

Validação de Simulação de Monte Carlo para Estudo da Distribuição de Luz em Tecidos Biológicos

Validation of Monte Carlo Simulation to Study the Distribution of Light in Biological Tissue

André L. O. Ramos, Marcelo V. P. Sousa e Elisabeth M. Yoshimura

Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo (SP), Brasil

Resumo

O objetivo deste trabalho foi calcular a distribuição de luz em emulsão de gordura por Simulação de Monte Carlo, comparar com resultados experimentais para validar a simulação. Utilizou-se o software MCML 1.2.2-2000, para simular a distribuição de luz em camadas de Lipovenos® 10% (Lp), de várias espessuras, irradiadas por feixe de laser com comprimento de onda de 633 nm. Com os resultados, a distribuição de fluência de luz no fundo da amostra e o perfil de fluência de luz ao longo de uma linha distante 12 mm do feixe foram calculados. Os resultados mostram que a luz transmitida para o fundo da amostra tem uma distribuição gaussiana com larguras que aumentam linearmente com a espessura. Observou-se também que a fluência máxima de luz no fundo da amostra apresenta um comportamento de atenuação exponencial com a espessura. Para validar a simulação um experimento foi realizado, adquirindo imagens com uma câmera CCD da luz transmitida e da luz espalhada a 90° de uma cubeta de PMMA contendo quantidades diferentes de Lp, iluminadas verticalmente com laser de He-Ne. O resultado experimental mostrou, nas imagens da base da cubeta, que a intensidade máxima de luz transmitida decresce exponencialmente com a espessura da amostra, similar ao resultado da simulação. A variação das larguras de distribuição de intensidade de luz dos resultados da simulação e experimentais foi basicamente a mesma, com coeficientes angulares compatíveis, 0,85 mm/mm (simulação) e 0,82 mm/mm (experimental). O perfil de fluência de luz a 12 mm do plano de incidência é muito similar à curva experimental de intensidade de luz com a profundidade, cujo máximo ocorre em 6,1mm com coeficiente exponencial assintótico de 1,79 cm⁻¹. Os resultados da simulação de Monte Carlo foram compatíveis com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Laser, simulação de Monte Carlo, emulsão de gordura, distribuição de luz.

Abstract

The goal of this work was to calculate light distribution in a fat emulsion by Monte Carlo Simulation, and to compare the calculation with experimental results to validate the simulation. We used the MCML1.2.2-2000 code to simulate light distribution in Lipovenos® 10% (Lp) layers with various thicknesses illuminated by a red laser beam. With the results, the light fluence distribution at the bottom of the layer and the profile of light fluence along a line distant 12 mm from the laser beam were calculated. The results show that the light transmitted to the bottom of the sample has a Gaussian distribution with widths that increase linearly with the liquid thickness. Also, the maximum light intensity transmitted across the sample has an exponential decay behavior with the thickness. To validate the simulation an experiment has been carried out, acquiring pictures with a CCD camera of the light transmitted and the light scattered at 90° from a PMMA cuvette containing different quantities of Lp, illuminated from the top with He-Ne laser. The experimental result showed that the maximum intensity of the transmitted light have an exponential decay behavior with the thickness, similar to the simulation result. The variation of the Gaussian widths of both simulated and experimental results was basically the same, with compatible angular coefficients, 0.85 mm/mm (simulated) and 0.82 mm/mm (experimental). The simulated light profile at 12 mm from the incidence plane is very similar to the experimental curve of scattered light intensity with depth, whose maximum occurs at 6.1mm with asymptotic exponential coefficient of 1.79 cm⁻¹. The Monte Carlo simulation results were compatible with the experimental results.

Keywords: Laser, Monte Carlo simulation, fat emulsion, light distribution.

Introdução

Conhecer a dose de luz internamente no tecido pode determinar a eficiência de muitos procedimentos realizados com LBI, tais como PDT, redução do processo inflamatório, analgesia e cicatrização de feridas. Como não temos acesso à fluência de luz internamente ao

tecido, o Método de Monte Carlo tornou-se uma poderosa ferramenta para a dosimetria, pois auxilia no melhor entendimento das interações laser-tecido e na determinação da dose adequada ao tecido. Portanto, pode-se otimizar o planejamento clínico da terapia levando a melhores resultados clínicos com redução de custos no tratamento.

Correspondência: André Luiz Oliveira Ramos – Laboratório de Dosimetria – Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 66318, CEP: 05314-970 – São Paulo (SP), Brasil – E-mail: a.ramos@usp.br

O objetivo deste trabalho é calcular a distribuição de luz em emulsão de gordura utilizando o Método de Monte Carlo, comparar seus resultados com procedimentos experimentais para validação da simulação.

