



22 a 27 de abril de 1990

ANAIS - PROCEEDINGS

REJEITOS DA CONVERSÃO DO URÂNIO

Roberto Vicente
José Claudio DellamanoCOMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - BRASIL

SUMÁRIO. Um conjunto de equações matemáticas foi desenvolvido e usado para estimar a significância radiológica de cada radionuclídeo presente nos efluentes da conversão. As equações descrevem a evolução das atividades no tempo desde a mineração até a conversão, passando pelo concentrado de urânio.

Alguns radionuclídeos que não são monitorados usualmente nestes efluentes (p.ex. Pa-231 e Ac-227) mostram-se potencialmente relevantes do ponto de vista radiossanitário. Estes radionuclídeos certamente são relevantes na indústria de mineração de urânio.

ABSTRACT. A set of mathematical equations was developed and used to estimate the radiological significance of each radionuclide present in the uranium refining industry effluents. The equations describe the evolution in time of the radionuclides activities in the uranium fuel cycle, from mining and milling, through the yellowcake, till the conversion effluents.

Some radionuclides that are not usually monitored in conversion effluents (e.g. Pa-231 and Ac-227) were found to be potentially relevant from the radiological point of view in conversion facilities, and are certainly relevant in mining and milling industry.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é identificar radionuclídeos (RN) relevantes do ponto de vista radio sanitário nos efluentes e rejeitos da conversão (purificação do urânio e fabricação de UF6) para que se possa adotar medidas eficazes de gerência de rejeitos radioativos e para se poder estimar o impacto radiológico das práticas adotadas.

Elaborou-se um modelo matemático que descreve a evolução das atividades ao longo do tempo, considerando que grande parte dos RN presentes tem meia-vida ($T_{1/2}$) da mesma ordem de grandeza que os tempos envolvidos na dispersão dos efluentes no ambiente.

A atividade dos RN liberados nos efluentes radioativos das instalações de conversão é considerada pequena quando comparada com a de outras instalações do ciclo do combustível [UN 82] não obstante os volumes gerados se constituírem em uma fração importante dos rejeitos de todo o ciclo. Esses RN pertencem às cadeias naturais de decaimento e são provenientes do minério de urânio. Atravessam o processo de beneficiamento, se constituem em impurezas do concentrado de urânio e são encontrados na sua totalidade nos efluentes da conversão.

Alguns destes RN apresentam limites de liberação bastante baixos, o que os tornam particularmente importantes do ponto de vista radio sanitário para a gerência dos rejeitos da conversão. A literatura sobre estes rejeitos é escassa e somente uma pequena parte dos 36 RN presentes é citada. A grande maioria deles é considerada irrelevante, seja pela atividade baixa ou pela meia-vida curta. Há ainda uma grande dificuldade em determinar as concentrações de muitos deles, inclusive de alguns relevantes por métodos espectrométricos usuais devido às baixas frequências de emissão gama aliadas às baixas energias dos fótons e à interferência entre distintos emissores. Neste aspecto, este trabalho também pode contribuir, permitindo uma avaliação das atividades de certos RN a partir da atividade de outros que possam ser medidos.

2. MODELO E MÉTODO

A atividade dos rejeitos da conversão está associada aos RN oriundos do minério. Portanto a concentração destes RN no minério, os rendimentos dos processos de extração no beneficiamento e na conversão, a idade do concentrado de urânio que alimenta a instalação de conversão e o tempo em que é feita a avaliação da atividade, influem todos no inventário radioquímico do rejeito. O modelo matemático desenvolvido é a solução da equação:

$$dN_i(t)/dt = - \lambda_i \cdot N_i(t) + \lambda_{i-1} \cdot N_{i-1}(t) \quad (1)$$

com a condição de que $N_i(0)$ seja a fração que passa nos processos químicos do beneficiamento e da conversão. A simbologia utilizada está definida na tabela 1 e a ordenação dos RN está indicada na tabela 2. A solução desta equação para cadeias longas requer expressões matemáticas complexas. Soluções simplificadas podem

Tabela 1 - Definição das variáveis e da simbologia empregada.

