

104900-19



## ASPECTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM MINAS DE URÂNIO

Elias Palacios e Célia M. Napolitano

INFORMAÇÃO IEA 062  
IEA - Inf - 062

NOVEMBRO/1978

## **CONSELHO DELIBERATIVO**

### **MEMBROS**

Klaus Reinach – Presidente  
Roberto D'Utra Vaz  
Helcio Modesto da Costa  
Ivanu Humbert Marchesi  
Admar Cervellini

### **PARTICIPANTES**

Regina Elisabete Azevedo Beretta  
Flávio Gori

## **SUPERINTENDENTE**

Rômulo Ribeiro Pieroni

**ASPECTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM MINAS DE URÂNIO**

**Elias Palacios e Célia M. Napolitano**

**CENTRO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E DOSIMETRIA**  
**CPRD - APMA 003**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
**SÃO PAULO - BRASIL**

**INIS Categories and Descriptors**

**C53**

**B31**

**ICRP**

**Recommendations**

**Uranium ores**

**Mining**

**Radiation protection**

**Personnel**

**Radiation hazards**

**Radioactive wastes**

**Waste management** ✓

# ASPECTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM MINAS DE URÂNIO

Elias Palacios e Célia M. Napolitano

## RESUMO

Neste trabalho descrevem-se os princípios básicos de proteção radiológica estabelecidos pela "International Commission on Radiological Protection - ICRP" e discutem-se os principais riscos a que se encontram expostos os trabalhadores de uma mina de urânio. Finalmente, são formulados alguns critérios para encerrar os problemas de gestão de resíduos radioativos que aparecem durante a exploração do urânio.

## 1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

O objetivo básico da proteção radiológica consiste em resguardar o homem dos perigos potenciais da radiação ionizante e ao mesmo tempo tornar possível à raça humana desfrutar de todos os benefícios que se podem originar do uso da energia atômica.

Os indivíduos devem ser resguardados da ocorrência de efeitos biológicos agudos e tardios, enquanto que seus descendentes devem ser protegidos dos efeitos hereditários induzidos pela radiação.

Os efeitos biológicos agudos podem ser evitados, mantendo-se as doses a níveis inferiores aos valores limiares que a maioria das lesões somáticas apresentam. A probabilidade de ocorrência de efeitos tardios ou hereditários deve ser limitada a níveis considerados aceitáveis. Isto é mais difícil de ser conseguido em virtude do fato de que à doses baixas, a frequência dos efeitos se confundem com aquela provocada por outras causas.

É prática normal da proteção radiológica adotar uma hipótese conservadora em relação aos efeitos biológicos produzidos pela radiação. Esta hipótese consiste em considerar que existe uma relação linear sem limiar, entre a dose e a probabilidade de efeitos tardios, tais como a indução de neoplasias e os efeitos deletérios hereditários. Uma consequência implícita desta hipótese é o fato de que do ponto de vista de proteção radiológica, nenhuma exposição à radiação possa ser considerada totalmente segura.

Os princípios básicos<sup>(2,6)</sup> da proteção radiológica, estabelecidos pela "International Commission on Radiological Protection - ICRP", e aceitos pela maioria das nações e pela Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency - IAEA), são:

- 1) As doses recebidas pelos indivíduos (tanto ocupacionalmente expostos como os do público) não devem exceder os correspondentes limites de doses recomendados pela ICRP ou, no nosso caso, a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).
- 2) O detrimento total produzido pelas radiações, numa prática ou operação, deve ser justificável em função do benefício que se obtém de tal prática ou operação.

- 3) Todas as doses de radiação provocadas por exposições justificadas devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente alcançável, levando em conta considerações sociais e econômicas.

Em relação ao primeiro princípio, os valores dos limites de doses recomendados pela ICRP são tais que resultam num risco pequeno comparado com os da vida diária. Os outros dois princípios devem ser respeitados, pois qualquer dose de radiação por pequena que seja não pode ser considerada totalmente segura.

