

## RADIAÇÃO CÓSMICA E VÔO

**Waldo Fonseca Temporal:** Cel.-Méd.-Aer., Chefe da Divisão de Medicina Aeroespacial da DIRSA

**Geraldo da Fonseca Oliveira:** Maj.-Méd.-Aer., Chefe da Seção de Oftalmologia do CEMAL

**Roberta Leal Costa de Campos:** Ten.-Méd.-Aer., Assistente da Seção de Oftalmologia do CEMAL

**Maurício Stanzione Galizia:** Ten. Méd. R2, Médico, Engenheiro, Piloto Civil

### Introdução

Existem muitos tipos diferentes de radiação que fazem parte do ambiente natural em que vivemos. Embora nem todos possam ser percebidos pelos nossos órgãos sensoriais, encontram-se presentes na Terra, nos prédios e nos alimentos que comemos.

A radiação natural na forma de luz e calor é essencial para a vida. Outras formas de radiação produzidas pelo Homem (tais como microondas utilizadas para cozinhar, em radares de controle de tráfego aéreo, telefones celulares e Raios-X para fins médicos) são importantes na nossa vida cotidiana.

O Homem é um organismo muito sensível à radiação, sofrendo diversos efeitos tissulares e genéticos. Considerando que os efeitos biológicos são dependentes da dose de radiação recebida, todos os fatores que possam vir a afetar a dose, são da maior importância no estudo das radiações. Dentre estes fatores está o vôo (1,3,4).

### Conceitos

**Radiação:** Emissão e propagação de energia em forma de ondas através do espaço ou tecidos. Refere-se, geralmente, à radiação eletromagnética, classificada por sua frequência: rádio, infravermelho, visível, ultravioleta, raios-X, raios gama e raios cósmicos.

**Dose de radiação:** É a energia fornecida à matéria por transformações nucleares (radioatividade).

**Ionização:** Energia aplicada a uma molécula neutra, suficiente para convertê-la em íons positivos ou negativos.

### Tipos de Radiação

Com o fim de simplificar sua compreensão, os diferentes tipos de radiação

podem ser classificados de acordo com os efeitos que produzem na matéria. Há duas categorias principais:

**Radiação Ionizante** – por exemplo, raios cósmicos, raios-X e radiações provenientes de materiais radioativos.

**Radiação Não Ionizante** – por exemplo, luz ultravioleta, ondas de rádio e microondas.

A quantidade de radiação cósmica que chega à Terra, oriunda do Sol e do Espaço varia e depende da latitude e da altitude acima do nível do mar, como demonstra o Quadro 1.

Quadro 1 – Taxa da Dose de Radiação Cósmica em diferentes localizações da atmosfera.

Coordenadas Geográficas	Altitude		Taxa de Dose Efetiva ( $\mu\text{Sv/hora}$ )
	metros	pés	
0°, 20°E	0	0	0,028
	6.098	20.000	0,54
	9.146	30.000	1,6
	12.195	40.000	3,0
40°N, 20°E	0	0	0,037
	6.098	20.000	0,76
	9.146	30.000	2,3
	12.195	40.000	4,7
80°N, 20°E	0	0	0,041
	6.098	20.000	1,1
	9.146	30.000	4,1
	12.195	40.000	9,1

Fonte: Federal Aviation Administration (FAA) (7)

O Homem, os animais e as plantas evoluíram num ambiente contendo uma radiação natural, que, com algumas exceções, não representa um risco significativo à saúde. Porém, na atividade aérea a dose da radiação recebida aumenta significativamente.

## Radiação Cósmica

A radiação cósmica é constituída de partículas subatômicas (prótons, neutros e elétrons), que, viajando em altíssimas velocidades (400 a 800 Km / segundo), atravessam a matéria, incluindo o corpo humano. Os choques destas partículas com as moléculas da matéria (por exemplo, o choque contra moléculas do DNA) vão determinar os seus efeitos biológicos.

A Radiação Cósmica provém de duas fontes:

- 1- Espaço Sideral, em que o principal componente é o próton de alta energia.
- 2- Sol (Fig. 1), em que os prótons de baixa energia são de menor significância, exceto quando emitidos durante as tempestades solares.