Símbolo	Definição
$A(i, j)$	Atividade normalizada do RN i na fase j em Bq/ton;
$AB(i)$	Abundância isotópica natural do RN i ;
ALFAS	Variáveis auxiliares, com $s = 1...5$;
B	Razão entre a massa de urânio no UF6 e a massa deste composto, cujo valor é 0,69;
$F(i, j)$	Rendimento de processo entre as fases j e $j-1$;
i	Índice que determina o RN; $i = 1...37$;
j	Índice que determina a fase do ciclo; $j = 1, 2, 3$;
$M(i)$	Massa atômica do RN i ;
$m(i, j)$	Massa normalizada do RN i na fase j , em kg/ton;
$N(i, j)$	Número de átomos do RN i na fase j , em átomos/ton;
$N_i(t)$	Número de átomos do RN i em função do tempo;
NO	Constante de Avogrado; $6,023 \text{ E}+23$;
$T(j)$	Tempo decorrido desde o início da fase j , em segundos;
$TEOR(i)$	Teor do elemento a que pertence o RN i no minério;
TEORY	Teor de urânio no concentrado;
$\lambda(i)$	Constante de decaimento do RN i , por segundo;

porém, produzir resultados com exatidão aceitável em intervalos de tempo limitados. As simplificações efetuadas no modelo foram desprezar na expressão matemática da solução, os termos que contribuíam com um valor arbitrariamente pequeno para a atividade de cada RN dentro dos intervalos de tempo de interesse. Contudo, não se fez 'a priori', qualquer tentativa de simplificação do trabalho pela redução do número de RN envolvidos. Embora muitos sejam de $T_{1/2}$ curta ou tenham significância radiossanitária baixa, optou-se por manter a cadeia completa com exceção daqueles resultantes de processos de decaimento com probabilidade de ocorrência baixa. O RN desprezado com maior probabilidade de ocorrência tem uma frequência na cadeia de 1,2 %.

Foi elaborado um conjunto de equações matemáticas para cada uma das fases (etapas) da vida dos RN: minério, concentrado de urânio e rejeito da conversão. Nestas equações a fase é denotada pelo subscrito j , sendo $j = 1$ para a fase minério, $j = 2$ para a

fase concentrado de urânio e $j = 3$ para a fase rejeito da conversão. Tres grandezas: massa, atividade e número de átomos de cada RN são avaliados no modelo. Estas grandezas são normalizadas de forma distinta em cada fase: na fase minério os resultados estão normalizados em relação à massa de minério; na fase concentrado de urânio, em relação à massa de yellowcake; e, na fase rejeito da conversão, em relação à massa de UF₆ produzida pela planta. Nas duas primeiras fases as grandezas calculadas podem ser interpretadas como concentrações.

Em cada grupo de RN que tem equação idêntica, a grandeza calculada em primeiro lugar é a que apresenta a expressão mais simples, com o menor número de fatores. As outras duas grandezas são calculadas em função desta primeira de acordo com as igualdades:

$$m(i, j) = M(i) * N(i, j) / N_0; A(i, j) = N(i, j) * \lambda(i) \quad (2)$$

2.1 - MODELO PARA A FASE MINÉRIO

Na fase minério, considera-se que há equilíbrio secular entre os RN de cada cadeia e, tendo em vista que a T_{1/2} do urânio e do tório são muito maiores que os tempos considerados no modelo, as concentrações são independentes do tempo. Esta hipótese implica em que o urânio é minerado de uma ocorrência onde a influência dos processos geoquímicos que perturbam aquele equilíbrio já não se fazem mais sentir. Também a emissão de radônio é suficientemente lenta para que o equilíbrio dos RN de T_{1/2} significativas (Pb-210, Bi-210 e Po-210) não seja quebrado. As concentrações são avaliadas com base no conhecimento dos teores de urânio e tório no minério.

$$\text{concentrações no minério } (j = 1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 15, 26 \\ m(i, j) &= 1000 * \text{TEOR}(i) * \text{AB}(i) \\ i &= 2, 3, \dots, 14, 16, \dots, 25, 27, \dots, 37 \\ A(i, j) &= A(i-1, j) \end{aligned}$$