Na análise da justificativa, além das considerações sócio-econômicas, são necessárias considerações políticas. Por tal razão, é uma tarefa que compete exclusivamente à Autoridade de cada país, no nosso caso a CNEN. Deve-se analisar os riscos aceitos pela sociedade, tanto quanto os benefícios esperados das operações que produzem a exposição. Esta justificativa é endossada por uma análise do tipo custo-benefício. Neste caso o detrimento resultante do funcionamento de uma instalação deve ser contrabalançado pelos benefícios que dela se obtém.

O custo, inclui todos os gastos de capital e de operação, mais os custos diretos e indiretos associados aos efeitos da radiação. O benefício inclui todos aqueles que direta ou indiretamente atingem a população. A equação geral de custo-benefício que pode ser expressa por:

$$B = V - P - X - Y \quad (1)$$

onde: B é o benefício líquido;

V é o benefício bruto;

P é o custo total da produção, excluindo a proteção radiológica;

X é o custo da proteção radiológica;

Y é o custo do detrimento causado pela radiação.

A Autoridade considerará justificável uma prática só quando o valor de B for positivo. A justificativa da exposição não é fácil, em virtude de que, como em muitas outras atividades, o grupo da população que sofre o detrimento nem sempre é o mesmo que se beneficia, portanto esta justificativa não tem sentido a menos que os riscos individuais sejam desprezíveis. O cumprimento dos limites de doses assegura a vigência da condição mencionada e portanto, neste caso, uma justificativa baseada na análise custo-benefício pode ser considerada aceitável.

Para estabelecer a dose "tão baixa quanto razoavelmente alcançável", é necessário recorrer a uma análise diferencial do tipo custo-benefício, tal como é estabelecido pela ICRP. Esta tarefa se conhece como otimização de proteção radiológica.

Para determinar se uma posterior redução da exposição é "razoavelmente alcançável", é necessário considerar a vantagem dessa redução, e também o custo para conseguí-la.

Na equação (1), V e P podem ser considerados constantes para uma determinada instalação. X e Y são variáveis e podem ser expressas em função da dose coletiva (S) na população (Figura 1).

Entende-se como dose coletiva a somatória dos produtos da dose média recebida por cada grupo da população pelo número de pessoas do grupo. Sua unidade é o rem-homem ou rad-homem ou, nas novas unidades, Sv-homem ou Gy-homem.

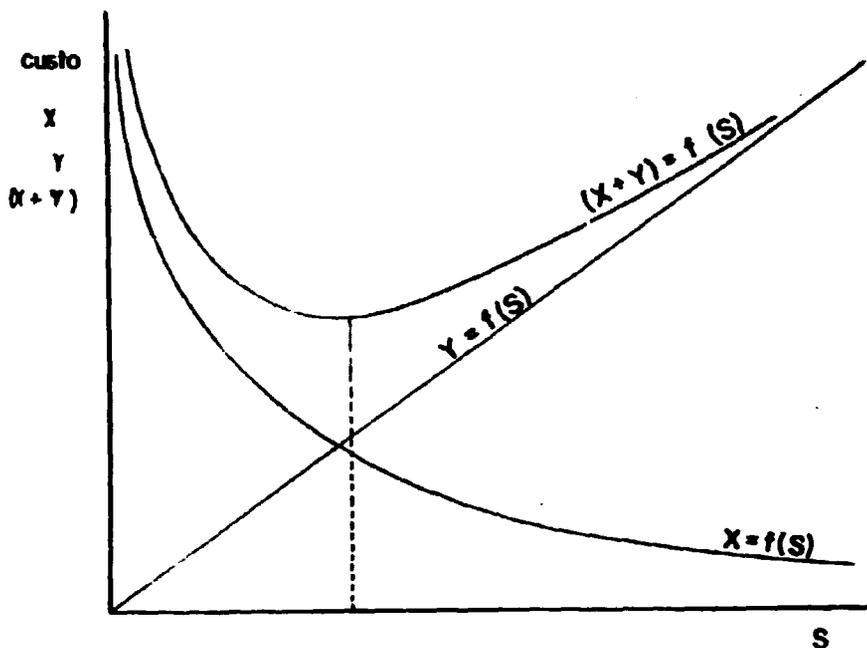


Figura 1 — Dose Coletiva (S) em função do custo.

