

Dosimetria em folículos tireoidianos devido aos elétrons de baixa energia do iodo usando o método Monte Carlo*

Dosimetry in thyroid follicles due to low-energy electrons of iodine using the Monte Carlo method

Laélia Campos¹, Frank da Silva²

Resumo **OBJETIVO:** Avaliar a dose absorvida em folículos tireoidianos devido aos elétrons de baixa energia, como os elétrons Auger e os de conversão interna, além das partículas beta, para os radioisótopos de iodo (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I e ¹³⁵I) usando o método Monte Carlo. **MATERIAIS E MÉTODOS:** O cálculo da dose foi feito ao nível folicular, simulando elétrons Auger, conversão interna e partículas beta, com o código MCNP4C. Os folículos (colóide e células foliculares) foram modelados como esferas, com diâmetros do colóide variando de 30 a 500 µm. A densidade considerada para os folículos foi a da água (1,0 g.cm⁻³). **RESULTADOS:** Considerando partículas de baixa energia, o percentual de contribuição do ¹³¹I na dose total absorvida pelo colóide é de aproximadamente 25%, enquanto os isótopos de meia-vida física curta apresentaram contribuição de 75%. Para as células foliculares, esse percentual é ainda maior, chegando a 87% para os iodios de meia-vida curta e 13% para o ¹³¹I. **CONCLUSÃO:** Com base nos resultados obtidos, pode-se mostrar a importância de se considerar partículas de baixa energia na contribuição para a dose total absorvida ao nível folicular (colóide e células foliculares) devido aos radioisótopos de iodo (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I e ¹³⁵I).
Unitermos: Dosimetria interna; Iodos de meia-vida curta; Câncer de tireóide; Método Monte Carlo; MCNP.

Abstract **OBJECTIVE:** To evaluate the absorbed dose in thyroid follicles due to low-energy electrons such as Auger and internal conversion electrons, besides beta particles, for iodine radioisotopes (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I and ¹³⁵I) utilizing the Monte Carlo method. **MATERIALS AND METHODS:** The dose calculation was performed at follicular level, simulating Auger, internal conversion electrons and beta particles, with the MCNP4C code. The follicles (colloid and follicular cells) were modeled as spheres with colloid diameter ranging from 30 to 500 µm, and with the same density of water (1.0 g.cm⁻³). **RESULTS:** Considering low-energy particles, the contribution of ¹³¹I for total absorbed dose to the colloid is about 25%, while the contribution due to short-lived isotopes is 75%. For follicular cells, this contribution is still higher achieving 87% due to short-lived iodine and 13% due to ¹³¹I. **CONCLUSION:** The results of the present study demonstrate the importance of considering low-energy particles in the contribution for the total absorbed dose at follicular level (colloid and follicular cells) due to iodine radioisotopes (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I and ¹³⁵I).
Keywords: Internal dosimetry; Short-lived iodines; Thyroid cancer; Monte Carlo method; MCNP.

Campos L, Silva F. Dosimetria em folículos tireoidianos devido aos elétrons de baixa energia do iodo usando o método Monte Carlo. Radiol Bras. 2008;41(6):403-407.

INTRODUÇÃO

A tireóide é uma glândula endócrina lobular situada na porção anterior do pescoço, com peso de 10 a 20 g para o homem

adulto⁽¹⁾. Cada um dos dois lobos laterais da tireóide, unidos pelo istmo, possui de 4 a 6 cm de altura, 2 cm transversalmente e 2 cm de espessura⁽²⁾. A unidade funcional da tireóide é o folículo, composto de células foliculares e de colóide. O folículo possui forma esférica e diâmetro médio, no homem adulto, de 200 µm, apresentando, no entanto, uma importante variação de tamanho em função de sua atividade funcional. Em repouso, os folículos são volumosos, com diâmetro de 200 a 500 µm, e em estado de hiperatividade apresentam-se menores, com diâmetro variando entre 30 e 50 µm⁽²⁾. As células foliculares são unidas por uma membrana basal compondo uma única camada que delimita o volume

do colóide e possuem diâmetro médio de 10 µm. O colóide é uma substância protéica que concentra os iodios circulantes no sangue e incorpora os hormônios tireoidianos, cuja produção está associada ao aporte de iodo no organismo⁽²⁾. O iodo é um elemento essencial na composição dos hormônios secretados pela tireóide, os quais têm função determinante no metabolismo de todas as células do organismo⁽³⁾ e, igualmente, no processo de crescimento e de desenvolvimento da maioria dos órgãos⁽⁴⁾, em particular do cérebro⁽⁵⁾.