2.2 - MODELO PARA A FASE CONCENTRADO

O concentrado é acondicionado para estocagem e transporte em tambores metálicos selados, o que impede o escape de radônio. Pode-se com isso considerar que há tendência de restabelecimento dos equilíbrios radioativos. O intervalo de tempo de validade do modelo é 1E06 e 1E08 segundos, o que corresponde, grosso modo, a 10 dias e 3 anos.

$$\text{concentrações no yellowcake } (j = 2) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 4, 5, 6, 12, 15, 17, 18, 26 \\ m(i, j) &= m(i, j-1) * \text{TEORY} * F(i, j) / \text{TEOR}(1) \\ i &= 2, 7, 13, 19, 27 \\ N(i, j) &= A(i-1, j) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j))) / \lambda(i) + \\ &+ N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} * \text{EXP}(-\lambda(i) * \\ &* T(j)) / \text{TEOR}(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & i = 14, 20, 29 \\
 N(i, j) &= N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) - (N(i-1, j-1) * \\
 & * \lambda(i-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) - A(i-2, j)) / \\
 & / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) - A(i-2, j) / \lambda(i)) * \text{EXP}(-\lambda(i) * \\
 & * T(j)) + ((N(i-1, j-1) * \lambda(i-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} / \\
 & / \text{TEOR}(1) - A(i-2, j)) / (\lambda(i) - \lambda(i-1))) * \\
 & * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * T(j)) + A(i-2, j) / \lambda(i) \\
 & i = 30 \\
 N(i, j) &= (\text{ALFA4} / \lambda(i-1) - \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) - \text{ALFA2} / \\
 & / (\lambda(i) - \lambda(i-2)) - \text{ALFA3} / \lambda(i)) * \lambda(i-1) * \\
 & * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j)) + (\lambda(i-1) * \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \\
 & - \lambda(i-1))) * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * T(j)) + (\lambda(i-1) * \\
 & * \text{ALFA2} / (\lambda(i) - \lambda(i-2))) * \text{EXP}(-\lambda(i-2) * T(j)) + \\
 & + \lambda(i-1) * \text{ALFA3} / \lambda(i) \\
 \text{ALFA1} &= N(i-1, j-1) * F(i-1, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) - \text{ALFA2} - \\
 & - \text{ALFA3} \\
 \text{ALFA2} &= (N(i-2, j-1) * \lambda(i-2) * F(i-2, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) - \\
 & - A(i-3, j)) / (\lambda(i-1) - \lambda(i-2)) \\
 \text{ALFA3} &= A(i-2, j) / \lambda(i-1) \\
 \text{ALFA4} &= N(i, j-1) * F(i, j) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) \\
 & i = 3, 8, \dots, 11, 16, 21, \dots, 25, 28, 31, \dots, 37 \\
 A(i, j) &= A(i-1, j)
 \end{aligned}$$

2.3 - MODELO PARA A FASE REJEITO DA CONVERSÃO

As equações que descrevem as grandezas na fase rejeito da conversão são análogas às da fase anterior. Os resultados estão normalizados em relação à quantidade de UF6 produzida pela planta. O período de tempo considerado nesta fase é também o intervalo 1E06 a 1 E08 segundos. Nesta fase os rendimentos de extração de processos químicos são os da purificação e conversão do urânio.

quantidades nos rejeitos da conversão (j = 3) (5)

