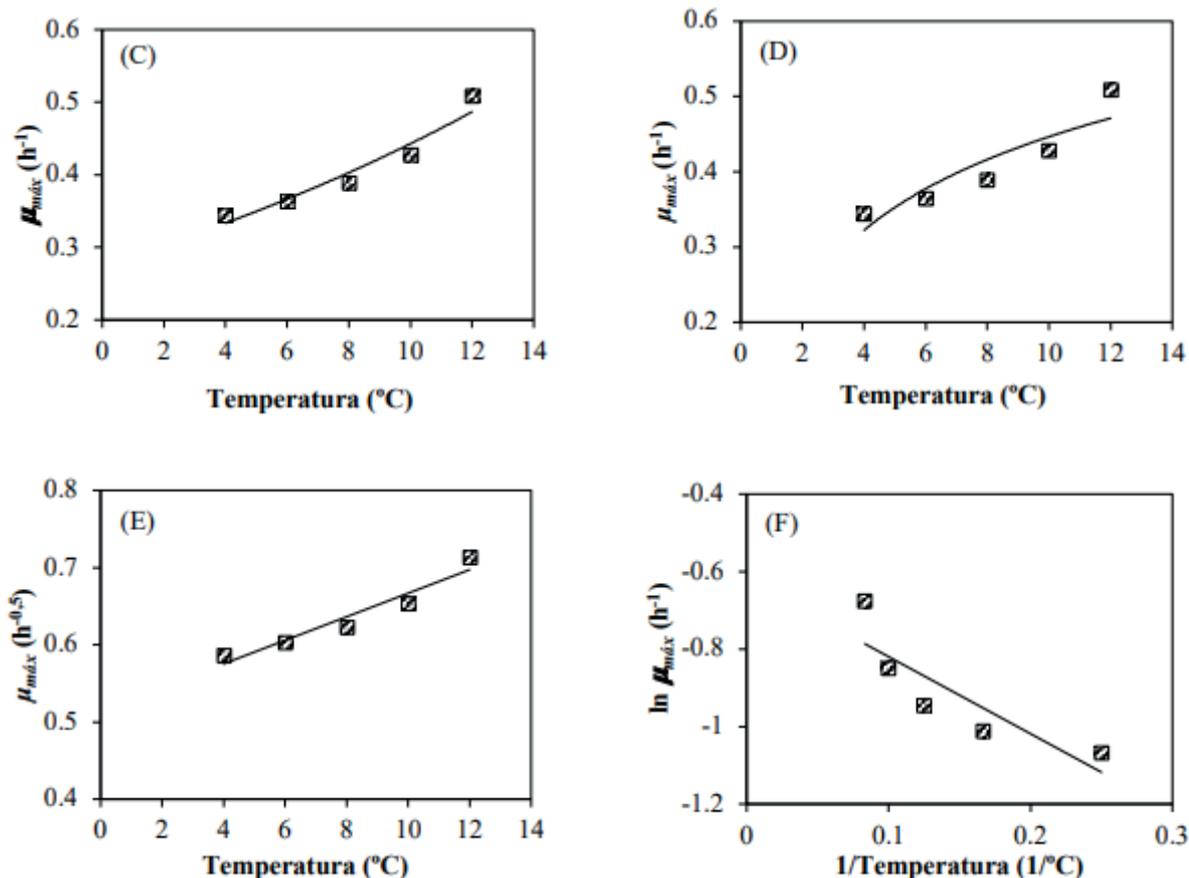
De acordo com os resultados publicados por Hwang e Sheen (2011), em temperaturas baixas, de 4 a 8 °C, o crescimento de *B. thermosphacta* foi maior do que *L. monocytogenes*, quando cultivadas em cultura mista no PCF. Enquanto, nas temperaturas abusivas, de 10 e 12 °C, o crescimento dominante passou a ser da bactéria *L. monocytogenes*, frente ao crescimento de *B. thermosphacta*. Assim, pode-se observar a importância de manter a cadeia do frio, pois a temperatura influencia diretamente nos parâmetros de qualidade e segurança dos produtos. Assim, diferentes modelos secundários foram utilizados para avaliar a influência da temperatura na velocidade específica máxima de crescimento ($\mu_{\text{máx}}$) de *B. thermosphacta* (Figura 3).

