

RADI AÇÃO IONI ZANTE: DOSI METRIA DE POPULAÇÕES

Elisabeth Mateus Yoshimura

Texto que sistematiza criticamente a obra de Elisabeth Mateus Yoshimura, para obtenção do título de Livre-Docente pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2003.

À Emico

Agradecimentos:

A minha família pelo carinho, paciência e compreensão.

A Emico Okuno, minha orientadora no doutorado, minha colega de trabalho nos últimos 15 ou 20 anos, minha grande amiga. É por sua dedicação, por sua liderança e trabalho árduo que o Laboratório de Dosimetria tem se mantido forte e vigoroso. Sem esse apoio, esteio e incentivo, jamais eu teria condições de me aventurar por este trabalho.

Ao Instituto de Física e ao Departamento de Física Nuclear, na pessoa de seus Diretores e Chefes, por terem dado apoio institucional ao desenvolvimento de meu trabalho. Esse apoio foi concretizado através do trabalho dedicado dos funcionários deste Instituto, a quem agradeço especialmente.

Às agências financiadoras, FAPESP CNPq e CAPES pelas bolsas de iniciação científica, mestrado e doutorado concedidas a meus alunos e ex-alunos, e pelos auxílios pesquisa e viagem que recebi nos últimos anos. A FAPESP também possibilitou a compra de vários dos equipamentos empregados nesta pesquisa.

Aos alunos e ex-alunos, cujos trabalhos foram aqui explicitamente sistematizados, pela grande contribuição a este projeto: A. A. R. Da Silva, M. B. Freitas, S. M. Otsubo, R. E. R. Oliveira, F. H. M. Medeiros e L. A. Ribeiro.

Aos colegas autores do conjunto de publicações que aqui sistematizo e que são, portanto co-autores desta síntese. Cito, explicitamente, aqueles com quem mais interagi no período: Emico Okuno, Nancy K. Umisedo, Roberto M. dos Anjos, Alessandro Facure, Paulo R. Costa e Ricardo Yano.

Aos colegas Francisco Y. Hiodo, Julio C. Hadler Neto, João D. T. Arruda Neto e Nilberto H. Medina, por cederem equipamentos, laboratórios e muita experiência, para que o trabalho aqui apresentado fosse desenvolvido.

A todos os orientados que tive no meu trabalho de pesquisa, com quem muito aprendi, de Física e de relacionamento humano, e que devem se considerar um pouco donos deste trabalho: Paulo, Anna Cristina, Marcelo, Almy, Marcos, Enoch, Sergio, Mario Sergio, Paula, Alessandro, Renata, Fernando, Vitor, Livia, Henry e Morlotti, e os co-orientados: Wille, Cintia e Ricardo.

Aos meus atuais alunos: Almy, Fernando, Henry, Livia, Marcelo e Morlotti, por terem tido mais paciência que o normal, e por terem suportado ficar em segundo plano nos últimos tempos.

Aos colegas e amigos do Instituto de Física, dos quais recebi enorme incentivo quando falei da decisão de fazer a livre-docência. Nomeio os que me ofereceram ajuda (mesmo que eu não tenha aceitado) e carinho especial: Cecil, Emico, Helena, Luiz, Maria Regina, Mazé e Raphael.

Aos colegas do Laboratório de Dosimetria ainda não citados, mas de grande importância na minha vida: Ana Regina, Nancy, Carla, Martha, Edu, Gabriel, Roberto, Mario Sandro, Francisco, Saulo, Salete, Iracimara, Karin, por estarem sempre por perto (mesmo fisicamente longe), por ajudarem a manter esta "família".

Resumo

São apresentados metodologia e resultados de pesquisa recente na área de Física das Radiações Ionizantes, envolvendo: avaliação de níveis radiação ambiental – gama e radônio – na cidade de São Paulo; revisão da situação ambiental da cidade de Goiânia, 12 a 14 anos após o acidente radiológico; dosimetria em radiodiagnóstico.

Desenvolveu-se metodologia para determinar separadamente a concentração de ^{222}Rn e de seus descendentes radioativos alfa-emissores, no ar de ambientes fechados (residenciais ou de trabalho). Utilizam-se detectores plásticos por contagem de traços nucleares, em geometria de filme fino, com o uso ou não de filtros, a fim de selecionar as partículas alfa emitidas pelos diferentes radionuclídeos em questão. O exame semi-automático dos traços com técnicas de análise de imagem permite a distinção de energias das partículas alfa. Está em andamento o levantamento de valores representativos para os níveis de radônio presentes em residências da cidade de São Paulo.

Utilizando-se espectrometria gama *in situ*, observou-se que, em São Paulo, a taxa de dose devida a raios gama em locais fechados comerciais é mais elevada que a céu aberto, e mais alta em comércio de rua e agências bancárias que em shopping centers. Além disso, obteve-se uma média de taxa de dose absorvida no ar, a céu aberto (88 nGy.h^{-1}), que se encontra no grupo de doses mais elevado relatado mundialmente. Tendo em vista os resultados apresentados e os em andamento, concluiu-se que a presença de edificações na cidade é, em parte, responsável pelas altas taxas de dose. Em complemento, está em desenvolvimento um estudo sistemático adicional, para obter concentrações de urânio, tório e potássio em amostras de solo da cidade e as taxas de dose gama devidas unicamente a radionuclídeos no solo.

Em parte com a mesma metodologia, mas restrita à busca de contaminação, estudou-se os locais da cidade de Goiânia que foram contaminados por ^{137}Cs , no acidente radiológico de 1987. Observou-se, no local que apresentava as maiores taxas de dose, que o perfil de concentração de césio em profundidade no solo não correspondia ao esperado para uma contaminação a partir da superfície: havia uma camada de solo, misturada a entulho, situada a partir de 15 ou 20 cm de profundidade, com altas concentrações desse nuclídeo. Com os resultados obtidos, conscientes de que moradores desse local recebiam doses injustificadas, conseguiu-se que a Comissão Nacional de Energia Nuclear solucionasse em parte o problema com a colocação de uma camada de concreto sobre todo o terreno em questão, além de retirar árvores contaminadas. Foram também publicados artigos que sugerem a inclusão de estudos de radiação ambiental em laboratórios didáticos de cursos de Física.

No estudo de doses em pacientes de radiodiagnóstico, são mostrados resultados para tomografia computadorizada de cabeça e abdome, utilizando-se simuladores homogêneos para obter perfis de dose e calcular doses efetivas. São apresentados ainda resultados de levantamentos de doses recebidas por pacientes submetidos a exames radiológicos convencionais de tórax na cidade de São Paulo e um procedimento, em andamento, para avaliar doses estatisticamente significativas nesse e outros exames, para um conjunto de clínicas e hospitais do Estado de São Paulo. Para obter os valores de dose utilizam-se técnicas de termoluminescência, simulação de transporte de fótons e de elétrons por Monte Carlo, espectroscopia de fótons de alta resolução, além de técnicas de amostragem e uma análise criteriosa dos dados fornecidos por órgãos sanitários brasileiros sobre o emprego de exames radiológicos. Destaca-se o grupo de pacientes infantis que tem importância maior devido ao risco mais elevado de efeitos estocásticos e sobre os quais pouco se conhece no Brasil.

Índice

Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	vii
Apresentação.....	viii
I. RADIAÇÃO AMBIENTAL: radônio e emissores gama	1
I.1. Introdução	1
I.2. Métodos de Trabalho e Resultados.....	2
I.2 a) Radiação gama	2
I.2 b) Radônio	3
I.3. Conclusões	6
I.4. Referências.....	6
II. CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL: o acidente de Goiânia.....	9
II.1. Introdução.....	9
II.2. Métodos de Trabalho e Resultados.....	9
II.3. Conclusões.....	13
II.4. Referências	13
III. DOSIMETRIA DE PROCEDIMENTOS MÉDICOS: radiologia diagnóstica	15
III.1. Introdução	15
III.2. Métodos de Trabalho e Resultados	15
III.2 a) Radiologia diagnóstica e a população	15
III.2 b) Radiografias torácicas na cidade de São Paulo	16
III.2 c) Levantamento de DEP no Estado de São Paulo	17
III.2 d) Radiodiagnóstico infantil	18
III.2 e) Doses efetivas em CT.....	20
III.2 f) Determinação de espectros de raios X.....	22
III.3. Conclusões	23
III.4. Referências	23

Lista de Figuras

Figura I.1 – Distribuição de dose efetiva média mundial (2,8 mSv) segundo a origem, conforme o UNSCEAR. Os valores relativos são: 10,3% ingestão, 44,6% inalação, 17% irradiação externa por gama terrestre, 14% radiação cósmica, 14% diagnóstico médico.....	1
Figura I.2 – Distribuições relativas de equivalente de dose ambiente em São Paulo.....	3
Figura I.3 – Relação entre dois parâmetros de traços circulares obtidos em LR115, irradiado em atmosfera de radônio e filhos, em baixa condição de ventilação	4
Figura I.4 – Gráfico de dispersão de dois conjuntos de variáveis, utilizados para estratificação dos aproximadamente 13.000 setores censitários da cidade de São Paulo em 12 grupos	5
Figura II.1. Distribuição da atividade de céσιο no solo, medida experimentalmente, em função da profundidade para um local de Goiânia onde a contaminação superficial era 14 kBq.kg ⁻¹ . A curva representa o ajuste exponencial: $A = A_0 \exp(-\alpha x)$, onde $\alpha = 0.12 \text{ cm}^{-1}$	10
Figura II.2. Concentração de ¹³⁷ Cs em amostras de solo de um dos terrenos de Goiânia. A numeração dos locais de coleta do solo corresponde aos pontos de medição da Tabela II.1.	11
Figura II.3. Localização dos pontos de medida TL um dos terrenos de Goiânia	12
Figura II.4 – Histogramas de taxa de equivalente de dose ambiente no terreno da Figura II.3, antes e depois da colocação de camada de concreto pela CNEN.....	12
Figura II.5 – Histograma de taxa de equivalente de dose ambiente em locais não contaminados da cidade de Goiânia	13
Figura III.1. Contribuições médias mundiais para a distribuição de cada exame e para a dose coletiva, por tipo de exame, divulgado pelo UNSCEAR	16
Figura III.2. Distribuição de doses de entrada na pele – ESD (mGy) – para radiografias de tórax: (a) projeção postero-anterior (PA) e (b) projeção lateral (LAT). As linhas verticais contínua, tracejada e pontilhada indicam, respectivamente, média, mediana e 3º quartil.....	16
Figura III.3 – Distribuição dos valores de dose de entrada na pele (mGy) para exames de tórax em pacientes infantis, projeções (a) PA e (b) LAT	18
Figura III.4. Distribuição dos exames radiológicos infantis, segundo o tipo, em um grande hospital de São Paulo: 60% tórax, 19% crânio e face, 11% membros superiores, 6% membros inferiores, outros inclui coluna, bacia e abdome (4%)	19
Figura III.5 - Distribuição etária das radiografias infantis para os dois tipos mais frequentes desses exames realizados em um grande hospital de São Paulo: tórax (60% dos exames) crânio e face (19% dos exames)	19
Figura III.6 – Perfil de dose típico em CT: espessura de corte de 10 mm, 120 kV e 200 mAs. Simulador de crânio à base de água e posicionado no orifício central.....	20
Figura III.7 – Espectros medido e corrigido, obtidos com o detector CdZnTe. Condições do feixe: 100 kV e 4.0 mmAl de filtração adicional	22

Lista de Tabelas

Tabela II.1 – Valores de taxa de dose no ar a 1 m do solo em um terreno de Goiânia, mostrado na Figura II.3	11
Tabela II.2 – Equivalentes de dose pessoal obtidos por TL no terreno de Goiânia visto na Figura II.3.....	12
Tabela III.1 –Frequência anual, para 2001, de exames radiológicos conduzidos no Estado de São Paulo.....	17
Tabela III.2 - Valores médios de DEP (mGy) para radiografias de tórax (AP, PA e/ou LAT), segundo a faixa etária. Entre parênteses estão os valores mínimo e máximo	18
Tabela III.3 – Resultado das medidas de CTDI realizados com câmara de ionização e TLD e cálculos da dose efetiva em exames de CT de homem adulto (crânio e abdome) em diferentes equipamentos. Os sobrescritos s e c se referem a superfície e centro do simulador	21

Apresentação:

A escolha do conjunto de trabalhos aqui sistematizado não foi uma tarefa fácil. Apesar de entender que há um fio condutor que poderia incluir quase todos os trabalhos que publiquei (a interação da radiação com a matéria), optei em colocar somente os trabalhos aplicados, publicados ou submetidos para publicação nos últimos 5 anos. O período de tempo (1999 a 2003) me pareceu adequado por não ser extenso demais, mas permitir um olhar mais abrangente sobre a carreira. O recorte tornou possível tomar uma linha mais sólida de encadeamento de idéias. A escolha por uma dosimetria de populações deixa implícito que reflito sobre efeitos de radiação a baixas doses e que gostaria de ver resultados deste trabalho incluídos em algum estudo epidemiológico relacionando radiação e incidência de câncer. Isso talvez seja possível para dosimetria ocupacional de radônio e certamente é para a população de Goiânia, que esperamos esteja em andamento.