$$\begin{aligned}
 & i = 1, 4, 5, 6, 12, 15, 17, 18, 26 \\
 m(i, j) &= m(i, j-1) * F(i, j) * B / \text{TEORY} \\
 & i = 2, 7 \\
 N(i, j) &= A(i-1, j) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j))) / \lambda(i) + (N(i, j-1) * \\
 & * F(i, j) * B / \text{TEORY}) * \text{EXP}(-\lambda(i) * T(j)) \\
 & i = 13, 19, 27 \\
 N(i, j) &= (A(i-1, j-1) * (1 - \text{EXP}(-\lambda(i) * (T(j-1) + T(j)))) / \\
 & / \lambda(i) + N(i, j-2) * F(i, j-1) * * \text{TEORY} * \text{EXP}(-\lambda(i) * \\
 & * (T(j-1) + T(j))) / \text{TEOR}(1)) * B / \text{TEORY} \\
 & i = 14, 20, 29 \\
 N(i, j) &= ((N(i, j-2) * F(i, j-1) * \text{TEORY} / \text{TEOR}(1) - \text{ALFA5} - \\
 & - A(i-2, j-1) / \lambda(i) * \text{EXP}(-\lambda(i) * (T(j-1) + T(j)))) + \\
 & + \text{ALFA5} * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * (T(j-1) + T(j))) + \\
 & + A(i-2, j-1) / \lambda(i)) * B / \text{TEORY} \\
 \text{ALFA5} &= (N(i-1, j-2) * \lambda(i-1) * F(i-1, j-1) * \text{TEORY} / \\
 & \text{TEOR}(1) - A(i-1, j-1)) / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) \\
 & i = 30 \\
 N(i, j) &= (\text{ALFA4} / \lambda(i-1) - \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \lambda(i-1)) - \text{ALFA2} / \\
 & / (\lambda(i) - \lambda(i-2)) - \text{ALFA3} / \lambda(i)) * \lambda(i-1) * \text{EXP}(-\lambda(i) * \\
 & * (T(j-1) + T(j)) + (\lambda(i-1) * \text{ALFA1} / (\lambda(i) - \lambda(i-1))) * \\
 & * \text{EXP}(-\lambda(i-1) * T(j-1) + T(j))) + (\lambda(i-1) * \text{ALFA2} /
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & / (\lambda(i) - \lambda(i-2)) * \text{EXP}(-\lambda(i-2) * T(j-1) + T(j)) + \\ & + \lambda(i-1) * \text{ALFA3} / \lambda(i) \\ i & = 3, 8, \dots, 11, 16, 21, \dots, 25, 28, 31, \dots, 37 \\ A(i, j) & = A(i-1, j) \end{aligned}$$

Este modelo tem aplicação dentro do intervalo de tempo prestabelecido. A distribuição dos erros entre os distintos grupos não é uniforme e nem é homogênea ao longo do tempo. Os desvios são máximos nos extremos do intervalo de tempo de validade. As estimativas obtidas tendem a superestimar as atividades. O erro máximo verificado nos resultados com o uso do modelo foi de 12 %.

Vale ressaltar que estes erros estão relacionados intrinsecamente com o modelo, e não com os valores adotados para as grandezas utilizadas na computação do inventário.

3. ENSAIO DO MODELO

A maioria das grandezas utilizadas no modelo têm seus valores já tabelados, tais como massa atômica ou constante de decaimento. Os valores de outras grandezas, entretanto, são raramente apresentados na literatura. É o caso dos valores do rendimento de extração no beneficiamento (Fij, para j = 2). É dada pouca importância para a fração dos RN presentes no minério que passa para o yellowcake, com exceção do Th-230 e do Ra-226. Estes valores são geralmente omitidos em virtude de serem relativamente pequenos.

A título de exemplo, aplicou-se o modelo aos dados apresentados na tabela 2. Estes dados são típicos daqueles resumidos da literatura para alguns RN particulares e foram adotados para os demais isótopos do mesmo elemento. No caso do Pa-231, do Ac-227 e do Bi-210 foram adotados valores de Fij iguais aos do Ra-226.

A tabela 3 mostra o inventário nas fases minério, concentrado de urânio e rejeitos da conversão para um concentrado purificado após um ano do beneficiamento e para um rejeito com cerca de 10 dias de vida. Este inventário é apresentado em termos de concentrações normalizadas de massa, atividade e número de átomos. A figura 1 mostra a evolução ao longo do tempo, do índice de risco relativo de alguns RN de maior importância radio sanitária. Adotou-se como índice de risco relativo a razão 'atividade/LIA', onde LIA é o limite de incorporação anual para cada radionuclídeo.

4. DISCUSSÃO

O modelo desenvolvido permite avaliar o inventário radioquímico dos rejeitos da conversão, partindo de informações sobre o concentrado de urânio. É possível, também, em princípio, pela determinação de alguns poucos RN por espectrometria gama, inferir todo o inventário. A exatidão dos resultados depende do conhecimento dos rendimentos de extração e teores iniciais. Estes resultados podem ser úteis para quem faz o controle de descarga dos efluentes e a gerência dos rejeitos da conversão.

