

OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DA CONCENTRAÇÃO DE BIOMASSA DA CIANOACTÉRIA *Spirulina platensis* EM UM SISTEMA FECHADO E QUE UTILIZA COMO MEIO DE CULTIVO A ÁGUA DA LAGOA MANGUEIRA

Liane Rodrigues Babelo

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
bacheloliane@hotmail.com

Jorge Alberto Vieira da Costa

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
jorgealberto@aol.com

Luiz Alberto Oliveira Rocha

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
luizrocha@mikrus.com.br

George Stanescu

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Cx. P. 19011, Curitiba, PR, 81531-990
stanescu@demec.ufpr.br

Resumo. O presente trabalho determina numericamente um modelo que representa o crescimento da concentração de biomassa da cianobactéria *Spirulina platensis* em um sistema fechado que utiliza a água da Lagoa Mangueira como meio de cultivo. O modelo matemático foi obtido usando-se a temperatura, a iluminância e o tempo como variáveis de controle. Os dados experimentais foram ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados. A função objetivo que representa o crescimento da concentração de biomassa da cianobactéria *Spirulina platensis* foi otimizada primeiramente fixando-se a iluminância e calculando-se a temperatura ótima na qual a concentração de biomassa máxima foi obtida em função do tempo. Como a concentração de biomassa máxima mostrou-se aproximadamente constante para um grande intervalo de pares $(I, T)_{\text{ótimos}}$ vislumbrou-se uma segunda oportunidade de otimização, i.e., a minimização do tempo necessário para o crescimento da concentração de biomassa máxima. Esse tempo foi determinado como aproximadamente 304 horas para a temperatura de 22 °C e iluminância de 3500 lux. Os resultados desse trabalho mostram, ainda, que um modelo numérico simples pode contribuir significativamente para a economia de tempo e de custos no planejamento de experimentos para a produção da cianobactéria *Spirulina platensis*.

Palavras chave: otimização numérica, Método dos Mínimos Quadrados, *Spirulina platensis*, temperatura e iluminância.

1. Introdução

O cultivo comercial de cianobactérias em larga escala começou no início dos anos 60 no Japão, com o cultivo de *Chlorella*, seguido pelo cultivo de *Spirulina* nos anos 70. Nos anos 80 cerca de 46 fábricas na Ásia produziam mais de 1000 kg de cianobactérias/mês (principalmente *Chlorella*) e em 1996 cerca de 2000 toneladas de *Chlorella* foram produzidas comercialmente somente no Japão (Borowitzka, 1999).

Segundo Henrikson (1994), a composição química das cianobactérias é um indicativo de que estas são capazes de suprir as necessidades nutritivas, energéticas e até curativas do ser humano, com custo abaixo daqueles praticados nas culturas tradicionais.

A *Spirulina platensis* é a cianobactéria mais conhecida e usada no planeta, já empregada na alimentação dos Astecas que habitavam o México antes da chegada dos espanhóis e dos sul-africanos do Lago Chad.

Os estudos relacionados ao cultivo da *Spirulina* aumentaram sensivelmente nos últimos anos, por esta ser uma boa fonte protéica e apresentar alta digestibilidade. A proporção de proteínas desta cianobactéria é superior a observada em produtos como carne, soja e ovos, entre outros. A *Spirulina* também é fonte de ácido γ -linolênico, ácido graxo essencial relacionado ao tratamento e prevenção de várias doenças (Henrikson, 1994).

A biomassa da cianobactéria responde constantemente às flutuações diurnas e sazonais de iluminância e de temperatura que ocorrem durante o curso do cultivo. O efeito destes dois fatores ambientais, iluminância e temperatura, de difícil controle e que representam uma limitação de ordem prática, é o tema mais importante no estudo da produção de biomassa a partir de cianobactéria (Santos, 2001).

Para otimizar o processo de produção da *Spirulina platensis* este trabalho apresenta um modelo matemático que simula o crescimento da cianobactéria em sistema fechado utilizando como meio de cultivo a água da Lagoa Mangueira. O uso deste meio foi motivado por apresentar pH superior a 8, níveis de carbonatos elevados, comprovada eficiência como meio de cultivo para o crescimento da *Spirulina platensis* e, ainda, devido a sua localização (extremo sul do Rio Grande do Sul). Baseado em dados experimentais ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados (Dieguez, 1992), este modelo semi-empírico obtém a concentração de biomassa quando a temperatura, a iluminância e o tempo de cultivo são utilizados como variáveis de controle.

