

Capítulo 11

DOI: 10.53934/agronfy-2025-inofas-11

MODELAGEM MATEMÁTICA DO CRESCIMENTO DE *Brochothrix thermosphacta* EM TAINHA VERMELHA EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Eduardo Cardoso da Silva Assunção ;Ive Mariana Ghizzoni Arantes ; Dayana Silva Batista Soares ;Ellen Godinho Pinto ; Ana Paula Stort Fernandes ; Alfredina dos Santos Araújo ; Wiaslan Figueiredo Martins 

*Autor correspondente (Corresponding author) – Email:
wiaslan.martins@ifgoiano.edu.br

Resumo: O presente estudo teve como objetivo modelar matematicamente o crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em tainha vermelha (*Mullus barbatus*) sob diferentes condições de temperatura, visando avaliar seus efeitos na qualidade e conservação do pescado. Essa bactéria psicrotrófica, frequentemente associada à deterioração de carnes e pescados, apresenta capacidade de multiplicação mesmo sob refrigeração, ocasionando perdas sensoriais e econômicas. Os dados foram obtidos do banco *Combase*, considerando temperaturas de 0, 4, 10, 15 e 20 °C, com pH fixo em 6,25. Os parâmetros de crescimento foram ajustados pelo modelo de Baranyi e Roberts, evidenciando forte influência da temperatura na cinética microbiana. A fase lag variou de 32,37 h a 0 °C para 3,1 h a 20 °C, enquanto a velocidade máxima de crescimento ($\mu_{\max}$) aumentou de 0,022 h⁻¹ a 0 °C para 0,199 h⁻¹ a 20 °C, com excelente ajuste dos modelos ($R^2 > 0,94$). A população máxima ($Y_{\max}$) manteve-se estável (6,18–5,89 log₁₀ UFC/g), sugerindo regulação por fatores intrínsecos da matriz alimentar. Conclui-se que a refrigeração a 0–4 °C, embora não impeça o crescimento de *B. thermosphacta*, retarda significativamente sua multiplicação, prolongando a vida útil do pescado, ao passo que temperaturas acima de 10 °C aceleram a deterioração. Esses resultados reforçam a importância do controle rigoroso da cadeia de frio e demonstram a aplicabilidade da microbiologia preditiva na avaliação de riscos e no desenvolvimento de estratégias de conservação de alimentos perecíveis.

Palavras-chave: *Brochothrix*; ComBase; fish; seafood

INTRODUÇÃO

O pescado é amplamente reconhecido como um alimento de elevado valor nutricional, econômico e cultural. Do ponto de vista nutricional, destaca-se por ser uma fonte de proteínas de alta qualidade, essenciais para o crescimento e a manutenção do organismo humano (1). Além disso, contém ácidos graxos poli-insaturados, como o ômega-3, que estão diretamente associados à prevenção de doenças cardiovasculares e ao bom funcionamento do sistema nervoso central (2). O pescado também fornece vitaminas importantes, como A, D, E e B₁₂, além de minerais como fósforo, cálcio, iodo e selênio, configurando-se como um alimento de alta densidade nutricional (3). Outro aspecto que favorece seu consumo é o baixo teor de gordura saturada, característica que o diferencia das carnes vermelhas e o coloca como uma opção mais saudável para o consumidor (4).

No âmbito econômico, o setor pesqueiro e aquícola movimenta bilhões de dólares anualmente, sendo responsável pela geração de milhões de empregos em todo o mundo (1). A aquicultura, em especial, tem se destacado como a atividade de maior crescimento dentro da produção de alimentos de origem animal, apresentando-se como alternativa sustentável frente à redução dos estoques pesqueiros naturais (5). Além disso, diversas espécies de pescado possuem grande valor de mercado, representando uma importante fonte de renda para comunidades costeiras e ribeirinhas (6).