Na Figura 1, o custo do detrimento em função da dose coletiva é representado por uma reta em virtude da linearidade entre a dose recebida e os efeitos biológicos produzidos por ela. Pode-se observar, como é evidente, que à medida que se aumentam as inversões financeiras em proteção radiológica (X), diminui a dose recebida pelos indivíduos.

A otimização de proteção radiológica consiste em fazer o valor de (X + Y) mínimo para que o benefício líquido seja máximo. Isto se alcança quando se cumpre a seguinte condição:

$$\left( \frac{dX}{dS} \right)_{S^*} + \left( \frac{dY}{dS} \right)_{S^*} = 0$$

Deve-se levar em consideração, que esta condição tem validade somente quando: 1) as exposições individuais inferiores aos limites de doses e 2) o benefício B, for positivo.

A ICRP<sup>(6)</sup> fornece os resultados obtidos por diversos autores na avaliação do termo  $\frac{dY}{dS}$ , resultados estes que variam entre \$ 10 e \$ 250 US/rem-homem. A "United State Nuclear Regulatory Commission" fixou o valor de \$ 1000 US/rem-homem para as análises do tipo custo-benefício em instalações nucleares. O valor de \$ 100 US/rem-homem foi sugerido<sup>(3)</sup> como suficientemente representativo para ser usado nos casos onde a Autoridade Competente do país não estabeleceu nenhum valor.

## 2 – RISCOS DO TRABALHADOR DE JAZIDAS DE URÂNIO

Como consequência das operações de exploração, aparecem no ar de uma jazida uranífera, grandes quantidades de aerossóis possíveis de serem inalados pelo trabalhador. A concentração de partículas no ar varia com o tempo e o local sendo mais significativa nas minas onde são usados explosivos e nos locais mais próximos à explosão. Estes aerossóis contêm alto teor de sílica e dão origem a uma enfermidade que se conhece como silicose que representa o maior risco para qualquer trabalhador mineiro.

Quando se trata de mina de urânio, ao risco antes mencionado deve ser agregado os riscos de origem radiológica. Neste sentido, o trabalhador encontra-se exposto à radiação externa e à contaminação interna.

Tanto os problemas de silicose como os de origem radiológica, acentuam-se no caso de minas subterrâneas, sendo quase desprezíveis quando se trata de minas a céu aberto.

### 2.1 – Radiação Externa

O trabalhador está submetido à radiação externa proveniente dos emissores  $\beta$  e  $\gamma$  que se encontram nas paredes e chão da mina. Os níveis de exposição não superam na maioria dos casos 1 mR/h (minério com teor de  $U_3O_8$  de 0,2%); não obstante quando se trata de zonas ricamente mineralizadas (minério com teor de  $U_3O_8$  de 20 a 30%), estes níveis podem alcançar valores significativamente altos, da ordem de 100 mR/h, em pontos muito localizados.

Outra via de radiação externa é provocada pela contaminação da pele e roupa do trabalhador como consequência da lama radioativa, no caso de jazidas submersas em aquíferos, e das partículas de minério em suspensão no ar. Esta forma de contaminação pode traduzir-se em contaminação interna por ingestão quando forem contaminados os alimentos pelas mãos, ou por inalação quando ocorrer a ressuspensão dos elementos contaminantes. A radiação externa não representa um problema radiológico sério na grande maioria das minas de urânio.

### 2.2 – Contaminação Interna

A contaminação interna se origina principalmente pela inalação de Rn e seus filhos de meia vida curta (Figura 2) e também pela inalação de alguns emissores alfa de meia vida longa presentes no ar de jazida:  $^{238}U$ ,  $^{234}U$ ,  $^{230}Th$ ,  $^{226}Ra$  e  $^{210}Pb$ .

O Rn sendo um gás inerte, passa livremente pelos pulmões com um mínimo de incorporação pelo sistema respiratório, o que não ocorre com os seus produtos filhos que são partículas sólidas. Estas partículas, que são metais pesados, interagem com as demais partículas do ar atmosférico formando íons ou núcleos de condensação e seguem os respectivos comportamentos.