2. Descrição do sistema

O sistema fechado utilizado para obtenção dos dados experimentais (Santos, 2001) constituía-se de erlenmeyers de 2l contendo água da Lagoa Mangueira como meio de cultivo, sendo o volume inicial de inóculo de 1600 ml. Os biorreatores contendo o meio de cultivo inoculado foram incubados em estufa incubadora (J. Prolab, modelo JP 1000, com alternância de temperatura e fotoperíodo), na qual a temperatura foi controlada por termostato digital com variação de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. A iluminância foi variada de acordo com o número de lâmpadas fluorescentes instaladas. A aeração foi mantida em 0,8 VVM (volume de ar por volume de meio por minuto) e o fotoperíodo teve ajuste para 12 horas de fase clara e de 12 horas de fase escura. A concentração inicial de células foi de aproximadamente $0,1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$.

Foram realizadas nove corridas com temperatura e iluminância variáveis (ver Tab. 1) e efetuou-se o controle de crescimento celular em intervalos de 24 horas, após a fase clara. O sistema foi esterilizado em autoclave a 121°C e 1,18 bar ($1,2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$).

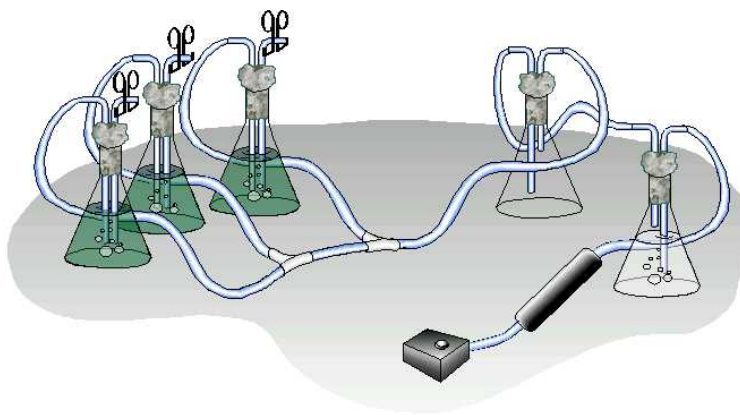


Figura 1. Esquema simplificado dos cultivos em sistema fechado da microalga *Spirulina platensis*.

3. Modelo Numérico e Resultados

Os dados experimentais obtidos para cada corrida foram ajustados através de um polinômio do 2º grau em função do tempo, t , com coeficientes variáveis em função da temperatura (T) e iluminância (I),

$$X = C_1(T,I) + C_2(T,I) t + C_3(T, I) t^2 \quad (1)$$

onde X representa a concentração de biomassa.

Tabela 1. Coeficientes do modelo obtidos através do ajuste dos dados experimentais.

Corrida	I (Lux)	T ($^\circ\text{C}$)	C_1	C_2	C_3	R2
A ₁	1400	20	5,128E-2	1,931E-3	-3,740E-6	0,800
A ₂	1400	40	1,125E-1	-5,190E-4	7,351E-7	0,922
A ₃	4800	20	4,724E-2	1,566E-3	-9,273E-7	0,930
A ₄	4800	40	9,412E-2	1,322E-3	-2,265E-6	0,840
A ₅	3100	30	6,699E-2	1,750E-3	-1,537E-6	0,972
A ₆	3100	16	1,065E-1	-4,938E-4	8,577E-7	0,915
A ₇	3100	44	6,802E-2	-6,565E-4	1,623E-6	0,718
A ₈	650	30	1,372E-1	5,002E-4	4,068E-7	0,944
A ₉	5550	30	7,569E-2	3,119E-3	-9,304E-6	0,903

Os valores numéricos dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 calculados no ajuste polinomial são mostrados na Tab. 1. O coeficiente R2 é igual ao quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson através dos pontos de dados conhecidos. Este coeficiente de correlação é um índice sem dimensão, com valores numéricos entre -1,0 e 1,0,

que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados, neste caso entre o conjunto de dados experimentais e o conjunto de resultados obtidos pela curva de ajuste escolhida. Ele pode ser interpretado como um indicador da precisão dos resultados numéricos (Dieguez, 1992). Um exemplo da adequação do ajuste de curvas realizado é mostrado na Figura 2, onde são comparados os dados experimentais obtidos nas corridas A5 e A9 com os dados numéricos calculados através da eq. (1) utilizando-se os coeficientes apropriados mostrados na Tab. 1.