Incluí alguns artigos submetidos para publicação recentemente, pois os considero parte importante desse todo – na hipótese de serem aceitos, faltam correções introduzidas pelos árbitros; se não aceitos, ficam as idéias. A lista abrange também os artigos publicados ou a publicar em anais de conferências com arbitragem de publicação. Para melhor organização os trabalhos foram agrupados por assunto, como listado abaixo, e assim separados ao final do trabalho. Para cada um dos três assuntos, por comodidade de leitura, redigi seções separadas, completas, inclusive com bibliografia, mesmo que algumas referências se repitam entre as seções:

I. Radiação ambiental: radônio e emissores gama

- I.1. OTSUBO S M, YOSHIMURA E M – Contribuição da radiação gama em ambientes fechados para a dose populacional na cidade de São Paulo. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
- I.2. DA SILVA A A R, YOSHIMURA E M – Calibration of LR115 plastic detectors in realistic conditions to indoor radon and daughters monitoring. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil, 29/4 a 4/5/2001.
- I.3. YOSHIMURA E M, UMISEDON K, OKUNO E – Assessment of ambient dose equivalent rate: performance of an automatic survey meter as an instrument to quantify the presence of radiation in soils. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **487(3)**, 457-464, 2002.
- I.4. DA SILVA A A R, YOSHIMURA E M – Calibration of LR115 for ^{222}Rn monitoring taking into account the plate-out effect. *Radiation Protection Dosimetry* **103(4)**, 367-370, 2003 (no prelo).
- I.5. DA SILVA A A R, YOSHIMURA E M – Thin film geometry to determine separately indoor ^{222}Rn concentration. Submetido a *Radiation Measurements*, 2003.
- I.6. YOSHIMURA E M, OTSUBO S M, OLIVEIRA R E R – Gamma ray contribution to the ambient dose rate in the city of São Paulo, Brazil. Submetido a *Radiation Measurements*, 2003.

II. Contaminação ambiental: o acidente de Goiânia

- II.1. ANJOS R M, FACURE A, MACARIO K C D, YOSHIMURA E M, BRAGE J A P, TERRA E M, TOMPAKOW H, GOMES P R S, ALHANATI C E, S. CARDOSO N M, SANTORO M D N, BOYD A L - E Estudo do acidente radiológico de Goiânia no ensino de Física Moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22(1)**, 60-68, 2000.
- II.2. ANJOS R M, FACURE A, LIMA E L N, GOMES P R S, SANTOS M S, BRAGE J A P, OKUNO E, YOSHIMURA E M, UMISEDON K - Radioactivity teaching: environmental consequences of the radiological accident in Goiânia (Brazil). *American Journal of Physics* **69(3)**, 377-381, 2001.
- II.3. YOSHIMURA E M, UMISEDON K, FACURE A, ANJOS R M, OKUNO E - Ambient dose equivalent rate in Goiânia 12 years after the radiological accident. *Health Physics* **80(6)**, 532-536, 2001.

- II.4. FACURE A, UMISEDO N K, OKUNO E, YOSHIMURA E M, GOMES P R S, ANJOS R M – Remains of ^{137}Cs contamination in the city of Goiânia, Brazil. *Radiation Protection Dosimetry* **95(1)**, 165-171, 2001.
- II.5. UMISEDO N K, OKUNO E, YOSHIMURA E M, GUIMARÃES C C, FACURE A, ANJOS R M – Recent evaluation of gamma radiation levels due to ^{137}Cs accident in Goiânia. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
- II.6. FACURE A, UMISEDO N K, OKUNO E, YOSHIMURA E M, GOMES P R S, ANJOS R M – Measurements performed in Goiânia after a new intervention action in 2001. *Radiation Protection Dosimetry* **98(4)**, 433-436, 2002.
- II.7. ANJOS R M, UMISEDO N K, FACURE A, YOSHIMURA E M, GOMES P R S, OKUNO E – Goiânia: 12 Years after the ^{137}Cs Radiological Accident. *Radiation Protection Dosimetry* **100(1-4)**, 201-204, 2002.

III. Dosimetria de procedimentos médicos: radiologia diagnóstica

- III.1. FREITAS M B, YOSHIMURA E M – Absorbed doses and physical parameters employed in chest radiological examinations carried out in hospitals of city of São Paulo. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
- III.2. FREITAS M B, YOSHIMURA E M – An overview of doses to patients and irradiation conditions of routine diagnostic x-ray examinations carried out in hospitals of the city of São Paulo – Brazil. *Radiation Protection Dosimetry*, **103(2)**, 141-148, 2003.
- III.3. YANO R, SAITO R H, SEVERO L S, YOSHIMURA E M, COSTA P R – Estudo comparativo das doses efetivas em exames de tomografia computadorizada de cabeça e abdome. Aceito para apresentação em painel no VIII Congresso Brasileiro de Física Médica, 13 a 16 de maio de 2003, Centro de Eventos da PUCRS, Porto Alegre/RS.
- III.4. FREITAS M B, RIBEIRO L A, YOSHIMURA E M – Exames radiológicos infantis em São Paulo: avaliação inicial de procedimentos, faixa etária e dose de entrada na pele. Aceito para apresentação oral no VIII Congresso Brasileiro de Física Médica, 13 a 16 de maio de 2003, Centro de Eventos da PUCRS, Porto Alegre/RS.

I. RADIAÇÃO AMBIENTAL: radônio e emissores gama

I.1. Introdução:

Neste assunto defenderam mestrado três de meus alunos¹⁻³, há em andamento duas dissertações de mestrado e uma tese de doutorado. Em parte houve desenvolvimento de metodologia, e em parte adaptação de metodologia tradicional.

Existem alternativas diversas para tratar o problema da radiação ambiental. Escolhemos o ponto de vista dosimétrico, o que significa determinar grandezas dosimétricas. Para raios gama do solo e de materiais de construção, de fato determinamos o equivalente de dose ambiente e, a partir dele avaliamos taxa de kerma ou de dose no ar. Para a contribuição do radônio, temos como meta a determinação em separado das concentrações de radônio e de seus filhos alfa-emissores, que são necessárias para que avaliações de dose possam ser posteriormente feitas.

A chamada radiação ambiental existente na terra é quase totalmente devida aos radionuclídeos das séries do urânio e do tório, e ao potássio natural, presentes no solo e nos produtos dele derivados (materiais de construção, principalmente). Outros nuclídeos no solo ou mesmo os cosmogênicos têm pouca importância do ponto de vista de deposição de energia nos organismos, devido ao tipo e energia da desintegração ou às concentrações encontradas. A radiação cósmica diretamente, contribui com frações inferiores a 15% da dose efetiva total, para a maior parte dos habitantes do planeta⁴, como se vê na Figura I.1. Os elementos radioativos das séries naturais e o potássio-40 contribuem para a dose, em maior ou menor monta, por irradiação gama externa, por irradiação interna através da ingestão em alimentos e da inalação de elementos presentes no ar, ligados ou não a aerossóis.

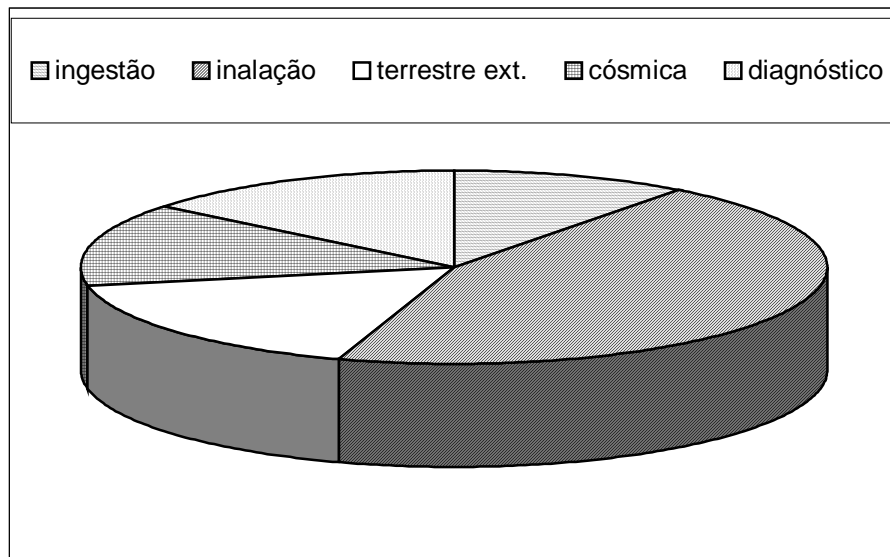


Figura I.1 – Distribuição de dose efetiva média mundial (2,8 mSv) segundo a origem, conforme o UNSCEAR⁴. Os valores relativos são: 10,3% ingestão, 44,6% inalação, 17% irradiação externa por gama terrestre, 14% radiação cósmica, 14% diagnóstico médico.

Dos decaimentos dos nuclídeos naturais, são de grande importância os que levam à emissão de fótons, devido à grande penetração dos raios gama em geral. As energias gama emitidas cobrem uma ampla faixa fazendo com que a população humana

seja irradiada por fótons emitidos a distâncias relativamente grandes, em percurso direto ou após espalhamentos intermediários ocorridos no solo, na atmosfera, ou em outros meios. O espectro de energia dos fótons que irradiam os seres humanos não guarda assim relação simples com as energias gama emitidas, sendo bastante amplo, com algumas linhas destacadas⁵⁻⁷.

Além dos raios gama, há a dose absorvida devido a emissões alfa efetivadas dentro do corpo humano, mais especificamente nas vias respiratórias. Essas emissões são quase exclusivamente atribuídas aos dois isótopos de polônio provenientes da desintegração do radônio-222 (série do urânio-238). Isso porque, por ter alcance muito reduzido, a partícula alfa só pode atingir o interior do corpo humano se o nuclídeo que a emitir já lá estiver. Essa importância do radônio para a dose ambiental se dá por ser ele um gás nobre que é produzido continuamente (a taxa constante) e tem meia-vida (3,8 dias) que lhe proporciona tempo de difusão do solo ou do material de construção para os ambientes de convívio humano. O comprimento característico de difusão do gás radônio é de algumas dezenas de centímetros, dependendo do solo⁸. A desintegração do radônio no ar ou no interior das vias aéreas produz dois descendentes alfa-emissores, com comportamento químico de metal, meias-vidas curtas (3,05 min para o ²¹⁸Po, e $1,6 \times 10^{-4}$ s para o ²¹⁴Po), que, uma vez dentro do corpo, dificilmente são eliminados. Cada partícula alfa emitida deposita toda sua energia cinética em um pequeno percurso, o que pode causar grande dano biológico.

Quando se trata de radiação ambiental, os efeitos biológicos a considerar se restringem aos chamados efeitos estocásticos: indução de câncer e efeitos hereditários. A motivação atual maior para o estudo de doses populacionais e níveis de radônio vem das grandes controvérsias a respeito dos efeitos de doses baixas e taxas baixas de radiação⁹⁻¹⁶. Quanto melhor se avaliam os níveis ambientais, melhor se pode conhecer os efeitos de baixas doses. Em particular, quando se trata do radônio, há muitos parâmetros que afetam tanto a concentração desse nuclídeo quanto a relação entre sua concentração e a de seus descendentes, tornando possível que, de um ambiente de convívio humano para outro, na mesma região, as doses absorvidas sejam muito distintas.

