



Área: Ciência de Alimentos

MODELAGEM DA INATIVAÇÃO DE *SALMONELLA* SPP. EM CARNE DE FRANGO

Tatiane Milkiewicz¹, Denise Ortigosa Stolf², Daniel Angelo Longhi³, Alessandro Cazonatto Galvão¹, Weber da Silva Robazza^{1,*}

¹Laboratório de Termofísica Aplicada, Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química, Universidade do Estado de Santa Catarina, Pinhalzinho, SC

²Unidade Central de Educação, FAEM Faculdade, UCEFF, Chapecó, SC

³Universidade Federal do Paraná, Curso: Engenharia de Alimentos, Jandaia do Sul, PR

*E-mail: weber.robazzi@udesc.br

RESUMO – O gênero *Salmonella* engloba bactérias patogênicas, as quais estão comumente envolvidas em surtos de intoxicação alimentar devidos ao consumo de carne de frango. Muitos estudos têm sido empregados para modelar a inativação bacteriana em função da temperatura. Devido à grande heterogeneidade dos resultados, uma descrição unificada da inativação de *Salmonella* em carne de frango é difícil de estabelecer. No presente estudo, através da avaliação da raiz do erro quadrático médio, desvio absoluto médio e dos critérios de informação de Akaike e Bayesiano, o modelo duplo de Weibull foi considerado como sendo o modelo primário mais adequado para ajustar 61 conjuntos de dados de inativação de *Salmonella* em carne de frango. Os resultados podem ser interpretados assumindo-se que a população bacteriana está recebida em duas subpopulações consistindo de uma mais resistente (cerca de 2,3% da população total) e outra menos resistente (cerca de 97,7% da população total) ao estresse térmico. Os resultados obtidos podem ser úteis para a avaliação do risco de contaminação com *Salmonella* em diferentes cortes da carne de frango.

Palavras-chave: *Salmonella*, carne de frango, inativação térmica, modelagem matemática.

1 INTRODUÇÃO

Salmonella é uma bactéria gram-negativa envolvida em muitos casos de gastroenterite causada por intoxicação alimentar no mundo todo. Os custos econômicos associados com doenças provocadas por *Salmonella* variam entre 2 e 11 bilhões de dólares por ano (AO et al., 2015; HOFFMANN et al., 2012; SCHARFF, 2012). De acordo com estimativas, a ingestão de alimentos contaminados com diferentes sorovares de *Salmonella* foi a causa principal de 80,3 milhões de casos de infecções entéricas por ano, resultando em aproximadamente 155 mil mortes (MAJOWICZ et al., 2010). Carne de frango está entre as fontes críticas de transmissão de *Salmonella* spp. Nesse contexto, o consumo de carne de frango provocou aproximadamente 200 mil casos de infecções com *Salmonella* por ano (HSI et al., 2015).

Como esta bactéria se encontra naturalmente presente no trato intestinal de muitos animais de sangue quente, sua ocorrência em carcaças de aves é bem conhecida (CHEN et al., 2018; DUARTE et al., 2009; YANG et al., 2011). A prevalência de *Salmonella* em carcaças de aves no varejo variou entre 5 e 54% (CHEN et al., 2018). Além disso, sua incidência em carne de frango moída é maior do que no produto inteiro (MCENTIRE et al., 2014). Embora a maior parte das aves contaminadas contenha menos que dez células bacterianas por carcaça, *Salmonella* pode se reproduzir para níveis altos em produtos submetidos a abusos de temperatura (OSCAR, 2009). Quando a temperatura variou de 9 para 12 °C, o aumento logarítmico da população bacteriana variou de 0,7 para 2,9 em carne de frango após 10 dias de armazenamento (OSCAR, 2011). Logo, um controle rígido da temperatura da carne de frango durante o processamento e armazenamento é uma questão de grande importância para a indústria de alimentos.

O processamento da carne de frango compreende diferentes etapas desde o transporte das aves até o processamento e consumidor final. Durante estas etapas, temperaturas de armazenamento inadequadas ou contaminação cruzada afetam o produto (CARRASCO et al., 2012). Monitorar e controlar o crescimento potencial e a inativação de *Salmonella* durante cada etapa de processamento é uma tarefa difícil, cujo resultado poderia fornecer uma estimativa realista do risco de contaminação de determinado corte de frango. Dessa forma, é necessário estimar as flutuações de temperatura e contaminação cruzada pelo menos durante as etapas críticas de processamento, as quais são escaldamento, depenamento, evisceração e resfriamento das carcaças (NDE et al., 2007).

Existem na literatura muitos modelos matemáticos que descrevem o crescimento de *Salmonella* em carne de frango (DOMINGUEZ, SCHAFFNER, 2008; JUNEJA et al., 2007; LI et al., 2017; MILKIEVICZ et al., 2020; OSCAR, 2002, 2005a, 2011). Entretanto, o número de modelos descrevendo a inativação térmica de *Salmonella* em carne de frango é limitada (SMADI et al., 2012). Além disso, a maioria dos modelos consiste no cálculo dos valores dos parâmetros D e z em uma faixa específica de temperaturas (JUNEJA et al., 2001b; KARUPPASAMY et al., 2015; MAZZOTTA, 2000; MURPHY et al., 2002, 2004). O parâmetro D corresponde ao tempo necessário para inativar 90% da população bacteriana. Entretanto, este conceito não considera a curvatura dos diagramas de inativação, o que leva a resultados imprecisos (KOYAMA et al., 2019).