Material e métodos

Foi utilizado o software MCML 1.2.2-2000¹, o qual realiza simulação de Monte Carlo para transporte de luz em meios turvos multi-camadas. Com ele, foi simulada a distribuição de luz em camadas de Lipovenos® 10% (Lp) de várias espessuras em geometria cilíndrica de 26 mm de diâmetro. As propriedades ópticas do Lp no comprimento de onda de 633nm são mostradas na tabela 1:

Tabela 1. Propriedades ópticas de Lipovenos 10%².

n	g	μ_a (cm ⁻¹)	μ_s (cm ⁻¹)
1,332	0,69	0,0023	411,39

n = índice de refração; g = coeficiente anisotrópico; μ_a = coeficiente de absorção; μ_s = coeficiente de espalhamento.

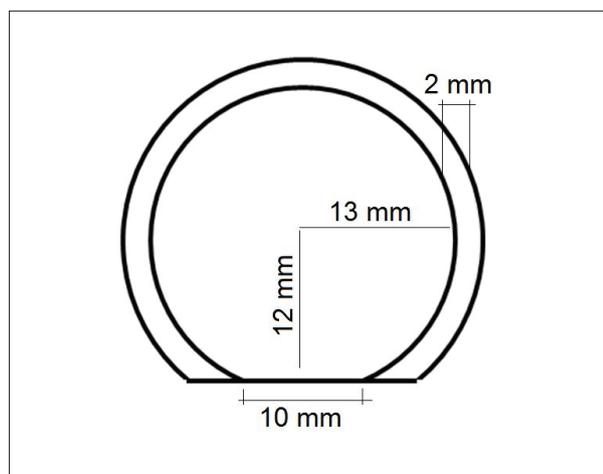


Figura 1. Vista superior da cubeta.

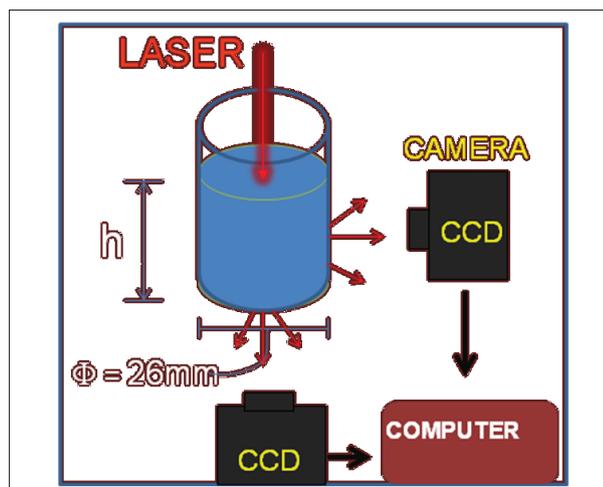


Figura 2. Arranjo experimental.

Com os resultados, a distribuição radial de fluência na base da amostra e o perfil de fluência de luz ao longo de uma linha distante 12 mm do feixe de laser, foram analisados.

Como a simulação trabalha em geometria cilíndrica, para validá-la, um experimento foi realizado utilizando-se uma cubeta de PMMA com 26 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Para obter imagens da lateral da cubeta ela foi projetada com um corte plano de 10 mm de largura da base ao topo, ao longo da parede da cubeta (figura 1).

Foram colocadas quantidades diferentes de Lp, de maneira a variar a espessura de líquido (h) numa faixa de 3 a 12 mm.

O laser de HeNe (raio = 2 mm) foi aplicado verticalmente no centro da cubeta. A potência foi ajustada de acordo com a espessura utilizada, para facilitar análise de imagens: de 3 a 5 mm (10 μ W), 6 a 12 mm (208 μ W) e 30 mm (6 μ W).

Imagens foram capturadas por câmera CCD posicionada a 90° da direção de incidência do laser assim como da base da amostra, conforme a figura 2.

De cada imagem obtida foi extraída a variação em escala de cinza ao longo de uma linha, com o software Image J.

Das imagens obtidas lateralmente foi extraído o comportamento da variação de intensidade de luz ao longo de uma linha na direção z, na posição central da janela da cubeta (figura 3).

Já das imagens obtidas do fundo da amostra, foi extraído o comportamento da variação de intensidade de luz ao longo de uma linha na direção radial na base da cubeta, passando pelo pixel correspondente ao nível máximo na escala de cinza, figuras 4 e 5.