Em casos de acidentes envolvendo centrais nucleares, isótopos radioativos de iodo são liberados em grandes quantidades no meio-ambiente e, por causa da sua alta

* Trabalho realizado no Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, Brasil.

1. Doutora, Professor Adjunto II do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, Brasil.

2. Mestre, Doutorando do Programa de Matemática Computacional da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, Brasil.

Endereço para correspondência: Dra. Laélia Campos, Departamento de Estatística e Informática, UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/nº, Dois Irmãos, Recife, PE, Brasil, 52171-900. E-mail: lpbcampos@gmail.com / l.campos@deinfo.ufrpe.br

Recebido para publicação em 31/3/2008. Aceito, após revisão, em 31/7/2008.

volatilidade e mobilidade, a exposição a esses radioisótopos demanda atenção especial em termos de radioproteção^(6,7). De fato, a capacidade da tireóide em concentrar o iodo faz deste órgão um dos mais vulneráveis em acidentes dessa natureza⁽⁸⁾. Entre os principais tipos de câncer de tireóide estão o carcinoma papilar, o qual representa de 60% a 80% dos casos, e o carcinoma folicular, que está entre 10% e 20% dos cânceres tireoidianos⁽⁹⁾. Esses dois tipos de carcinomas se originam a partir das células foliculares. Do ponto de vista de radioproteção, os isótopos radioativos de iodo mais importantes são o ^{131}I e os isótopos de meia-vida curta: ^{132}I ($T_{1/2} = 2,38$ h), ^{133}I ($T_{1/2} = 20,8$ h), ^{134}I ($T_{1/2} = 52,5$ min) e ^{135}I ($T_{1/2} = 6,7$ h), e a avaliação de dose devido a esses radioisótopos de iodo é de fundamental importância^(10,11).

Assim, a dose absorvida, definida como sendo a energia média depositada pela radiação por unidade de massa do tecido ou órgão irradiado⁽¹²⁾, é a grandeza física mais importante para avaliar os riscos associados a uma contaminação ou exposição à radiação ionizante. Porém, uma dosimetria retrospectiva envolvendo contaminação interna acidental não é tarefa fácil, geralmente pela ausência de informações sobre as condições de exposição. No acidente de Chernobyl, usado como exemplo comparativo neste trabalho, a maioria das medidas diretas de dose só ocorreu cerca de um mês após o acidente. Ademais, essas medidas foram realizadas apenas para o ^{131}I , enquanto os radioisótopos de iodo de meia-vida curta não foram levados em consideração na estimativa da dose absorvida pela tireóide⁽⁸⁾.

Alguns trabalhos mostraram resultados de doses ao nível celular devido às partículas beta do ^{131}I usando métodos determinísticos⁽¹³⁻¹⁵⁾, enquanto outros usaram simulações de Monte Carlo para o ^{131}I ⁽¹⁶⁾ e para iodos de meia-vida curta⁽¹¹⁾, porém nenhum dos trabalhos levou em consideração partículas de baixa energia, como elétrons Auger ou elétrons de conversão interna.

A utilização de códigos de Monte Carlo para cálculos de dose absorvida em órgãos e/ou tecidos do corpo humano^(17,18) tem sido bastante difundida em todo o mundo, atendendo aos profissionais que trabalham

com dosimetria interna ou externa, empregando, para tal fim, modelos geométricos (ou fantasmas) dos órgãos e/ou tecidos a serem estudados⁽¹⁹⁾, como também ao nível celular⁽¹¹⁾.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a dose absorvida em folículos tireoidianos devido aos elétrons de baixa energia, como os elétrons Auger e de conversão interna, além das partículas beta, para os radioisótopos de iodo (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I e ^{135}I), usando o método Monte Carlo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelagem para o folículo tireoidiano

A modelagem do folículo tireoidiano (composto de colóide e de células foliculares) foi realizada usando duas esferas concêntricas. A esfera interna representa o colóide e a região compreendida entre a esfera interna e a externa corresponde às células foliculares, cuja distância entre os raios interno e externo possui 10 μm . Os diâmetros usados para a esfera interna (colóide) foram os seguintes: 30, 50, 80, 100, 200, 300, 400 e 500 μm .

