

Análise das Recomendações Internacionais Sobre Cálculo de Dose Absorvida na Biota

Wagner de S. Pereira¹, Alphonse Kelecom² e Delcy de A. Py Júnior¹

¹Unidade de Tratamento de Minérios – UTM.
Caixa Postal 961, CEP 37.701-970, Poços de Caldas, MG, Brasil.
Indústrias Nucleares do Brasil – INB.

E-mail: wspereira@inb.gov.br e delcy@inb.gov.br

¹Laboratório de Radiobiologia e Radiometria - LARARA-PLS, Universidade Federal Fluminense,
CP 100.436, 24001-970 Niterói, RJ, Brasil

pereiraws@gmail.com.br e kelecom@uol.com.br

²Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental.
Caixa Postal 107.092, CEP 24.360-970, Niterói, RJ, Brasil.
Universidade Federal Fluminense – UFF.

E-mail: kelecom@uol.com.br

Resumo. A radioproteção sempre foi focada no ser humano. Atualmente essa visão tem sido alterada havendo a necessidade de comprovação da proteção do ambiente dos efeitos indesejados da radiação. Para tanto a International Commission on Radiological Protection (ICRP) editou a partir do ano de 2000 uma série de recomendações visando criar um arcabouço para a proteção do meio ambiente. O presente trabalho visa avaliar as recomendações da ICRP que possuem como objetivos a radioproteção ambiental (RPA). Foram analisadas as recomendações 26, 60, 91, 103 e 108 da ICRP. A visão da ICRP sobre RPA vem evoluindo do conceito antropocêntrico utilizado pela ICRP-26, questionado pela ICRP-60 e definitivamente refutado na ICRP-103. Essa última publicação definiu a o conceito de animal e planta de referência (APR) a ser utilizado na RAP baseada no cálculo de dose absorvida na biota. A ICRP-91 montou um arcabouço teórico para a RPA, e a ICRP-108 desenvolveu ferramentas de RAP baseada no cálculo de dose absorvida baseado no conceito de APR. Esse último enfoque permite a montagem de um arcabouço legal de proteção ambiental com uma visão ética, moral e cientificamente mais defensável que o conceito antropocêntrico.

1 Introdução

A radioproteção, desde sua origem, foi uma ciência focada na proteção do ser humano. A proteção da meio ambiente era feita em função das vias de exposição do homem à radiação visando restringir a exposição dos indivíduos do público. O conceito de radioproteção ambiental da biota é uma visão nova que tem sido desenvolvida pela comunidade de radioproteção na última década [1, 2 e 3]. Os primeiros conceitos de radioproteção do ambiente foram desenvolvidos com uma visão antropocêntrica pela ICRP [4] que afirmava: *"The commission therefore believes that if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently protected"*. Essa visão era justificada pela maior radiosensibilidade da espécie humana, quando comparada a outras espécies, como apontada por alguns autores [5, 6 e 7].

Esse enfoque não resiste a uma análise ecológica simples: diferenças de nichos ecológicos entre a espécie humana e todos os outros representantes da biota, obrigatoriamente gera diferentes exposições. Tipo e taxas de consumo de alimentos (teias alimentares diferentes), taxas de respiração, de ingestão de água, diferenças fisiológicas na absorção, biocinética dos elementos nos organismos podem ser citados como importantes nessa avaliação.

Dois outros fatos importantes para a contestação dessa afirmação são: 1) Existem ecossistemas em que o ser humano não está presente (e.g. o oceano) e 2) em outros ecossistemas existe a recomendação de evacuação dos seres humanos do local (e.g. o entorno da central nuclear de Tchernobyl, após o acidente de 1986).

Os parâmetros importantes para a avaliação do efeito biológico da radiação nos ecossistemas podem ser divididos em três grupos. O primeiro grupo diz respeito à fonte de radiação e à exposição; o segundo diz respeito à biologia do organismo irradiado e por fim o terceiro diz respeito a fatores ambientais. Para o primeiro grupo o tipo da radiação, a magnitude, a duração e a taxa de exposição, além da distribuição espacial da dose são importantes para a avaliação. Em relação à biologia do organismo, temos o número dos cromossomos, o volume dos cromossomos, a duração do ciclo mitótico, a porcentagem do número de células que estão se dividindo, o estágio do ciclo celular, o tipo de célula ou tecido, o estágio da diferenciação celular, o tamanho do organismo, a idade, o estágio do ciclo de crescimento, as condições nutricionais, a existência de substâncias sensibilizantes ou protetoras e a espécie. Como condições ecológicas, podemos citar: a estação do ano, temperatura, umidade, duração da luminosidade diária, irradiação solar, competição, parasitismo, predação e tipo de cadeia alimentar [8].