Tabela 2 - Dados de entrada para o ensaio do modelo.

i	RN	F(i, j) j=2	F(i, j) j=3	i	RN	F(i, j) j=2	F(i, j) j=3
1	U-238	0,95	0,002	20	Ra-223	0,002	1,0
2	Th-234	0,02	1,0	21	Rn-219	-	-
3	Pa-234	-	-	22	Po-215	-	-
4	U-234	0,95	0,002	23	Pb-211	-	-
5	Th-230	0,02	1,0	24	Bi-211	-	-
6	Ra-226	0,002	1,0	25	Tl-207	-	-
7	Rn-222	0,0	0,0	26	Th-232	0,02	1,0
8	Po-218	-	-	27	Ra-228	0,002	1,0
9	Pb-214	-	-	28	Ac-228	0,002	1,0
10	Bi-214	-	-	29	Th-228	0,02	1,0
11	Po-214	-	-	30	Ra-224	0,002	1,0
12	Pb-210	0,001	1,0	31	Rn-220	-	-
13	Bi-210	0,001	1,0	32	Po-216	-	-
14	Po-210	0,001	1,0	33	Pb-212	-	-
15	U-235	0,95	0,002	34	Bi-212A	-	-
16	Th-231	0,02	1,0	35	Bi-212B	-	-
17	Pa-231	0,002	1,0	36	Po-212	-	-
18	Ac-227	0,002	1,0	37	Tl-208	-	-
19	Th-227	0,02	1,0				

TEOR(1) = TEOR(15) = 0,002; TEOR(26) = 0,002; TEORY = 0,75
 AB(1) = 0,9928; AB(15) = 0,0072; AB(26) = 1,0

Os programas de monitoração ambiental e de efluentes priorizam o controle de U-238, Th-230, Ra-226 e Pb-210 nos efluentes líquidos e nos rejeitos sólidos do beneficiamento e da conversão [US 74, IA 81, Ri 82, Yu 82, Se 83, Fo 85, IC 85, FE 88]. Não há referências, contudo, ao controle naqueles efluentes dos RN Pa-231 e Ac-227 que passaram a ser relevantes a partir da publicação do ICRP-30 [IC 78] quando se reconheceu que a radiotoxicidade destes dois RN é dez vezes superior à do Ra-226 e tres vezes superior à do Pb-210. Deve-se considerar também que Pa-231 e Ra-226 ocorrem na natureza em mesma concentração.

Por meio da análise de concentrados de urânio poderão ser confirmadas ou rejeitadas as hipóteses sobre a relevância dos RN listados como importantes, em especial o Pa-231 e o Ac-227 nos efluentes da conversão. Em todo o caso, já está estabelecida a importância destes RN nos rejeitos da mineração e beneficiamento de urânio.

Deve-se reconhecer que a aplicação prática destes resultados depende ainda de se determinar de que maneira os RN se distribuem nos diferentes fluxos de rejeito numa instalação. O estudo desta distribuição é a continuação natural do presente trabalho.

NOTA: Foram omitidos no texto, por razões de espaço, várias informações sobre as premissas adotadas na elaboração do modelo, bem como resultados obtidos e bibliografia consultada. O trabalho completo está publicado na série Publicação IPEN.

Tabela 3 - Inventário radioquímico das fases minério, concentrado e rejeito da conversão.