A justificativa da utilização desses valores reside no diâmetro dos folículos tireoidianos humanos, que varia de 30 a 50 μm , quando em estado de hiperatividade, enquanto em estado de hipoatividade (repouso) essa variação é de 200 a 500 μm ⁽²⁾.

Simulação do folículo tireoidiano com o código MCNP

Para simular os folículos tireoidianos contaminados com os radioisótopos de iodo, foi usado o código MCNP (*Monte Carlo N-Particle*) versão 4C⁽²⁰⁾, que utiliza o método Monte Carlo para transporte de partículas. Na entrada do código foram descritas a geometria do folículo e a distribuição da fonte radioativa, os espectros de energia de decaimento dos elétrons Auger e de conversão interna, bem como das partículas beta para cada isótopo de iodo simulado. A densidade considerada para o colóide e células foliculares foi a da água (1,0 g.cm⁻³). Para cada diâmetro, os iodos (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I e ^{135}I) foram simulados de maneira uniforme no interior do colóide. As tabelas com os espectros de decaimento de energia dos iodos e abundâncias ener-

géticas foram obtidas do Brookhaven National Laboratory's (BNL) National Nuclear Data Center (<<http://www.nndc.bnl.gov>>; jul/2008).

Na saída do MCNP tem-se a energia depositada tanto no colóide quanto nas células foliculares devido aos isótopos de iodo. Fótons não foram usados na simulação, visto que eles não contribuem para a dose absorvida ao nível celular.

RESULTADOS

Os resultados das simulações para o modelo do folículo tireoidiano (colóide e células foliculares) estão apresentados nas Figuras 1 a 6. Os gráficos estão em escala logarítmica e correspondem a dose em gray por desintegração (Gy/des) em função do diâmetro do colóide (μm) simulado. Os pontos traçados nos gráficos foram obtidos independentes uns dos outros por meio de uma única simulação com parâmetros físicos e geométricos específicos.

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados para a dose absorvida pelo colóide e pelas células foliculares devido aos elétrons Auger, respectivamente. É possível observar, nos gráficos, que a maior contribuição de dose absorvida devido aos elétrons Auger é proveniente do ^{131}I e em seguida do ^{134}I , para todos os diâmetros simulados.

Os resultados de dose devido aos elétrons de conversão interna são mostrados nas Figuras 3 e 4. Observa-se que a maior contribuição de dose devido aos elétrons de conversão interna é inicialmente devido ao ^{131}I , e à medida que aumenta o diâmetro do folículo, o percentual de contribuição do ^{131}I vai se igualando ao do ^{134}I , até ser praticamente igual.

As Figuras 5 e 6 apresentam a dose absorvida devido às partículas beta. A contribuição de dose para o colóide é quase a mesma para todos os isótopos de iodo (Figura 5) devido às partículas beta, observando-se apenas uma contribuição um pouco maior do ^{131}I , quando comparado com os outros isótopos. Examinando-se a Figura 6, pode-se afirmar que todos os isótopos de iodo possuem a mesma contribuição para as doses depositadas nas células foliculares devido às partículas beta em todos os diâmetros simulados.

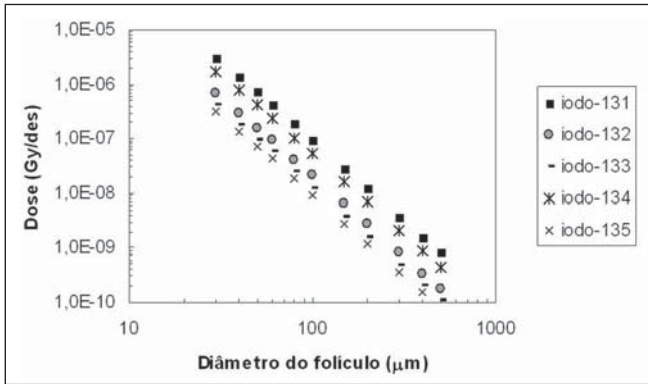


Figura 1. Dose absorvida pelo colóide devido aos elétrons Auger.