O presente estudo visa desenvolver um modelo geral capaz de descrever a cinética de inativação de



Salmonella spp. em carne de frango submetida a perfis isotérmicos e não isotérmicos de temperatura. O modelo preditivo resultante pode ser usado como uma ferramenta útil para avaliar a inativação de *Salmonella* spp. em carne de frango nas diferentes etapas de processamento e para se efetuar avaliação do risco de contaminação com esta bactéria.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CONJUNTOS DE DADOS

Para modelar a cinética de inativação bacteriana, um total de 61 curvas de inativação térmica (57 isotérmicas e 4 não-isotérmicas) de diferentes sorovares de *Salmonella* em carne de frango foram selecionadas da literatura. Os critérios de busca incluíram os termos “*Salmonella*”, “thermal inactivation” e “chicken” nas bases de dados PubMed, Web of Science e Scopus. Nos estudos que incluíram fatores adicionais levando à inativação bacteriana, tais como a adição de outra substância inibitória, somente o tratamento controle foi considerado. A Tabela 1 apresenta os estudos adotados bem como a faixa de temperaturas empregada e o teor de gordura da carne utilizada. Resultados gráficos foram extraídos e convertidos para valores numéricos com o software GetData Graph Digitizer v. 2.23. O objetivo de usar conjuntos de dados de diferentes fontes consiste em obter um modelo mais robusto que pode descrever a inativação bacteriana sob diferentes condições.

Tabela 1. Descrição dos dados experimentais utilizados neste estudo.

Fonte	Número de curvas	Temperatura (°C)	Teor de gordura (%)
Thayer et al., (1991)	1	60	17,7
Murphy et al., (1999)*	4	67,5-70	0,12
Murphy et al., (2000)	7	55-70	0,12
Juneja et al., (2001a)	16	58-65	2-12
Yang et al., (2001)	3	50-60	Não especificado
Murphy et al., (2004)	2	62,5-70	10,3
Chambliss et al., (2006)	2	55	2,5
Juneja (2007)	2	55	Não especificado
Juneja et al., (2012)	8	55-71	Não especificado
Juneja et al., (2013)	3	60-71,1	Não especificado
Osaili et al., (2013)	4	54-60	7,6
Karuppasamy et al., (2015)	3	60-68	Não especificado
Yadav et al., (2016)	3	56-64	Não especificado
Karyotis et al., (2017)	3	55-60	Não especificado

*Conjuntos de dados não-isotérmicos.

2.2 MODELOS PRIMÁRIOS DE INATIVAÇÃO

Seis modelos diferentes de inativação térmica foram usados no presente estudo. Foram empregadas as equações correspondentes aos seguintes modelos: modelo de inativação bifásico (Equações. 1a e 1b, Humpheson et al., 1998), modelo de Weibull (Equação 2, Peleg; Cole, 1998), modelo logístico (Equação 3, Bermúdez-Aguirre; Corradini, 2012), um modelo linear sem uma fase de adaptação (Equações 4a e 4b, Whiting, 1993), modelo duplo de Weibull (Equação 5, Coroller et al., 2006) e um modelo linear sem uma fase de adaptação (Equação 6). A maioria destes modelos foi selecionada porque eles são muito usados em estudos de cinética de inativação bacteriana (Equações 1 a 5) e o modelo linear (Equação 6) foi usado devido a sua simplicidade.

Nas Equações de 1 a 6, $S(t)$ é a fração de sobreviventes no instante t definida por $S(t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N(t)}{N_0}$, sendo N_0 e $N(t)$ a população bacteriana inicial e no instante t , respectivamente. Os parâmetros k , k_1 e k_2 são constantes de velocidade (min^{-1}), b é um pseudo parâmetro de velocidade (min^{-n}), n é um parâmetro de forma, t_1 , t_c e t_L correspondem aos instantes (min) em que a velocidade de inativação muda (Equações 1a e 1b), o comprimento do “ombro” (Equação 3) e a duração do período de adaptação (Equação 4), respectivamente, D é o tempo de redução decimal e S_* representa um fator de correção que compensa a não linearidade da fração de sobreviventes em função do tempo. Os parâmetros δ_1 e δ_2 correspondem aos tempos da primeira redução decimal (min) relativamente a duas subpopulações bacterianas com diferentes sensibilidades térmicas e α é definido como $\alpha \stackrel{\text{def}}{=} \log_{10} \left(\frac{f}{1-f} \right)$, onde f é a fração da primeira subpopulação bacteriana (mais sensível ao estresse térmico em relação à segunda subpopulação, se $\delta_1 < \delta_2$).