Para o consumidor, o pescado é relevante por múltiplos fatores. Trata-se de um alimento associado à saúde e ao bem-estar, sendo recomendado por profissionais da saúde devido à sua contribuição na prevenção de doenças e no fortalecimento do organismo (7). Além disso, sua versatilidade culinária permite diferentes formas de preparo e consumo, o que amplia sua aceitação e inserção na dieta de diferentes culturas (4).

No entanto, a qualidade e a conservação do pescado podem ser comprometidas pela ação de microrganismos deteriorantes. Entre eles, destaca-se a *Brochothrix thermosphacta*, uma bactéria Gram-positiva pertencente à família Listeriaceae, que não forma esporos e apresenta morfologia em bacilos curtos (8). Essa bactéria é considerada psicrotrófica, capaz de crescer em baixas temperaturas, o que a torna relevante no contexto da conservação de alimentos refrigerados, principalmente carnes e pescados (9). Sua presença já foi relatada em carnes, pescados, laticínios e superfícies de indústrias de alimentos, evidenciando seu potencial de contaminação cruzada (10).

As condições ideais para o crescimento de *B. thermosphacta* incluem temperaturas próximas de 20 a 25 °C, embora seja capaz de se multiplicar mesmo em refrigeração, característica que representa um desafio para a indústria alimentícia (11). O microrganismo se desenvolve em pH entre 5,0 e 7,5, faixa comum em carnes e pescados frescos. Embora não seja considerado patogênico, o maior problema associado a essa bactéria está relacionado à produção de metabólitos como acetonas e diacetil, que conferem odores e sabores desagradáveis, descritos como rançosos ou azedos, comprometendo as características sensoriais, reduzindo a vida de prateleira e gerando perdas econômicas significativas (12).

O objetivo deste estudo foi modelar o crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em tainha vermelha fresca, embalada em sacos, sob diferentes condições de temperatura utilizando o *Combase*.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de crescimento em diferentes temperaturas foram obtidos no banco de dados *Combase* (www.combase.cc), utilizando a categoria de alimento “Seafood/fish” e o micro-organismo *Brochothrix thermosphacta*, na faixa de 0 a 20 °C. Foram selecionados dados de crescimento de *B. thermosphacta* em pescado em cinco temperaturas de armazenamento: 0 °C, 4 °C, 10 °C, 15 °C e 20 °C, com pH fixo em 6,25. A umidade do alimento não foi informada no banco de dados, e todas as amostras selecionadas apresentavam dióxido de carbono como fator de conservação. Os dados foram reportados no estudo de Koutsoumanis et al. (13), intitulado *Applicability of an Arrhenius model for the combined effect of temperature and CO2 packaging on the spoilage microflora of fish*, publicado no periódico *Applied and Environmental Microbiology*.

O modelo matemático primário analisa a dinâmica do microrganismo em função do tempo, com função de ajuste, Baranyi e Roberts (14) (Equações 1, 2 e 3) que foi ajustado às curvas experimentais obtidas no *combase*.

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

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

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

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.

Os modelos secundários exponencial e raiz quadrada (Equações 4 e 5, 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 $T_{m\acute{i}n}$ é a temperatura teórica mínima de crescimento ($^{\circ}C$).

$$\mu_{m\acute{a}x} = ae^{(bT)} \quad (4)$$

$$\sqrt{\mu_{m\acute{a}x}} = a(T - T_{m\acute{i}n}) \quad (5)$$

Os ajustes do modelo primário aos dados experimentais 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 $y_{m\acute{a}x}$. Os modelos secundários foram ajustados no programa Microsoft Excel®.

Para a avaliação do desempenho do modelo primário, usou-se 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 parâmetros cinéticos de *Brochothrix thermosphacta* em pescados evidenciam a forte influência da temperatura sobre o crescimento microbiano (Tabela 1) (Figura 1). A fase lag (λ) foi significativamente maior a $0^{\circ}C$ (32,37 h), reduzindo-se progressivamente com o aumento da temperatura, chegando a apenas 3,1 h a $20^{\circ}C$. Esse comportamento demonstra maior tempo de adaptação em condições de refrigeração e adaptação quase imediata sob temperaturas elevadas, o que está de acordo com Baranyi e Roberts (14), que destaca a relação inversa entre temperatura e tempo de adaptação bacteriana.