I RADION	ATIVIDADE (BQ/TON)			ATIVIDADE (CI/TON)			CONCENTRAÇÃO Nº DE ATOMOS POR TONELADA			CONCENTRAÇÃO DE MASSA (KG/TON)		
	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6	MINERIO	CONCENTR	UF6
1 U-238	2.47E+17	6.80E+09	1.62E+07	6.68E-04	2.38E-01	4.38E-04	5.02E+24	1.79E+27	3.29E+24	1.99E+09	7.07E+02	1.30E+00
2 TH-234	2.47E+17	5.80E+09	5.08E+09	6.68E-04	2.29E-01	1.84E-01	7.42E+13	2.64E+16	1.63E+16	2.88E-11	1.03E-08	7.09E-09
3 PA-234	2.47E+17	5.80E+09	5.08E+09	6.68E-04	2.34E-01	1.84E-01	2.50E+09	8.92E+11	6.16E+11	9.72E-16	3.46E-13	2.39E-13
4 U-234	2.47E+17	8.80E+09	1.62E+07	6.68E-04	2.38E-01	4.38E-04	2.75E+20	9.60E+22	1.80E+20	1.07E-04	3.81E-02	7.00E-05
5 TH-230	2.47E+17	1.85E+08	1.71E+08	6.68E-04	5.01E-03	4.61E-03	3.48E+19	6.36E+20	5.85E+20	3.24E-05	2.43E-04	2.23E-04
6 RA-226	2.47E+17	1.85E+07	1.71E+07	6.68E-04	5.01E-04	4.61E-04	1.80E+18	1.35E+18	1.24E+18	6.75E-07	5.06E-07	4.66E-07
7 RN-222	2.47E+17	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	1.18E+13	8.34E+12	6.80E+12	4.34E-12	3.26E-12	2.51E-12
8 PO-218	2.47E+17	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	6.52E+09	4.89E+09	3.77E+09	2.36E-15	1.77E-15	1.36E-15
9 Pa-214	2.47E+17	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	5.73E+10	4.30E+10	3.21E+10	2.04E-14	1.53E-14	1.18E-14
10 Bi-214	2.47E+17	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	4.26E+10	3.19E+10	2.46E+10	1.51E-14	1.13E-14	8.73E-15
11 Pb-214	2.47E+17	1.85E+07	1.43E+07	6.68E-04	5.01E-04	3.86E-04	5.65E+03	4.38E+03	3.37E+03	2.08E-21	1.56E-21	1.20E-21
12 Pb-210	2.47E+17	9.27E+06	8.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	2.51E+16	9.40E+15	8.65E+15	8.74E-09	3.28E-09	3.02E-09
13 Bi-210	2.47E+17	9.27E+06	8.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	1.54E+13	5.79E+12	5.33E+12	5.39E-12	2.02E-12	1.36E-12
14 PO-210	2.47E+17	9.27E+06	8.53E+06	6.68E-04	2.50E-04	2.30E-04	4.26E+14	1.60E+14	1.47E+14	1.49E-10	5.57E-11	5.13E-11
15 U-235	1.15E+06	4.11E+08	7.56E+05	3.12E-05	1.11E-02	2.04E-05	3.69E+22	1.31E+25	2.42E+22	1.44E-02	5.13E+00	9.44E-03
16 TH-231	1.15E+06	4.11E+08	7.56E+05	3.12E-05	1.11E-02	2.04E-05	1.53E+11	5.44E+13	1.00E+11	5.88E-14	2.09E-11	3.84E-14
17 PA-231	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.72E+18	1.29E+18	1.19E+18	6.59E-07	4.94E-07	4.55E-07
18 AC-227	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.14E+15	8.56E+14	7.87E+14	4.30E-10	3.23E-10	2.97E-10