Os resultados dos ajustes obtidos neste trabalho corroboram com o estudo realizado por Anjos (2013), ao estudar o crescimento de *B. thermosphacta* em diferentes temperaturas e valores de pH, obtendo um bom ajuste dos modelos primários Baranyi e Roberts e Gompertz modificado (ZWIETERING *et al.*, 1990), com valores de R^2 variando entre 0,989 e 0,99 para todas as condições, valores esses próximos aos relatados neste estudo.

Os modelos secundários que melhor se ajustaram aos dados do parâmetro $\mu_{\text{máx}}$ obtidos pelo ajuste do modelo de Baranyi e Roberts para os dados de PCF embalado a vácuo são apresentados na Figura 3 e as equações dos modelos com seus parâmetros ajustados são apresentadas na Tabela 3.

Figura 3. Modelos secundários que representam o efeito da temperatura no parâmetro velocidade específica máxima de crescimento ($\mu_{\text{máx}}$) de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo. (A) modelo linear, (B) modelo da potência, (C) modelo exponencial, (D) modelo logarítmico, (E) modelo da raiz quadrada e (F) modelo do tipo Arrhenius.





Fonte: elaborada pelos autores (2021).

Tabela 3. Equações dos modelos secundários que representam a influência da temperatura do no parâmetro velocidade específica máxima de crescimento (μ_{max}) de *Brochothrix thermosphacta*.

Modelos	Equação	R ²
Linear	$\mu_{max} = 0,0197 \times T + 0,2492$	0,914
Potência	$\mu_{max} = 0,2084 \times T^{(0,3282)}$	0,855
Exponencial	$\mu_{max} = 0,276 \times e^{0,0473 \times T}$	0,943
Logarítmico	$\mu_{max} = 0,1355 \times \ln(T) + 0,1345$	0,814
Raiz quadrada	$\sqrt{\mu_{max}} = 0,0152 (T + 33,83)$	0,929
Tipo Arrhenius	$\ln \mu_{max} = -1,9878 \times (1/T) - 0,6209$	0,739

Fonte: elaborada pelos autores (2021).

Ao analisar a Figura 3, é possível verificar de forma qualitativa que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, sendo que os modelos secundários apresentados na Tabela 3 podem ser usados para prever a velocidade específica máxima de crescimento de *B. thermosphacta* nas condições estudadas e em condições que não extrapolem a temperatura no intervalo entre 4 °C e 12 °C.



Os modelos exponencial, raiz quadrada e linear apresentaram valores de R^2 acima de 0,9, com maior destaque para o modelo exponencial, com valor de R^2 igual a 0,943. Os valores de R^2 próximos a 1,0 são considerados como um ajuste satisfatório (ROSS, 1996). No entanto, muitos autores reportaram o uso do modelo da raiz quadrada para descrever o efeito de fatores extrínsecos, como a temperatura, nos parâmetros de crescimento de bactérias deteriorantes de produtos cárneos (ANJOS, 2013; SILVA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; SEVERO, 2018; MARTINS *et al.*, 2020). Dessa forma, foi realizada uma comparação entre os modelos exponencial e raiz quadrada para predição do crescimento e, a partir das predições geradas, não foram obtidas diferenças, sendo o modelo da raiz quadrada escolhido para gerar as predições do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF em condições não isotérmicas.