$$\log_{10}S(t) = -k_1t \quad \text{se } t \leq t_1 \quad (1a)$$

e

$$\log_{10}S(t) = -k_1t_1 - k_2(t - t_1) \quad \text{se } t > t_1 \quad (1b)$$



$$\log_{10}S(t) = -b t^n \quad (2)$$

$$\log_{10}S(t) = -\log_{10}(1 + 10^{k(t-t_c)}) \quad (3)$$

$$\log_{10}S(t) = 0 \quad \text{se } 0 < t < t_L \quad (4a)$$

$$\log_{10}S(t) = -\frac{(t-t_L)}{D} \quad \text{se } t > t_L \quad (4b)$$

$$\log_{10}S(t) = \log_{10}\left(\frac{1}{1+10^\alpha}\right) + \log_{10}\left(10^{\alpha-\left(\frac{t}{\delta_1}\right)^n} + 10^{-\left(\frac{t}{\delta_2}\right)^n}\right) \quad (5)$$

$$\log_{10}S(t) = S_* - \frac{t}{D} \quad (6)$$

2.2 MODELOS SECUNDÁRIOS DE INATIVAÇÃO

Para modelar a dependência dos parâmetros dos modelos primários de inativação com a temperatura foram utilizados quatro diferentes modelos. A Equação 7 é uma expressão logarítmica-logística empírica que foi previamente usada para modelar inativação térmica sob regimes não-isotérmicos de temperatura (CORRADINI, PELEG, 2009). A Equação 8 expressa a Equação de Arrhenius (BOZKURT et al., 2014), enquanto que a Equação 9 consiste na bem conhecida Equação de Bigelow (BIGELOW, 1921). Finalmente, a Equação 10 consiste em uma adaptação de um modelo empírico previamente utilizado (VILLA-ROJAS et al., 2013). Nas Equações de 7 a 10, k_w ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) é uma constante de velocidade da temperatura, T_w ($^{\circ}\text{C}$) corresponde à temperatura de início da inativação, T_{ref} é uma temperatura arbitrária de referência (K na Equação 8 e $^{\circ}\text{C}$ na Equação 9), R é a constante universal dos gases (8,314 J mol⁻¹ K⁻¹), T is the temperature (K na Equação 8, $^{\circ}\text{C}$ nas Equações. 7, 9 e 10), $Y(T)$ é o valor do parâmetro do modelo primário (ou sua transformação) à temperatura T , $Y(T_{\text{ref}})$ é o parâmetro do modelo primário em T_{ref} , z representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) necessária for a curva de inativação se mover de um ciclo logarítmico, a_0 (min^{0,5}), a_1 (min^{0,5} $^{\circ}\text{C}^{-1}$) e a_2 (min^{0,5} $^{\circ}\text{C}^{-2}$) são parâmetros empíricos sem significado biológico.

$$Y(T) = \ln[1 + e^{k_w(T-T_w)}] \quad (7)$$

$$Y(T) = Y(T_{\text{ref}})\exp\left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (8)$$

$$Y(T) = Y_{\text{ref}}10^{-\left(\frac{T-T_{\text{ref}}}{z}\right)} \quad (9)$$

$$Y(T) = (a_0 + a_1T + a_2T^2)^2 \quad (10)$$

O parâmetro de forma n e o parâmetro empírico α foram assumidos como sendo independentes da temperatura, uma vez que eles não exibem um padrão de comportamento bem definido quando a temperatura varia (BERMÚDEZ-AGUIRRE, CORRADINI, 2012; COROLLER et al., 2006). Portanto, eles foram assumidos como constantes e iguais aos valores médios obtidos após a regressão não linear.

2.3 MODELOS NÃO-ISOTÉRMICO

O seguinte modelo matemático foi aplicado para avaliar a cinética de inativação para quatro perfis não-isotérmicos de temperatura. A Equação 11 é uma expressão geral que pode ser aplicada para todos os modelos primários de inativação (Equações de 1 a 6). O procedimento para resolver a Equação 11 consiste em inserir modelos secundários que expressam a dependência dos parâmetros primários de inativação com a temperatura na equação original, derivar a expressão resultante em relação ao tempo e integrar o resultado numericamente usando o método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem (LONGHI et al., 2017).

$$\log_{10}S(t) = \int_0^t \frac{d\log_{10}S(t)}{dt} dt \quad (11)$$

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar a qualidade de ajuste dos modelos foram usados os seguintes índices estatísticos: erro absoluto médio (MAE, Equação 12), raiz do erro quadrático médio (RMSE, Equação 13), critério de informação de Akaike



(AIC, Equação 14), critério de informação Bayesiano (BIC, Equação 15) e o erro relativo percentual médio (MRPE, Equação 16). Nas Equações de 12 a 16, num corresponde ao número de observações, $y_{obs,i}$ representa o i -ésimo valor observado, $y_{pred,i}$ representa o i -ésimo valor predito pelo modelo, p corresponde ao número de parâmetros do modelo e RSS é a soma residual dos quadrados após o ajuste do modelo aos dados. Toda a análise estatística e os procedimentos de regressão não linear foram realizados com o software R v. 3.6.1 (R CORE TEAM, 2016).

$$MAE = \frac{1}{num} \sum_{i=1}^{num} |y_{pred,i} - y_{obs,i}| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{num} (y_{pred,i} - y_{obs,i})^2}{num}} \quad (13)$$

$$AIC = num \ln \left(\frac{RSS}{num} \right) + 2p \quad (14)$$

$$BIC = num \ln \left(\frac{RSS}{num} \right) + p \ln(num) \quad (15)$$

$$MRPE = \frac{100}{num} \sum_{i=1}^{num} \left| \frac{y_{pred,i} - y_{obs,i}}{y_{obs,i}} \right| \quad (16)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AJUSTE DOS MODELOS PRIMÁRIOS DE INATIVAÇÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos índices de qualidade dos ajustes obtidos após o ajuste dos modelos primários de inativação para os 57 conjuntos de dados isotérmicos considerados neste estudo. A partir da Tabela 2, é possível observar que, na média, o modelo duplo de Weibull forneceu os melhores resultados para todos os índices seguidos, respectivamente, por modelo bifásico, modelo de Weibull, modelo logístico, modelo linear com fase de adaptação e modelo linear sem fase de adaptação. O desempenho do modelo duplo de Weibull foi ligeiramente menos eficiente ao se considerar os índices AIC e BIC porque estes levam em conta o número de parâmetros do modelo. Como o modelo duplo de Weibull contém 4 parâmetros ajustáveis e os demais incluem menos parâmetros (2 ou 3) em suas expressões matemáticas, este comportamento pode ser facilmente compreendido.