1.2. Métodos de Trabalho e Resultados:

1.2 a) Radiação gama:

Boa parte do trabalho tem sido feito com medidas *in situ* com detector de iodeto de sódio, calibrado em equivalente de dose ambiente, com metodologia que discutimos em artigo longo¹⁷. O principal motivo da escolha é a possibilidade de obter resultados com tempos curtos de integração, no local freqüentado pela população, o que é de suma importância em locais com grande quantidade de edificações como São Paulo. O resultado do trabalho desses últimos anos, com medidas na cidade de São Paulo, em locais fechados comerciais¹⁸ e em locais abertos, foi resumido em artigo que submetemos recentemente¹⁹. Para chegar aos números finais (equivalentes de dose ambiente de 110 nSv.h^{-1} para locais a céu aberto, 122 nSv.h^{-1} em shopping centers e 173 nSv.h^{-1} em agências bancárias e comércio de rua), fizemos um conjunto muito grande de medidas, observamos distribuições largas de resultados, avaliamos contribuição de radiação cósmica para os resultados medidos, pela medida sobre extensas represas, fizemos testes estatísticos de hipóteses. A Figura I.2 ilustra os histogramas relativos para resultados de equivalente de dose ambiente a céu aberto (à esquerda) e em ambientes comerciais fechados, classificados por tipo de comércio. Os valores para nossa cidade estão entre os mais elevados relatados em todo o mundo⁴,

talvez porque a quantidade de edifícios aumente muito o valor de dose devido somente ao solo. Espera-se que esse aumento na dose ocorra por dois fatores: pelo papel de meio espalhador desempenhado pelas edificações, e pelo incremento na quantidade de núcleos que contribui para a dose.

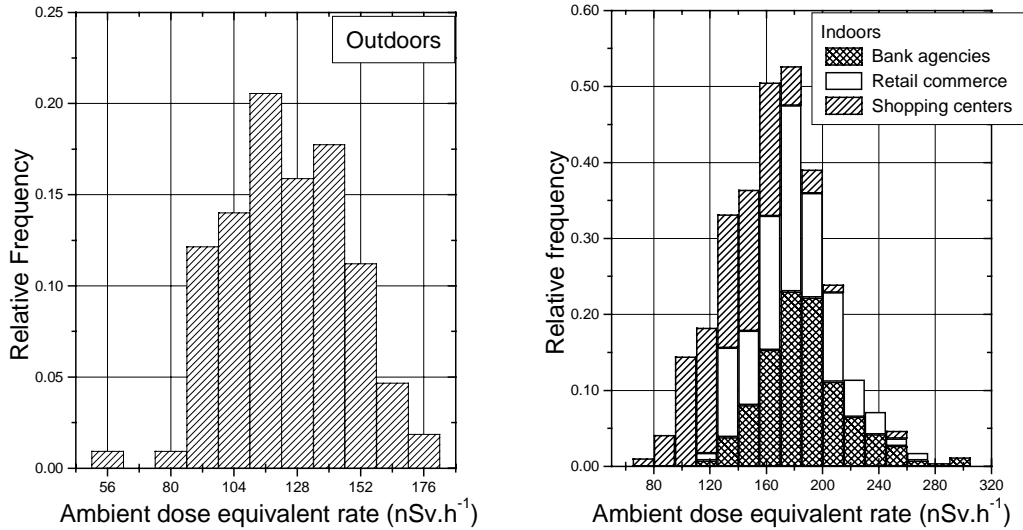


Figura 1.2 – Distribuições relativas de equivalente de dose ambiente em São Paulo.

Para corroborar essa hipótese, passamos a avaliar a contribuição isolada do solo, realizando medidas nos grandes parques da cidade, a 1,0 m do solo e a 0,70 m de profundidade, com o mesmo equipamento, além de coletar amostras para realizar avaliação em laboratório (com HPGe) dos teores de urânio, tório e potássio no solo da cidade (não há disponível nenhum trabalho sistemático publicado com essa avaliação). Os resultados que já temos²⁰ indicam que, de fato, as taxas de dose são mais baixas em regiões sem edificações e, mais que isso, a contribuição do solo para a dose gama ambiental pode ser avaliada de maneira simples – basta realizar uma medida de equivalente de dose ambiente a 0,70 m de profundidade. As simulações com o código de Monte Carlo MCNP levaram ao mesmo resultado, para uma simetria de solo infinito e concentração homogênea, em qualquer proporção, dos isótopos das séries naturais: há uma relação linear entre a dose absorvida medida no ar, a 1 m do solo, e aquela em profundidade. O coeficiente angular dessa reta é o mesmo para o conjunto de linhas gama emitidas nas séries do tório e do urânio.

1.2 b) Radônio:

A pesquisa que temos feito foi uma opção pelo método passivo de detecção de radônio, em ambientes fechados. Os motivos principais são o desconhecimento sobre os níveis de radônio no Brasil, os valores relativamente altos que temos encontrado para a radiação gama em São Paulo, e os resultados em vários países do mundo, que indicam que, dependendo das condições de ventilação e das características do solo, pode haver níveis preocupantes de radônio na atmosfera de residências^{4,21}. Com o método passivo, utilizando detectores de traços nucleares, é possível avaliar níveis médios de emissores alfa no ar ambiente, em períodos relativamente longos de tempo, o que é ideal para se avaliar a exposição recebida pelos moradores. Medidas pontuais servem para avaliar ocorrências específicas, mas não podem ser estendidas no tempo devido aos diversos fatores que afetam a presença de radônio e o equilíbrio relativo com seus descendentes em escalas de tempo relativamente curtas. Boa parte das dificuldades para a

determinação de concentrações de emissores alfa no ar vem das características químicas dos descendentes do radônio (polônio, bismuto e chumbo): por terem comportamento metálico e serem eletricamente carregados ao se formarem²², eles, com facilidade, se depositam em superfícies (fenômeno conhecido como *plate-out*) e se agregam a aerossóis.

Nosso primeiro resultado* foi a determinação da concentração total de emissões alfa no ar, com detectores plásticos (LR115), levando em conta a existência de *plate-out*^{23,24}. Para esse detector com 12 μm de espessura, irradiado nu e com o tratamento químico padrão, não é possível registrar partículas alfa emitidas por qualquer dos núclídeos da sub-série do radônio exatamente sobre sua superfície (auto *plate-out*) por causa de sua resposta energética. Esse fato faz com que a concentração seja subestimada, por isso a necessidade de calibração em situação conhecida²⁵.

Com a concentração total de emissores alfa é possível fazer estimativas das concentrações parciais (de radônio e de filhos), utilizando-se fatores de equilíbrio empíricos, encontrados na literatura⁴. Devido às incertezas inerentes ao uso desse fator, passamos a investir na determinação em separado da concentração do gás radônio. Para isso desenvolvemos um monitor com geometria de filme fino, cujas dimensões evitam quase totalmente (em condições normais de ventilação) a chegada de filhos do radônio na porção central do dispositivo, onde se encontra um pequeno detector de LR115, coberto por folha de alumínio. Submetemos recentemente artigo com os resultados²⁶, onde mostramos que, com a análise semi-automática das imagens de microscopia óptica do detector, é possível obter as energias das partículas alfa que incidem no detector, e, por considerações de geometria, obter traços devidos unicamente ao radônio-222 presente no ar.

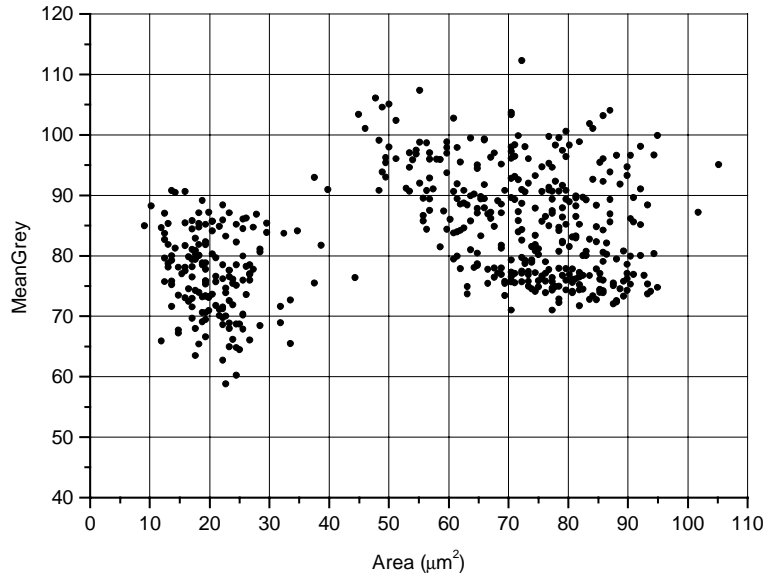


Figura I.3 – Relação entre dois parâmetros de traços circulares obtidos em LR115, irradiado em atmosfera de radônio e filhos, em baixa condição de ventilação.

A Figura I.3 resume a forma de análise dos resultados: gráficos de dispersão de dois parâmetros – um relacionado a sua opacidade e outro às dimensões – de traços circulares permitem a distinção entre traços de $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ (o grupo à direita no

* O trabalho deve grande parte do seu sucesso à colaboração que tivemos do grupo liderado pelo Prof. J. C. Hadler Neto, do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do IFGW-Unicamp.

gráfico da figura I.3) daqueles devidos a ^{214}Po , sendo que os dois isótopos de polônio são produzidos dentro do monitor, a partir da desintegração do radônio. Parte importante do trabalho foi avaliar a razão entre as densidades desses dois conjuntos de traços, obtendo o resultado 2, provando o equilíbrio secular dentro do monitor e a medição exclusiva de radônio.

O trabalho está agora em fase de coleta de dados em campo, com a intenção de obter um primeiro perfil da quantidade de radônio presente em domicílios de São Paulo. Com a ajuda da Profa. Nilza Nunes da Silva (Dep. de Epidemiologia da Faculdade de Saúde Pública) que nos forneceu o resultado da estratificação dos dados censitários²⁷ baseado nas variáveis: renda média familiar, idade e escolaridade das pessoas responsáveis, número de moradores por domicílio, presença de crianças, adolescentes e idosos, e tipo de moradia, foi possível planejar e obter uma amostra representativa de residências na cidade²⁸. São 12 estratos, com as características resumidas na Figura I.4, sem distinção por região geográfica, dos quais selecionamos os de números 1, 2 e 8, pela predominância de residências térreas, e por abarcarem várias faixas de renda.

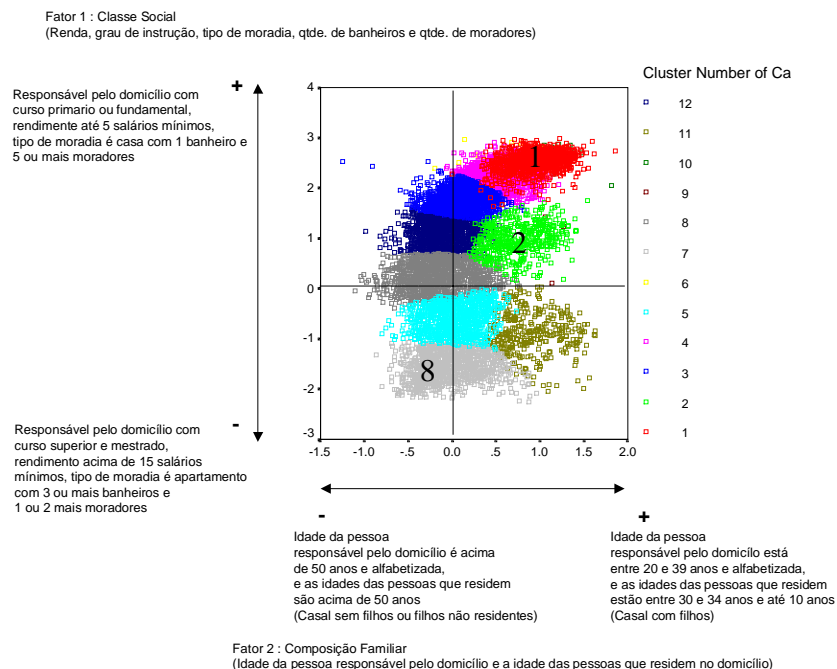


Figura I.4 – Gráfico de dispersão de dois conjuntos de variáveis, utilizados para estratificação dos aproximadamente 13.000 setores censitários da cidade de São Paulo em 12 grupos²⁸.