## Unidades

Roentgen – Indicador básico de quantidade de radiação. Determina sua magnitude através da ionização produzida por sua passagem através de um meio. O *roentgen* se refere à ionização produzida no ar pela passagem de radiação X ou gama, especificamente, a quantidade de radiação necessária para produzir 0,001293 gramas de íons de ar contendo uma unidade eletrostática positiva ou negativa.

Rad (radiation absorbed dose) - É uma unidade antiga de medida de exposição. Um *rad* de qualquer tipo de radiação corresponde à absorção de 100 ergs por grama de qualquer meio. É uma unidade especial de dose absorvida.

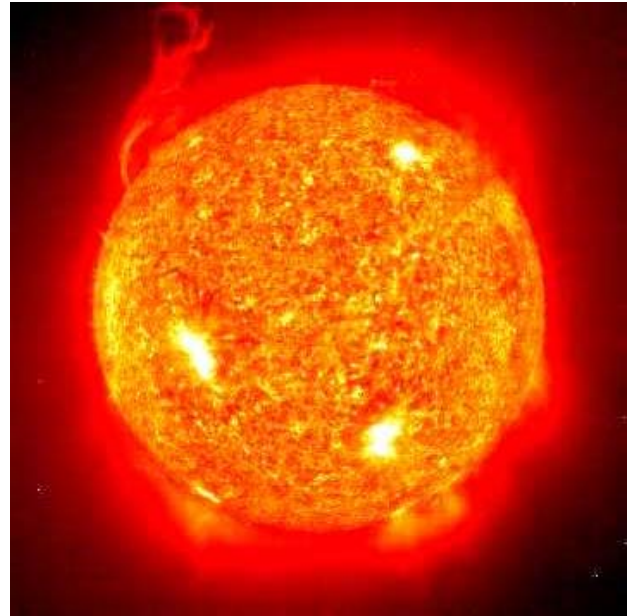
REM – (Roentgen Equivalent Man) - Refere-se à dose absorvida de qualquer radiação ionizante que produza o mesmo efeito no Homem que o de 1 roentgen de raios-X.

Sv (Sievert) – É a unidade atualmente utilizada, que expressa qualquer dose como a dose equivalente de efeito biológico. A dose equivalente em Sv é igual à dose absorvida multiplicada pelo fator Q (de qualidade da radiação

específica). 1 Sv = 100 rem

Gy (Gray) – Unidade de dose absorvida. Um Gy é igual à dose absorvida de 100 rads.

Figura 1 – O Sol



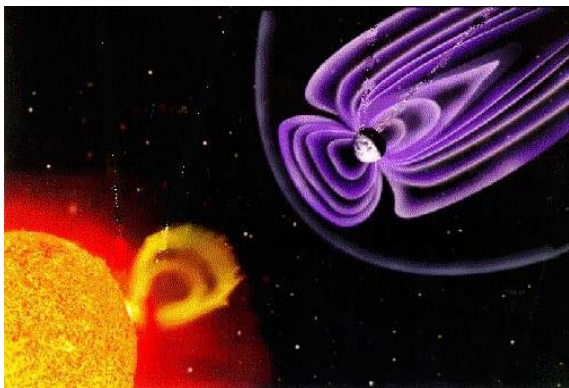
As partículas de energia mais baixa da radiação solar não contribuem significativamente para os níveis de radiação cósmica exceto por ocasião de alterações da atividade do Sol e das tempestades solares. A quantidade de radiação cósmica que penetra na atmosfera segue um ciclo de 11 anos sendo a intensidade da radiação mais baixa quando a atividade solar está em seu máximo. Em 2001, a atividade solar esteve no máximo. Naquele ano, os níveis de radiação cósmica estiveram no mínimo.

A radiação cósmica é absorvida eficazmente pela atmosfera e também é afetada pelo campo magnético da Terra. O efeito no corpo depende da latitude e da altitude em que o indivíduo estiver voando, assim como do tempo em que permanecer em vôo.

O efeito do campo magnético da Terra (Fig. 2), como escudo protetor contra as radiações cósmicas, não é homogêneo. É diferente dependendo da posição geográfica, além de possuir aberrações em algumas localizações, como a que existe próximo às Regiões Sul e Su-

deste do Brasil. Junta-se a este fato, o de que o Hemisfério Sul não foi tão estudado como o Hemisfério Norte. Daí a extrema necessidade de que se efetuem estudos e dosagens locais em vôos reais nestas latitudes e em diversas altitudes (2).