Tabela 2. Número de melhores ajustes obtidos de acordo com cada índice estatístico.

	BP	WB	LO	LL	DW	LI
MAE	13 (22,81%)	2 (3,51%)	0 (0,00%)	1 (1,75%)	41 (71,93%)	0 (0,00%)
RMSE	11 (19,30%)	3 (5,26%)	0 (0,00%)	1 (1,75%)	41 (71,93%)	1 (1,75%)
AIC	13 (22,81%)	5 (8,77%)	1 (1,75%)	3 (5,26%)	34 (59,65%)	1 (1,75%)
BIC	13 (22,81%)	5 (8,77%)	1 (1,75%)	3 (5,26%)	34 (59,65%)	1 (1,75%)
MRPE	15 (26,32%)	0 (0,00%)	6 (10,53%)	4 (7,02%)	32 (56,14%)	0 (0,00%)

Como os dois modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais assumem duas diferentes fases das curvas de inativação, a hipótese que a população bacteriana total é constituída por duas subpopulações com diferentes sensibilidades ao estresse térmico foi reforçada (HUMPHESON et al., 1998; PELEG, COLE, 1998). Este fenômeno pode ser atribuído a uma maior concentração de proteínas do choque térmico nas células mais resistentes (DOYLE, MAZZOTTA, 2000). Os valores obtidos para o parâmetro f , que corresponde à fração da subpopulação bacteriana mais sensível ao estresse térmico e que está relacionado com o parâmetro α na Equação 5, foram independentes da temperatura. A maior parte dos valores (72%) variou entre 0,98 e 1, sugerindo que somente uma fração pequena da população bacteriana é mais resistente à inativação térmica, confirmando resultados obtidos em outro estudo (HUMPHESON et al., 1998).

No que diz respeito aos outros modelos, de acordo com os resultados, na média eles não reproduziram os dados experimentais de forma tão precisa quanto o modelo duplo de Weibull e bifásico. Embora o modelo de Weibull seja capaz de reproduzir diferentes formatos da curva dependendo do parâmetro de forma n (PELEG, COLE, 1998; VAN BOEKEL, 2002), o modelo duplo de Weibull pode prever uma mudança da concavidade dentro da mesma curva. O modelo linear com adaptação gerou bons ajustes somente quando havia uma fase de adaptação bem definida. De outra forma, ele consistiu em uma linha reta pela origem. De forma análoga, o modelo linear sem adaptação não foi capaz de descrever os diferentes conjuntos de dados. Este comportamento confirma a hipótese que o desprezo da curvatura do diagrama de inativação para estimar o valor D pode levar a resultados não realistas. Além disso, o modelo logístico forneceu bons ajustes somente para um conjunto de dados pequenos. Este modelo deveria ser aplicado somente se a curva experimental exibir um “ombro” bem definido seguido de uma linha reta (BERMÚDEZ-AGUIRRE, CORRADINI, 2012). Portanto, a partir dos resultados obtidos o modelo primário de inativação duplo de Weibull foi



selecionado como tendo obtido o melhor desempenho.

3.2 AJUSTE DOS MODELOS SECUNDÁRIOS DE INATIVAÇÃO

Como mencionado previamente, o parâmetro α (f) não exibe uma dependência com a temperatura. O valor assumido para f foi sua média, 0,977, uma vez que os valores estimados não variaram significativamente com a temperatura (desvio-padrão igual a 0,041). Portanto, pode-se concluir que, na média, de cada 1000 células bacterianas apenas 23 exibem alta resistência térmica. O parâmetro de forma n foi também assumido como constant e com valor igual à sua média, 1.840 (desvio-padrão de 1,120). A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos após o ajuste das Equações de 7 a 10 para os valores do tempo para a primeira redução decimal da subpopulação 1 (δ_1). Como pode ser observado, o modelo de Bigelow gerou resultados mais precisos. Resultados similares foram obtidos para δ_2 (resultados não apresentados).

Tabela 3. Sumário dos resultados obtidos após o ajuste das Equações de 7 a 10 para valores estimados de δ_1 . Resultados estão expressos como média (erro-padrão).