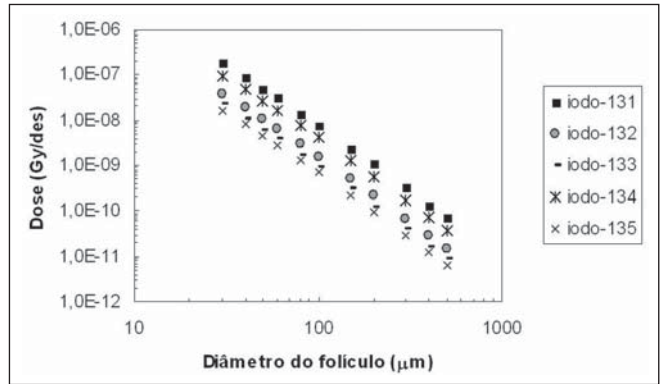


Figura 2. Dose absorvida pelas células foliculares devido aos elétrons Auger.

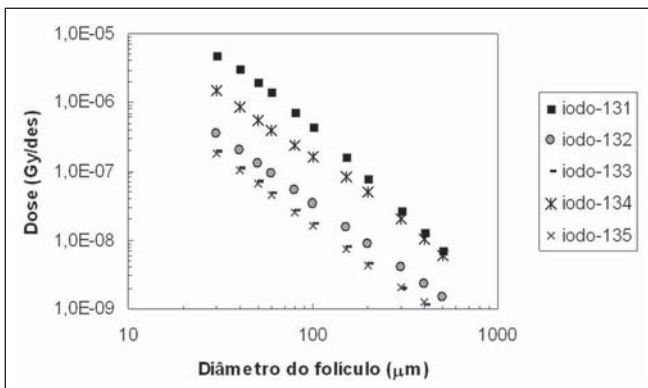


Figura 3. Dose absorvida pelo colóide devido aos elétrons de conversão interna.

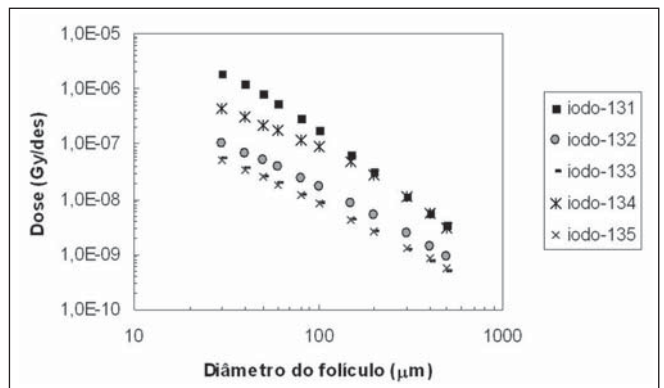


Figura 4. Dose absorvida pelas células foliculares devido aos elétrons de conversão interna.

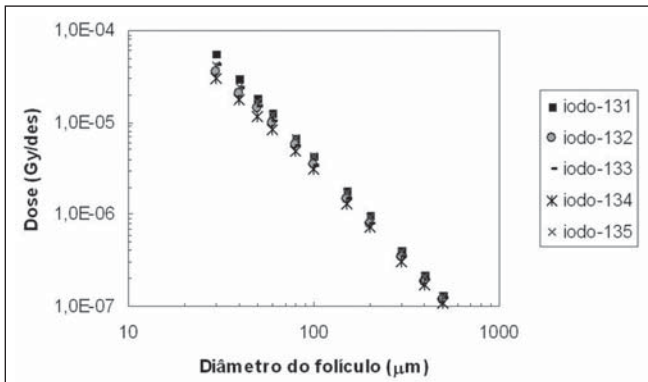


Figura 5. Dose absorvida pelo colóide devido às partículas beta.