Ao avaliar um produto cárneo que difere do estudado (MEZARROBA *et al.*, 2016) verificou que em filé de peito o modelo primário que melhor se adequou foi o de Baranyi se mostrando com uma maior eficácia nos seus dados, juntamente com o secundário exponencial que foi destaque no estudo sobre *B. thermosphacta*, contudo cada estudo distingue o melhor modelo a se seguir na predição, mas foi ressaltado que a predição utilizada para as bactérias ácido-láticas é confiável para ser utilizadas em demais produtos e pode ser considerado seguro em estudos de outras bactérias que possam causar deterioração ao produto, reduzindo assim a sua vida útil.

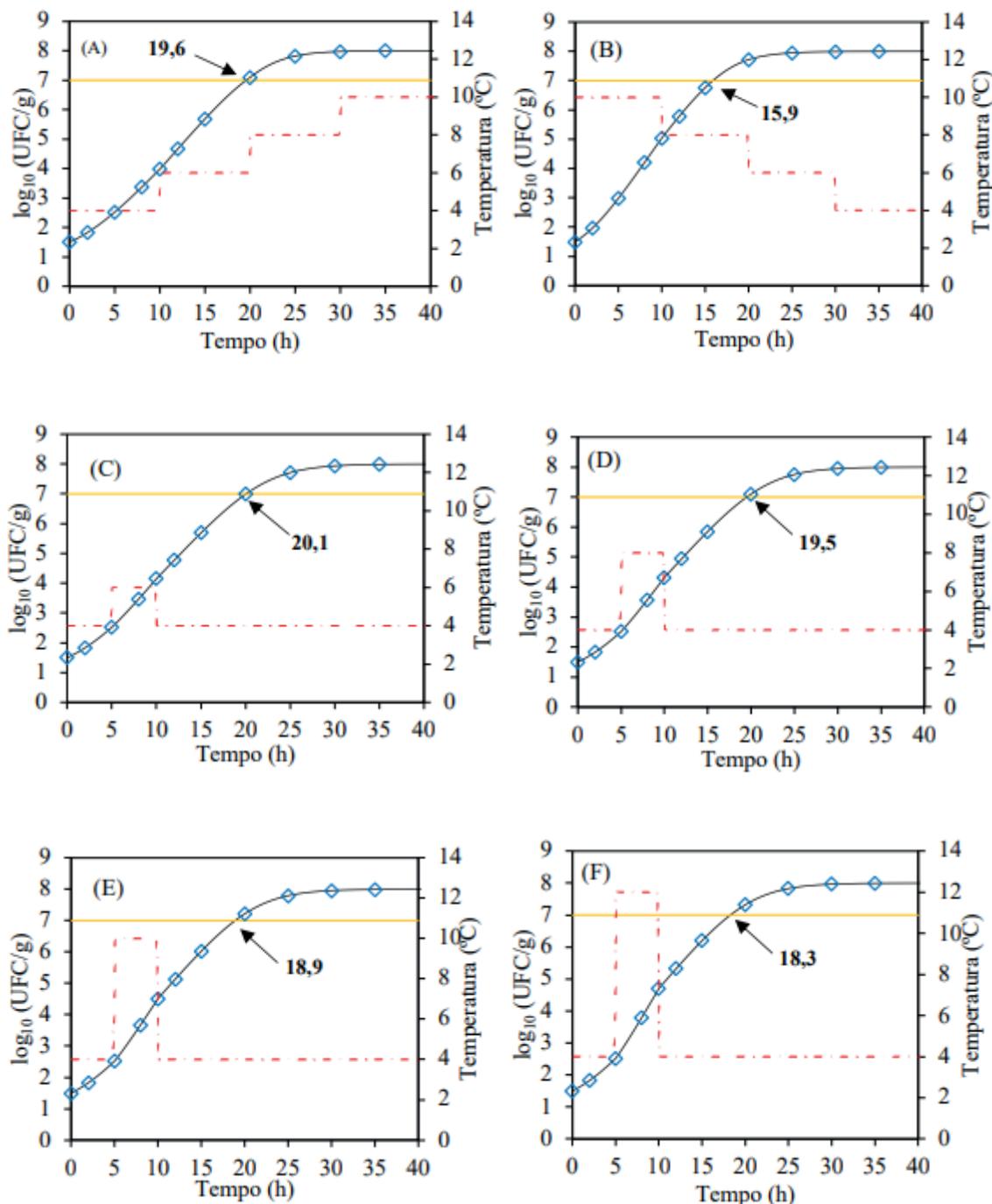
A equação do modelo secundário Raiz quadrada e o valor médio de h_0 foram usados para a predição do crescimento de *B. thermosphacta* em PCF em condições não isotérmicas (simulações), a partir da resolução da equação diferencial do modelo de Baranyi e Roberts, por meio do método de Runge-Kutta 4^a ordem. As condições de oscilação de temperatura foram simuladas baseando-se em ocorrências de diversos abusos de temperatura no armazenamento de alimentos, como o acondicionamento dos alimentos em refrigeradores domésticos, no dia a dia dos consumidores, o desligamento de freezers dos supermercados durante um período, com o intuito de economia de energia, bem como falhas operacionais durante o transporte refrigerado dos alimentos, ocasionando um aumento na sua temperatura externa e interna. As simulações da variação de temperatura, a predição do crescimento, o limiar de vida útil do alimento e a simulação dos dados experimentais estão representadas na Figura 4.