19 TH-227	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.69E+12	2.02E+12	1.86E+12	1.01E-12	7.60E-13	6.99E-13
20 RA-223	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	1.64E+12	1.23E+12	1.13E+12	6.08E-13	4.56E-13	4.20E-13
21 RN-219	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	6.59E+06	4.94E+06	4.54E+06	2.39E-13	1.60E-13	1.65E-13
22 PO-215	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.96E+03	2.22E+03	2.04E+03	1.06E-21	7.92E-22	7.29E-22
23 Pb-211	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	3.60E+09	2.70E+09	2.49E+09	1.26E-15	9.46E-16	8.71E-16
24 Bi-211	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	2.16E+08	1.62E+08	1.49E+08	7.58E-17	5.69E-17	5.23E-17
25 TL-207	1.15E+06	8.64E+05	7.95E+05	3.12E-05	2.34E-05	2.15E-05	4.76E+08	3.57E+08	3.28E+08	1.04E-16	1.23E-16	1.13E-16
26 TH-232	8.12E+06	6.09E+07	5.60E+07	2.19E-04	1.65E-03	1.51E-03	5.19E+24	3.89E+25	3.59E+25	2.00E+00	1.50E+01	1.38E+01
27 RA-228	8.12E+06	1.22E+07	1.14E+07	2.19E-04	3.31E-04	3.08E-04	2.12E+15	3.20E+15	2.98E+15	8.04E-10	1.21E-09	1.13E-09
28 AC-228	8.12E+06	1.22E+07	1.14E+07	2.19E-04	3.31E-04	3.08E-04	2.59E+11	3.90E+11	3.63E+11	9.79E-14	1.47E-13	1.37E-13
29 TH-228	8.12E+06	4.63E+07	4.23E+07	2.19E-04	1.25E-03	1.14E-03	7.07E+14	4.03E+15	3.68E+15	2.68E-10	1.52E-09	1.39E-09
30 RA-224	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	3.79E+12	2.12E+13	2.10E+13	1.39E-12	7.89E-12	7.82E-12
31 RN-220	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	6.51E+08	3.73E+09	3.70E+09	2.38E-16	1.36E-15	1.35E-15
32 PO-210	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	1.76E+06	1.01E+07	9.58E+06	6.30E-19	3.61E-18	3.58E-18
33 Pb-212	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	4.49E+11	2.57E+12	2.55E+12	1.58E-13	9.03E-13	8.97E-13
34 Bi-212A	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	4.26E+10	2.44E+11	2.42E+11	1.50E-14	8.58E-14	8.52E-14
35 Bi-212B	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	1.76E+10	1.01E+11	9.98E+10	6.14E-15	3.54E-14	3.51E-14
36 PU-212	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	3.52E+00	2.01E+01	2.00E+01	1.24E-24	7.04E-24	7.04E-24
37 TL-208	8.12E+06	4.65E+07	4.61E+07	2.19E-04	1.26E-03	1.25E-03	2.18E+09	1.25E+10	1.24E+10	7.52E-16	4.30E-15	4.27E-15
SOMA	4.66E+08	3.69E+10	1.30E+10	1.23E-02	9.97E-01	3.51E-01						