Os produtos filhos do Rn tem meia vida curta, o que resulta em um aumento rápido da concentração destas partículas no ar de jazida. São de tamanho sub-micron e por tal razão podem alcançar o sistema respiratório.

A maior dose de radiação é recebida pelo sistema respiratório como consequência dos emissores alfa de meia vida curta. A dose causada pela inalação dos filhos de radônio é 20 vezes maior que a produzida pelo Rn por si só nos pulmões. Essa dose depende da concentração dos produtos filhos no ar inalado, da distribuição do tamanho das partículas onde os produtos filhos são ligados, e também, dos parâmetros fisiológicos do trabalhador. Os íons filhos do Rn são combinados aos aerossóis, depositam-se preferencialmente na nasofaringe e traquéia-brônquios (Figura 3), onde se observa a maior

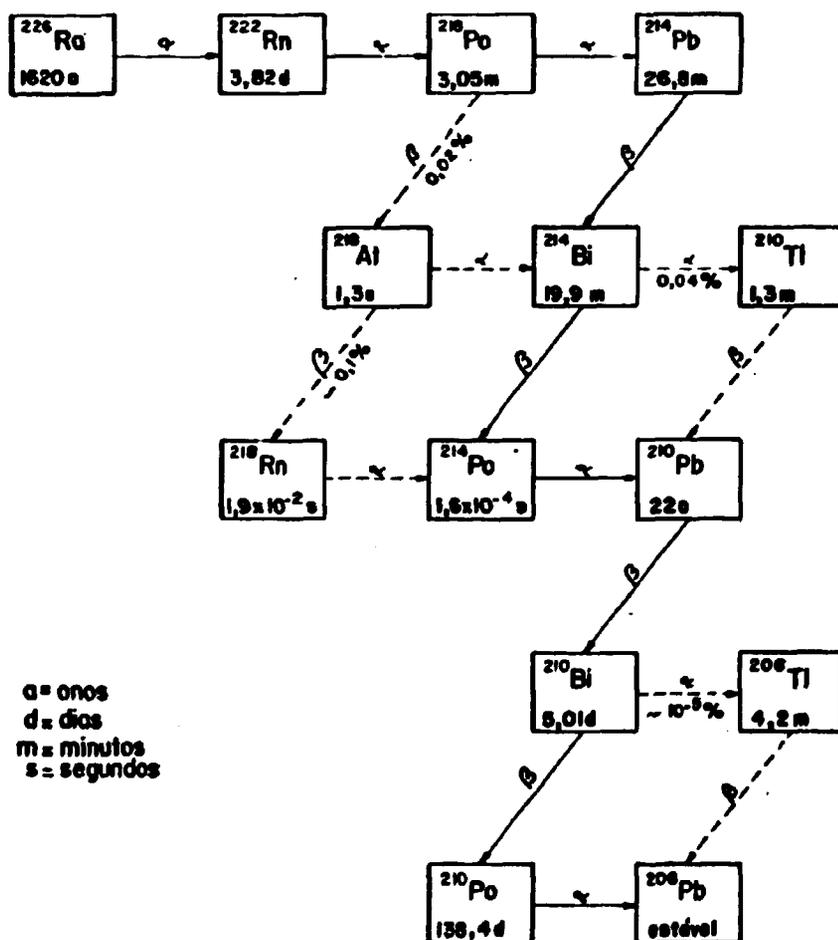


Figura 2 - Esquema da cadeia de decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ .

incidência de câncer na maioria dos mineiros; enquanto que os ligados aos aerossóis, depositam-se nos pulmões, com excesso das partículas maiores que  $30\ \mu\text{m}$  que raramente tem acesso ao sistema respiratório<sup>(4,5)</sup>.