	Equação 7	Equação 8	Equação 9	Equação 10
k_w ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,271 (0,039)			
T_w ($^{\circ}\text{C}$)	61,89 (0,93)			
D_{ref} (min)		6,90 (0,52)	16,01 (1,19)	
E_a (J)		$2,12 \times 10^5$ ($2,86 \times 10^4$)		
z ($^{\circ}\text{C}$)			9,91 (1,35)	
a_0 ($\text{min}^{0,5}$)				-72,69 (21,98)
a_1 ($\text{min}^{0,5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)				2,07 (0,73)
a_2 ($\text{min}^{0,5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-2}$)				-0,015 (0,006)
MAE	2,412	2,343	2,334	2,334
RMSE	3,523	3,515	3,515	3,508
AIC	263,1	262,9	262,9	264,7
BIC	268,7	268,5	268,5	272,2
MRPE	143,6	100,6	96,0	122,7

3.3 AJUSTE DO MODELO NÃO-ISOTÉRMICO

A partir dos resultados obtidos com os modelos primários e secundários, o seguinte modelo não-isotérmico foi gerado:

$$\log_{10}S(t) = \log_{10}\left(\frac{1}{1+10^{1.631}}\right) + \log_{10}\left(10^{1.631-\left(\frac{t}{\delta_1(T)}\right)^{1.840}} + 10^{-\left(\frac{t}{\delta_2(T)}\right)^{1.840}}\right) \quad (17)$$

Após emprego do procedimento descrito na Seção 2.3, a Figura 1 apresenta as previsões obtidas para os quatro perfis não-isotérmicos. Os quatro perfis de temperatura não-isotérmicos usados para validar o modelo correspondem a temperaturas que aumentam a partir de valores baixos (entre 0 e 4 $^{\circ}\text{C}$) até 6,5 $^{\circ}\text{C}$. Como pode ser observado a partir da Figura 1, a temperatura aumentou a diferentes taxas para cada perfil. De um modo geral, os erros obtidos para os dois primeiros perfis foram aproximadamente iguais às incertezas experimentais médias obtidas em estudos experimentais (MAE igual a 0,4). Além disso, a inativação predita foi ligeiramente inferior aos resultados reais o que corresponde a erros seguros do ponto de vista do consumidor. Os erros obtidos foram superiores para os perfis apresentados nas Figuras 1c e 1d, o que sugere que o modelo é muito sensível a aumentos abruptos da temperatura. É possível concluir que as previsões mais precisas foram obtidas quando a velocidade de aumento da temperatura foi inferior a 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em relação a velocidades de aumento superiores a 30 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

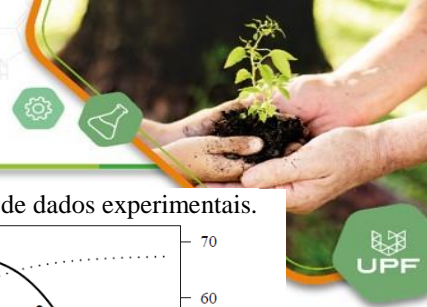
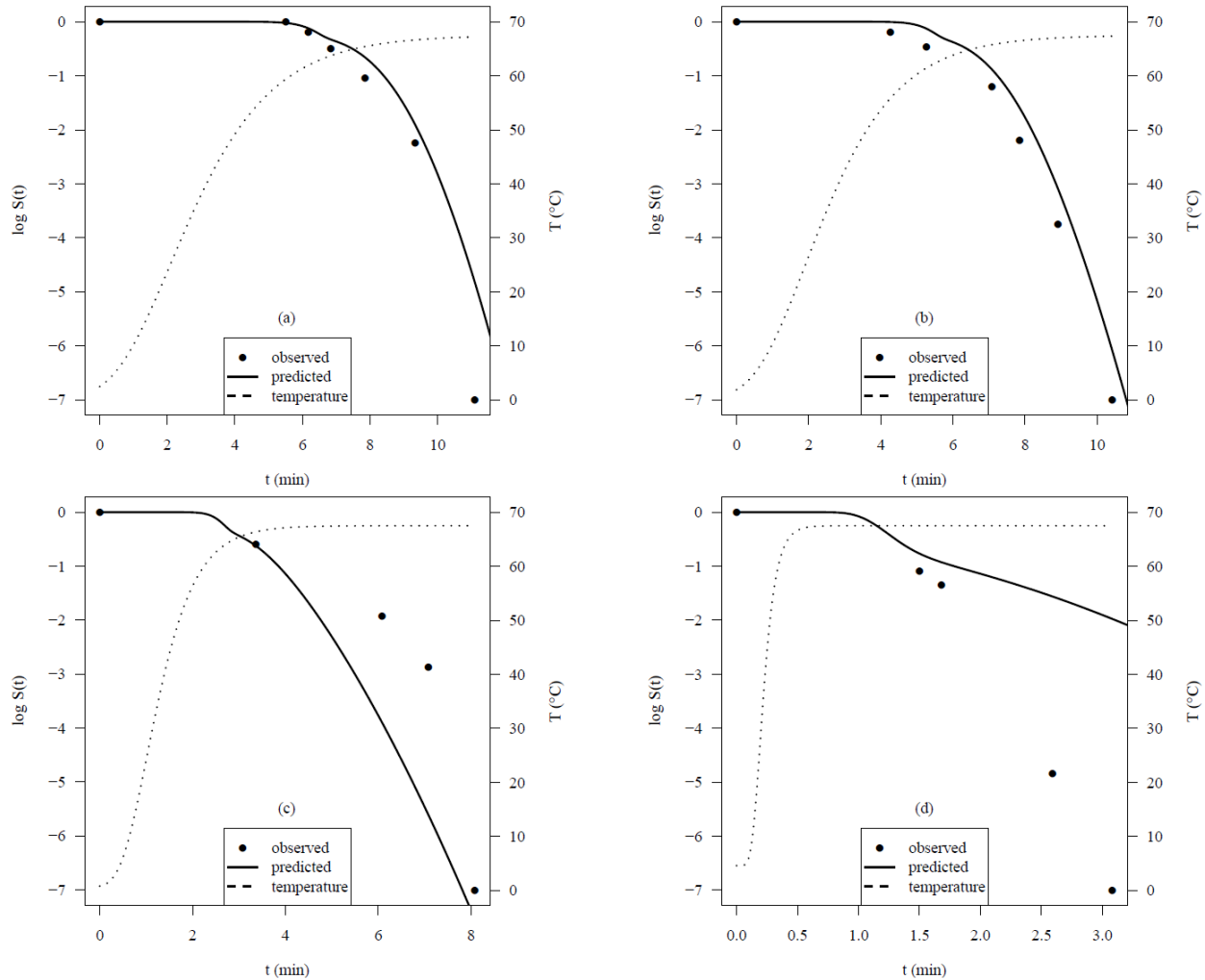