O limite crítico utilizado para estimar a vida útil do PCF nas condições não isotérmicas foi de 10^7 UFC/g (7 log₁₀), de acordo com vários autores que indicaram que, ao atingir esse valor, o alimento já se encontra em processo de deterioração, com alterações na cor, no odor e na textura, tornando-o inadequado ao consumo (SLONGO 2008; DALCANTON, 2013; IRKIN *et al.*, 2011; MENEZEZ *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2020).





Figura 4. Predição do crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo em diferentes condições de armazenamento não isotérmico. (A) 4-6-8-10 °C, (B) 10- 8-6-4 °C, (C) 4-6-4 °C, (D) 4-8-4 °C, (E) 4-10-4 °C e (F) 4-12-4 °C. Em todos os gráficos, a linha contínua preta representa a predição do modelo de Baranyi e Roberts, a linha em tracejada em vermelho representa a simulação do perfil de temperatura, os símbolos em azul representam uma simulação dos dados de crescimento, a linha em amarelo representa o limite crítico de deterioração estabelecido em 7 log₁₀ (UFC/g). As setas indicam o tempo para atingir o limite crítico.



Fonte: elaborada pelos autores (2021).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4, é possível observar que o aumento gradual da temperatura (Figura 4A), de 4 °C a 10 °C, possui menor influência na vida útil do PCF (19,6 h) quando comparado com a condição de temperatura de 10 °C a 4 °C (Figura 4B), quando a temperatura é decrescente, exemplificando uma possível falha no





início da cadeia do frio do produto, o qual atinge o limite crítico em 15,9 h, demonstrando que a refrigeração não é capaz de recuperar a segurança do alimento que apresenta elevados níveis de alteração. Assim, destaca-se a importância na manutenção da cadeia do frio, principalmente pelos consumidores que, na maioria dos casos, não possuem informações, conhecimentos científicos ou hábitos de leitura dos rótulos sobre a forma de armazenamento dos alimentos. Além disso, muitos consumidores selecionam os produtos cárneos refrigerados e prontos para o consumo no início das compras, permanecendo em sem refrigeração até chegar no refrigerador doméstico, provocando um aumento expressivo no crescimento de microrganismos deteriorantes.

Ao analisar a Figura 4C-F, na qual apresenta abuso de diferentes temperaturas nas primeiras cinco horas da cadeia do frio, é possível observar que uma amplitude de 2 °C em cada condição não isotérmica representou uma diminuição expressiva na vida útil de PCF embalado a vácuo. Assim, as simulações comprovam a importância da manutenção constante da cadeia do frio da carne e produtos cárneos, pois uma mínima alteração nessas condições pode provocar um aumento expressivo no crescimento de microrganismos deteriorantes, comprometendo, assim, a segurança e a qualidade desses produtos.