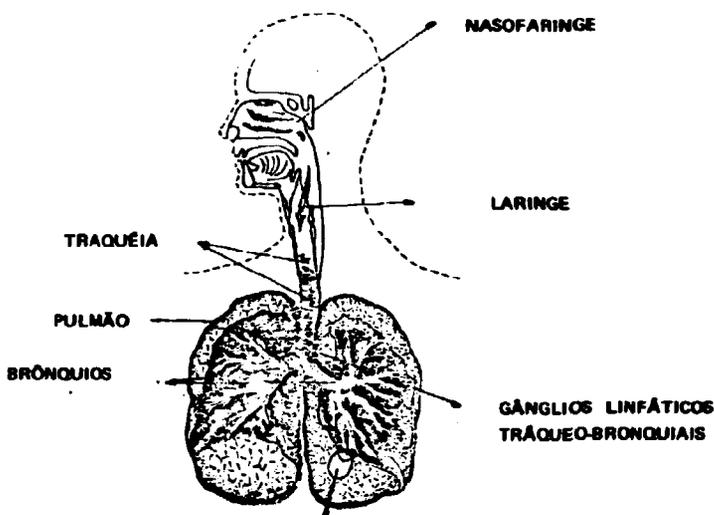


Figura 3 — Diagrama Esquemático do Sistema Respiratório.

### 3 — ENERGIA ALFA POTENCIAL

O  $^{222}\text{Rn}$  entra em equilíbrio radioativo secular com seus filhos de meia vida curta ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Po}$ ) após 3 horas (Figura 4). A ventilação natural ou forçada faz com que o tempo de permanência dos átomos de Rn no ar da jazida seja bem menor que o necessário para alcançar o estado de equilíbrio.

Considerando que os filhos de Rn emissores alfa, são os principais contribuintes para a dose no trabalhador mineiro e que nunca existe equilíbrio radioativo no ar do interior de uma mina, os limites operacionais tem sido sempre referidos à energia alfa potencial, isto é, a energia total liberada por uma dada mistura de Rn e seus filhos em seu decaimento a  $^{210}\text{Pb}$ .

A fim de poder avaliar a energia alfa potencial do ar inalado pelo trabalhador, foi necessário definir o que se conhece como concentração de radônio equivalente.

Denomina-se concentração de Rn equivalente ( $C'$ ), de uma amostra de concentração ( $C$ ) de radônio, àquela que em equilíbrio com seus filhos, tem mesma energia alfa potencial que a amostra.

A energia alfa potencial de uma amostra de  $100\ \text{pCi/l}$  de Rn em equilíbrio com seus filhos de meia vida curta é de  $1,3 \cdot 10^5\ \text{MeV/l}$ . Alguns países utilizam a expressão "work level" — WL (nível de trabalho) que corresponde à concentração de  $100\ \text{pCi/l}$  de radônio equivalente.

### 4 — NÍVEIS PERMISSÍVEIS PARA TRABALHADORES

Em virtude da incidência de câncer no sistema respiratório em vários grupos de mineiros