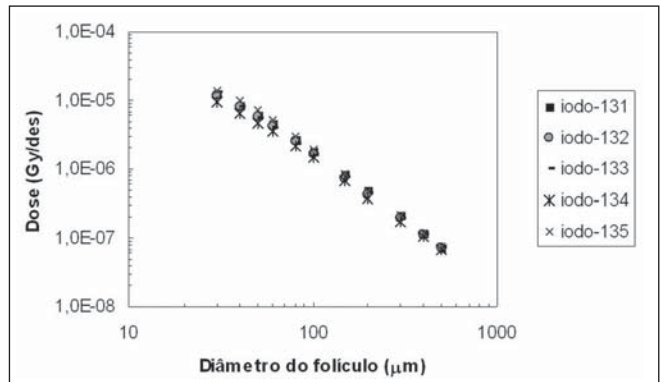


Figura 6. Dose absorvida pelas células foliculares devido às partículas beta.

Os erros relativos estimados, gerados pelo código MCNP, variaram de 0,06% a 1,7%, estando, dessa maneira, dentro da faixa confiável, como estabelecido por este código.

A Tabela 1 apresenta os valores da dose total absorvida pelo colóide (Gy/des), considerando elétrons Auger, elétrons de conversão interna e partículas beta para todos

os isótopos de iodo e todos os diâmetros simulados, além de apresentar os percentuais de dose devido ao ^{131}I e devido aos iodios de meia-vida curta. A Tabela 1 mostra que o percentual de contribuição do ^{131}I na dose total absorvida pelo colóide é, em média, 25%, enquanto para os iodios de meia-vida física curta esse percentual total é, em média, 75%.

A Tabela 2 mostra os valores da dose total absorvida pelas células foliculares (Gy/des), considerando elétrons Auger, elétrons de conversão interna e partículas beta, além de apresentar os percentuais de dose devido ao ^{131}I (13% em média) e percentuais devido aos isótopos de meia-vida física curta (87% em média).

Tabela 1 Dose total absorvida pelo colóide devido aos isótopos de iodo.

Diâmetro do colóide (μm)	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I	(%) ^{131}I	(%) dos iodios de $T_{1/2}$ curta
30	6,37E-05	3,70E-05	4,23E-05	3,39E-05	4,20E-05	29	71
50	2,10E-05	1,44E-05	1,53E-05	1,26E-05	1,67E-05	26	74
80	7,77E-06	5,76E-06	5,59E-06	5,15E-06	6,82E-06	25	75
100	4,80E-06	3,60E-06	3,45E-06	3,28E-06	4,25E-06	25	75
200	1,07E-06	8,05E-07	8,13E-07	7,70E-07	9,22E-07	24	76
300	4,38E-07	3,45E-07	3,51E-07	3,30E-07	3,87E-07	24	76
400	2,32E-07	1,91E-07	1,94E-07	1,83E-07	2,11E-07	23	77
500	1,40E-07	1,20E-07	1,22E-07	1,16E-07	1,31E-07	22	78

Tabela 2 Dose total absorvida pelas células foliculares devido aos isótopos de iodo.

Diâmetro do colóide (μm)	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I	(%) ^{131}I	(%) dos iodios de $T_{1/2}$ curta
30	1,45E-05	2,12E-05	2,20E-05	2,40E-05	2,40E-05	14	86
50	6,87E-06	9,78E-06	9,16E-06	1,14E-05	1,14E-05	14	86
80	3,05E-06	4,25E-06	3,92E-06	5,45E-06	4,91E-06	14	86
100	2,01E-06	2,80E-06	2,61E-06	3,83E-06	3,21E-06	14	86
200	5,23E-07	7,65E-07	7,37E-07	1,12E-06	8,58E-07	13	87
300	2,27E-07	3,54E-07	3,42E-07	4,68E-07	4,15E-07	13	87
400	1,23E-07	2,02E-07	1,98E-07	2,45E-07	2,46E-07	12	88
500	7,58E-08	1,31E-07	1,29E-07	1,47E-07	1,60E-07	12	88

DISCUSSÃO

As doses absorvidas devido aos elétrons Auger foram apresentadas nas Figuras 1 e 2, destacando a maior contribuição para o ^{131}I . A importância dos elétrons Auger na dosimetria permaneceu negligenciada durante vários anos, em grande parte porque a energia absorvida pelo tecido devido a esses elétrons normalmente é insignificante em comparação com o total de energia liberada no decaimento do radionuclídeo⁽²¹⁾.

