

REGULAMENTAÇÃO E DECISÕES NA AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DOS RESÍDUOS CONTENDO RADIOATIVIDADE

Adir Janete Godoy dos Santos

Centro de Metrologia das Radiações
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN – SP)
Av. Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP
ajgodoy@ipen.br

RESUMO

A indústria de processamento e síntese dos compostos se desenvolveu a partir da mineração, beneficiamento e tratamento químico dos minerais, de origem sedimentar, ígnea ou metamórfica, que parcialmente determinam a composição radioativa do resíduo industrial produzido. Os radionuclídeos naturais ocorrem inicialmente como integrantes na composição de minerais e rochas e são distribuídos nos compartimentos ambientais. A atividade humana pode alterar a concentração destes radionuclídeos nos diversos compartimentos do ecossistema. A radioatividade natural é originada principalmente pelas séries de decaimento do urânio e tório e pelo ^{40}K e varia com as características geoquímicas do local. O presente trabalho aborda o levantamento das principais regulamentações sobre os resíduos sólidos contendo radioatividade, gerados na atividade industrial, questões ambientais inerentes e decisões a serem adotadas na avaliação do impacto ambiental radiológico.

1. INTRODUÇÃO

Algumas atividades humanas podem resultar em alterações significativas da concentração e da distribuição dos radionuclídeos nos vários compartimentos do ecossistema. Os exemplos mais importantes desta situação são as instalações que compõem o ciclo do combustível nuclear. Outras atividades antrópicas também podem ocasionar essas modificações no meio ambiente, pelo uso de materiais que contêm elementos radioativos na sua composição. Enquadra-se neste segundo caso, toda a atividade industrial que utiliza minérios contendo urânio e tório associados, seus produtos, sub-produtos e resíduos (SANTOS, 2002). Esta atividade industrial inclui a produção de ácido fosfórico a partir de rochas fosfáticas, combustão do carvão, produção de energia a partir de combustíveis fósseis, extração mineral e emprego de bens minerais (UNSCEAR, 1993).

Os resíduos sólidos provenientes das atividades humanas são tratados e disponibilizados de acordo com a legislação, normas técnicas e normas regulamentadoras. Como metodologia para o tratamento térmico de resíduos sólidos pode-se citar a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA número 316, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos (CONAMA, 2002). Esta resolução especifica que os rejeitos radioativos deverão seguir a normalização específica da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. A disponibilização dos resíduos sólidos no solo é o método mais adotado de estocagem dos resíduos sólidos radioativos. Geralmente, é efetuado em condições controladas, a céu aberto. Nesta prática, os radionuclídeos naturais de interesse no solo, ar, água e organismos vivos, na área circunvizinha, incluem o ^{40}K e os

isótopos das séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th (UNSCEAR, 1988). Exposições humanas ocorrem por irradiação externa e por irradiação interna, após ingestão ou inalação dos radionuclídeos.

2. NORMALIZAÇÃO DOS RESÍDUOS CONTENDO RADIOATIVIDADE

As doses efetivas resultantes da incorporação de radionuclídeos naturais, provenientes do ar, alimentos e água, pode ser determinada pela medida da concentração no organismo ou estimada pela concentração dos materiais incorporados.

2.1. Regulamentação Internacional

Até a década de 1960, a radiação natural era vista como aquela cujo controle pelo homem era desnecessário, incluindo-se, neste caso, as radiações ionizantes originadas de fontes cósmica e terrestre natural. A exposição total a essas fontes era considerada praticamente constante e equivalente a 1mSv ano^{-1} (UNSCEAR, 1977).

A partir da década de 1970, passou a existir uma preocupação cada vez maior com relação às exposições decorrentes da radiação natural, cujas fontes, variações e conseqüente detrimento da população tornaram-se, então, objeto de intensa pesquisa. Inicialmente, o conceito de radiação natural tecnologicamente aumentada, TENORM, era limitado à ocorrência de níveis elevados de radionuclídeos naturais, originados em atividades humanas específicas.