Tabela 1 – Parâmetros de crescimento estimados pelo ajuste do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais de *B. thermosphacta* em tainha vermelha, fresca e embalada em sacos a 0, 4, 10, 15 e $20^{\circ}C$ de armazenamento e os índices estatísticos de desempenho do modelo.

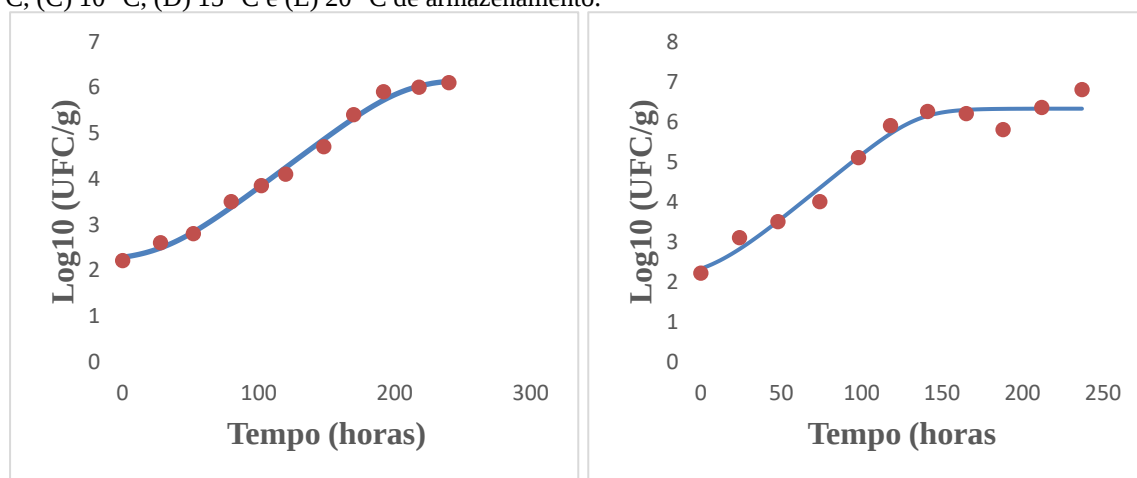
Temperatura ($^{\circ}C$)	Parâmetros de crescimento	Índices estatísticos
--------------------------------	---------------------------	-------------------------