De acordo com Galarz (2008), a manutenção da cadeia do frio para alimentos comercializados, principalmente, os produtos cárneos é de grande importância, uma vez que o abuso de temperatura pode ocasionar a predominância de um patógeno, que irá diminuir a segurança daquele produto uma vez que seu crescimento for efetivo.

A aplicação de modelos preditivos e *softwares* de fácil utilização pode auxiliar às indústrias de cárneos na determinação da vida útil de alimentos, sem a necessidade de realização de vários experimentos para determinar a qualidade e a segurança desses produtos. Além disso, os modelos podem ser utilizados para a tomada de decisão nas diversas áreas de ciência e tecnologia de alimentos, como verificar a eficiência de aditivos na conservação de alimentos, o desenvolvimento de novas formulações de alimentos, novas embalagens para o aumento da vida útil de alimentos, entre outras aplicações.

Badia (2018) validou modelos preditivos para determinar a vida útil de linguiça toscana embalada a vácuo adicionada de óleo essencial de alecrim e orégano em diferentes temperaturas de armazenamento, por meio do crescimento de *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Pseudomonas* spp. e BAL. Nesse trabalho, não foi possível validar o modelo não isotérmico para o crescimento de *B. thermosphacta* em PCF, uma vez que é necessária a realização dos experimentos nessas condições para avaliar o desempenho do modelo a partir dos índices estatísticos.



■ CONCLUSÃO

O modelo primário de Baranyi e Roberts apresentou bom desempenho para descrever o crescimento da *B. thermosphacta* em presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo, com a obtenção dos parâmetros de crescimento. Além disso, os modelos secundários descreveram bem a influência da temperatura na velocidade específica máxima de crescimento de *B. thermosphacta*, com destaque para os modelos Exponencial e Raiz quadrada. A partir dos modelos primário e secundário da Raiz quadrada foi possível estabelecer um modelo não isotérmico e estudar a vida útil de presunto cozido, fatiado e embalado a vácuo, considerando oscilações de temperaturas que simulam as condições em que os produtos são armazenados inadequadamente, evidenciando a importância da manutenção da cadeia do frio. Assim, pode-se concluir que a aplicação de modelos preditivos e *softwares* de fácil utilização pode auxiliar às indústrias de carnes na determinação da vida útil de alimentos, sem a necessidade de realização de vários experimentos para determinar a qualidade e a segurança dos produtos.

■ REFERÊNCIAS

1. ABPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Relatório Anual 2020. 2020. Disponível em: <https://abpa-br.org/relatorios>. Acesso em 19 de março de 2021.
2. ALCANTARA, M. et al. Principais Microrganismos envolvidos na deterioração das características sensoriais de derivados carnes. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 7, n. 1, p. 1- 20, 2012.
3. ANJOS, L. D. **Modelos de crescimento de psicrotróficos em diferentes temperaturas e pH**. 2013. 126p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
4. BADIA, V. **Modelagem do efeito da aplicação de óleos essenciais de alecrim (*rosmarinus officinalis*) e orégano (*origanum vulgare*) sobre a vida útil de linguiça toscana embalada a vácuo**. 2018. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Curso de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, 2018.
5. BARANYI, J.; ROBERTS, T. A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. **International Journal of Food Microbiology**, v. 23, p. 277-294, 1994.
6. DALCANTON, F. et al. Modelling growth of *Lactobacillus plantarum* and shelf life of vacuum-packaged cooked chopped pork at different temperatures. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 48, p. 2580–2587, 2013.
7. DIEZ, A. M. et al. Microbial, sensory and volatile changes during the anaerobic cold storage of *morcilla de Burgos* previously inoculated with *Weissella viridescens* and *Leuconostoc mesenteroides*. **International Journal of Food Microbiology**, v. 131, p. 168–177, 2009.