*Figura 2 – Campo Magnético da Terra*



**Dosagem da Radiação**

A radiação pode ser dosada diretamente por meio de um equipamento (Figs 3 e 4), como o que há a bordo do Concorde, ou estimada por meio de um sofisticado programa de computador que analisa a rota, o tempo em cada altitude e a fase do ciclo solar. Calcula, então, a dose de radiação recebida por tripulantes e passageiros em um determinado vôo em particular. Têm sido comparadas as medidas reais obtidas a bordo das aeronaves com as estimativas dos computadores e os dois métodos têm apresentado resultados muito semelhantes.

Em agosto de 2002, durante o 2º Curso de Introdução à Medicina Aeroespacial, promovido pela Disciplina de Cirurgia do Trauma da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (USP), o Dr. Peter Beck, físico e pesquisador austríaco apresentou alguns resultados de seus trabalhos, que incluíram uma comparação das doses de radiação recebidas anualmente por profissionais de diferentes campos de atividade. Nesta comparação, as doses anuais de radiação, em milisieverts, foram, respectivamente:

- Médicos/Dentistas/Veterinários: 2,7
- Radiografia Industrial: 3,4
- Indústria Nuclear: 3,6
- Equipagens de Vôo: 4,6
- Grandes Altitudes (aleatoriamente): 7,9

Estes resultados podem ser visualizados na Fig. 5. Chama a atenção a alta carga recebida por tripulações de vôo comparada às dos profissionais que rotineira e intencionalmente utilizam radiações no exercício de suas atividades.

*Figura 3 – Dosímetro Portátil*



*Dosímetro utilizado pelo Dr. Peter Beck (2), Vista superior*

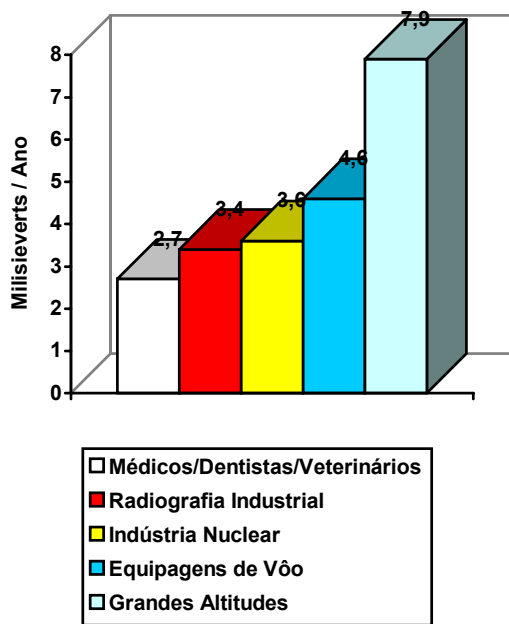
*Figura 4 – Dosímetro Portátil*



*Dosímetro utilizado pelo Dr. Peter Beck (2), Vista lateral*

Nessa ocasião, o Dr. Beck enfatizou a importância das medidas locais da radiação em vôos reais (2), o que também, foi um consenso durante o 50º Congresso Internacional de Medicina Aeroespacial, realizado em Sydney, Austrália em setembro de 2002 (1,2,3).

Figura 5 – Dose Anual de Radiação entre diversos profissionais



Fonte: Beck, P. (2)

### Limites de Exposição Máxima

Os efeitos da radiação ionizante dependem, não só da dose absorvida, mas também do tipo e energia da radiação e dos tecidos expostos. Estes fatores têm que ser levados em consideração para se chegar à Dose Equivalente, medida em Sieverts (Sv). As doses de radiação cósmica geralmente são expressas em microsieverts ( $\mu\text{Sv}$ ), que é um milionésimo de um Sievert, ou milisieverts (mSv), que é um milésimo de um Sievert. Os residentes na Grã-Bretanha são expostos a uma dose total de aproximadamente 2,6 mSv por ano de radiação ionizante ambiental.