Foi feito então um sorteio em dois estágios²⁹: desse conjunto de estratos sorteou-se 14 setores censitários, e em cada um deles 5 residências foram aleatoriamente escolhidas, totalizando uma amostra com 70 residências espalhadas em diversos distritos da cidade. Iniciamos a exposição em cada uma das residências, de um monitor de radônio, que possui, além do detector interno de LR115, outro detector externo (nu) para avaliar a emissão alfa total, e um detector gama por termoluminescência. Esses monitores permanecerão nas residências por um período aproximado de 6 meses, quando serão analisados em laboratório. Além deles, outro conjunto colocado em residências escolhidas, está sendo utilizado para testes de ventilação. Parte do trabalho será apresentada no próximo congresso da ABRASCO (Associação Brasileira de Pós-Graduação em Saúde Coletiva), em julho³⁰.

Para a realização desse trabalho contamos com o apoio da FAPESP (item X.7 do memorial) que possibilitou a compra de um sistema semi-automático de aquisição e

análise de imagens³¹ – câmera, placa, adaptadores e programa, e uma fonte de radônio (Pylon Electronics 2000 A, com 100 kBq de ²²⁶Ra) que será utilizada brevemente para a calibração dos monitores.

1.3. Conclusões:

Temos hoje um melhor conhecimento da situação da radiação ambiental na cidade de São Paulo. Os resultados que estamos publicando podem ser comparados aos de outros locais do mundo, mas dificilmente serão usados em tempo próximo para estudos epidemiológicos de câncer. Apesar de os registros de câncer na cidade de São Paulo³² concluírem que a incidência do câncer no Brasil pode ser considerada elevada ou moderadamente elevada, sendo São Paulo a cidade brasileira com os índices mais elevados no período analisado (412,9/100.000 entre homens em 1993 e 330,0/100.000, entre mulheres em 1993), atribuir esse excessivo número de casos à radiação ambiental seria uma leviandade.

Como se sabe, o câncer é uma (ou são várias) doença que decorre de um número muito grande de fatores, de genéticos a ambientais. O detrimento considerado hoje para a população em geral, é de 0,05 casos de câncer fatal e 0,01 de câncer não-fatal por Sievert de dose efetiva³³, considerando a hipótese de relação linear entre incidência e dose. Numa conjectura (pessimista) de que as doses ambientais em São Paulo sejam o dobro da média mundial, teríamos um aumento de 1.680 casos de câncer (fatal e não-fatal) na cidade, em um ano. Como houve, em 1997, 31.023 novos casos³² na cidade (excluído o câncer de pele), em torno de 5% deles teriam sido causados por tal excesso de dose ambiental. Seria impossível tratar essa situação com os métodos epidemiológicos tradicionais.

É claro que melhor conhecimento da relação entre radiação e indução de câncer, possibilitaria realizar inferências com os estudos de doses ambientais em geral. No atual estágio de conhecimento, haveria possibilidade de um estudo epidemiológico para grupos de indivíduos (trabalhadores, provavelmente) que, comprovadamente, estivessem submetidos a níveis de radiação ambiental superiores ao restante da população.

1.4. Referências:

-
1. Da Silva A A R - Determinação da concentração de radônio e filhos com detectores plásticos. Dissertação de Mestrado (IFUSP), 2000.
 2. Oliveira R E R - Doses populacionais de radiação ionizante na cidade de São Paulo: medidas de dose gama a céu aberto. Dissertação de Mestrado (IFUSP), 2001.
 3. Otsubo S M - Contribuição da radiação gama em ambientes fechados para a dose populacional na cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado (IFUSP), 2001.
 4. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation – Annex B, United Nations, New York, United Nations sales publication E.00.IX.3, 2000.
 5. Beck H L, de Planque G - The radiation field in air due to the distributed gamma-ray sources in the ground. Report HASL – 195, U. S. Atomic Energy Commission, New York, 1968.
 6. Beck H L – External environmental radiation-levels from natural sources. Transactions of the American Nuclear Society **26**, 117-118, 1977.
 7. Saito K, Jacob P – Gamma-ray fields in the air due to sources in the ground. Radiat. Prot. Dosim. **58**, 29-45, 1995.

8. Abumarad K M, Atallah M, Kullab M K and Ismail A – Estimation of radon soil concentration levels in the governorate of Irbid, Jordan. *Radiation Measurements* **28(1-6)**, 585-588, 1997.
9. Field R W, Duport P J – Point / Counterpoint: Exposure to residential radon causes lung cancer. *Medical Physics* **30(4)**, 485-488, 2003.
10. Becker K – Radon dosimetry and radon risks in perspective. *Radiat. Prot. Dosim.* **47(1-4)**, 361-365, 1993.
11. Jacobi W – Lung cancer risk from environmental exposure to radon daughters. ICRP publication 50. *Radiat. Prot. Dosim.* **24(1-4)**, 19-22, 1988.
12. Cohen B L – Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Phys.* **68(2)**, 157-174, 1995.
13. Bochicchio F, Forastiere F, Abeni D, Rapiti E – Epidemiologic studies on lung cancer and residential exposure to radon in Italy and other countries. *Radiat. Prot. Dosim.* **78(1)**, 33-38, 1998.
14. Durrani S A – Radon as a health hazard at home: what are the facts?. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **22(1-4)**, 303-317, 1993.
15. Haque A K M M and Kirk A E – Environmental radon and cancer risk. *Radiat. Prot. Dosim.* **45 (1-4)**, 639-642, 1991.
16. Radiation Hormesis -special issue on - *Health Phys.* **52(3)**. 1987.
17. Yoshimura E M, Umisedo N K, Okuno E – Assessment of ambient dose equivalent rate: performance of an automatic survey meter as an instrument to quantify the presence of radiation in soils. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A* **487(3)**, 457-464, 2002.
18. Otsubo S M, Yoshimura E M – Contribuição da radiação gama em ambientes fechados para a dose populacional na cidade de São Paulo. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
19. Yoshimura E M, Otsubo S M, Oliveira R E R – Gamma ray contribution to the ambient dose rate in the city of São Paulo, Brazil. Submetido a *Radiation Measurements*, 2003.
20. Medeiros F H M, Yoshimura E M – Evaluation of the contribution of soil radioactivity to the ambient dose in the city of São Paulo – enviado para o First International Meeting on Applied Physics, 14 a 18 de outubro de 2003, Badajoz, Espanha.
21. Wang Y, Ju C, Stark A D, Teresi, N – Radon mitigation survey among New York State residents living in high radon homes. *Health Phys.* **77(4)**, 403-409, 1999.
22. Marlow W H – Electrical charge in radon daughter deposition: a critical review. *Radiat. Prot. Dosim.* **24(1-4)**, 211-215, 1988.
23. Da Silva A A R, Yoshimura E M – Calibration of LR115 plastic detectors in realistic conditions to indoor radon and daughters monitoring. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil, 29/4 a 4/5/2001.
24. Da Silva A A R, Yoshimura E M – Calibration of LR115 for ²²²Rn monitoring taking into account the plate-out effect. *Radiat. Prot. Dosim.* **103(4)**, 367-370, 2003.
25. Hadler Neto J C, Paulo S R – Indoor radon daughter contamination monitoring: the absolute efficiency of CR-39 taking into account the plateout effect and environmental conditions. *Radiat. Prot. Dosim.* **51(4)**, 283-296, 1994.
26. Da Silva A A R, Yoshimura E M – Thin film geometry to determine separately indoor ²²²Rn concentration. Submetido a *Radiation Measurements*, 2003.
27. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2002. Base de informações por setor censitário – censo demográfico 2000, IBGE, Rio de Janeiro, 2002. (CD-rom).
28. Silva N N – trabalho em andamento, comunicação particular.
29. Silva N N - Amostragem probabilística: um curso introdutório. 2ª edição, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
30. Da Silva A A R, Yoshimura E M – Contaminação ambiental por radônio. Aceito para o VII Congresso Brasileiro de Saúde Coletiva, 29 de julho a 02 de agosto de 2003, Universidade de Brasília – UnB, Brasília-DF.

-
31. Da Silva A A R, Yoshimura E M – Semi-automatic track analysis system for application in alpha particle detection with plastic detectors. XXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2002.
 32. Mirra A P (coordenador) – Incidência de câncer no município de São Paulo, Brasil, 1997-1998. Mortalidade de câncer no município de São Paulo, Brasil. Tendência no período 1969-1998. Ministério da Saúde / Faculdade de Saúde Pública USP / Departamento de Epidemiologia / Registro de Câncer de São Paulo, São Paulo, 2001.
 33. ICRP – 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP* 21(1-3), 1990.

II. CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL: o acidente de Goiânia

II.1. Introdução:

Sob esse tema, defenderam mestrado uma aluna¹ da Profa. Emico Okuno e um aluno do Prof. Roberto M. dos Anjos². É um trabalho que envolveu aspectos éticos importantes, e no qual todos nós mais diretamente envolvidos sentimos a importância imediata do estudo realizado. Do ponto de vista técnico-científico, utilizamos espectroscopia gama, com detectores de NaI, *in situ* e, em laboratório, de amostras de solo e vegetais, e dosimetria termoluminescente tanto para o solo como para os ambientes de convívio.

O trabalho se iniciou em 1999 no Departamento de Física da Universidade Federal Fluminense, num laboratório didático, onde, a título de ilustração de uma aula de laboratório de detectores gama, foram utilizadas amostras de solo trazidas de Goiânia por um aluno. Para a redação do artigo de ensino³, fomos procurados pelo Prof. Roberto Meigikos dos Anjos, para que um caráter de dosimetria fosse dado ao conjunto de dados coletados e analisados. Ao notar que havia valores de fato elevados para a concentração de césio no solo, juntamos os dois grupos (do Laboratório de Dosimetria do IFUSP e do Laboratório de Análises de Radiação Ambiental do DF-UFF) e fizemos diversas viagens com vários propósitos: levantamento de doses gama ambientais em todos os locais contaminados em 1987 relatados em documentos da época e de locais não contaminados; coleta de amostras de solo de vários desses locais; coleta de solo para perfis de radioatividade de dois dos terrenos contaminados; coleta de frutas e folhas de árvores plantadas em um desses terrenos; colocação de dosímetros TL em diversos locais desse terreno; verificação de documentação sobre o acidente existente na Fundação Leide das Neves; entrevistas com moradores. Simultaneamente, ao entendermos que havia um grupo de pessoas sendo contaminada e irradiada desnecessariamente, além de haver risco de uma nova contaminação se espalhar a outros locais, alertamos a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para que tomasse medidas a respeito.

II.2. Métodos de Trabalho e Resultados:

A violação de uma fonte de césio utilizada em radioterapia, com atividade aproximada de 51 TBq em setembro de 1987, e a manipulação posterior do material radioativo pulverizado^{4,5} causaram contaminação de residências e de vários locais utilizados como ferro-velho. No processo de descontaminação coordenado pela CNEN, as casas foram derrubadas, sendo o entulho e parte do solo removidos e mais tarde acomodados em Abadia de Goiás. É claro que num processo em que o material radioativo foi manipulado sem controle por pelo menos 15 dias, parte da fonte nunca foi recolhida. Devido à solubilidade do cloreto de césio, às condições climáticas da cidade (chovia muito na época), supõe-se que uma camada de ¹³⁷CsCl tenha ficado depositada sobre as superfícies e nas camadas iniciais do solo dos locais mais contaminados e de outros próximos deles e, de acordo com as condições de permeabilidade, tenha posteriormente penetrado mais no solo ou tenha sido removida de superfícies.

Para avaliar a contaminação por césio ainda presente na cidade, utilizou-se a mesma metodologia empregada para medida de radiação gama ambiental, somente agora centrados na presença do ¹³⁷Cs: com o detector espectroscópico de iodeto de

sódio obteve-se a distribuição de resultados de equivalente de dose ambiente nos diversos locais⁶. Desse conjunto de dados identificou-se que um dos locais, um ferrolho à época do acidente, que fora descontaminado, mas não coberto com concreto como os demais terrenos, apresentava níveis bastante elevados de taxa de dose. Havia um agravante, pois era o único dos locais remanescentes do acidente que estava habitado. Um grupo de catadores de papel tinha naquele terreno seu local de armazenamento de papel coletado e de moradia, com plantação e criação de animais domésticos. A falta de impermeabilização do solo, as constantes construções de barracos e a abertura de buracos no terreno traziam ainda o risco de contaminação de um pequeno riacho que passa ao fundo do terreno.