A “International Commission on Radiological Protection, ICRP” (ICRP, 1977) introduziu então, conceitos distintos para “radiação natural normal” e “radiação natural aumentada”. Desse modo, toda radiação ionizante de fontes terrestre e cósmica que, aumentada de alguma forma pelo homem, produza incrementos apreciáveis da exposição à radiação, está incluída no segundo caso. A aplicação dos limites de dose se restringiu apenas aos componentes da radiação natural resultantes de atividades antrópicas ou tecnologicamente aumentada.

Em 1982, foi publicada uma extensa revisão sobre as fontes de radiação natural e tecnologicamente aumentada, bem como as doses decorrentes, alterando-se então o valor médio estimado do equivalente de dose efetiva anual de 1 para 2 mSv (UNSCEAR, 1982). Esse aumento foi atribuído principalmente à dose no pulmão, causada pelos produtos de decaimento do radônio (^{222}Rn) e do torônio (^{220}Rn), ressaltando-se as exposições no interior de residências. Posteriormente, a ICRP concluiu que a distinção adotada anteriormente não era a mais apropriada, pois não ocorreu modificação da fonte, mas sim uma modificação no estilo de vida do homem (ICRP, 1984).

Em 1985, novas discussões sobre exposições à radiação tecnologicamente modificada e sobre a necessidade de atuação dos órgãos regulamentadores, no sentido de limitar os níveis de radiação natural aumentada, foram realizadas no meio científico (Hamilton, 1985). Nessa ocasião, criou-se o conceito de “exposição voluntária”, que diz respeito à parcela das exposições à radiação que pode ser controlada por mudanças adequadas nos hábitos de vida.

Dessa forma, poder-se-ia diminuir as exposições aos raios cósmicos, radiação gama, exposição ao radônio e incorporação de outros radionuclídeos, reduzindo o equivalente de dose efetiva aos níveis inferiores a 1mSv ano^{-1} . Exposições acima deste nível poderiam ser

consideradas “voluntárias”. A partir dessa data, observou-se que em algumas situações as exposições voluntárias eram mais elevadas e atingiam uma parcela maior da população, do que as exposições às fontes artificiais, regulamentadas.

Toda essa questão motivou, em 1990, a Conferência Internacional sobre altos níveis de radiação natural (Sohrabi e col., 1993), e o assunto novamente foi abordado pela ICRP (ICRP,1991), que revisou a sua recomendação de 1977 (ICRP, 1977). Desse modo, a ICRP (ICRP,1991) aconselhou que, a partir de 1991 fossem aplicados os limites de dose de 1 mSv ano⁻¹ para toda a radiação ionizante de fontes terrestre e cósmica, natural ou tecnologicamente aumentada pelo homem, ratificando então a necessidade do controle da exposição do homem à radiação natural e à irradiação natural tecnologicamente aumentada, que produzam incrementos de dose significativos.

Desde então, o interesse sobre a exposição à radiação tecnologicamente aumentada voltou-se principalmente para as atividades industriais localizadas, que redistribuem os materiais radioativos naturais da litosfera para a biosfera, tais como a geração de energia a partir do carvão, gás natural e turfa; mineração e beneficiamento da monazita; o emprego das rochas fosfáticas; materiais e agregados para a construção civil. Esse assunto tem sido objeto de sucessivas avaliações por parte do “United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation” UNSCEAR (UNSCEAR, 1977; 1982; 1988; 1993, 2000).

Neste contexto, a indústria mineral extrativa, de beneficiamento, de transformação primária, de transformação secundária pode ser classificada como uma das fontes potenciais de modificações da radioatividade natural no ambiente, provocada pelas atividades tecnológicas (TENORM). Estas modificações podem ocasionar um aumento da dose devido à radiação natural, pelas suas atividades industriais propriamente ditas. Tais atividades originam impactos ambientais pela manipulação da matéria-prima e produtos, além da geração de resíduos sólidos contendo radioatividade.