* VALORES NORMALIZADOS PARA 1 TONELADA DE UF6 PRODUZIDO

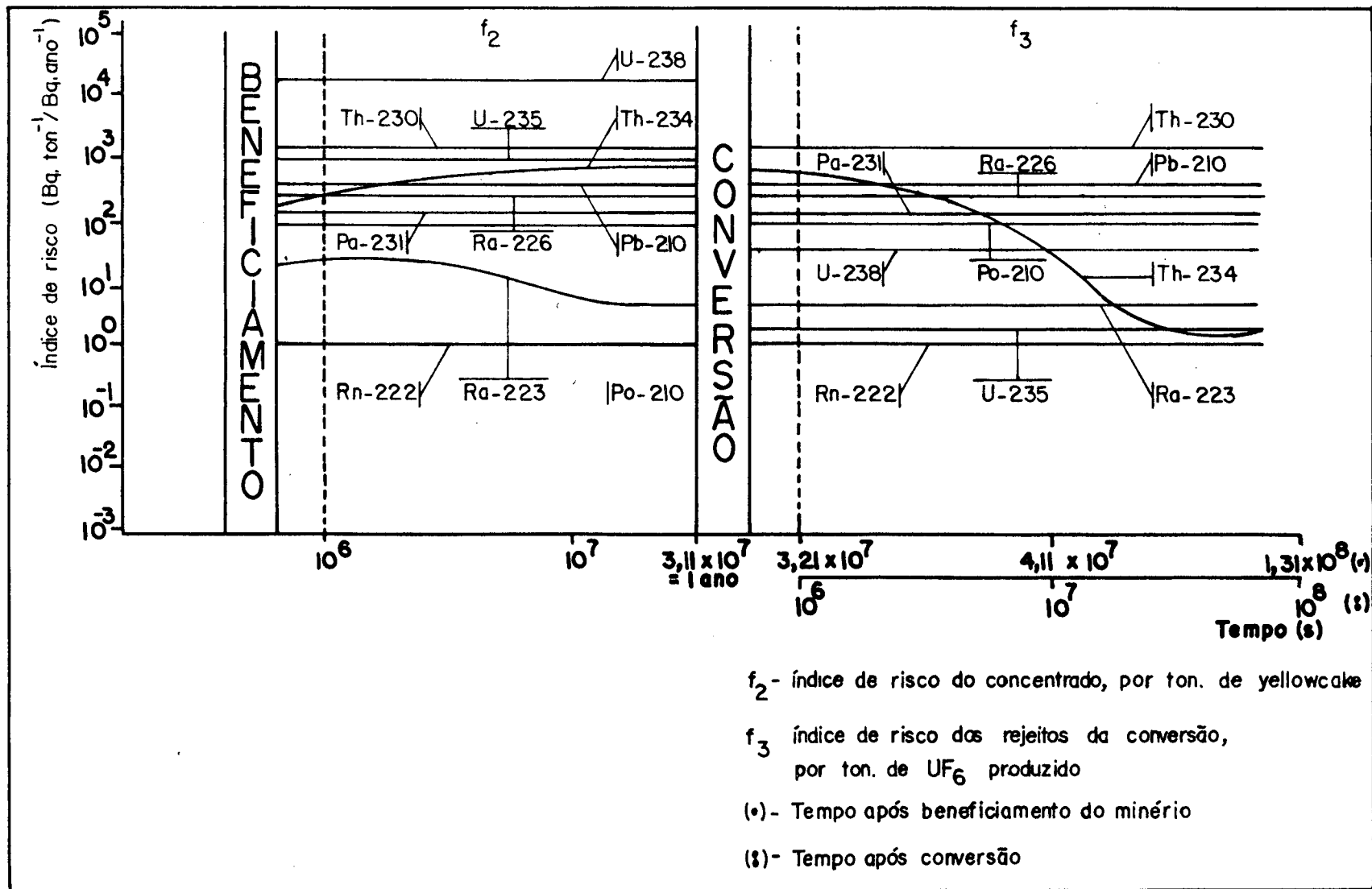


Fig.1 - Índice de risco relativo de alguns RN relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Fe 88] FERREIRA, E.G. Criteria for requesting specific radionuclide analysis through gross alfa and beta concentration measurements in environmental samples. In: CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. Proteção radiológica e controle ambiental: proceedings of a seminar on ... held at Belo Horizonte, 8-12 agosto 1988. Nuclebrás, 1988. p. 90-101.
- [Fo 85] FORSBERG, C.W. Flow-sheets and source-terms for radioactive projections. March, 1985. (ORNL-TM-8462).
- [IA 81] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from the refining and conversion of uranium ore concentrates to uranium hexafluoride. Vienna, 1981. (IAEA-TECDOC-241).
- [IC 78] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for intake of radionuclides by workers. Oxford, Pergamon, 1978. (ICRP-PUB No. 30).
- [IC 85] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radiation protection of workers in mines. Oxford, Pergamon, 1985. (ICRP Publication 47)
- [Ri 82] RING, R.J. & LEVINS, D.M. Radionuclides in process and waste streams at operating uranium mill. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from uranium mining and milling. Proceedings of a symposium on ... held at Albuquerque, 10-14 May, 1982. IAEA, Vienna, 1982. p. 247-61.
- [Se 83] SEARS, M.B.; ETNIER, E.L.. Correlation of radioactive-waste treatment costs and the environmental impact of waste effluents in the nuclear fuel cycle - Part 2: The solvent extraction-fluorination process. Oak Ridge, 1983. (ORNL-TM-8602).
- [UN 82] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATIONS. Ionizing radiation: sources and biological effects. United Nations, New York, 1982.p.255
- [US 74] UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION. Environmental survey of the uranium fuel cycle. Washington, 1974. (WASH-1248).
- [Yu 82] YUAN, Y.C. & ROBERTS, C.J. Comparative assessment of radiological impact from uranium and thorium mining and miling. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Management of wastes from uranium mining and milling. Proceedings of a symposium on ... held at Albuquerque, 10 - 14 May, 1982. IAEA, Vienna, 1982. p. 247-61.