Figura 1. Curvas obtidas após a aplicação do modelo não-isotérmico para quatro conjuntos de dados experimentais.

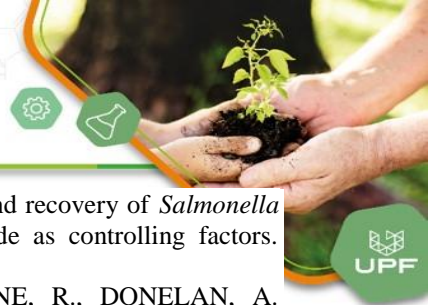


4 CONCLUSÃO

A inativação de *Salmonella* spp. em carne de frango é melhor descrita por modelos matemáticos que consideram o comportamento bifásico das curvas experimentais. Tanto o modelo duplo de Weibull quanto o bifásico são capazes de descrever de forma precisa os resultados experimentais, mas a qualidade de ajuste do modelo duplo de Weibull é ligeiramente superior. Além disso, sua derivada é contínua por toda a região de inativação o que torna sua utilização mais fácil para modelar inativação não isotérmica. O desenvolvimento de um modelo geral que é capaz de fornecer resultados precisos em diferentes situações, não é fácil devido a variações nos sorovares bacterianos ou no tipo de corte da carne de frango. O modelo desenvolvido neste estudo forneceu resultados relativamente precisos quando a temperatura não varia muito rapidamente (menos que 20 °C por minuto). Nestas situações, ele pode ser empregado com segurança para modelar a inativação de *Salmonella* spp. em carne de frango.

5 REFERÊNCIAS

- AO, T. T., FEASEY, N. A., GORDON, M. A., KEDDY, K. H., ANGULO, F. J., CRUMP, J. A. Global burden of invasive non-typhoidal *Salmonella* disease. **Emerging and Infectious Diseases**, v. 21, p. 941-949, 2015.
- BERMÚDEZ-AGUIRRE, D., CORRADINI, M. G. Inactivation kinetics of *Salmonella* spp. under thermal and emerging treatments: A review. **Food Research International**, v. 45, n. 2, p. 700-712, 2012.
- BIGELOW, W. D. The logarithmic nature of thermal death time curves. **Journal of Infectious Diseases**, v. 29, n. 5, p. 528-536, 1921.
- BOZKURT, H., D'SOUZA, D. H., DAVIDSON, P. M. A comparison of the thermal inactivation kinetics of human norovirus surrogates and hepatitis A virus in buffered cell culture medium. **Food Microbiology**, v. 42, p. 212-217, 2014.
- CARRASCO, E., MORALES-RUEDA, A., GARCÍA-GIMENO, R. M. Cross contamination and recontamination by *Salmonella* in foods: A review. **Food Research International**, v. 45, n. 2, 545-556, 2012.