2.1.1. Regulamentação no Brasil

No Brasil, a regulamentação relativa às atividades humanas envolvendo fontes naturais de radiação, que contemple a fiscalização de instalações que manuseiam radionuclídeos naturais associados ao resíduo industrial é recente. A norma Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-industriais, CNEN-NN-4.01, estabelece os requisitos de segurança e proteção radiológica de instalações mínero-industriais que manipulam, processam e armazenam minérios, matérias-primas, estéreis, resíduos, escórias e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, simultaneamente ou em separado, que possam causar exposições indevidas de indivíduos do público e de trabalhadores à radiação ionizante. Aplica-se às atividades em instalações mínero-industriais em atividade, suspensas ou que tenham cessado suas atividades, destinadas à lavra, ao beneficiamento físico, químico e metalúrgico e à industrialização de matérias-primas e resíduos que contenham radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, abrangendo as etapas de implantação, operação e descomissionamento da instalação (CNEN, 2005).

A norma experimental da Comissão Nacional de Energia Nuclear, “Licenciamento de instalações radiativas”, CNEN-NE-6.02, de outubro de 1984 (CNEN, 1984), estabelece que estão isentas de processo de licenciamento as instalações que envolvam, em qualquer

instante: (a) substâncias radioativas com atividade específica inferior a 100 Bq g^{-1} ; (b) radionuclídeos cujas atividades totais, dentro de cada classe, não excedam os seguintes valores: classe A, $0,1 \text{ mCi}$ ($3,7 \times 10^3 \text{ Bq}$); classe B, 1 mCi ; classe C, 10 mCi e classe D, 100 mCi . Os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{232}Th são considerados classe A, ou seja, sua radiotoxicidade é muito alta.

Outra norma da CNEN, “Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas”, CNEN-NE-6.05, publicada no Diário Oficial da União (DOU) em 17 de dezembro de 1985, estabelece que rejeitos sólidos podem ser eliminados no sistema de coleta de lixo urbano, desde que a sua atividade específica não exceda $7,5 \times 10^4 \text{ Bq kg}^{-1}$ (CNEN, 1985).

A norma experimental da CNEN, “Diretrizes básicas de radioproteção”, CNEN-NE-3.01, de 1988, estabelece limites para trabalhadores e o público, decorrente de incrementos de exposição devido às instalações nucleares e radioativas (CNEN, 1988).

Os estudos citados neste trabalho demonstram claramente que a exposição à radiação natural fez parte de algumas atividades humanas, ao longo do tempo. O desenvolvimento tecnológico se, por um lado contribuiu para a melhoria da qualidade de vida em termos sociais e econômicos, por outro, aumentou o risco de exposição à radiação natural. Algumas atividades humanas estão, portanto, diretamente relacionadas com a exposição à radiação.

Assim, é importante conhecer-se a dose e o risco inerente a todas as práticas que envolvem TENORM, para que se possa avaliar conjuntamente o benefício/detrimento advindo da prática e analisar o custo necessário para minimizar o risco.

3. DECISÕES NA AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

Em vista do exposto, torna-se evidente a necessidade da avaliação do impacto radiológico ambiental ocasionado pela disponibilização ambiental dos resíduos sólidos contendo radioatividade. Para a estimativa da dose efetiva, devido à irradiação interna e externa, estes cálculos devem considerar as concentrações dos radionuclídeos de interesse, as vias de transferência, as vias críticas e o grupo crítico da população. As principais vias de transferência dos radionuclídeos naturais, dos resíduos sólidos estocados no meio ambiente, para o homem, são a inalação, ingestão e a exposição direta à radiação beta e gama no ar.