Whicker e Schultz [8] apontam que a combinação de variáveis ambientais, químicas, físicas e biológicas, que causam estresses aos organismos vivos, não possui limite mensurável.

A biodiversidade sempre foi impedimento para desenvolver uma radioproteção ambiental pela multiplicidade de fatores a serem analisados. Visando criar um mecanismo tecnicamente defensável de proteção para a biota contra os efeitos da radiação ionizante a International Commission on Radiological Protection (ICRP) desenvolveu uma série de recomendações. Em 2003 [1] editou uma recomendação montando um quadro geral sobre a proteção da biota. Em 2007 [2] afirmou a necessidade de proteção da biota de forma explícita e definiu o conceito de organismo de referência e em 2009 [3] desenvolveu os mecanismos de cálculo de dose.

O presente trabalho visa analisar o arcabouço proposto pela ICRP sobre as medidas de radioproteção ambiental baseada no cálculo de dose absorvida na biota.

2 Metodologia

2.1 O Sistema Mundial de Radioproteção

O sistema de radioproteção funciona através de uma série de instituições. A base do sistema é composta por três instituições: A United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), a ICRP e, a International Atomic Energy Agency (IAEA). A UNSCEAR é um órgão da Organização das Nações Unidas (ONU) e fica responsável pela coleta de dados sobre o efeito biológico das radiações. Com o levantamento dos dados a ICRP prepara recomendações, dando um caráter prático ao conhecimento de radiobiologia e radioproteção. Por fim, a IAEA com base nessas recomendações da ICRP edita guias e recomenda a adoção desses guias pelos países membros, através de legislação

própria. Várias instituições são convidadas por esses órgãos para auxiliar na formulação dos conceitos e valores utilizados na radioproteção.

2.2 A Radioproteção da Biota

Com relação à radioproteção da biota a UNSCEAR está em fase de levantamento de dados sobre os efeitos biológicos da radiação na biota, com previsão de liberação de uma publicação, no final de 2011. A IAEA ainda não definiu questão sobre a radioproteção da biota, ela editou um documento sobre os conceitos éticos e filosóficos da radioproteção da biota [9]. A ICRP, por sua vez está desenvolvendo uma série de recomendações focando a radioproteção da biota.

2.3 A Radioproteção da Biota na Ótica da ICRP.

A ICRP tem várias publicações com referência à radioproteção do ambiente, as mais importantes foram as recomendações 26 [4] de 1977, 60 [17] de 1990 e 103 [2] de 2007. Além dessas existem a publicação 91 [1] de 2003, intitulada: *A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species*, e a publicação 108 [3], de 2009, intitulada: *Environmental Protection: the concept and use of reference animals and plants*. As três primeiras publicações (as recomendações 26, 60 e 103) são recomendações gerais de radioproteção, mencionando superficialmente a radioproteção ambiental. Já as duas últimas publicações (as publicações 91 e 108) são específicas para a radioproteção ambiental.

2.3.1 Recomendação Número 26 da ICRP (1977).

Nessa recomendação [4] foi feita a primeira tentativa de radioproteção ambiental baseada na biota. A visão antropocêntrica vigente à época criou o paradigma a ser quebrado: se o homem está protegido a biota estará, A recomendação da ICRP afirma que: *“Although the principal objective of radiation protection is the achievement and maintenance of appropriate safe conditions for activities involving human exposure, the level of safety required for the protection of all human individuals is thought likely to be adequate to protect other species, although not necessarily individual members of those species. The Commission therefore believes that if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently”*. Essa afirmação foi posta em dúvida por vários autores [10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16], incluindo a própria ICRP nas suas recomendações 60, 91, 103 e 108 [1, 2, 3 e 17].

2.3.2 Recomendação Número 60 da ICRP (1990).

Nessa recomendação [17], a ICRP colocou em dúvida a afirmação: *“The Commission therefore believes that if man is adequately protected then other living things are also likely to be sufficiently”* reconhecendo, agora, que em alguns casos, indivíduos da biota podem estar em risco. Na recomendação 60 [17], a ICRP reconhece que: *“The Commission believes that the Standards of environmental control needed to protect man to the degree currently thought desirable will ensure that other species are not put at risk. Occasionally, individual members of nonhuman species might be harmed, but not to the extent of endangering whole species or creating imbalance between species. At the present time, the Commission concerns itself with mankind environment only with regard to the transfer of radionuclides through the environment, since this directly affects the radiological protection of man”*. Mesmo com a ressalva de risco individual o sistema da ICRP

continuava baseado no homem e todos os procedimentos ainda visavam à proteção de uma única espécie: o ser humano.