Coletaram-se também amostras de solo superficial desses locais e obtiveram-se, em laboratório, as concentrações de césio por espectroscopia gama com NaI. Tínhamos então dois conjuntos de dados, um da dosimetria gama externa, e outro das amostras superficiais de solo. Espera-se que, ao se depositar um material solúvel (como o cloreto de césio) contendo nuclídeo radioativo sobre a superfície do solo, ocorra uma paulatina penetração do elemento radioativo para as camadas mais profundas, de acordo com o comportamento químico e a solubilidade do composto. Prevê-se uma queda exponencial da concentração com a profundidade no solo, para o caso do césio, nas situações em que o local não é revolvido, e se pode relacionar a concentração na superfície com a taxa de dose no ar a 1 m⁷⁻⁹. Essa distribuição foi de fato observada, como se vê na Figura II.1¹⁰, para um dos locais.

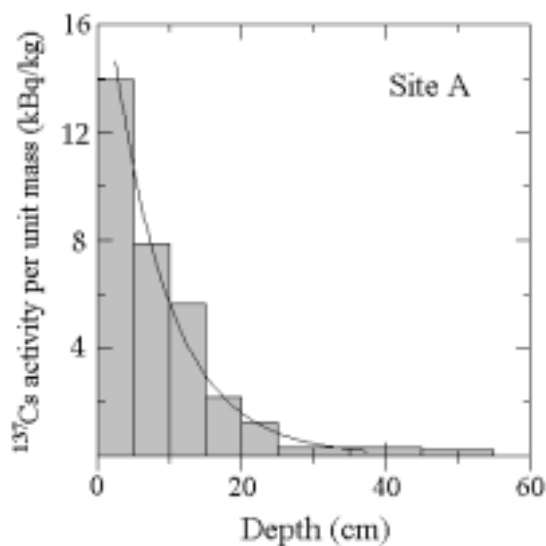


Figura II.1. Distribuição da atividade de césio no solo, medida experimentalmente, em função da profundidade para um local de Goiânia onde a contaminação superficial era 14 kBq.kg⁻¹. A curva representa o ajuste exponencial: $A = A_0 \exp(-\alpha x)$, onde $\alpha = 0.12 \text{ cm}^{-1}$.

As relações entre taxa de dose e concentração do nuclídeo são obtidas por simulações com método de Monte Carlo, a partir do conhecimento da interação da radiação com a matéria. Foi ao tentarmos essa correlação que verificamos que uma parte das medidas externas concordava com a concentração de césio e outra não^{10,11}. Nesses casos, a taxa dose externa, vista na Tabela II.1, era muitas vezes mais alta que o esperado das contaminações superficiais: sempre inferiores a 5,0 kBq.kg⁻¹, elas corresponderiam a um limite superior de 0,21 μGy.h⁻¹ para os valores de taxa de dose esperados a 1 m do solo.

A explicação para as discrepâncias veio quando fizemos as medidas de distribuição de césio em função da profundidade nesses locais, mostrada, parcialmente,

na Figura II.2. O motivo dessa distribuição foi, provavelmente, a forma de “descontaminação” utilizada à época do acidente, que deixou no local uma camada de entulho contaminado, provavelmente originado das casas derrubadas, coberta por solo limpo, que, com o tempo, foi sendo desgastado ou mesmo retirado pelos moradores.

Tabela II.1 – Valores de taxa de dose no ar a 1 m do solo em um terreno de Goiânia, mostrado na Figura II.3.

Localização	Taxa de dose medida a 1 m, no ar ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)
P1	0,41(4)
P2	1,97(20)
P3	1,11(11)
P4	0,56(6)
P5	0,86(9)
P6	0,41(4)
P7	1,34(13)
P8	1,15(12)
P9	0,88(9)
P10	0,46(5)
P11	0,14(1)
P12	0,18(2)

Também foi observada a contaminação de árvores¹⁰, com o uso de metodologia para análise de contaminações, que aprendemos e que sistematizamos em artigo que apresenta uma visão educacional do trabalho com o ambiente¹².

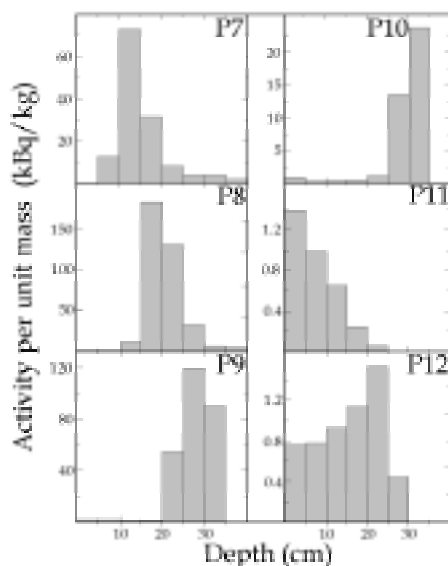


Figura II.2. Concentração de ¹³⁷Cs em amostras de solo de um dos terrenos de Goiânia. A numeração dos locais de coleta do solo corresponde aos pontos de medição da Tabela II.1.

Uma dosimetria de tempo mais longo (56 dias de exposição) foi também efetuada, com detectores TL afixados nos locais numerados da Figura II.3, a 1 m do solo, para o mesmo terreno¹³. Os valores de equivalente de dose pessoal, extrapolados para o período de 1 ano, são mostrados na Tabela II.2, supondo permanência total nos locais. Como as pessoas que moram e trabalham nesse local são consideradas da população e não trabalhadores com radiação, esses números assustam. De acordo com o

relato feito à época^{4,5}, o processo de descontaminação realizado pela CNEN, pretendia reduzir a dose futura dos moradores a menos de 1 mSv ao ano, e todos os valores medidos por nós levariam a doses acima desse valor.

Tabela II.2 – Equivalentes de dose pessoal obtidos por TL no terreno de Goiânia visto na Figura II.3.

Número do monitor	Equivalente de dose pessoal anual (mSv/y)
1	2,62
2	2,31
3	3,24
4	12,47
5	5,63
6	8,94
7	5,23
8	11,17
9	3,16
10	6,31

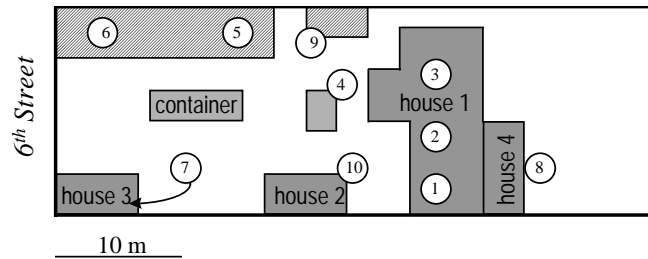


Figura II.3. Localização dos pontos de medida TL em dos terrenos de Goiânia.

Depois de todas essas medidas e publicações, e muita negociação com a CNEN, conseguimos finalmente que, em 2001, fosse aplicada ao terreno uma nova camada de concreto, que diminuiu os valores de equivalente de dose ambiental a valores mais próximos dos observados no restante da cidade de Goiânia¹⁴. A Figura II.4 mostra essa mudança de níveis de dose, especificamente para o terreno já citado nas figuras e tabelas anteriores, enquanto a Figura II.5 mostra os valores de taxa de equivalente de dose ambiente em uma área não contaminada da cidade.

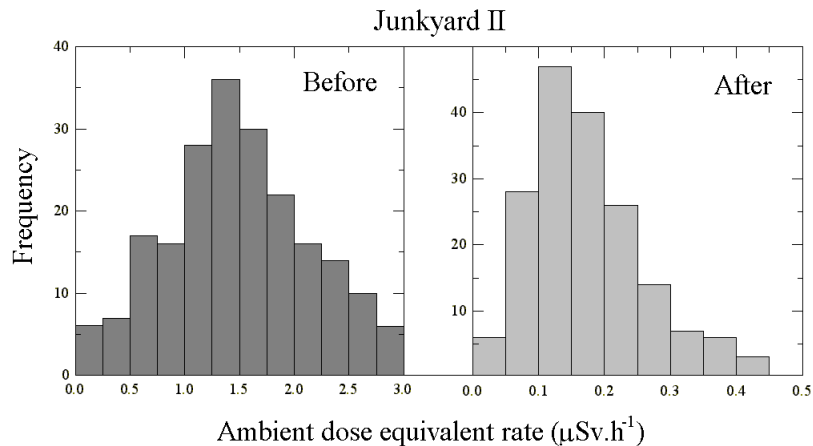


Figura II.4 – Histogramas de taxa de equivalente de dose ambiente no terreno da Figura II.3, antes e depois da colocação de camada de concreto pela CNEN.

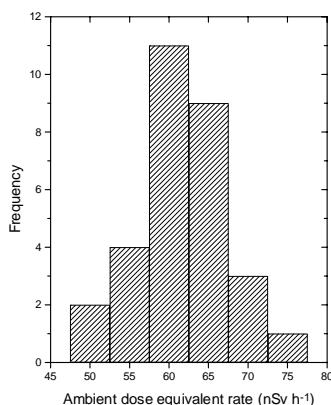


Figura II.5 – Histograma de taxa de equivalente de dose ambiente em locais não contaminados da cidade de Goiânia⁶.

II.3. Conclusões:

A publicação desse conjunto de trabalhos possibilitou um ganho científico, pois um grupo de Física Aplicada se estabeleceu na Universidade Federal Fluminense, graças à força e ao impacto que o trabalho tomou. Além disso, trouxe também um benefício social imediato, que considero relevante.

As duas publicações didáticas mostraram que um trabalho cuidadoso permite a obtenção, por alunos de graduação, de resultados importantes no âmbito da dosimetria ambiental.

Do ponto de vista metodológico, poderíamos ter feito uma melhor avaliação da taxa de dose esperada com as distribuições de atividade observadas, desde que usássemos alguma hipótese consistente sobre a extensão de cada de cada faixa de concentração observada, simulando o terreno contaminado. Nossa opção de trabalho foi a de não prosseguir na sondagem do terreno, pelo risco que havia de espalhar essa camada de entulho contaminada para regiões limpas, no processo de coleta, e pelo fato de ser um local de moradia de um grupo de pessoas, e a nossa intervenção lhes traria desconfortos.

Ainda que trabalhando com sistemas espectroscópicos com baixa resolução em energia, como o nuclídeo contaminador era conhecido, os resultados finais são bastante relevantes. A boa eficiência conhecida dos detectores de iodeto de sódio, aliada ao custo relativamente baixo e à facilidade de trabalho, é uma vantagem a considerar em situações de medida de pequenas quantidades de material biológico contaminado, e de busca rápida de contaminações ambientais¹⁵, a despeito da baixa resolução em energia.

O uso de diversas técnicas de medida de radiação, complementarmente, possibilitou um estudo mais abrangente e permitiu a estimativa de doses efetivas para o grupo de catadores de papel.

II.4. Referências

1. Umisedo N K - Goiânia revisitada: medidas recentes de radiação ionizante ambiental. Dissertação de Mestrado, Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade de Saúde Pública, USP, 2003.
2. Facure A – A contaminação radiológica remanescente em Goiânia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, UFF, 2001.