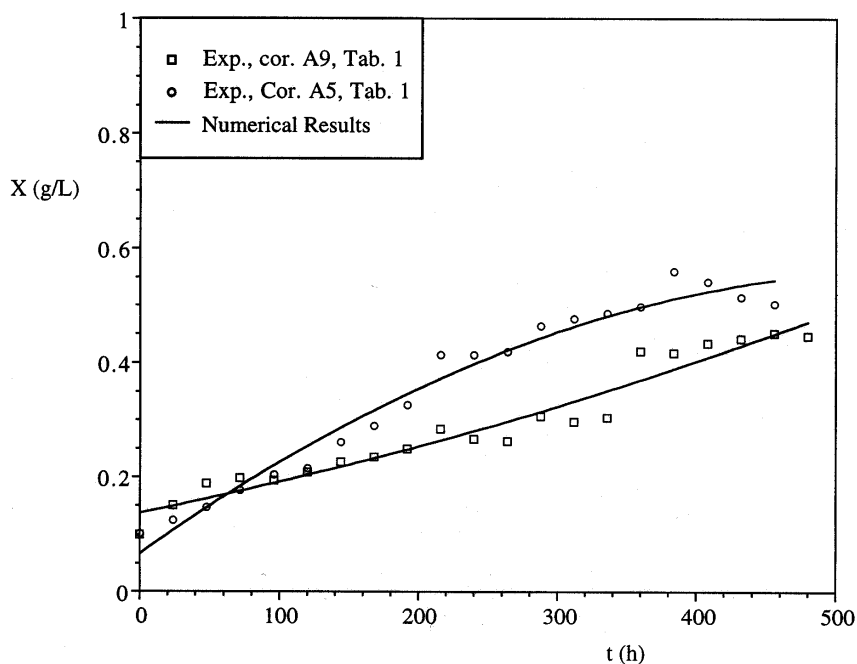


Figura 2. Comparação entre os resultados experimentais nas corridas A5 e A9 e os resultados numéricos calculados com a Eq. (1), utilizando os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 apresentados na Tabela 1.

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 são dependentes da temperatura e iluminância e também necessitam ser ajustados. C_1 foi ajustado a uma função linear utilizando-se os valores de temperatura e iluminância mostrados na Tab. 1 para cada corrida, de acordo com a Eq. (2)

$$C_1 = B_1 + B_2 Z \tag{2}$$

onde

$$Z = \text{sen} [a_1 \log(a_2 I T)] \tag{3}$$

e os coeficientes B_1 , B_2 , a_1 e a_2 foram calculados numericamente pelo método dos mínimos quadrados e estão mostrados na Tab. 2.

Tabela 2. Coeficientes e parâmetros usados nas equações (2), (3) e (4).

Coeficientes	B_1	B_2	B_3	a_1	a_2	R2
C_1	8,1607E-2	-4,0797E-2	-	4,926	4,012	0,8074
C_2	-9,4502E-4	-7,3620E-4	4.3378E-3	3,79	4,980	0,7905
C_3	-6,8705E-6	-5,7511E-7	9,4890E-6	3,87	2,570	0,7209

Os coeficientes C_2 e C_3 foram ajustados a um polinômio do segundo grau de tipo

$$C_{2,3} = B_1 + B_2 Z + B_3 Z^2 \tag{4}$$

onde a função Z é dada pela Eq. (3). Os coeficientes B_1 , B_2 , B_3 e os parâmetros a_1 e a_2 foram calculados numericamente e são mostrados na Tab. 2. A determinação numérica destes coeficientes foi realizada ajustando-se os dados da Tab. 1. Para cada um dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 foi ajustada a sua função correspondente, i. e., eq. (2) ou (4), variando-se os

parâmetros a_1 e a_2 da eq. (3) entre 0,01 e 10,0 e calculando-se o valor do coeficiente de correlação R2. O par (a_1 , a_2) que apresentou o valor de R2 mais próximo de 1 foi o escolhido e esses valores de a_1 e a_2 foram utilizados para calcular os correspondentes valores dos coeficientes B_1 , B_2 e B_3 .