Na via de transferência por inalação deve-se considerar todos os radionuclídeos gasosos presentes. Dos radionuclídeos naturais, os elementos gasosos que emanam do resíduo sólido são o polônio e o radônio. Os isótopos de radônio e polônio são considerados críticos, a partir da sua meia-vida, concentração, taxa de exalação e diluição atmosférica.

No estudo da ingestão há que se considerar a disponibilidade química dos radioisótopos, do resíduo para o solo e água. Portanto, a avaliação do impacto radiológico ambiental deve ser complementada pelo estudo da disponibilidade química dos isótopos radioativos no resíduo, bem como no solo, água e ar da área de estocagem do resíduo em questão.

Sob o ponto de vista ambiental, uma questão importante se refere à localização dos radionuclídeos na estrutura sólida do resíduo, como material retentor. A questão é se os radionuclídeos encontram-se distribuídos uniformemente na estrutura cristalina ou amorfa do

resíduo sólido ou se estão contidos em fases químicas distintas. Este questionamento é um problema comum em geoquímica e a sua solução não é tão imediata, exigindo estudos que envolvem a determinação das formas químicas dos vários componentes na matriz. A informação necessária em termos de impacto ambiental não é somente a quantificação do elemento propriamente dito, mas sim o conhecimento das formas como ele se encontra ligado ou “aprisionado” na estrutura da amostra.

3.1. Disponibilidade química

Os principais processos físicos, biológicos e químicos que definem o comportamento dos radionuclídeos de meia-vida longa num resíduo sólido podem ser identificados como segue.

Na estrutura sólida de um resíduo, os componentes em concentração no nível de traço estão presentes em diferentes formas químicas e em diferentes fases, sendo carregados por adsorção superficial, associados aos carbonatos, associados aos óxidos, principalmente os de ferro e manganês muito comuns em matrizes naturais, complexado pela matéria orgânica, associado aos sulfetos ou presente no arranjo espacial estrutural residual dos sólidos amorfos ou cristalinos. Quando presentes nas águas intersticiais podem ocorrer como partículas ionizadas, íons inorgânicos ou orgânicos complexos e compostos quelados. Estas associações são inter cruzadas e dependentes da oxidação e redução do meio, composição química e parâmetros físico-químicos envolvidos, conforme apresentado na Figura 1.