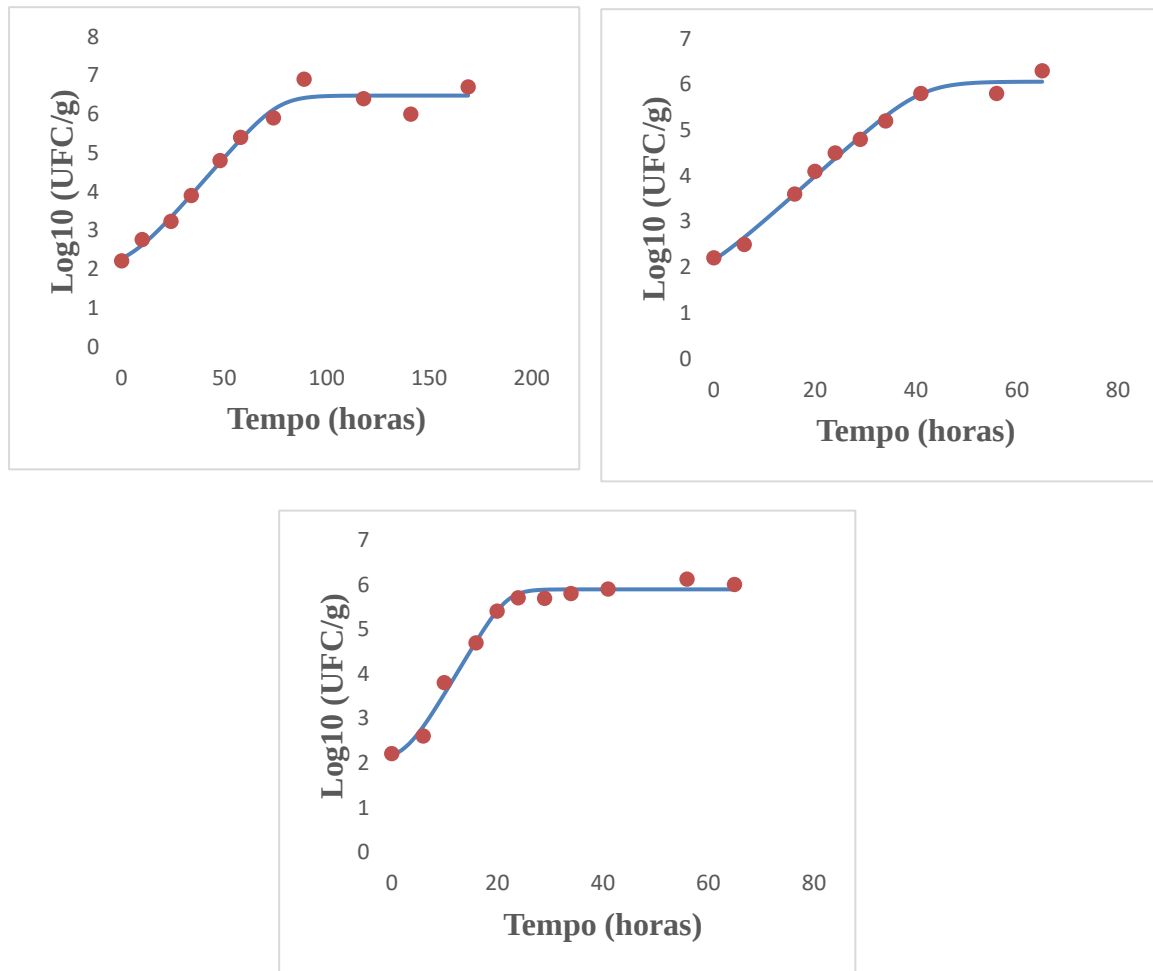
	λ (h)	$\mu_{\text{máx}}$ (h ⁻¹)	$Y_{\text{máx}}$ (log ₁₀ UFC/g)	R ²	Erro padrã o
0	32,37	0,022	6,189	0,992	0,132
4	12,81	0,033	6,324	0,954	0,332
10	7,183	0,061	6,476	0,969	0,294
15	1,406	0,098	6,056	0,984	0,177
20	3,100	0,199	5,891	0,983	0,182

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A velocidade máxima de crescimento específico ($\mu_{\text{máx}}$) aumentou exponencialmente com a elevação da temperatura, variando de 0,022 h⁻¹ a 0 °C até 0,199 h⁻¹ a 20 °C. Esse comportamento foi descrito de forma satisfatória pelo modelo secundário exponencial ($R^2 = 0,9944$) (Figura AB), o que demonstra a influência direta da temperatura sobre a cinética de crescimento de *B. thermosphacta*. Estudos anteriores já apontaram que essa bactéria apresenta crescimento em ampla faixa de temperaturas, sendo classificada como psicrotrófica, com maior taxa de multiplicação em condições de abuso térmico (15).