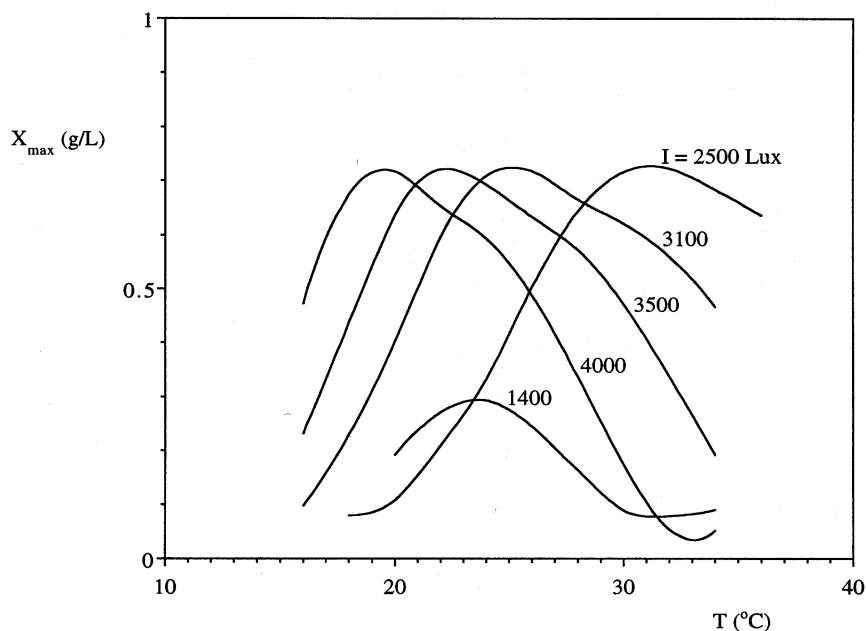


Figura 3. Influência da temperatura e da iluminância na concentração de biomassa.

3.1 Otimização Numérica

A equação (1) é agora denominada função objetivo e será maximizada com respeito aos graus de liberdade iluminância e temperatura. A Figura 3 mostra que existe uma concentração de biomassa máxima quando a iluminância é fixada e a temperatura é variada. Entretanto, esse valor máximo obtido para diversos valores de iluminância mantém-se em um patamar aproximadamente constante ($X_{max} \cong 0,72 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$), quando a iluminância situa-se no intervalo aproximado entre 2000 e 4000 Lux (Santos, 2001). Cultivos de *Spirulina platensis* com valores de Iluminância fora deste intervalo produzem valores de concentração de biomassa inferiores ao máximo, conforme pode-se observar na curva de concentração de biomassa para $I = 1400$ Lux mostrada na Fig. 3. Isto quer dizer que para diversos valores de iluminância e de temperatura existe uma concentração de biomassa máxima aproximadamente constante. Este comportamento já havia sido observado por Bacelo et al., 2004. Assim, uma segunda oportunidade de otimização reside na minimização do tempo para obter essa concentração de biomassa máxima. Os resultados da Fig. 3 são sintetizados na Fig. 4, onde é também mostrado o tempo necessário para a obtenção da concentração de biomassa máxima para cada par (I , T)_{ótimo} obtido na Fig. 3. O tempo mínimo obtido para a máxima concentração de biomassa é de aproximadamente 304 horas a uma temperatura de 22 °C e iluminância de 3500 Lux.

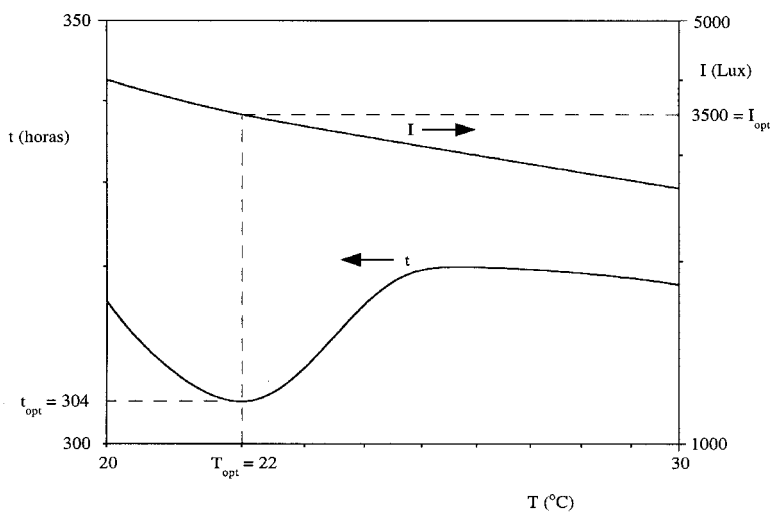


Figura 4. Otimização do tempo necessário para a obtenção da máxima concentração de biomassa.