3. Anjos R M, Facure A, Macario K C D, Yoshimura E M, Brage J A P, Terra E M, Tompakow H, Gomes P R S, Alhanati C E, S. Cardoso N M, Santoro M D N, Boyd A L - Estudo do acidente radiológico de Goiânia no ensino de Física Moderna. Revista Brasileira de Ensino de Física **22(1)**, 60-68, 2000.
4. IAEA. The Radiological Accident in Goiânia. International Atomic Energy Agency, Vienna; pp 61-70; 1988.
5. E. C. S. Amaral, M. E. C. Vianna, J. M. Godoy, E. R. R. Rochedo, M. J. Campos, M. A. Pires do Rio, J. P. Oliveira, J. C. A. Pereira and W. G. Reis, Distribution of ^{137}Cs in soils due to Goiânia accident and decisions for remedial action during the recovery phase, Health Phys. **60**, No. 1 91-98 (1991).
6. Yoshimura E M, Umisedo N K, Facure A, Anjos R M, Okuno E - Ambient dose equivalent rate in Goiânia 12 years after the radiological accident - *Health Physics* **80(6)**, 532-536, 2001.
7. Kocher D C, Sjoreen A L – Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Health Physics* **48**, 193-205, 1985.
8. Anspaugh L R, Daniels J I – Bases for secondary standards for residual radionuclides in soil and some recommendations for cost-effective operational implementation. *Health Physics* **70(5)**, 722-734, 1996.
9. Chiu C Y, Lai S Y, Lin Y M, Chiang H C – Distribution of the radionuclide Cs-137 in the soils of a wet mountainous forest in Taiwan. *Appl. Radiat. and Isot.* **50** 1097-1103, 1999.
10. Facure A, Umisedo N K, Okuno E, Yoshimura E M, Gomes P R S, Anjos R M – Remains of ^{137}Cs contamination in the city of Goiânia, Brazil - *Radiation Protection Dosimetry* **95(1)**, 165-171, 2001.
11. Anjos R M, Umisedo N K, Facure A, Yoshimura E M, Gomes P R S, Okuno E – Goiânia: 12 Years after the ^{137}Cs Radiological Accident, *Radiation Protection Dosimetry* **100(1-4)**, 201-204, 2002.
12. Anjos R M, Facure A, Lima E L N, Gomes P R S, Santos M S, Brage J A P, Okuno E, Yoshimura E M, Umisedo N K – Radioactivity teaching: environmental consequences of the radiological accident in Goiânia (Brazil) - *American Journal of Physics* **69(3)**, 377-381, 2001.
13. Umisedo N K, Okuno E, Yoshimura E M, Guimarães C C, Facure A, Anjos R M – Recent evaluation of gamma radiation levels due to ^{137}Cs accident in Goiânia, V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
14. Facure A, Umisedo N K, Okuno E, Yoshimura E M, Gomes P R S, Anjos R M – Measurements performed in Goiânia after a new intervention action in 2001, *Radiation Protection Dosimetry* **98(4)**, 433-436, 2002.
15. Yoshimura E M, Umisedo N K, Okuno E – Assessment of ambient dose equivalent rate: performance of an automatic survey meter as an instrument to quantify the presence of radiation in soils. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A* **487(3)**, 457-464, 2002.

III. DOSIMETRIA DE PROCEDIMENTOS MÉDICOS: radiologia diagnóstica

III.1. Introdução:

Sob esse tema, defendeu mestrado um aluno¹, há em andamento uma tese de doutorado e um trabalho de iniciação científica, e temos colaboração com o Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE-USP).

O objetivo final, quando se trata de dosimetria em radiologia diagnóstica, é avaliar duas grandezas: a dose de entrada na pele (DEP)², que é utilizada por autoridades sanitárias para estabelecer valores de dose de referência e pelo próprio serviço no seu programa de garantia da qualidade; e a dose absorvida média em órgãos irradiados para que possam ser feitas estimativas de dose efetiva e de dose coletiva. Em simuladores do corpo humano a dose nos órgãos pode ser medida, mas em pacientes ela é avaliada, por exemplo, a partir da DEP e conhecimentos sobre o feixe.

Além de usarmos uma metodologia tradicional do Laboratório de Dosimetria, a termoluminescência – TL, para avaliar doses, seja na pele de pacientes, seja no interior de simuladores, há outras técnicas envolvidas, para se poder avaliar a doses internas no paciente. Para obter valores realistas é preciso conhecer o espectro de energia dos fótons. Para feixes de raios X na área do diagnóstico deve-se medir espectros nos locais, pois eles variam muito com condições específicas, além da tensão de operação: presença e quantidade de filtros; sistema de retificação para gerar o potencial acelerador; ângulo, composição e espessura do anodo onde são produzidos os raios X.

III.2. Métodos de Trabalho e Resultados:

III.2 a) Radiologia diagnóstica e a população:

Como visto na Figura I.1, a radiologia diagnóstica contribui, em média, com 14% da dose efetiva da população mundial³, sendo que a fração é maior para países com maior avanço na área da saúde do que nos países mais carentes sob esse aspecto. Essa parcela de doses tem crescido relativamente, devido ao acesso cada vez mais facilitado aos procedimentos que utilizam radiação, principalmente na área da radiologia. Dessa forma, tem havido grande preocupação com valores de dose absorvida em pacientes e com eventuais formas de diminuí-los.

No Brasil, foi publicada em 1998 uma portaria da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde² em que se estabelecem níveis de referência de DEP para um grande conjunto de exames radiológicos. Mundialmente, o UNSCEAR realiza a compilação de valores de dose, em que são levadas em conta também as frequências com que se realizam os diversos procedimentos⁴. A Figura III.1. mostra os resultados do último relatório do UNSCEAR, para a população mundial. Nota-se que a distribuição dos exames e das doses não é a mesma: o exame mais frequente (radiografia convencional de tórax) contribui com apenas 3% da dose coletiva, enquanto que os exames por CT, que representam apenas 5% do total, contribuem com 34% para a dose. No Brasil, apesar de os valores de referência de dose terem sido estabelecidos, há poucos levantamentos sobre doses em pacientes^{5,6} (o último relatório do UNSCEAR, só há dados para o Estado do Paraná). Como o país é muito grande e tem regiões com diferentes níveis de atendimento à saúde, é importante também que, ao menos regionalmente, se verifiquem as distribuições de frequência de exames por habitante, e

se observem os valores de DEP nas clínicas e hospitais.

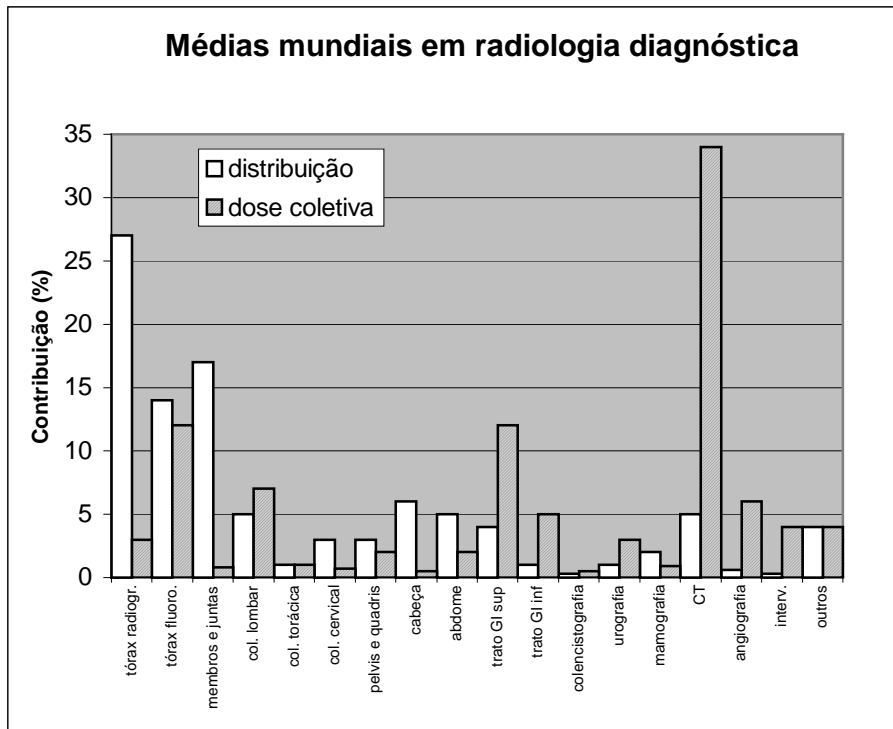


Figura III.1. Contribuições médias mundiais para a distribuição de cada exame e para a dose coletiva, por tipo de exame, divulgado pelo UNSCEAR.

III.2 b) Radiografias torácicas na cidade de São Paulo:

Verificou-se recentemente^{7,8} que, para radiografias de tórax, na cidade de São Paulo, ocorre uma grande variação nos valores de DEP. A Figura III.2 mostra os resultados para um conjunto de 12 hospitais (27 aparelhos de raios X), em que se radiografou o tórax de um simulador antropomórfico, com dosímetros TL. O grupo de hospitais analisado, apesar de pequeno em número, realiza aproximadamente 2 milhões de radiografias anuais.

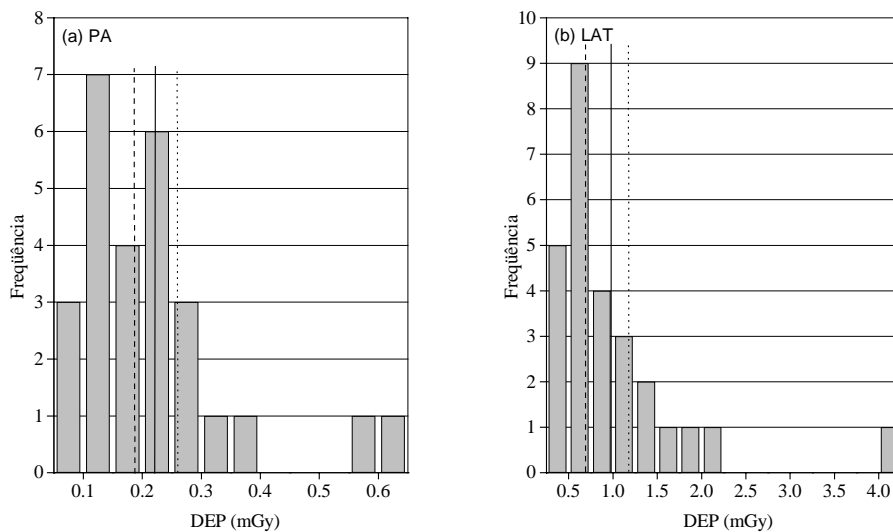


Figura III.2. Distribuição de doses de entrada na pele –DEP (mGy) – para radiografias de tórax: (a) projeção postero-anterior (PA) e (b) projeção lateral (LAT). As linhas verticais contínua, tracejada e pontilhada indicam, respectivamente, média, mediana e 3º quartil.

Como, para todos os casos em que o levantamento foi feito, obteve-se uma radiografia com qualidade diagnóstica, conclui-se que é possível reduzir doses, em muitos casos, sem perda de qualidade.

Outro fato evidenciado no trabalho é que, muitas vezes, o campo de radiação ultrapassava, e muito, as dimensões do filme radiográfico, fazendo com que as doses absorvidas na tireóide fossem compatíveis com as doses dos pulmões.

III.2 c) Levantamento de DEP no Estado de São Paulo:

Com os resultados para a capital em mãos, passamos a focar a atenção nos hospitais do estado de São Paulo, que tem um índice anual de radiografias por 1.000 habitantes pouco inferior ao de países de nível I em atenção à saúde*. Os dados que fornecemos na Tabela III.1 são obtidos a partir das tabulações de dados do Sistema de Informação Ambulatorial SIA/SUS, e mostram a distribuição aproximada dos tipos de exames de pacientes ambulatoriais⁹.

Tabela III.1 – Frequência anual, para 2001, de exames radiológicos^a conduzidos no Estado de São Paulo.

Examination	Annual number (%)	Annual Frequency (per 1000)	More frequent examination and projections	(%) of the examinations
Chest, heart	3,827,139 (31.2)	100.2	Chest: PA Chest : PA + LAT	65.1 30.8
Pelvis and down extremities	2,410,146 (19.7)	63.1	Knee: AP + LAT Foot or toe	22.0 20.6
Thoracic skeleton and upper extremities	1,882,446 (15.4)	49.3	Hand (two projections) Wrist: AP + LAT + Oblique	21.8 18.7
Head	1,752,514 (14.3)	45.9	Sinus: (three projections) Skull: PA + LAT	42.5 29.9
Spine	1,109,820 (9.1)	29.1	Lumbosacral spine Cervical spine: (three projections)	34.4 21.8
Mammography	558,685 (4.6)	28.7 ^b	Bilateral mammography	99.7
Abdomen	463,392 (3.8)	12.1	Simple abdomen: AP Abdomen: AP-LAT or localized	61.1 25.8
Urography and Cholangiography	172,382 (1.4)	4.5	Intravenous urography Esophagus, hiatus, stomach and duodenum	23.7 19.3
Others	71,421 (0.5)	1.9	Bone densitometry of the spine	35.6
TOTAL	12,247,945 (100)	320.8	TOTAL	68.5

^aExaminations carried out in internal patients are not included.