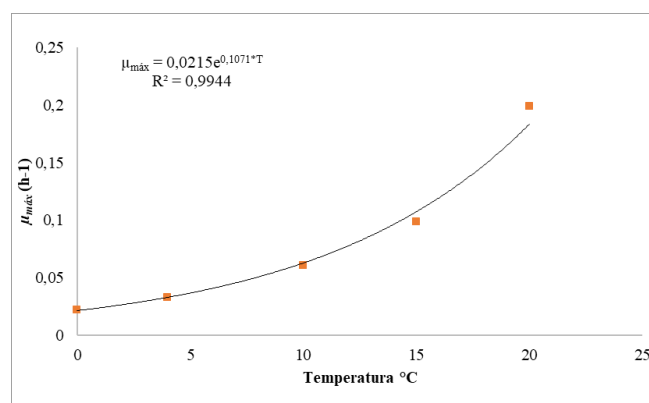
Figura 1 – Curvas de crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em tainha vermelha, fresca e embalada em sacos, os ajustes do modelo de Baranyi e Roberts aos dados experimentais nas temperaturas de (A) 0 °C, (B) 4 °C, (C) 10 °C, (D) 15 °C e (E) 20 °C de armazenamento.

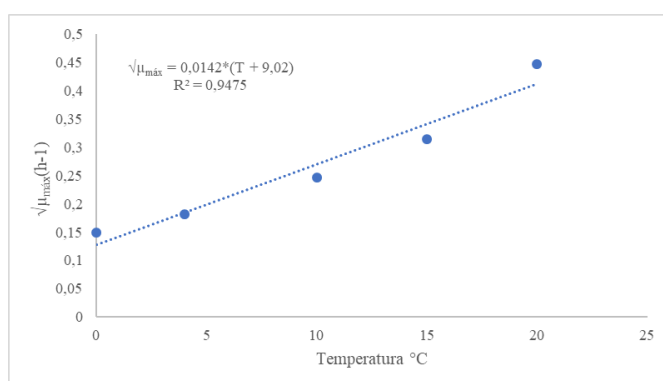




Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Figura 2 - Modelos secundários que representam o efeito da temperatura no parâmetro velocidade específica máxima de crescimento ($\mu_{\max}$) de *Brochothrix thermosphacta* em tainha vermelha, fresca e embalada em sacos. (A) modelo exponencial e (B) modelo da raiz quadrada.





Fonte: elaborada pelos autores (2025).

O modelo da raiz quadrada de Ratkowsky apresentou boa linearidade ($R^2 = 0,9475$) (Figura 2B), evidenciando sua adequação para prever a influência da temperatura sobre o crescimento de microrganismos deterioradores. Conforme descrito por Ratkowsky et al. (16), esse modelo se destaca pela robustez na estimativa do efeito da temperatura sobre microrganismos de relevância em alimentos refrigerados, sendo amplamente empregado em estudos de microbiologia preditiva.

A população máxima ($Y_{máx}$) manteve-se relativamente estável entre as diferentes temperaturas (6,18–5,89 log₁₀ UFC/g), sugerindo que, apesar da variação na velocidade de crescimento, o limite populacional é determinado principalmente por fatores intrínsecos da matriz alimentar, como a disponibilidade de nutrientes e a competição microbiana. Esse comportamento já foi descrito em estudos de deterioração de pescados, nos quais *B. thermosphacta* atingiu níveis populacionais semelhantes independentemente da temperatura (17). Na prática, esses resultados indicam que, embora a refrigeração entre 0–4 °C não impeça o crescimento de *B. thermosphacta*, ela reduz significativamente sua velocidade de multiplicação, contribuindo para prolongar a vida útil do pescado. Em contrapartida, temperaturas superiores a 10 °C favorecem o crescimento acelerado, encurtando drasticamente o tempo de vida útil. Esses achados estão em consonância com Ercolini et al. (18), que ressaltam a importância do controle rigoroso da cadeia de frio como medida fundamental para preservar a qualidade e a segurança de produtos pesqueiros.

CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu compreender a influência da temperatura sobre o crescimento de *Brochothrix thermosphacta* em tainha vermelha, evidenciando a importância da microbiologia preditiva na avaliação da qualidade e segurança de produtos pesqueiros. Observou-se que, embora a refrigeração em baixas temperaturas (0–4 °C) não impeça totalmente o desenvolvimento da bactéria, ela retarda de forma significativa sua multiplicação, contribuindo para o aumento da vida útil do pescado. Em contrapartida, temperaturas superiores a 10 °C favoreceram o crescimento acelerado do microrganismo, reduzindo drasticamente o tempo de vida útil e comprometendo a aceitação do alimento.