- CHAMBLISS, L. S., NARANG, N., JUNEJA, V. K., HARRISON, M. A. Thermal injury and recovery of *Salmonella* enterica serovar Enteritidis in ground chicken with temperature, pH, and sodium chloride as controlling factors. **Journal of Food Protection**, v. 69, n. 9, p. 2058-2065, 2006.
- CHEN, F.-C., GODWIN, S., CHAMBERS, D., CHAMBERS, E., CATES, S., STONE, R., DONELAN, A. Contamination by meat juice when shopping for packages of raw poultry. **Journal of Food Protection**, v. 81, n. 5, p. 835-841, 2018.
- COROLLER, L., LEGUERINEL, I., METTLER, E., SAVY, N., MAFART, P. General model, based on two mixed Weibull distributions of bacterial resistance, for describing various shapes of inactivation curves. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 72, n. 10, p. 6493-6502, 2006.
- CORRADINI, M. G., PELEG, M. Dynamic model of heat inactivation kinetics for bacterial adaptation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 75, n. 8, p. 2590-2597, 2009.
- DOMINGUEZ, S. A., SCHAFFNER, D. W. Modeling the growth of *Salmonella* in raw poultry stored under aerobic conditions. **Journal of Food Protection**, v. 71, n. 12, p. 2429-2435, 2008.
- DOYLE, M. E., MAZZOTTA, A. S. Review of studies on the thermal resistance of Salmonellae. **Journal of Food Protection**, v. 63, n. 6, p. 779-795, 2000.
- DUARTE, D. A. M., RIBEIRO, A. R., VASCONCELOS, A. M. M., SANTOS, S. B., SILVA, J. V. D., ANDRADE, P. L. A., FALCÃO, L. S. P. C. A. Occurrence of *Salmonella* spp. in broiler chicken carcasses and their susceptibility to antimicrobial agents. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 40, n. 3, p. 569-573, 2009.
- HOFFMANN, S., BATZ JR, M. B., MORRIS, J. G. Annual cost of quality adjusted life year losses in the United States due to 14 foodborne pathogens. **Journal of Food Protection**, v. 75, p. 1292-1302, 2012.
- HSI, D. J., EBEL, E. D., WILLIAMS, M. S., GOLDEN, N. J., SCHLOSSER, W. D. Comparing foodborne illness risks among meat commodities in the United States. **Food Control**, v. 54, p. 353-359, 2015.
- HUMPHESON, L., ADAMS, M. R., ANDERSON, W. A., COLE, M. B. Biphasic thermal inactivation kinetics in *Salmonella* Enteritidis PT4. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 64, n. 2, p. 459-464, 1998.
- JUNEJA, V. K. Thermal inactivation of *Salmonella* spp. in ground chicken breast or thigh meat. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 42, n. 12, p. 1443-1448, 2007.
- JUNEJA, V. K., EBLEN, B. S., MARKS, H. M. Modeling non-linear survival curves to calculate thermal inactivation of *Salmonella* in poultry of different fat levels. **International Journal of Food Microbiology**, v. 70, n. 1-2, p. 37-51, 2001a.
- JUNEJA, V. K., EBLEN, B. S., RANSOM, G. M. Thermal inactivation of *Salmonella* spp. in chicken broth, beef, pork, turkey, and chicken: determination of D- and z-values. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 1, p. 146-152, 2001b.
- JUNEJA, V. K., GONZALES-BARRON, U., BUTLER, F., YADAV, A. S., FRIEDMAN, M. Predictive thermal inactivation model for the combined effect of temperature, cinnamaldehyde and carvacrol on starvation-stressed multiple *Salmonella* serotypes in ground chicken. **International Journal of Food Microbiology**, v. 165, n. 2, p. 184-199, 2013.
- JUNEJA, V. K., MELENDRES, M. V., HUANG, L., GUMUDAVELLI, V., SUBBIAH, J., THIPPAREDDI, H. Modeling the effect of temperature on growth of *Salmonella* in chicken. **Food Microbiology**, v. 24, n. 4, p. 328-335, 2007.
- JUNEJA, V. K., YADAV, A. S., HWANG, C.-A., SHEEN, S., MUKHOPADHYAY, S., FRIEDMAN, M. Kinetics of thermal destruction of *Salmonella* in ground chicken containing trans-cinnamaldehyde and carvacrol. **Journal of Food Protection**, v. 75, n. 2, p. 289-296, 2012.
- KARUPPASAMY, K., YADAV, A. S., SAXENA, G. K. Thermal inactivation of *Salmonella* Enteritidis on chicken skin previously exposed to acidified Sodium chlorite or tri-sodium phosphate. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 12, p. 8236-8243, 2015.
- KARYOTIS, D., SKANDAMIS, P. N., JUNEJA, V. K. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in *sous-vide* processed chicken breast. **Food Research International**, v. 100, p. 894-898, 2017.
- KOYAMA, K., ABE, H., KAWAMURA, S., KOSEKI, S. Calculating stochastic inactivation of individual cells in a bacterial population using variability in individual cell inactivation time and initial cell number. **Journal of Theoretical Biology**, v. 469, p. 172-179, 2019.
- LI, M., HUANG, L., YUAN, Q. Growth and survival of *Salmonella* Paratyphi A in roasted marinated chicken during refrigerated storage: Effect of temperature abuse and computer simulation for cold chain management. **Food Control**, v. 74, p. 17-24, 2017.
- 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**, v. 240, p. 57-62, 2017.
- MAFART, P., LEGUERINEL, I. Modelling combined effects of temperature and pH on heat resistance of spores by linear-Bigelow equation. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 1, p. 6-8, 1998.
- MAJOWICZ, S. E., MUSTO, J., SCALLAN, E., ANGULO, F. J., KIRK, M., O'BRIEN, S. J., JONES, T. F., FAZIL, A., HOEKSTRA, R. M. The global burden of non-typhoidal *Salmonella* gastroenteritis. **Clinical and Infectious Diseases**, v. 50, p. 882-889, 2010.