2.3.3 Recomendação Número 91 da ICRP (2003).

Esta recomendação [1] é a primeira a desenvolver um sistema de proteção da biota dando bases e objetivos para a radioproteção da biota, utilizando-se de princípios éticos e científicos. Indica uma forma de avaliar o impacto radiológico ambiental, em termos de proteção do ambiente e não da espécie humana, como anteriormente apregoava. E por fim, indica a necessidade de se criar um sistema de radioproteção integrado, entre o proposto para a espécie humana e para as espécies não humanas (biota). Os objetivos dessa recomendação são:

- *Defining how the ICRP can contribute to the attainment of society's goals of environmental protection by developing a protection policy based on scientific and ethical-philosophical principles;*
- *Suggesting a framework for the assessment of the impact of ionizing radiation in the environment based on science to support requirements for protection of the environment against harmful effects of ionizing radiation; and*
- *Showing how such a proposal for assessment of impact of ionizing radiation in non-human species can be interfaced with or integrated into an overall system of radiological protection.*

Essa recomendação aponta evidências científicas da necessidade de proteção do ambiente e de como essa proteção pode afetar de forma direta ou indireta a saúde do ser humano, apontando a necessidade de complementar as leis nacionais de forma a proteger o ambiente dos efeitos não desejados da radiação.

A evolução dos conceitos de radioproteção ambiental são avaliados por essa recomendação, apontando diversos enfoques. Resumidamente a evolução da radioproteção ambiental, segundo a ICRP, foi

1. Uma visão antropocêntrica, sendo o homem parte do ambiente, sua proteção protegerá as outras espécies
2. Demonstrar através de cálculos que a dose de 1mSv ano proposta como limite garante que os animais e plantas da cadeia alimentar humana receberão doses menores e estarão protegidos como populações [18];
3. O uso ou proposta de uso de limite de dose absorvida como forma de proteção da biota [19, 20, 21 e 22];
4. A utilização da avaliação de risco ambiental para avaliar os efeitos dos radionuclídeos na biota, com a utilização de modelos dosimétricos para estimar as taxas de doses que não produzem efeitos mensuráveis em alguns organismos chaves do ecossistema [23 e 24];
5. A utilização de animais e plantas de referência para definir um escopo de proteção que englobaria modelos dosimétricos, dados sobre estimativa de exposição e dados sobre a relação exposição-efeito biológico que poderia ser usado para tomada de decisão em diferentes circunstâncias de controle de práticas e de intervenção [12, 14, 25 e 26];
6. Definir de forma aplicável um sistema de proteção da biota regional ou nacional [27 e 28].

2.3.4 Recomendação Número 103 da ICRP (2007).

Essa recomendação [2] não trata diretamente da proteção da biota, e sim dos princípios que norteiam a radioproteção. Sua principal contribuição para a radioproteção da biota foi a quebra do paradigma antropocêntrico, afirmando que a proteção do ambiente não pode ficar atrelada a proteção do homem e que as autoridades nacionais precisam criar mecanismos para comprovar essa proteção, como pode ser visto na afirmação: *“However, the Commission considers that it is now necessary to provide advice with regard to all exposure situations. It also believes that it is necessary to consider a wider range of environmental situations, irrespective of any human connection with them. The Commission is also aware of the needs of some national authorities to demonstrate, directly and explicitly, that the environment is being protected, even under planned situations”*.

Outro fato relevante nesta recomendação foi a definição de animal e planta de referência (APR), como sendo: *A Reference Animal or Plant is a hypothetical entity, with the assumed basic biological characteristics of a particular type of animal or plant, as described to the generality of the taxonomic level of family, with defined anatomical, physiological, and life-history properties, that can be used for the purposes of relating exposure to dose, and dose to effects, for that type of living organism*

2.3.5 Recomendação Número 108 da ICRP (2009).

Essa recomendação [3] define os conceitos e a utilização dos animais e plantas de referência. Aponta a necessidade de uma radioproteção comum ao ser humano e ao ambiente, explicita critérios para a escolha de APR, descreve em termos anatômicos, fisiológicos e ecológicos de um grupo de APR, explicita as vias de exposição dos APR descritos, calcula os fatores de conversão de concentração de atividade em taxa de dose absorvida para os APR.