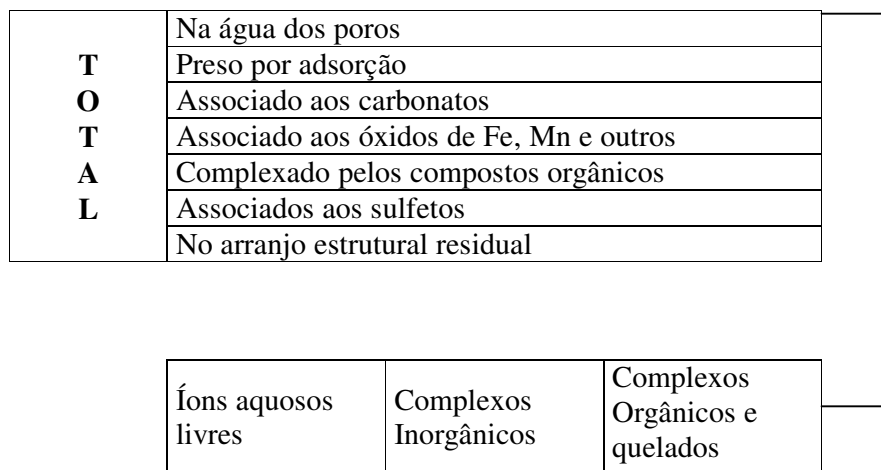
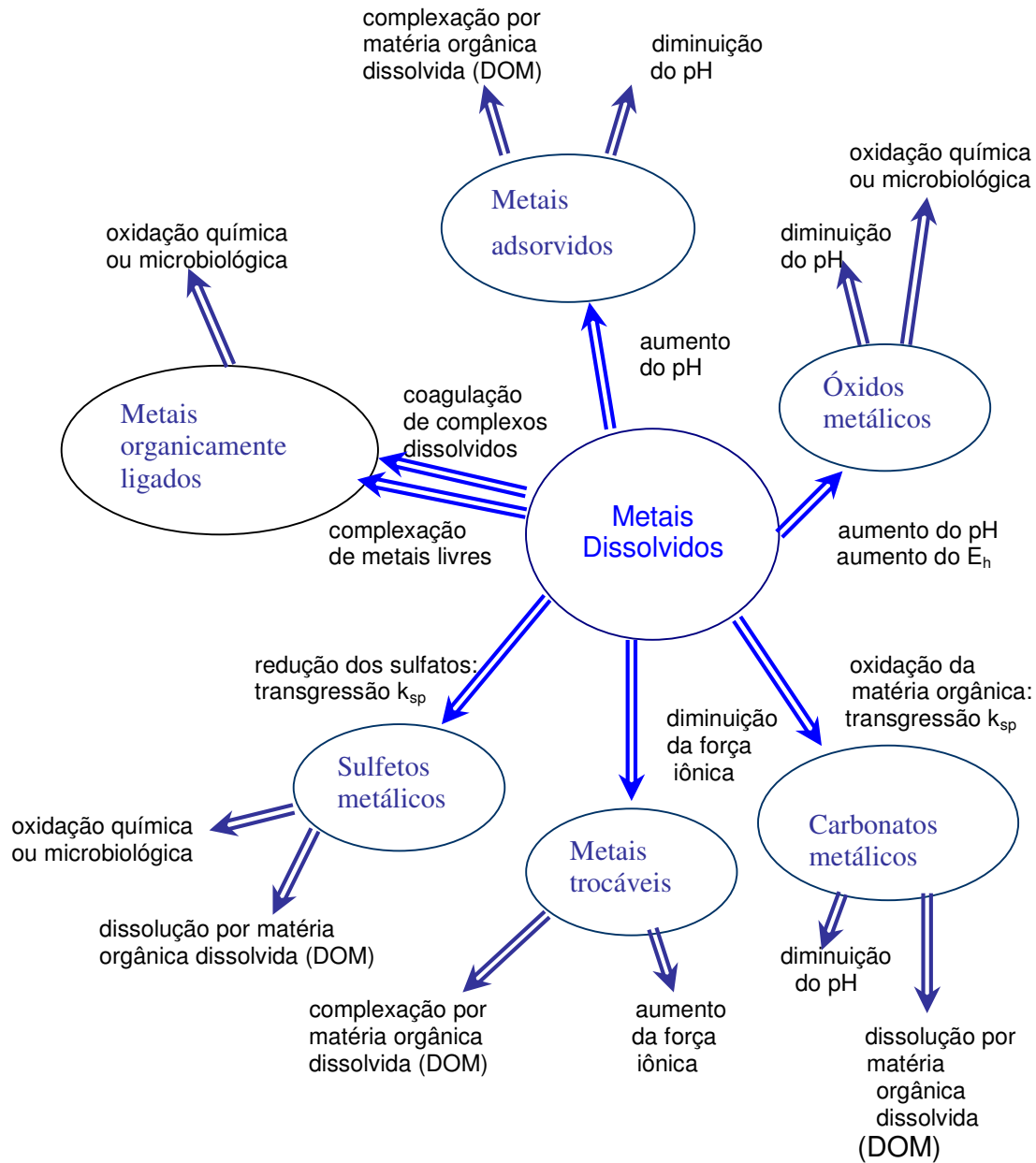


Figure 1. Formas químicas, em fases diferentes, dos componentes presentes em concentração traço no resíduo sólido.

Os metais traço integram a matriz sólida por afinidade ou comportamento químico similar aos macros constituintes, estando sujeitos aos fenômenos da oclusão, co-precipitação, arraste, adsorção ou absorção.