Em vôo, a exposição depende da rota, da altitude e do tipo de aeronave. Em média as doses recebidas serão da ordem de:

Concorde – 12 a 15  $\mu\text{Sv/h}$

Aeronave de longo curso - 5  $\mu\text{Sv/h}$

Aeronave de vôos de curta duração – 1 a 3  $\mu\text{Sv/h}$ , dependendo da altitude

Para passageiros, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), recomenda um limite de 1 mSv por ano. Isto equivale a cerca de 80 horas de vôo por ano no Concorde e cerca de 200 horas por ano voando em aero-

nave subsônica em rotas trans-equatoriais. Embora a taxa da dose recebida a bordo de aeronaves subsônicas seja menor do que no Concorde, em virtude da sua menor altitude de cruzeiro, a dose total num vôo transatlântico é aproximadamente a mesma devido ao maior tempo de exposição (1, 8). Em tripulantes a dose anual máxima recomendável é de 4 a 6 mSv. Aquele que atingir 4 mSv deverá ser rigorosamente acompanhado para se assegurar que não ultrapassará 6 mSv no ano (11).

### Riscos

Quando a radiação ionizante passa através do corpo, a energia é transmitida aos tecidos, afetando os átomos de cada célula individualmente. Isto pode resultar em:

- 1) **Câncer** – Como resultado de ter sido irradiada, a célula pode ser alterada e tornar-se cancerosa. A probabilidade de que isto ocorra dependerá da dose recebida. Para uma dose acumulada de 5 mSv por ano, ao longo de uma carreira de 20 anos, a probabilidade de se desenvolver câncer devido à radiação será de 0,4%. Este fato deve ser levado em consideração quando se analisa a taxa de mortalidade por câncer, de uma população. Por exemplo, para uma população em que a taxa de mortalidade por câncer de algum tipo seja de 23%, esta exposição à radiação deve ser adicionada, e assim o risco aumenta de 23% para 23,4%.
- 2) **Efeitos Genéticos** – Uma criança concebida após a exposição da mãe ou pai à radiação ionizante tem um risco maior de herdar anomalias genéticas induzidas pela radiação. Estes podem tomar forma de anormalidades anatômicas ou funcionais evidenciadas ao nascimento ou mais tarde, durante a vida. O risco decorrente da

dose acumulada de 5 mSv por ano ao longo de uma carreira de 20 anos, será de 1 em 1.000. Este fato também deve ser considerado ao se analisar a incidência de anomalias genéticas na população geral, que é de, aproximadamente, 1 em 50.

**3) Riscos para a saúde do feto** – Tendo em vista que os tecidos do corpo da mãe e o líquido amniótico não oferecem proteção ao feto, em relação à gravidez, é recomendável que a exposição à radiação deva ser a menor possível. A Federal Aviation Administration (FAA) e a International Commission on Radiological Protection (ICRP) recomendam uma dose máxima de 1 mSv durante toda a gravidez, não ultrapassando 0,5 mSv em nenhum mês (7, 8, 9).

### Efeitos Gerais

Os estudos realizados no século XX, possibilitaram a aquisição de muitos conhecimentos sobre os efeitos biológicos da radiação. Dentre os efeitos danosos causados ao ser humano podemos citar: câncer; leucemia; tumores benignos; morte por outras doenças que não câncer; aumento dos níveis de colesterol; diminuição da fertilidade; do crescimento; aberrações cromossômicas; mutações em células sanguíneas; efeitos no sistema imunológico; efeitos neurológicos; retardamento mental; efeitos psicológicos; efeitos no processo do envelhecimento; geração de radicais livres; catarata, entre muitos outros acometendo todos os aparelhos e sistemas.

### Efeitos em Aeronavegantes

Em virtude das mudanças ocorridas, ao longo dos anos, nos perfis de vôo, em consequência da evolução tecnológica, tais como maior altitude e tempo de permanência em vôo nestas altitudes, as companhias civis e forças aéreas

de alguns países vêm, cada vez mais, estudando os problemas relacionados à exposição à radiação em vôo, como por exemplo, a British Airways, da Grã-Bretanha. Trabalhando em estreita parceria com o governo, autoridades da aviação civil e a Comissão Nacional de Proteção Radiológica (National Radiological Protection Board), essa companhia aérea tem monitorado a radiação cósmica a bordo de aeronaves por mais de 20 anos. O Concorde (Figura-6) possuía aparelhos para monitoração da radiação, permanentemente instalados.