Resultados

No gráfico da figura 3, podemos observar que o perfil de fluência simulado é compatível à curva experimental de intensidade de luz com a profundidade de Lp. Como esperado, no início a intensidade aumenta com a profundidade até um valor máximo, em seguida decresce exponencialmente.

Nas figuras 4 e 5, foi analisada a abertura do perfil de intensidade de luz e a intensidade máxima com a espessura de Lp. Para isso, tentou-se ajustar estas curvas com várias funções de pico. Esses perfis de intensidade foram mais bem ajustados com a função gaussiana.

Com o resultado do ajuste de dados para cada espessura de Lp, extraíram-se da curva ajustada os valores de máxima intensidade e a largura da distribuição.

Foi analisada a variação da largura de distribuição de fluência com a espessura de amostra simulada, e o comportamento da largura de distribuição de intensidade de luz transmitida experimentalmente (figura 6).

Dos resultados da simulação, foi analisado o comportamento da fluência máxima de luz no fundo da amostra com a espessura, e dos resultados experimentais o comportamento da intensidade máxima de luz transmitida (Figura 7).

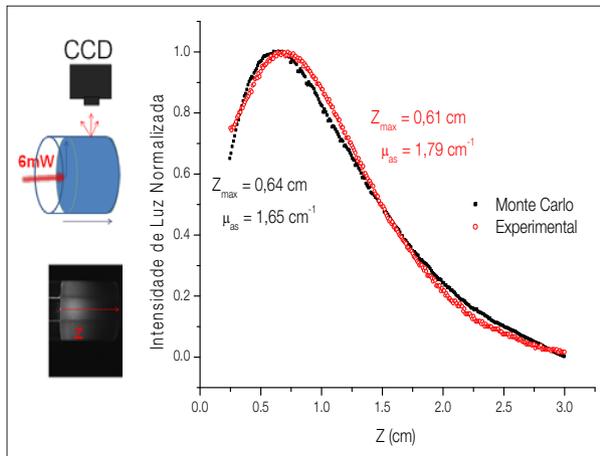


Figura 3. Perfil de intensidade de luz normalizada ao longo da direção z , a uma distância radial de 12 mm do ponto de incidência. Comparação entre resultados experimentais e simulação de Monte Carlo.

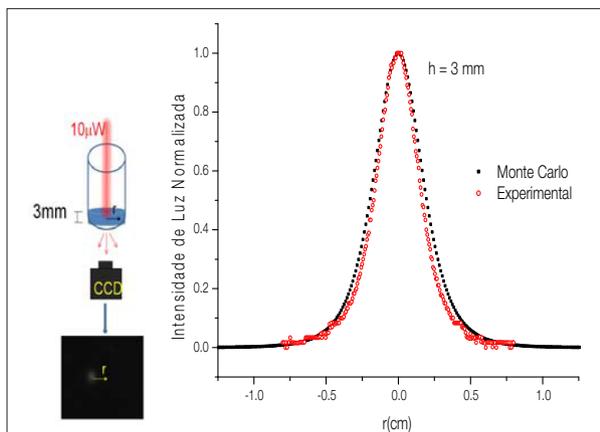


Figura 4. Perfil de intensidade de luz normalizada do fundo da amostra a 3 mm de profundidade, ao longo da direção radial. Comparação entre resultados experimentais e simulação de Monte Carlo.

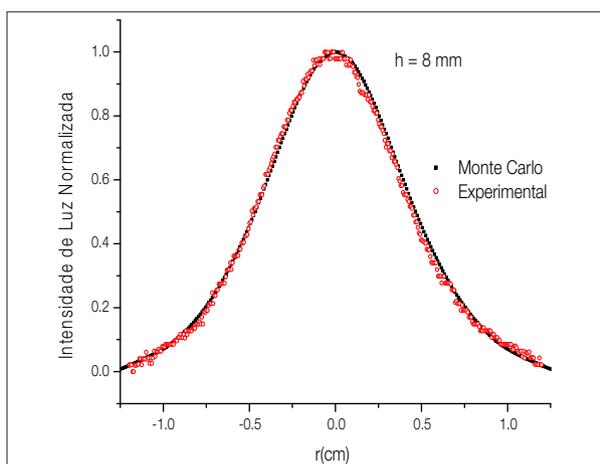


Figura 5. Perfil de intensidade de luz normalizada do fundo da amostra a 8 mm de profundidade, ao longo da direção radial. Comparação entre resultados experimentais e simulação de Monte Carlo.