Além dessas informações para o cálculo da dose, ela coleta informações sobre a relação dose-efeito nos APR e as avalia em termos de limites derivados, propondo correlação entre faixas de doses e possíveis efeitos biológicos, propondo aplicações e extrapolações, ressaltando as diferenças na biologia, nas situações de exposição, na dosimetria da radiação e nos efeitos da radiação nos APR.

Com relação aos critérios de proteção da biota, essa recomendação utiliza o nível suprapopulacional, se preocupando com a diversidade biológica e não com o indivíduo, como pode ser visto na frase a seguir: *“Since then, the Commission has published its revised set of recommendations [2], in which it considered it appropriate to broaden its in order to address the protection of the environment directly, and thus to include in its general aims the prevention or reduction of the frequency of deleterious radiation effects in the environment to a level where they would have a negligible impact on the maintenance of biological diversity, the conservation of species, or the health and status of natural habitats, communities, and ecosystems. The Commission also stated that it believed that its approach to environmental protection should be commensurate with the overall level of risk, and thus optimized, and that it should be compatible with other approaches being made to protect the environment.”*

Um conceito questionável, do ponto de vista radiológico, é a utilização da dose absorvida, que na radioproteção humana foi substituída pela dose equivalente e por fim pela dose

efetiva que expressa melhor às diferenças de respostas biológicas dos diferentes tipos de radiação e das diferentes sensibilidades de órgãos e tecidos. Ainda como questionamento, mas dessa vez ecológico está na proteção em níveis ecológicos de comunidade e ecossistemas e não de indivíduos da biota, isso particularmente no caso de espécies ameaçadas de extinção.

3 Conclusões

Houve uma alteração do conceito de radioproteção ambiental, anteriormente antropocêntrico, para uma avaliação do impacto radiológico ambiental em que seja levada em consideração a biota. O arcabouço técnico atual aponta a avaliação da dose absorvida na biota como um caminho tecnicamente defensável. A ICRP propôs a utilização de faixa de doses e seus possíveis efeitos biológicos, diferentemente do conceito utilizado na radioproteção humana em que é utilizado o conceito de limite de dose. A utilização do conceito de homem referência foi incorporada no modelo, com a escolha de alguns organismos de referência. Outra diferença de abordagem entre as radioproteções (humana e da biota) é o enfoque de proteção dada ao indivíduo na primeira e nas populações no caso da radioproteção da biota. Mesmo não havendo consenso na forma de se proteger a biota, o arcabouço montado pela ICRP a partir do ano de 2000, tem se sedimentado apontando um caminho viável tecnicamente e defensável do ponto de vista ético e moral, podendo ser considerado um avanço em relação ao conceito anterior.

A radioproteção ambiental sofreu uma evolução, passando da visão antropocêntrica, para uma ampliação de abrangência com a avaliação da cadeia alimentar humana em termos de dose. O uso do conceito de limite de dose absorvida foi proposto bem como a aplicação do conceito de avaliação de risco ambiental, seguido do conceito de APR. Por fim a ICRP [3] montou um arcabouço de proteção da biota baseada no conceito dose absorvida pelo APR que é científico, ético e moralmente defensável.

A utilização da dose absorvida expressa bem a deposição de energia pela radiação na matéria, mais não é capaz de expressar dois fatos relevantes reconhecidos pela radioproteção humana: os diferentes efeitos biológicos dos diferentes tipos de radiação e as diferenças de sensibilidade de diferentes órgãos, tecidos e organismos, fatos estes levados em conta com a dose equivalente, no caso da radiação e a dose efetiva, no caso da radiação e da sensibilidade.

O estabelecimento de fatores de ponderação para a radiação e para os tecidos, órgãos e organismos parece ser o futuro, pois permite a convergência das radioproteções humana e ambiental de forma a harmonizar os conceitos, criando uma radioproteção única como apregoado pela ICRP.

Referências

1. International Commission on Radiological Protection. 2003. *A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species*. Edição: J. Valentin. Vol. 93. New York: Elsevier, 201-265 pp.
2. International Commission on Radiological Protection. 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Edição: J. Valentin. Vol. 103. New York: Elsevier.