Em um processo industrial onde é gerado um resíduo sólido, ou nos compartimentos ambientais, os metais traço podem ser redistribuídos entre as diferentes frações de uma fase

sólida por muitos processos químicos e no decorrer do tempo pelos componentes bióticos e/ou abióticos atuantes na matriz, modificando as formas químicas das espécies ou as formas às quais as espécies estão associadas. Os tipos de reações que podem ocorrer nessa redistribuição estão sumariamente apresentados na Figura 2.



pH = potencial hidrogeniônico, E_h = potencial de oxi-redução do meio, DOM = matéria orgânica dissolvida, POM = matéria orgânica particulada.

Figure 2. Processos que podem redistribuir traços de radioisótopos entre as diferentes frações de uma fase sólida.

3. CONCLUSÕES

A indústria mineral extrativa, de beneficiamento, de transformação primária, de transformação secundária pode ser classificada como uma das fontes potenciais de modificações da radioatividade natural no ambiente, provocada pelas atividades tecnológicas (TENORM). Estas modificações podem ocasionar um aumento da dose devido à radiação natural, pelas suas atividades industriais propriamente ditas. Tais atividades originam impactos ambientais pela manipulação da matéria-prima e produtos, além da geração de resíduos sólidos contendo radioatividade.

A prática de estocagem a céu aberto, de resíduos sólidos contendo radioatividade, deve considerar o solo, a água e o ar como possíveis vias críticas, para o incremento da estimativa de dose.

A disponibilidade química dos isótopos radioativos, presentes em concentração muito baixa nos resíduos sólidos, é afetada pela concentração e característica das espécies químicas presentes na matriz e no solo empregado na deposição final no ambiente.

REFERÊNCIAS

1. A. J. G. Santos. Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb . **PhD Thesis**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 165p, (2002). In Portuguese.
2. CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Licenciamento de instalações radiativas**. Norma experimental CNEN-NE-6.02. Brasília, (1984).
3. CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas**. Norma experimental CNEN-NE-6.05, Brasília, 1985.
4. CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de radioproteção**. Norma experimental CNEN-NE-3.01. Brasília, 1988
5. CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-industriais**, CNEN-NN-4.01, Brasília, 2005.
6. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente. *Dispõe sobre procedimentos e critérios para o tratamento térmico de resíduos*. **Resolução Conama Número 316**, Brasília, (2002).
7. E. I. HAMILTON. *Exposure to enhanced natural radiation and its regulatory implications*. **Sci. Total Environ. Special Issue**, v. 45, (1985).
8. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the International commission of the Radiological Protection*. **ICRP Publication 26**, Pergamon Press, Oxford. (1977). (ICRP-26).
9. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation*. **ICRP Publication 39**, Pergamon Press, Oxford, (1984). (ICRP-39).
10. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **ICRP Publication 60**, Pergamon Press, Oxford, (1991). (ICRP-60).
11. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.

- Protection against Radon-222 at home and work. **ICRP Publication 65**, Ann. ICRP 23 2, Pergamon Press, Oxford, (1993). (ICRP-65).
12. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. **ICRP Publication 67**, Pergamon Press, Oxford, 1993.
 13. A. J. G. Santos. Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb . PhD Thesis, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 165p, (2002). In Portuguese.
 14. M. Sohrabi. In: Proceedings of international conference on high levels of natural radiation. Ramsar, p. 3-7, (1993).
 15. UNSCEAR 77. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 1977. **Sources and effects of radiation**. United Nations, New York, 1977.
 16. UNSCEAR 82. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 1982. **Ionizing Radiation: sources and biological effects**. United Nations, New York, 1982.
 17. UNSCEAR 88. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations**. Report to the General Assembly, with Annexes, United Nations, New York, 1988.
 18. UNSCEAR 93. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations.**, Report to the General Assembly, with Annexes. New York, 1993.
 19. UNSCEAR 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources of Ionizing Radiations.**, Report to the General Assembly, with Annexes. New York, 2000.