8. GALARZ, L. A. **Estimativa da vida útil em peito de frango em diferentes temperaturas de armazenamento**. 2008. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2008.
9. GEITENES, S. et al. Modelagem do Crescimento de Bactérias Lácticas e Análise Microbiológica em Apresuntado e Presunto Cozido Fatiados e Embalados a Vácuo. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 15, n. 1, p. 113-133, 2013.
10. HWANG, C.; SHEEN, S. Growth characteristics of *Listeria monocytogenes* as affected by a native microflora in cooked ham under refrigerated and temperature abuse conditions. **Food Microbiology**, v. 1, n. 28, p. 350-355, 2011.
11. IRKIN, R. et al. Influence of packaging conditions on some microbial properties of minced beef meat at 4 °C storage. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 17, p. 655–663, 2011.
12. LONGHI, D. A.; MARTINS, W. F.; SILVA, N. B.; CARCIOFI, B. A. M.; ARAGÃO, G. M. F.; LAURINDO, J. B. Optimal experimental design for improving the estimation of growth parameters of *Lactobacillus viridescens* from data under non-isothermal conditions. **International Journal of Food Microbiology**, 240, 57–62, 2017.
13. MARTINS, W. F. et al. A mathematical modeling approach to the quantification of lactic acid bacteria in vacuum-packaged samples of cooked meat: Combining the TaqMan-based quantitative PCR method with the plate-count method. **International Journal of Food Microbiology**, v. 318, 108466, 2020.
14. MATHIAS, S. P. **Avaliação Físico-Química, Microbiológica e Sensorial do Presunto de Peru Submetido à Tecnologia de Alta Pressão Hidrostática**. 2008. 53p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de pós-graduação em ciência e tecnologia de alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
15. MENEZES, N. M. C. et al. Modeling the effect of oregano essential oil on shelf-life extension of vacuum-packed cooked sliced ham. **Meat Science**, v. 139, p. 113-119, 2018.
16. MEZAROBA, M. E. P. et al. Estimativa da vida útil e dos parâmetros de crescimento de bactérias ácido-lácticas em filés de peito de frango resfriados embalados a vácuo e com atmosfera modificada. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 34, n 1, p. 1-14, 2016.
17. PIOTROWSKA-CYPLIK, A. et al. Characterization of specific spoilage organisms (SSOs) in vacuum-packed ham by culture-plating techniques and MiSeq next generation sequencing technologies. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, p. 659–668, 2017.
18. ROBAZZA, W. S.; TELEKEN, J. T.; GOMES, G. A. Modelagem Matemática do Crescimento de Microrganismos em Alimentos. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 1, p. 101- 110, 2010.
19. ROSS, T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. **Journal Applied Bacteriology**, v. 81, p. 501–508, 1996.
20. SCHLEI, K. P. et al. Microbiologia preditiva: aspectos gerais e tendências. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 10, p. 52-68, 2018.

- 
21. SEVERO, D. S. **Modelagem do crescimento de *Leuconostoc mesenteroides* em cultura pura e mista usando PCR quantitativo (qPCR)**. 2018. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
 22. SILVA, A. P. R. et al. Modelling the growth of lactic acid bacteria at different temperatures. **Biological and Applied Sciences**, v. 61, 2018.
 23. SILVA, N. B. et al. Modeling the growth of *Lactobacillus viridescens* under non-isothermal conditions in vacuum-packed sliced ham. **International Journal of Food Microbiology**, v. 240, p. 97-101, 2017.
 24. SLONGO, A, P. **Uso de alta pressão hidrostática em presunto fatiado: avaliação físico-química e sensorial e modelagem do crescimento microbiano**. 2008. 144p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
 25. ZWIETERING, M. H. et al. Modeling of bacterial growth curve. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 6, p. 1875-1881, 1990.