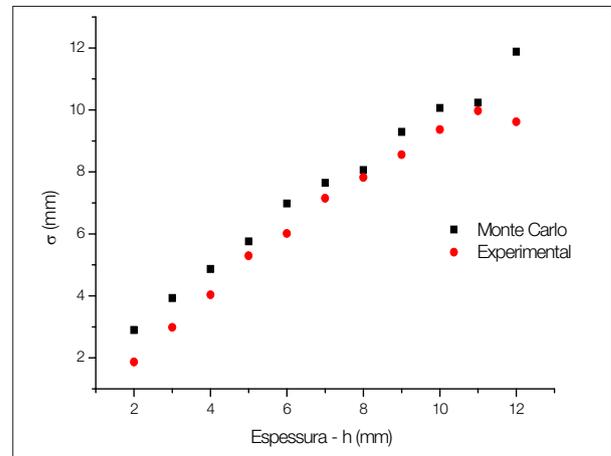


Figura 6. Variação da largura da distribuição do perfil radial de intensidade em função da espessura de L_p . Comparação entre resultados experimentais e simulação de Monte Carlo.

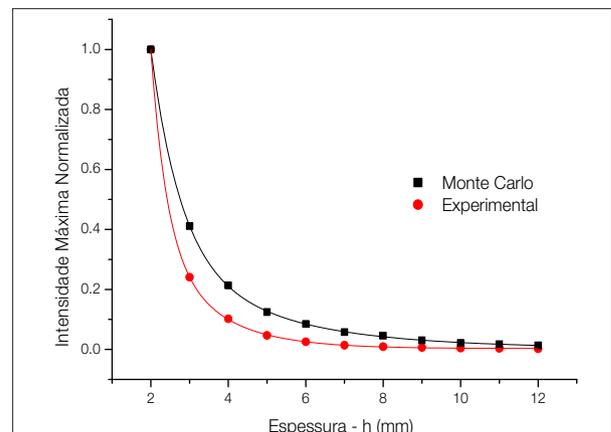


Figura 7. Intensidade máxima em função da espessura de L_p . Comparação entre resultados experimentais e simulação de Monte Carlo.

Tabela 2. Parâmetros de atenuação obtidos do ajuste dos dados da figura 7, com exponencial de 2ª ordem.

Fator de atenuação	Monte Carlo	Experimental
μ_1 (cm^{-1})	30,7	28,7
μ_2 (cm^{-1})	5,0	7,6

Os dados da figura anterior foram ajustados com exponencial de segunda ordem. Os parâmetros de atenuação obtidos do ajuste são mostrados na tabela 2.

Discussão e conclusões

No gráfico da figura 3, pode-se notar que em ambas as curvas há o aumento da intensidade até um máximo (posição z_{max}) e mais adiante, um comportamento exponencial de atenuação caracterizado por μ_{as} . O perfil de fluência simulado é muito similar à curva experimental de intensidade

de luz com a profundidade de L_p , onde o máximo ocorre em 6,4 mm com um coeficiente exponencial assintótico de $1,65 \text{ cm}^{-1}$. O resultado da simulação é compatível com o experimental.

Os gráficos da figura 4 e 5 mostram que o resultado calculado da distribuição de intensidade no fundo da amostra é basicamente o mesmo que o obtido experimentalmente, para espessuras de 3 mm e de 8 mm de L_p . Observa-se também uma distribuição de intensidade mais larga para a maior espessura do L_p , comportamento que está sistematizado na figura 6, na qual se observa que a largura da distribuição de fluência na base da amostra é proporcional à espessura de L_p . O mesmo comportamento ocorreu experimentalmente e os coeficientes angulares obtidos por ajustes são compatíveis entre si, 0,85 mm/mm (simulado) e 0,82 mm/mm (experimental).

Além disso, a intensidade luminosa máxima e a fluência total transmitida através da amostra decrescem exponencialmente com a espessura da amostra tanto nos resultados experimentais quanto nos calculados, figura 7,

e os pares de coeficientes de atenuação obtidos foram próximos.

Todos estes resultados mostram que os resultados da simulação de Monte Carlo são basicamente os mesmos dos experimentais.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Óptica do IFUSP.

Referências

1. Wang LH, Jacques SL, Zheng LQ. MCML – Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 1995; 47: 131-146. Software disponível em: <http://omlc.ogi.edu/software/mc/>. Acessado em 31/3/2010.
2. Michels R, Foschum F, Kienle A. Optical properties of fat emulsions. *Optics Express* 2008;16(8):5907-25.