Os resultados obtidos a partir do banco de dados *Combase* reforçam sua relevância como uma ferramenta robusta para a modelagem preditiva do crescimento de *B. thermosphacta* em pescado. A disponibilidade de parâmetros validados em diferentes condições de armazenamento permite que pesquisadores e a indústria de alimentos realizem simulações realistas de cenários de refrigeração e abuso térmico, auxiliando tanto na

previsão da vida útil quanto na avaliação de riscos microbiológicos. Assim, o uso de dados provenientes do *Combase* contribui não apenas para o avanço de estudos acadêmicos, mas também para o desenvolvimento de estratégias práticas de gestão da qualidade e segurança em cadeias produtivas de pescado e outros alimentos perecíveis.

REFERÊNCIAS

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Rome: FAO; 2022.
2. Mozaffarian D, Rimm E. Fish intake, contaminants, and human health: evaluating the risks and benefits. *JAMA*. 2006; 296:1885-99.
3. Simopoulos AP. Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *Am J Clin Nutr*. 2002; 54:438-63.
4. Trondsen T, Braaten T, Lund E, Eggen AE. Consumption of fish and other seafood in Norwegian women in relation to health and self-reported risk behaviour. *Public Health Nutr*. 2004; 7:141-9.
5. Valenti WC. Aquicultura no Brasil: bases para um desenvolvimento sustentável. Brasília: CNPq/MCT; 2002.
6. Béné C, Barange M, Subasinghe R, Pistrup-Andersen P, Merino G, Hemre GI, et al. Feeding 9 billion by 2050 – Putting fish back on the menu. *Food Secur*. 2015;7(2):261-74.
7. Olsen SO. Understanding the relationship between age and seafood consumption. *Food Qual Prefer*. 2003; 14:199-209.
8. Zhang Y, Yamamoto O, Kimura H, Kuda T, Takahashi H, Kimura B. Characterization of *Brochothrix thermosphacta* isolated from meat. *Food Microbiol*. 2012; 29:224-30.
9. Nuñez M, García MR, Rodríguez JL, García T. Growth of *Brochothrix thermosphacta* in meat products: a review. *Meat Sci*. 2015; 108:98-107.
10. Brooks JC, Sofos JN, Belk KE, Smith GC, Williams SN, Bellinger GR. Identification and characterization of bacteria in retail beef. *J Food Prot*. 2004; 67:2399-404.
11. Stiles ME, Holley RA. Spoilage bacteria of fresh meat and poultry. *J Appl Bacteriol*. 1991; 70:133-53.
12. Gill CO. Spoilage of packaged foods. In: Stiles ME, Holley RA, editors. *Food microbiology: fundamentals and frontiers*. Washington: ASM Press; 2004. p. 641-54.
13. Koutsoumanis KP, Taoukis PS, Drosinos EH, Nychas GJ. Applicability of an Arrhenius model for the combined effect of temperature and CO₂ packaging on the spoilage microflora of fish. *Appl Environ Microbiol*. 2000;66(9):3528-34.

14. Baranyi J, Roberts TA. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *Int J Food Microbiol.* 1994; 23:277-94.
15. Dalgaard P. Modelling of microbial activity and prediction of shelf life for packed fresh fish. *Int J Food Microbiol.* 2002; 73:305-18.
16. Ratkowsky DA, Olley J, McMeekin TA, Ball A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *J Bacteriol.* 1982; 149:1-5.
17. Gram L, Dalgaard P. Fish spoilage bacteria - problems and solutions. *Curr Opin Biotechnol.* 2002; 13:262-6.
18. Ercolini D, Russo F, Nasi A, Ferranti P, Villani F. Monitoring of microbial metabolites and bacterial diversity in beef stored in different packaging conditions. *Appl Environ Microbiol.* 2009; 75:609-18.