4. Conclusões

Este trabalho apresenta um modelo matemático semi-empírico para prever, baseado na temperatura, na iluminância e no tempo, a concentração de biomassa da cianobactéria *Spirulina platensis* em um sistema fechado usando como meio de cultivo a água da Lagoa Mangueira, localizada no Rio Grande do Sul. Para verificar a adequação do modelo, resultados numéricos de concentração de biomassa são comparados com resultados experimentais. Então, o modelo semi-empírico é usado para prever a máxima concentração de biomassa considerando-se a variação da temperatura e da iluminância. Como a concentração de biomassa máxima calculada mostrou-se aproximadamente constante para um grande intervalo de pares $(I, T)_{\text{ótimos}}$, vislumbrou-se uma segunda oportunidade de otimização, i. e., a minimização do tempo necessário para o crescimento da concentração de biomassa máxima. Esse tempo foi determinado como aproximadamente 304 horas para a temperatura de 22°C e iluminância de 3500 lux. Adicionalmente, os resultados deste trabalho mostram que modelos numéricos simples podem contribuir significativamente para a economia de tempo e de custos no planejamento de experimentos para a produção da cianobactéria *Spirulina platensis*.

5. Referências Bibliográficas

- Bacelo, L. R., Costa, J. A. V., Rocha, L. A. O. e Stanescu, G., 2004, "Numerical Optimization of Biomass Concentration of the Cyanobacterium *Spirulina platensis* in an Open System using Mangueira Lagoon Water as Culture Medium", Colloque international CSSD «Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement» île des Embiez.
- Borowitzka, M., 1999, "Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters", Journal of Biotechnology, Vol. 70, 313-321.
- Dieguez, J. P. P., 1992, "Métodos Computacionais para a Engenharia", Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Henrikson, R., 1994, "Microalga *Spirulina* – Superalimento del futuro", Barcelona, Ediciones S.A. Urano, ISBN 84-7953-047-2.
- Santos, R. C., 2001, "Influência da temperatura, iluminância e taxa de aeração na concentração de biomassa da cianobactéria *Spirulina platensis*", Dissertação de mestrado, Engenharia de Alimentos, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

NUMERICAL OPTIMIZATION OF BIOMASS CONCENTRATION OF THE CYANOBACTERIUM *Spirulina platensis* IN CLOSED SYSTEM THAT USES THE WATER OF THE MANGUEIRA LAGOON AS MEDIUM OF CULTURE

Liane Rodrigues Bacelo

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
baceloliane@hotmail.com

Jorge Alberto Vieira da Costa

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
jorgealberto@aol.com

Luiz Alberto Oliveira Rocha

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, Cx. P. 474, Rio Grande, RS, 96201-900
luizrocha@mikrus.com.br

George Stanescu

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Cx. P. 19011, Curitiba, PR, 81531-990
stanescu@demec.ufpr.br

Abstract

This work determines numerically a model that represents the growth of the biomass concentration of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in a closed system that uses the water of the Mangueira Lagoon as medium of culture. This mathematical model was obtained using temperature, light intensity, and time as control variables. The experimental data was adjusted using the Least Square Method. The objective function that represents the growth of the biomass concentration of the cyanobacterium *Spirulina platensis* was first optimized by fixing the light intensity and calculating the optimal temperature in which the maximal biomass concentration was reached as time passed. The results showed that the maximal biomass concentration was approximately constant in a large range of optimal temperature and light intensity pairs $(T, I)_{\text{opt}}$. Therefore, a second opportunity for optimization was found: minimization of the time needed to grow the maximal biomass. This time was calculated as approximately 304 hours when the temperature was set at 22°C and the light intensity at 3500 lux. Results of this work also show that simple numerical

models can contribute to save time and cost when planning experiments to produce the cyanobacterium *Spirulina platensis*.

Keywords: numerical optimization, Least Square Method, *Spirulina platensis*, temperature and light intensity.