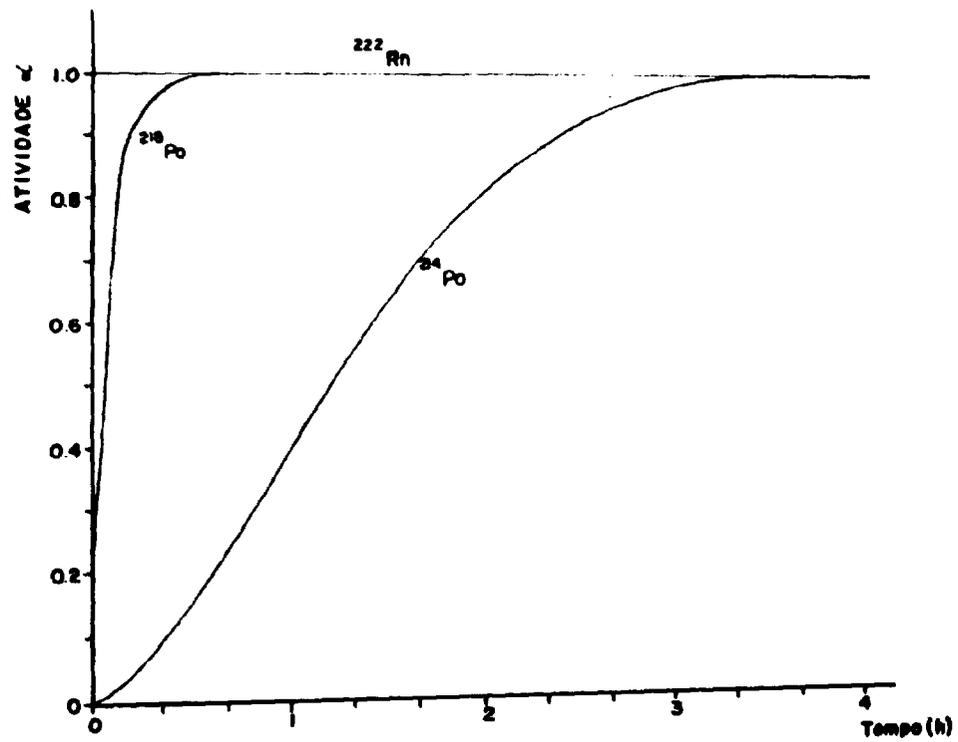


Figure 4 - Gráfico de Equilíbrio Radioativo Secular entre Rn e Produtos Finais.

expostos a altas concentrações de Rn e seus produtos filhos, a ICRP recomendou, pela primeira vez em 1955, como concentração máxima permitível (CMP), para 2000 h de trabalho por ano (50 semanas de 40 horas cada uma), 300 pCi/l de Rn em equilíbrio com seus filhos de meia vida curta. Nesta época já se sabia que a dose no pulmão era causada principalmente pelos filhos do  $^{222}\text{Rn}$ . A CMP foi avaliada tomando como base o limite de dose para o pulmão de 15 rem/a.

Em 1959, a ICRP reduziu o valor de concentração máxima permitível para 30 pCi.a/l, considerando que 10% dos átomos de  $^{218}\text{Po}$  inhaledos não estavam ligados às partículas de aerossóis. Isto significa o reconhecimento de que a distribuição de dose no sistema respiratório não era homogênea e a dose causada pelos átomos não ligados de  $^{218}\text{Po}$  era dirigida à traquéia-brônquios.

Em 1973, a CNEN fixou em 30 pCi/l o limite de concentração de radônio no ar de áreas de trabalho.

Países membros de AIEA e EURATOM, assim como outros países da Europa, América do Sul e África, não acompanharam esta redução, pois o aparecimento de trabalhos posteriores mostraram que a fração de  $^{218}\text{Po}$  não ligada aos aerossóis era bem menor que 10% (observou-se uma tendência a limitar este valor em 100 pCi.a/l). Em 1976, a ICRP reafirma sua recomendação de limitar a concentração de radônio equivalente em 30 pCi.a/l<sup>(1)</sup>.

## 5 - RESÍDUOS RADIOATIVOS

Como consequência da exploração mineira aparecem resíduos líquidos, sólidos e gasosos contendo radionuclídeos da família do urânio; principalmente o  $^{238}\text{U}$ , o  $^{230}\text{Th}$ , o  $^{226}\text{Ra}$ , o  $^{222}\text{Rn}$  e os filhos do radônio de meia vida curta.

Os resíduos líquidos são águas provenientes de drenagens da jazida ou das operações de perfuração e sondagem. O maior volume se origina do bombeamento das águas subterrâneas que inundam as zonas mineralizadas.

A maioria do  $^{226}\text{Ra}$  é insolúvel e permanece como resíduo sólido. Uma pequena fração, menor que 1%, pode ser dissolvida. A concentração de rádio nos efluentes de uma mina pode alcançar de 250 a 500 pCi/l.

Até 50% do tório contido no minério pode ser dissolvido em soluções ácidas. Porém, as quantidades encontradas na água drenada de uma mina são na maioria dos casos, desprezíveis. Outros radionuclídeos como o  $^{238}\text{U}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{227}\text{Th}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{210}\text{Po}$  podem estar presentes nos efluentes líquidos em quantidades menores.

O  $^{226}\text{Ra}$  apresenta-se sempre como o radionuclídeo que, do ponto de vista radiométrico, é o mais significativo nos resíduos líquidos.

Os resíduos sólidos encontram-se formados principalmente por minério de baixa concentração de urânio que acompanha a exploração e cuja recuperação não se apresenta viável.