Emissões de elétrons Auger deixam escapar uma cascata de elétrons de baixa energia, em que a maioria desta energia é depositada dentro de alguns nanômetros (nm), sendo a dose local muito alta. O mais energético elétron Auger resulta de transições para a camada K (25 a 27 keV), mas a maioria dos elétrons é produzida por transições entre orbitais exteriores e, portanto, possuem energias menores que 500 eV, com alcances correspondentes menores que 25 nm. Radionuclídeos que emitem elétrons Auger são amplamente utilizados em medicina nuclear e pesquisas biomédicas. Os efeitos dos elétrons Auger têm sido avaliados empregando-se técnicas de microdosimetria⁽²²⁾.

Os elétrons transportam apenas pequena fração da energia liberada por decaimento e fazem apenas uma menor contribuição para a dose total no órgão, contudo, elétrons Auger podem ser crucialmente importantes na determinação da magnitude do dano celular porque os riscos biológicos associados com emissões Auger dependem largamente da precisão local do decaimento dentro da célula. Elétrons Auger extracelulares seriam relativamente inofensivos por causa de seu alcance limitado, mas podem produzir irreparáveis danos a qualquer estrutura radiosensível⁽²¹⁾.

As contribuições de dose para o colóide e células foliculares devido aos elétrons de conversão interna foram apresentadas nas Figuras 3 e 4. Por possuírem menor alcance na deposição de energia, elétrons de baixa energia, como os de conversão interna, são largamente usados no tratamento de tumores superficiais, mas são também apropriados para radioterapia intra-operatória. A densa chuva de elétrons Auger de curto alcance liberados pelos radionuclídeos, o qual decai por meio de captura eletrônica ou por conversão interna, resulta em danos biológicos, que é muito dependente da área local de decaimento da célula⁽²³⁾.

As Figuras 5 e 6 mostram as doses absorvidas pelo colóide e pelas células foliculares devido às partículas beta. Em radioimunoterapia, o tratamento de tumores profundos por radionuclídeos que emitem partículas beta é preferível. Entretanto, para a erradicação de pequenos grupos de células cancerígenas, radionuclídeos que emitem elétrons Auger ou partículas alfa são considerados vantajosos por causa de sua habilidade em depositar energia de radiação localmente⁽¹⁴⁾.

O valor percentual de 75% dos isótopos de meia-vida física curta exposto na Tabela 1 confirma a alta contribuição de dose absorvida pelo colóide devido a esses isótopos, e mostra que esse percentual encontrado ainda é maior que o existente na literatura⁽¹¹⁾, em que não existiam cálculos com elétrons Auger e elétrons de captura interna. Para a dose total absorvida pelas células foliculares (observar Tabela 2), o percentual de dose devido aos iodios de meia-vida curta é maior ainda, representando, em média, 87% da dose total, enquanto o ^{131}I contribui, em média, com 13%. Este resultado ressalta a importância do uso das partículas de baixa energia em cálculos de dose ao nível celular, onde, neste trabalho,

os elétrons Auger simulados possuem faixa de energia de 0,08 a 32 keV.

Para radionuclídeos que emitem partículas de baixa energia, a dosimetria convencional freqüentemente estabelece dose estimada de forma inadequada, isto é, a dose em células individuais dentro do órgão pode ser muito superior ou muito inferior do que a dose média calculada para o órgão como um todo, isso porque a dosimetria convencional estabelece doses médias de radiação para órgãos específicos ou tecidos, podendo, grosseiramente, subestimar ou superestimar a exposição à radiação para células individuais.