3. International Commission on Radiological Protection. 2009. *Environmental Protection: the concept and use of reference animals and plants*. : J. Valentin. Vol. 103. New York: Elsevier.
4. International Commission on Radiological Protection. 1977. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Edição: J. Valentin. Vol. 26. New York: Elsevier.
5. Odum, E. P. 1985. *Ecologia*. 1. Tradução: Marcia cabrita. Rio de Janeiro: Koogan. 434 pp.
6. Odum, E. P., e G. W. Barret. 2007. *Fundamentos de ecologia*. tradução da 5 edição americana. São Paulo, São Paulo: Thompson,.
7. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation – UNSCEAR. 2000. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly: UNSCEAR 2000 Report to the general assembly with scientific annex. UNSCEAR. 20 pp.
8. Whicher, F. W e Shultz, V. 1982. Radioecology: nuclear energy and the environment. CRC press. Boca Raton, FL.
9. International Atomic Energy Agency. 2002. Ethical considerations in protecting the environment from the effects of ionizing radiations. A report for discussion. Vienna: IAEA, 36 pp.
10. Woodhead D.S. 1979. Methods of dosimetry for aquatic organisms. In Methodology for assessing impacts of radioactivity in aquatic ecosystems IAEA Tech. Report. 190 43-96.
11. Amiro, B.D. 1997. Radiological dose conversion factor for generic non-human biota used for screening potential ecological impacts. J. Environ. Radioactivity, v.35, nº1, p. 35-51.
12. Pentreath, R.J. 1999. A system for radiological protection of the environment: some initial thoughts and ideas. J. Radiol. Prot. v. 19, p. 117 e 128.
13. Pentreath R.J. and Woodhead D.S. 2001. A system for protecting the environment from ionizing radiation: selecting reference fauna and flora, and the possible dose models and environmental geometry that could be applied to them. Sci. Total Environ. v. 277. p.33-43.
14. Pentreath. R.J. 2002. Radiation protection of people and environment developing a common approach. J. Radiol. Prot. v. 22, p.1-12.
15. Woodhead, D.S. 2003. A possible approach for the assessment radiation effects on populations of wild organisms in radionuclide-contaminated environments. Journal of Environmental Radioactivity, v. 66, p. 181-213.
16. Pereira, W.S., Kelecom, A. and Py Junior, D.A. 2007. Utilização de peixes como biomonitor para fins de radioproteção ambiental em ecossistemas aquáticos continentais. Um modelo conceitual. *Oecol. Bras.* v. 12. nº 3. p. 542-552.
17. International Commission on Radiological Protection.. 1990. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Edição: J. Valentin. Vol. 60. New York: Elsevier.
18. IAEA (1992). Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards. Technical Reports Series No. 332. IAEA, Vienna, Austria.
19. USDOE (1993). Radiation Protection of the Public and the Environment. DOE Order 5400.5. US Department of Energy, Washington, DC, USA
20. USDOE (1996) Radiation protection of the public and the environment. Federal Register 61 (36), 6799–6801.
21. UNSCEAR (1996). Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annex. United Nations, New York, NY, USA.
22. Sazykina, T.G., Kryshev, I.I. (1999). Estimation of the control concentration of radionuclides in sea water considering health physics and radioecological criteria. *Atom. Energ.* 87, 302–307. (in Russian).
23. Bird, G.A., Thompson, P.A., Macdonald, C.R., et al. (2003). Assessment of the Impact of radionuclide releases from Canadian nuclear facilities on non-human biota. Third

- International Symposium on Protection of the Environment from Ionizing Radiation. (SPEIR 3). IAEA Vienna, Austria, pp. 241–247.
24. Thompson, P.A., Macdonald, C.R., Harrison, F. (2003). Recommended RBE Weighting Factor for the Ecological Risk Assessment of Alpha-emitting Radionuclides. In: Third International Symposium on Protection of the Environment from Ionizing Radiation (SPEIR 3). IAEA, Vienna, Austria.
 25. Pentreath, R.J. (2003). Evaluating the Effects of Ionizing Radiation Upon the Environment. In: Third International Symposium on the Protection of the Environment from Ionizing Radiation (SPEIR 3). IAEA, Vienna, Austria
 26. IUR (2000). Doses and Effects in Non-human Systems. International Union of Radioecology, Oslo, Norway
 27. Copplestone, D., Bielby, S., Jones, S.R., et al. (2001). Impact assessment of ionising radiation on wildlife. Environment Agency (UK) R&D Publ. 128, 222pp.
 28. Strand, P., Brown, J.E., Woodhead, D.S., et al. (2000). Delivering a System and Framework for the Protection of the Environment from Ionising Radiation. Tenth International Congress of the IRPA, Hiroshima, Japan, 14–19 May 2000, P-2a-116, 5 pp