Mais de 70% de atividade contida no mineral é insolúvel, permanecendo como resíduo sólido mesmo depois dos processos de recuperação do urânio.

Os sistemas de tratamento de efluentes líquidos fornecem também resíduos sólidos com concentrações altas de  $^{226}\text{Ra}$ , mas em quantidades menores.

O  $^{222}\text{Rn}$  é a principal fonte de resíduos gasosos. É emanado de forma contínua para o interior da jazida e por decaimento, se produzem aerossóis de tamanho sub-micron contendo quantidades

significativas de  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Po}$ . As partículas contendo os emissores alfa de meia vida longa como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$ , são formados como consequência das tarefas de exploração, sendo que, em virtude de seus tamanhos relativamente grandes, a maior parte se deposita no interior da jazida.

Os efluentes líquidos que aparecem como consequência da exploração de uma mina de urânio devem ser, quando possível, armazenados em pequenas lagoas artificiais permitindo a evaporação natural da água.

Os sedimentos destas lagoas devem ser removidos periodicamente e tratados como resíduos sólidos. A frequência de remoção deve ser governada pelo aumento das taxas de exposição nas proximidades da área de tratamento.

As águas de drenagem podem ser também utilizadas para inundar os níveis inferiores já explorados da jazida, obtendo-se desta forma, uma diminuição da emissão de radônio proveniente dessas áreas, de um fator 25<sup>(7)</sup>.

Os resíduos sólidos devem ser utilizados para recheiar as áreas já exploradas da jazida. Desta forma, consegue-se diminuir a emissão de radônio, tanto dos resíduos como das áreas já exploradas. Nos casos em que for difícil realizar esta tarefa num prazo razoável, e quando não for possível a disposição dos resíduos em áreas isoladas em relação ao público e trabalhadores, o recobrimento com terra se apresenta com a técnica mais adequada. Deve-se levar em consideração que a emissão de Rn diminui de um fator 2 para cada metro de recobrimento<sup>(7)</sup>.

Os gases e aerossóis radioativos produzidos no interior da jazida são diluídos em grandes massas de ar de ventilação. As baixas concentrações alcançadas com a diluição e a meia vida curta dos radionuclídeos presentes, não justifica nenhum tratamento adicional para os efluentes gasosos, antes de serem eliminados no ambiente.

As áreas de estocagem do minério explorado são sempre a céu aberto e as concentrações de radônio no ar não atingem níveis altos que possam representar riscos especiais do ponto de vista radiossanitário.

## ABSTRACT

The basic principles of radiation protection recommended by the International Commission on Radiological Protection - ICRP are presented and the main radiological risks for the uranium mining workers are discussed. Finally some criteria for planning the radioactive waste management in uranium mines are given.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANNALS ICRP, 1(1), 1977.
2. ANNALS ICRP, 1(3), 1977.
3. BENINSON, D. Radiation protection requirements in the limitation of the release of radioactive effluents. In: REGIONAL seminar on the application of environmental impact analysis to the nuclear power industry, Buenos Aires, Argentina, 29 August - 2 September 1977. [s.n.t.] (IAEA-SR-24).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Inhalation risks from radioactive contaminants report of a panel on ... held in Vienna, 30 November - 4 December 1970*. Vienna, 1973. (Technical reports series, 142).

5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Manual on radiological safety in uranium and thorium mines and mills*. Vienna, 1976. (Safety series, 43).
6. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Implications of commission recommendations that doses be kept as low as readily achievable a report by committee 4 of . . . in April 1973*. Oxford, Pergamon, 1973. (ICRP publication Radiation protecti 22).
7. UNITED NATIONS. *Scientific committee on the effects of atomic radiation Annex D. Nuclear power productions*. [s.1.], Feb. 1977. (A/AC.82/R.343).



**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
**Caixa Postal, 11049 - Pinheiros**  
**CEP 05508**  
**01000 - São Paulo - SP**

**Telefone: 211-6011**  
**Endereço Telefônico - IEATOMICA**  
**Telex - 011-23592 IENA BR**