- MAZZOTTA, A. S. D- and z-values of *Salmonella* in ground chicken breast meat. **Journal of Food Safety**, v. 20, n. 4, p. 217-223, 2000.
- MCENTIRE, J., ACHESON, D., SIEMENS, A., EILERT, S., ROBACH, M. The public health value of reducing *Salmonella* levels in raw meat and poultry. **Food Protection Trends**, v. 34, n. 6, p. 386-392, 2014.
- MILKIEVICZ, T., BADIA, V., SOUZA, V. B., LONGHI, D. A., GALVÃO, A. C., ROBAZZA, W. S. Development of a general model to describe *Salmonella* spp. growth in chicken meat subjected to different temperature profiles. **Food Control**, v. 112, p. 107151, 2020.
- MURPHY, R. Y., MARKS, B. P., JOHNSON, E. R., JOHNSON, M. G. Inactivation of *Salmonella* and *Listeria* in ground chicken breast meat during thermal processing. **Journal of Food Protection**, v. 62, n. 9, p. 980-985, 1999.
- MURPHY, R. Y., MARKS, B. P., JOHNSON, E. R., JOHNSON, M. G. Thermal inactivation kinetics of *Salmonella* and *Listeria* in ground chicken breast meat and liquid medium. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 706-710, 2000.
- MURPHY, R. Y., DUNCAN, L. K., JOHNSON, E. R., DAVIS, M. D., SMITH, J. N. Thermal inactivation D- and Z-values of *Salmonella* serotypes and *Listeria innocua* in chicken patties, chicken tenders, franks, beef patties, and blended beef and turkey patties. **Journal of Food Protection**, v. 65, n. 1, p. 53-60, 2002.
- MURPHY, R. Y., OSAILI, T., DUNCAN, L. K., MARCY, J. A. Thermal inactivation of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in ground chicken thigh/leg meat and skin. **Poultry Science**, v. 83, n. 7, p. 1218-1225, 2004.
- NDE, C. W., MCEVOY, J. M., SHERWOOD, J. S., LOGUE, C. M. Cross contamination of turkey carcasses by *Salmonella* species during defeathering. **Poultry Science**, v. 86, n. 1, p. 162-167, 2007.
- OSAILI, T. M., AL-NABULSI, A. A., SHAKER, R. R., OLAIMAT, A. N., JARADAT, Z. W., HOLLEY, R. A. Thermal inactivation of *Salmonella* Typhimurium in chicken shawirma (gyro). **International Journal of Food Microbiology**, v. 166, n. 1, p. 15-20, 2013.
- OSCAR, T. P. Development and validation of a tertiary simulation model for predicting the potential growth of *Salmonella typhimurium* on cooked chicken. **International Journal of Food Microbiology**, v. 76, p. 177-190, 2002.
- OSCAR, T. P. Development and validation of primary, secondary, and tertiary models for growth of *Salmonella typhimurium* on sterile chicken. **Journal of Food Protection**, v. 68, n. 12, p. 2606-2613, 2005a.
- OSCAR, T. P. Predictive model for survival and growth of *Salmonella* Typhimurium DT104 on chicken skin during temperature abuse. **Journal of Food Protection**, v. 72, n. 2, p. 304-314, 2009.
- OSCAR, T. P. Development and validation of a predictive microbiology model for survival and growth of *Salmonella* on chicken stored at 4 to 12°C. **Journal of Food Protection**, v. 74, n. 2, p. 279-284, 2011.
- PELEG, M., COLE, M. B. Reinterpretation of microbial survival curves. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 38, n. 5, p. 353-380, 1998.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available in <http://www.r-project.org>, 2016.
- SCHARFF, R. L. Economic burden from health losses due to foodborne illness in the United States. **Journal of Food Protection**, v. 75, n. 1, p. 123-131, 2012.
- SMADI, H., SARGEANT, J. M., SHANNON, H. S., RAINA, P. Growth and inactivation of *Salmonella* at low refrigerated storage temperatures and thermal inactivation on raw chicken meat and laboratory media: Mixed effect meta-analysis. **Journal of Epidemiology and Global Health**, v. 2, n. 4, p. 165-179, 2012.
- THAYER, D. W., SONGPRASERTCHAI, S., BOYD, G. Effects of heat and ionizing radiation on *Salmonella typhimurium* in mechanically deboned chicken meat. **Journal of Food Protection**, v. 54, n. 9, p. 718-724, 1991.
- VAN BOEKEL, M. A. J. S. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. **International Journal of Food Microbiology**, v. 74, n. 1-2, p. 139-159, 2002.
- VILLA-ROJAS, R., TANG, J., WANG, S., GAO, M., KANG, D.-H., MAH, J.-H., GRAY, P., SOSA-MORALES, M. E., LÓPEZ-MALO, A. Thermal inactivation of *Salmonella* Enteritidis PT30 in almond kernels as influenced by water activity. **Journal of Food Protection**, v. 76, n. 1, p. 26-32, 2013.
- WHITING, R. C. Modeling bacterial survival in unfavorable environments. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 12, p. 240-246, 1993.
- YADAV, A. S., SAXENA, G. K., SAXENA, V. K., KATARIA, J. M., JUNEJA, V. K. Thermal inactivation of *Salmonella* Typhimurium on dressed chicken skin previously exposed to acidified sodium chlorite or carvacrol. **Food Control**, v. 66, p. 227-232, 2016.
- YANG, H., LI, Y., JOHNSON, M. G. Survival and death of *Salmonella* Typhimurium and *Campylobacter jejuni* in processing water and on chicken skin during poultry scalding and chilling. **Journal of Food Protection**, v. 64, n. 6, p. 770-776, 2001.
- YANG, B., XI, M., WANG, X., CUI, S., YUE, T., HAO, H., WANG, Y., CUI, Y., ALALI, W. Q., MENG, J., WALLS, I., LO FO WONG, D. M., DOYLE, M. P. Prevalence of *Salmonella* on raw poultry at retail markets in China. **Journal of Food Protection**, v. 74, n. 10, p. 1724-1728, 2011.