Figura-6 – O Concorde (Vista inferior)



O Boeing 747-400, que é uma aeronave de longo curso, é regularmente monitorado. A British Airways vem, nos últimos 40 anos, realizando estudos epidemiológicos sobre a incidência de doenças e a expectativa de vida de tripulantes. A mortalidade devida ao melanoma (que é relacionado com a exposição à luz solar), foi a maior, nos países nórdicos, dentre os casos de câncer encontrados nestes estudos (1). Nas tripulantes do sexo feminino, estudos revelaram um aumento na incidência do câncer de mama (10). Um estudo epidemiológico entre pilotos da Air Canada mostrou uma incidência da leucemia mielóide (relacionada a exposição à radiação) quatro vezes maior entre pilotos do que na população geral. A incidência do astrocitoma (tumor cerebral) foi duas vezes maior nestes pilotos do que na população geral (12).

Quanto à proteção contra a radiação cósmica a bordo de aeronaves, ainda não se encontrou uma solução, pois as partículas subatômicas são dotadas de energia e velocidade de tal magnitude, que seria necessária uma parede de chumbo de cerca de 50 centímetros de espessura, o que é absolutamente inviável numa aeronave.

Utilizando-se o programa CARI-6 da Federal Aviation Administration (FAA), procederam-se aos cálculos das doses estimadas de radiação cósmica em diferentes altitudes, datas e localidades brasileiras. Os resultados encontram-se no Quadro 2.

Conforme já exposto, todos os resultados de cálculos teóricos necessitam ser validados através da dosagem local em vôos reais.

**Quadro 2 – Doses calculadas de Radiação Cósmica em vôos no Brasil.**

Local	Altitude		Data	Dose (µSv/hora)	
	metros	pés			
Rio de Janeiro (SBSC) 22°55'58" S/43°43'10" W Altitude: 3 m (10 pés)	10.671	35.000	Set 2002	2,58	
			Jan 1995	2,70	
	7.622	25.000	Set 2002	1,09	
			Jan 1995	1,14	
	4.573	15.000	Set 2002	0,29	
			Jan 1995	0,30	
	1.524	5.000	Set 2002	0,06	
			Jan 1995	0,06	
	3	10	Set 2002	0,03	
			Jan 1995	0,03	
	Macapá (SBMQ) 00°03'03" N/51°04'13" W Altitude: 17 m (56 pés)	10.671	35.000	Set 2002	2,29
				Jan 1995	2,37
7.622		25.000	Set 2002	0,98	
			Jan 1995	1,02	
4.573		15.000	Set 2002	0,26	
			Jan 1995	0,27	
1.524		5.000	Set 2002	0,05	
			Jan 1995	0,06	
17		56	Set 2002	0,03	
			Jan 1995	0,03	
Pelotas (SBPK) 31°43'08" S/52°19'41" W Altitude: 18 m (59 pés)		10.671	35.000	Set 2002	2,87
				Jan 1995	3,01
	7.622	25.000	Set 2002	1,19	
			Jan 1995	1,25	
	4.573	15.000	Set 2002	0,31	
			Jan 1995	0,33	
	1.524	5.000	Set 2002	0,06	
			Jan 1995	0,07	
	18	59	Set 2002	0,03	
			Jan 1995	0,04	

### Outras fontes de radiação

Para fins de comparação, o Quadro 3 mostra doses de radiação de diferentes fontes.

Quadro 3 – Outras fontes de Radiação

Fonte	Dose
Fogões/Aquecedores a gás natural	60 a 90 $\mu$ Sv/ano
Detetor caseiro de fumaça	0,08 $\mu$ Sv/ano
Despertador com mostrador radioativo	70 a 90 $\mu$ Sv/ano
Dormir 8h/dia próximo a outra pessoa	20 $\mu$ Sv/ano
Tabagismo (30 cig./dia)	80 $\mu$ Sv/ano
Radiografia de Tórax	250 $\mu$ Sv/cada uma
Radiografia Dentária	250 a 350 $\mu$ Sv/cada uma
Radiografia diagnóstica	390 $\mu$ Sv/cada uma
Medicina Nuclear	14 $\mu$ Sv/procedimento

Fonte: INEEL, Department of Environmental Quality, Idaho, EUA.