^bOnly women.

Tendo também acesso a esse conjunto de dados distribuído segundo a DIR (Diretoria Regional de Saúde), foi estabelecida a meta de obter por via postal uma amostra significativa de resultados de DEP no estado, fazendo medidas sobre a pele de pacientes, já que não seria razoável utilizar o fantoma para um trabalho em grande escala. O processo foi iniciado com o desenvolvimento de um kit postal¹⁰ que inclui, além de um conjunto de 21 monitores, com 2 dosímetros TL cada, fichas de controle de pacientes e manual de instruções para o técnico que deve aplicar o kit. Como metodologia de amostragem, escolhemos fazer uma amostra aleatória estratificada^{11,12} segundo o número de exames radiológicos realizados anualmente nos municípios do Estado de São Paulo. Um número total de 200 instituições, distribuídas igualmente nos 4 estratos previamente preparados, foi sorteado aleatoriamente sobre o cadastro de estabelecimentos do Ministério da Saúde¹³, e contatado para participar do projeto. Os primeiros resultados, que estão neste momento sendo analisados, são para exames de

* O UNSCEAR⁴ classifica os países em 4 grupos de nível de atenção à saúde da população, de acordo com o número de médicos e instalações de atendimento, por milhar de habitantes. O Brasil é considerado como nível II, embora algumas cidades, como São Paulo, atendam critérios de nível I.

tórax, onde 762 valores de DEP foram medidos, correspondendo a 503 pacientes e 66 salas de exame⁸.

III.2 d) Radiodiagnóstico infantil:

Como não se restringiu em qualquer aspecto o tipo de paciente a radiografar para inclusão no projeto, mas solicitou-se que dados dos pacientes, como idade e peso, fossem colocados nas fichas, houve a inclusão de um número razoavelmente elevado de pacientes infantis nos kits utilizados. Da observação dos resultados de DEP para as crianças, encontraram-se valores elevados¹⁴, como se vê nos histogramas da Figura III.3, para um número ainda pequeno de pacientes (36 crianças que se submeteram a exames de tórax em 10 hospitais, idades entre 0 e 16 anos).

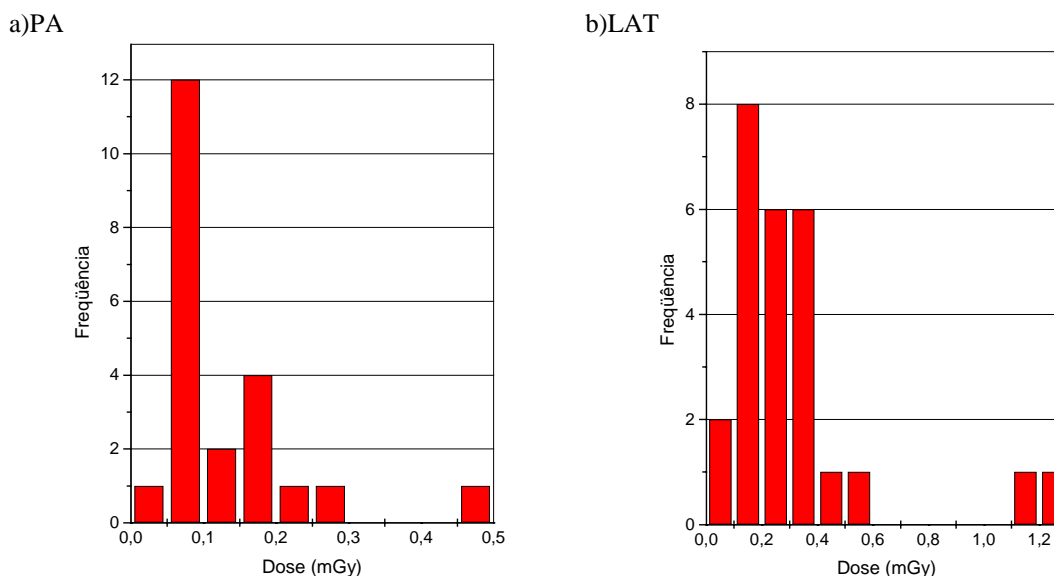


Figura III.3 – Distribuição dos valores de dose de entrada na pele (mGy) para exames de tórax em pacientes infantis, projeções (a) PA e (b) LAT.

Como parte dos valores se aproxima dos resultados vistos na Figura III.2 para adultos, e a distribuição etária, e portanto de tamanhos, dos pacientes é ampla, foi feita a separação em 6 faixas de idade, para melhor avaliar as DEP, como visto na Tabela III.2.

Tabela III.2 - Valores médios de DEP (mGy) para radiografias de tórax (AP, PA e/ou LAT), segundo a faixa etária. Entre parênteses estão os valores mínimo e máximo.

Faixa Etária	AP	PA	LAT
0 a 11m	0,13 (0,13-0,14)	--	0,16 (0,15-0,17)
1 a 3a	0,13 (0,09-0,21)	0,14 (0,09-0,18)	0,23 (0,13-0,39)
4 a 6a	0,27 (0,16-0,39)	0,14 (0,08-0,22)	0,34 (0,18-0,53)
7 a 9a	--	0,09 (0,04-0,15)	0,17 (0,07-0,23)
10 a 12a	--	0,23 (0,08-0,45)	0,69 (0,20-1,22)
13 a 16a	--	0,10 (0,05-0,17)	0,24 (0,09-0,38)
N*	14	22	26

*Número total de valores de dose determinados.

Nota-se que, pelo menos nesse primeiro conjunto de dados, as DEP mais elevadas não estão necessariamente relacionadas a crianças mais velhas.

A preocupação com doses em exames infantis já existia em nosso grupo, e faz parte do projeto de iniciação científica de uma aluna. Há mundialmente uma atenção especial a essa faixa etária¹⁵, no sentido de estabelecer padrões de técnica e de qualidade de imagem¹⁶. Além disso, deve-se lembrar que os riscos associados de efeitos estocásticos são maiores¹⁷ quanto mais novo é o ser humano.

Não há dados no Brasil a respeito da distribuição dos exames infantis de acordo com região radiografada. Foi feita então uma verificação nos prontuários de um grande hospital geral da cidade de São Paulo: observou-se que a fração de exames realizados em crianças é grande (em torno de 40% do total de 5.000 prontuários em um mês de atendimento); a distribuição dos tipos de exames nessa faixa etária, como se vê na Figura III.4, é distinta da mostrada na Tabela III.1 e do total observado na cidade⁸.

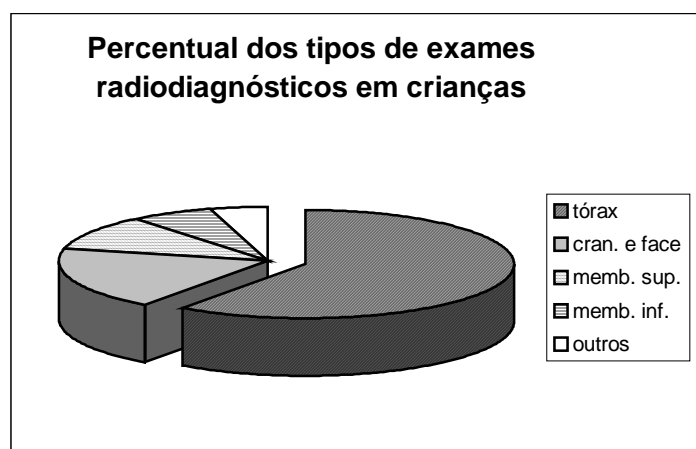


Figura III.4. Distribuição dos exames radiológicos infantis, segundo o tipo, em um grande hospital de São Paulo: 60% tórax, 19% crânio e face, 11% membros superiores, 6% membros inferiores, outros inclui coluna, bacia e abdome (4%).

Outro fato que chama a atenção é que a distribuição dos exames muda para as diversas faixas etárias examinadas: a maior parte dos exames de tórax (78%) é realizada em crianças com até 3 anos, enquanto que 60% das crianças que realizam exames de cabeça têm 4 anos ou mais, como ilustrado na Figura III.5.

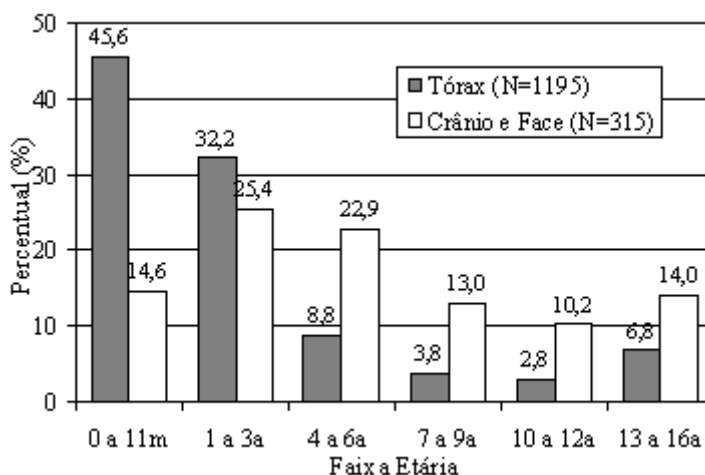


Figura III.5 - Distribuição etária das radiografias infantis para os dois tipos mais frequentes desses exames realizados em um grande hospital de São Paulo: tórax (60% dos exames) crânio e face (19% dos exames).

III.2 e) Doses efetivas em CT:

A Figura III.1 ilustra bem a necessidade de se obter valores de dose em tomografia computadorizada: trata-se do exame diagnóstico com raios X que produz as maiores doses absorvidas em pacientes¹⁸, tipicamente na faixa de 10 a 100 mGy. O motivo primeiro das altas doses é o fato de ser um exame tomográfico, e, como tal, necessitar de uma região irradiada maior para se concretizar. Além disso, há uma faixa mais ampla de valores de dose mensuráveis para essa técnica, pois a detecção dos raios X transmitidos se dá com detectores de estado sólido e não filmes radiográficos, estes conhecidos por sua estreita faixa de linearidade. Esse fato, que torna a técnica mais poderosa, permite por outro lado, que se obtenha imagens em situações absolutamente inadequadas: técnicas que enegreceriam totalmente o filme radiográfico possibilitam a obtenção de imagem de qualidade diagnóstica em CT, pelo simples ajuste de escalas de cinza no monitor do computador (para intensidades abaixo da saturação do detector). Assim, há uma cultura de não se ajustar os parâmetros do feixe às dimensões do paciente, resultando às vezes em valores desnecessariamente elevados para a dose absorvida, principalmente para pacientes infantis. Acrescente-se ainda que a qualidade diagnóstica (e estética) do exame por CT muitas vezes faz com que o médico o solicite, mesmo que uma radiografia convencional bastasse para o diagnóstico.

O trabalho que tem sido realizado com a equipe do IEE-USP, envolve a determinação de doses absorvidas no eixo e na superfície de simuladores cilíndricos, de acrílico ou de água, com dimensões equivalentes a cabeça e abdome¹⁹. Normalmente a dosimetria para CT usa a grandeza CTDI (acrônimo em inglês para Índice de Dose em Tomografia Computadorizada), definida em cada corte como:

$$CTDI = \frac{1}{T} \int_{-50}^{+50} D(z) dz$$

onde $D(z)$ é a dose ao longo da direção longitudinal z (perfil de dose), e os valores -50 mm e $+50 \text{ mm}$ indicam que um comprimento de 10 cm, centrado no corte que é irradiado, é levado em conta para o cálculo do índice, independente da espessura do corte tomográfico (T , em mm). O valor de CTDI pode ser medido experimentalmente com uma câmara de ionização específica para tal, ou, de acordo com a definição, a partir da medida do perfil de doses, com um conjunto de dosímetros TL. Um perfil típico é visto na Figura III.6.