Devido às baixas energias dos elétrons Auger e, correspondentemente, pequeno alcance (de 1 nm a 1 µm), os efeitos biológicos de emissões Auger são bastante dependentes de sua distribuição celular e subcelular. A dosimetria convencional usada para um órgão específico não leva em consideração a heterogeneidade célula a célula, onde as emissões Auger se concentram no núcleo da célula⁽²⁴⁾.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos por simulação de Monte Carlo, evidencia-se a importância de se considerar partículas de baixa energia, como os elétrons Auger e os de conversão interna, na contribuição para a dose total absorvida ao nível folicular (colóide e células foliculares) devido aos isótopos de iodo de meia-vida curta (¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I, ¹³⁵I) e ¹³¹I. Para o mesmo número de desintegrações, o percentual de contribuição foi da ordem de 75% para a dose total absorvida pelo colóide devido aos iodios de meia-vida curta e 25% para o ¹³¹I. Para as células foliculares esses valores chegaram a 87% para os isótopos de iodo de meia-vida curta e 13% para o ¹³¹I.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelo apoio logístico, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), dentro do acordo Capes/Cofecub, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. Cristy M. Reference man anatomical model. In: Raabe OG, editor. Internal radiation dosimetry. Madison: Medical Physics Pub Corp; 1994. p. 217–38.
2. Leclère J, Orgiazzi J, Rousset B, et al. La thyroïde: des concepts à la pratique clinique. 2nd ed. Paris: Elsevier; 2001.
3. Sterling K. Thyroid hormone action at the cellular level. In: Ingbar SH, Braverman LE, editors. Werner's The thyroid: a fundamental and clinical text. Philadelphia: JB Lippincott; 1986. p. 219–33.
4. Fisher DA. Thyroid hormone effects on growth and development. In: Delange F, Fisher DA, Malvaux P, editors. Pediatric thyroidology. Basel: Karger; 1985. p. 75–9.
5. Dussault JH. Action of thyroid hormones on brain development. In: Delange F, Fisher DA, Glinoe D, editors. Research in congenital hypothyroidism. New York: Plenum Press; 1989. p. 95–102.
6. Galle P. Toxiques nucléaires. 2nd ed. Paris: Masson; 1998.
7. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Oxford: Pergamon Press; 1994.
8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR Report 2000 to the General Assembly, with Annexes. New York: United Nations; 2000.
9. Schlumberger MJ. Papillary and follicular thyroid carcinoma. N Engl J Med. 1998;338:297–306.
10. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. Radiat Prot Dosimetry. 2003;105:593–9.
11. Campos L, Amaral A, Colas-Linhart N, et al. Evaluation of absorbed dose in thyroid follicles

due to short-lived iodines irradiation using the Monte Carlo method. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2006;269:635–8.

12. International Commission on Radiation Units & Measurements (ICRU). Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51. Bethesda: ICRU; 1993.
13. Bardiès M, Chatal JF. Absorbed doses for internal radiotherapy from 22 beta-emitting radionuclides: beta dosimetry of small spheres. Phys Med Biol. 1994;39:961–81.
14. Goddu SM, Rao DV, Howell RW. Multicellular dosimetry for micrometastases: dependence of self-dose versus cross-dose to cell nuclei on type and energy of radiation and subcellular distribution of radionuclides. J Nucl Med. 1994;35:521–30.
15. Li WB, Friedland W, Pomplun E, et al. Track structures and dose distributions from decays of ¹³¹I and ¹²⁵I in and around water spheres simulating micrometastases of differentiated thyroid cancer. Radiat Res. 2001;156:419–29.
16. Champion C, Zanotti-Fregonara P, Hindié E. CELLDOSE: a Monte Carlo code to assess electron dose distribution – S values for ¹³¹I in spheres of various sizes. J Nucl Med. 2008;49:151–7.
17. Campos L, Stabin M. Intravascular brachytherapy to prevent restenosis: dosimetric considerations. Cell Mol Biol (Noysi-le-grand). 2002;48:429–39.
18. Campos L, Stabin M. Internal dosimetry for radiation therapy in coronary arteries. Radiat Prot Dosimetry. 2002;101:423–6.
19. Fisher DR. From “micro” to “macro” internal dosimetry. In: Raabe OG, editor. Internal radiation dosimetry. Madison: Medical Physics Pub Corp; 1994. p. 61–80.
20. Briesmeister JF. MCNP™ – a general Monte Carlo N-particle transport code, version 4C. Manual LA-13709-M. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory; 2000.
21. Ftáčniková S, Böhm R. Monte Carlo calculations of energy deposition on cellular, multicellular and organ level for auger emitters. Radiat Prot Dosimetry. 2000;92:279–88.
22. Persson L. Radiation protection issues of Auger electron emitters. Radiat Prot Dosimetry. 1996; 64:189–91.
23. Humm JL, Howell RW, Rao DV. Dosimetry of Auger-electron-emitting radionuclides: report No. 3 of AAPM Nuclear Medicine Task Group No. 6. Med Phys. 1994;21:1901–15.
24. Hofer KG. Dosimetry and biological effects of incorporated Auger emitters. Radiat Prot Dosimetry. 1998;79:405–10.