### Resumo

A radiação cósmica é um tema tão complexo quanto preocupante. Embora não possam ser percebidas pela visão, tato, olfato ou paladar, radiações estão sempre presentes ao nosso redor. Sabemos que não há nível de radiação abaixo do qual nenhum efeito ocorra. Podemos estimar a probabilidade da ocorrência de algum dano biológico, baseados na dose da exposição. Estes dados devem ser combinados com os resultados dos estudos epidemiológicos disponíveis.

A avaliação da dose recebida pelas equipagens de vôo e passageiros, em cada vôo específico, pode ser feita através da utilização de um sofisticado modelo em computador. Este deve levar em consideração todos os fatores do vôo que interferem com a dose da radiação recebida pelos que se encontram a bordo das aeronaves, incluindo os perfis de subida e descida, tempo de permanência em altitude, a latitude do vôo, época do ano e o ponto no ciclo solar. As estimativas do

computador devem ser periodicamente validadas através de medidas reais realizadas em vôo.

O objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre os principais parâmetros do vôo e a dose efetiva de radiação cósmica incidindo sobre os ocupantes das modernas aeronaves: passageiros e tripulantes.

### Abstract

Cosmic radiation is a complex and concerning subject. Although it cannot be seen, touched, smelt or tasted it is always present around us. There is no level of radiation exposure below which effects do not occur. It is possible to estimate the probability of any biological harm based on the dose of exposure received. This knowledge of dose received must be coupled with the results of available epidemiological studies.

The dose received during each specific flight by crew and passengers can be estimated using a sophisticated computer model. This should take into account all the factors of flight that interfere with radiation dose including the aircraft climb and descent profiles, latitude of the flight, altitude, time of the year and point in the solar cycle. The computer estimating must be periodically validated by measurements performed in actual flight.

The aim of this paper was to analyze the relationship between the major flight parameters and effective cosmic radiation dose absorbed by all those flying in the modern aircrafts: passengers and aircrew members.

### Unitermos

Radiação Cósmica, Raios Cósmicos

### Keywords

Cosmic Radiation, Cosmic Rays

## Referências

- 1 - BAGSHAW M. British Airways compliance with European cosmic radiation directive.
- 2 - BECK P. Cosmic Radiation. 2º Curso de Introdução à Medicina Aeroespacial, USP, São Paulo, 3 a 4 de agosto de 2002.
- 3 – 50º INTERNATIONAL CONGRESS OF AVIATION AND SPACE 2002. Final Report. Sydney, Australia, 2002.
- 4 – TEMPORAL WF, RIBEIRO NETO MD. Manual de Medicina de Aviação. AFA,1981.
- 5- WEBB P. Bioastronautics Data Book. 2ª Ed. Scientific and Technical Information Division, NASA, Washington, EUA, 1973
- 6 – LANGHAM W. Radiobiological factors in manned space flight. National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, EUA, 1967
- 7 – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Crewmember training on inflight radiation exposure, Advisory circular No. 120-61, Washington, EUA, 1994
- 8 – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. General principles for the radiation protection for workers, ICRP Publication 75, Annals for the ICRP 27(1), Nova Iorque, EUA, 1997
- 9 – NICHOLAS JS, COPELAND K, DUKE FE, FRIEDBER W, O'BRIEN III K. Galactic cosmic radiation exposure of pregnant aircrew members II (DOT/FAA/AM-00/33). FAA, Office of Aviation Medicine, Washington, EUA, 2000
- 10 – ZEEB H. Cosmic radiation and air transport: The ESCAPE European aircrew cohort study. 50º INTERNATIONAL CONGRESS OF AVIATION AND SPACE 2002. Final Report. Sydney, Australia, 2002.
- 11 – COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 96/29 EURATOM de 13 de maio de 1996, Official Journal of the European Communities 39, L159, 29 de Junho de 1996
- 12 – BAND PR, LE ND, DESCHAMPS M, COLDMAN AJ, GALLAGHER RP, MOODY J. Cohort study of Air Canada pilots mortality, cancer incidence and leukemia risk. American Journal of Epidemiology, Vo. 143, Nº2, 1996
- 13 – TAUHATA L., SALATI I.P.A., PRINZIO A.R.D. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 3ª v. – IRD/CNEN., Rio de Janeiro, abril/2001