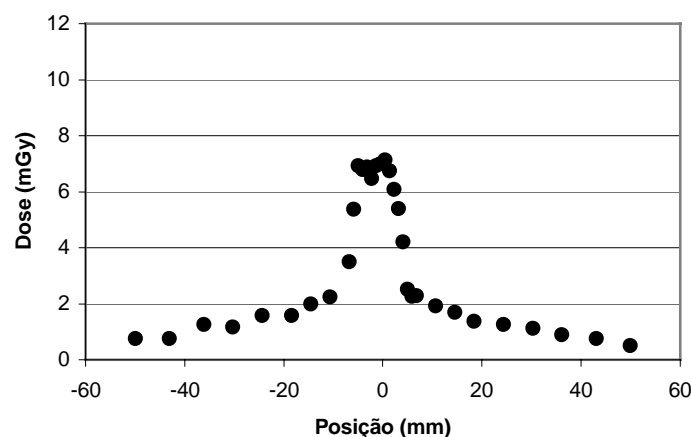


Figura III.6 – Perfil de dose típico em CT: espessura de corte de 10 mm, 120 kV e 200 mAs. Simulador de crânio à base de água e posicionado no orifício central.

Para diversos equipamentos de CT da cidade de São Paulo, as duas formas de determinação de dose foram feitas, resultando nos valores expostos na Tabela III.3 em várias situações de irradiação de três simuladores. A grande variação dos valores de CTDI para cada tipo de simulador de acrílico dá idéia das possíveis variações de dose absorvida por pacientes.

Tabela III.3 – Resultado das medidas de CTDI realizados com câmara de ionização e TLD e cálculos da dose efetiva em exames de CT de homem adulto (crânio e abdome) em diferentes equipamentos. Os sobrescritos s e c se referem a superfície e centro do simulador.

Tomógrafo	Técnica			Simulador	CTDI (mGy)			Dose efetiva (mSv)	
	Vp	As	nominal (mm)		Câmara de ionização (±5%)		TLD ^c (±6%) CTDI ^c	Abdome (± 16%)	Crânio (± 16%)
					CTDI ^s	CTDI ^c			
A	120	250	5	Abdome	16,37	9,35	-	4,67	-
	120	330	5	Abdome	-	12,86	10,57	6,46 (*)	-
	120	250	10	Crânio acrílico	28,04	28,42	-	-	0,81
	120	330	5	Crânio acrílico	-	52,44	38,32	-	1,44 (*)
	120	330	5	Crânio água	-	37,12	26,60	-	1,02 (*)
B	120	528	5	Abdome	32,45	16,93	24,98	8,80	-
	120	528	5	Crânio água	-	40,44	46,78	-	1,11 (*)
C	120	200	7	Abdome	12,43	5,70	-	3,30	-
	120	200	5	Abdome	-	8,10	8,55	4,07 (*)	-
	120	200	10	Crânio acrílico	27,78	25,82	27,38	-	0,74
	120	200	10	Crânio água	-	18,30	18,76	-	0,50 (*)
D	140	275	2,5	Abdome	26,53	16,06	-	7,48	-
	140	275	2,5	Abdome	-	14,86	15,88	7,47 (*)	-
	120	250	2,5	Crânio acrílico	34,37	33,35	-	-	0,93
	120	250	2,5	Crânio acrílico	-	30,85	32,34	-	0,85 (*)
E	120	260	5	Abdome	40,13	18,57	-	10,66	-
	120	320	5	Crânio acrílico	62,13	55,76	-	-	1,63
F	120	260	5	Abdome	44,33	18,66	-	11,23	-
	120	260	5	Crânio acrílico	67,11	59,93	-	-	1,78
G	120	200	10	Abdome	20,33	9,65	-	5,46	-
	120	300	2	Crânio acrílico	75,19	66,55	-	-	1,94
H	120	335	5	Abdome	32,14	18,63	-	9,17	-
	120	200	5	Crânio acrílico	19,60	19,07	-	-	0,53
I	120	380	10	Abdome	31,38	14,14	-	8,18	-
	120	500	10	Crânio acrílico	67,69	60,80	-	-	1,81
J	120	300	10	Abdome	25,71	12,31	-	6,78	-
	120	300	3	Crânio acrílico	39,43	36,53	-	-	1,04
K	120	250	5	Abdome	16,37	9,35	-	4,67	-
	120	250	5	Crânio acrílico	28,42	28,04	-	-	0,81
L	120	300	5	Abdome	25,71	12,31	-	6,78	-
	120	300	3	Crânio acrílico	43,57	39,35	-	-	1,14

(*) – Cálculo de dose efetiva realizado levando-se em conta somente o valor do CTDI central.

Para os cálculos de dose efetiva correspondentes a essas irradiações descritas na Tabela III.3, foram utilizados resultados de Atherton e Huda²⁰, Huda et al.²¹ e Shrimpton et al.²², que relacionam de maneira simplificada a energia cedida ao corpo na região irradiada (calculada a partir das doses superficial e no centro do simulador) com a dose efetiva para adultos de 70 kg, para CT's de diversas regiões do corpo. As relações são obtidas com técnicas de Monte Carlo, aplicadas a um simulador heterogêneo, com dimensões de um adulto padrão²³. O fato de os feixes de CT serem, em geral, gerados por potenciais mais elevados que os usados em radiologia convencional e possuírem uma filtração inerente relativamente elevada, faz com que se possa extrapolar os cálculos de dose efetiva realizados por outros pesquisadores, sem grandes perdas de exatidão. Neste caso pode-se observar uma ampla variação dos valores de dose efetiva: valor médios de 7 mSv e 1,1 mSv e coeficiente de variação de 32% e 40%, para abdome e crânio, respectivamente.

III.2 f) Determinação de espectros de raios X

Quando se efetuam medidas de DEP em pacientes, obtém-se valores de dose mais realistas. Por outro lado, como não se pode medir as doses internas, nos órgãos, ou se faz alguma extrapolação para uma situação padrão (como foi feito para CT), ou se avaliam as doses internas pelo conhecimento do espectro de energias (absoluto) do feixe de raios X. É possível fazer essas medidas com detectores HPGe, mas o sistema não é prático para efetuar medidas nas clínicas radiológicas – há a eletrônica associada, muito sensível, e o sistema de resfriamento por nitrogênio líquido. A chegada ao mercado de detectores semicondutores²⁴⁻²⁶ que trabalham acoplados a um sistema de resfriamento Peltier (-20°C), são muito compactos, e permitem resoluções em energia de 0,5 keV na faixa diagnóstica, deu outro impulso às medidas experimentais de espectros médicos.

Tem sido utilizado neste trabalho de avaliação de doses em radiodiagnóstico um detector CZT (Amptek) para realizar medidas desse tipo. Há dificuldades por não se conhecer corretamente a curva de resposta do detector, que só tem sido determinada por cálculos de Monte Carlo^{27,28}. Também pelas suas dimensões, a probabilidade de escape de fótons característicos nele gerados deve ser conhecida, em função da energia dos fótons detectados[#]. Como a resposta depende, além da composição, das condições específicas de medida (por exemplo, a eletrônica inclui um sistema de rejeição de pulsos por tempo de subida⁺, que afeta a eficiência), a sua determinação foi feita recentemente, juntamente com a curva de escape, experimentalmente²⁹ e isso tem possibilitado a correção dos espectros medidos, como na Figura III.7. É possível medir espectros de feixes em laboratório, mas a intensidade dos feixes em radiologia dificulta ainda a aplicação do detector – quando se consegue distâncias foco-detector mais longas e correntes não tão intensas, é possível realizar a medida. Uma simulação computacional do detector com o código Monte Carlo EGS4 também está em andamento.

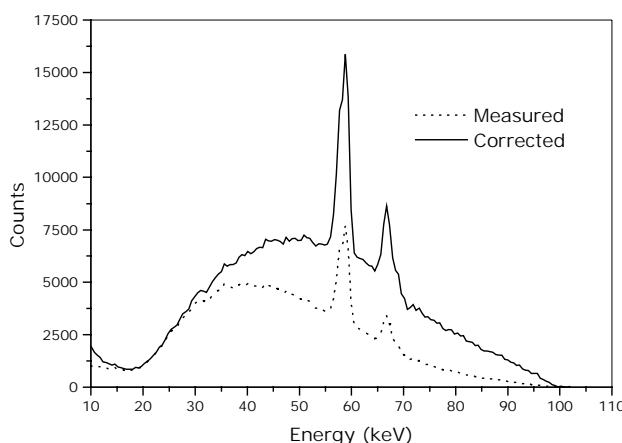


Figura III.7 – Espectros medido e corrigido, obtidos com o detector CdZnTe. Condições do feixe: 100 kV e 4.0 mmAl de filtração adicional.

[#] Pelo alto número atômico do detector, e pela baixa energia dos fótons de raios X diagnóstico, espera-se comprimentos efetivos de interação dependentes da energia do fóton, e conseqüentemente, variações na probabilidade de escape dos fótons de fluorescência.

⁺ Uma desvantagem desse semicondutor é a presença de defeitos em maior concentração que os tradicionais detectores de Ge ou Si, levando a uma maior probabilidade de armadilhamento de cargas, que afeta as qualidades de transporte de carga desse material.

III.3. Conclusões:

Tem-se feito progresso no conhecimento das doses diagnósticas recebidas pela população de São Paulo. Para se obter valores de dose efetiva coletiva, trabalha-se com as estatísticas de saúde do país (DataSUS), um conjunto de DEP representativo para pacientes no Estado de São Paulo, e com conjuntos de espectros medidos ou calculados.

Para a radiologia infantil é necessário mais investimento para determinar as frequências de cada tipo de exame, fazendo coleta de dados em diversos hospitais da cidade, já que essas estatísticas não são disponíveis.

O que o trabalho junto à comunidade médica tem mostrado é que existe uma grande receptividade para a realização deste tipo de trabalho. Mas, por outro lado, há também um grande desconhecimento, por parte tanto de médicos como de técnicos de radiologia, dos possíveis danos causados por irradiação e doses desnecessárias.

III.4. Referências:

-
1. Freitas M B - Doses absorvidas pelos pacientes submetidos a radiografias torácicas no município de São Paulo. Dissertação de Mestrado (IFUSP), 2000.
 2. Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde – Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico (Portaria N° 453). Diário Oficial, 01/06/1998.
 3. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation – Annex B, United Nations, New York, 2000.
 4. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation – Annex D, United Nations, New York, 2000.
 5. Tilly Jr J G – Avaliação de doses de radiação em pacientes submetidos a exames radiológicos convencionais. Dissertação de Mestrado (FFCLRP-USP), 1997.
 6. Drexler G, Cunha P G, Peixoto J E – Medical and occupational exposures in Brazil. Radiation Protection Dosimetry, **36(2-4)**, 101-105, 1991.
 7. Freitas M B, Yoshimura E M - Absorbed doses and physical parameters employed in chest radiological examinations carried out in hospitals of city of São Paulo. V Regional Congress on Radiation Protection and Safety (IRPA), Recife – PE, Brazil 29/4 a 4/5/2001.
 8. Freitas M B, Yoshimura E M – An overview of doses to patients and irradiation conditions of routine diagnostic x-ray examinations carried out in hospitals of the city of São Paulo – Brazil, Radiation Protection Dosimetry, **103(2)**, 141-148, 2003.
 9. Freitas M B, Yoshimura E M – Dose measurements in diagnostic radiology: adult and pediatric patients. Enviado para o First International Meeting on Applied Physics, 14 a 18 de outubro de 2003, Badajoz, Espanha.
 10. Freitas M B, Yoshimura E M, Ribeiro L A – Desenvolvimento de um “kit” postal para avaliação em grande escala das doses absorvidas pelos pacientes submetidos a exames radiológicos convencionais. XXXI Congresso Brasileiro de Radiologia, 24 a 27 de outubro de 2002, São Paulo, SP, Brasil – Radiologia Brasileira **35(supl. 1)**, 22, 2002.
 11. Silva N N – Amostragem probabilística: um curso introdutório. 2ª edição, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
 12. TCU (Tribunal de Contas da União) – Técnicas de amostragem para auditorias. Brasília, TCU – Secretaria Adjunta de Fiscalização, 2002.
 13. CNES – Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde, Ministério da Saúde, Brasília, 2000.
 14. Freitas M B, Ribeiro L A, Yoshimura E M – Exames radiológicos infantis em São Paulo: avaliação inicial de procedimentos, faixa etária e dose de entrada na pele. Aceito para apresentação oral no VIII Congresso Brasileiro de Física Médica, 13 a 16 de maio de 2003, Centro de Eventos da PUCRS, Porto Alegre/RS.

-
15. European Commission. European Guidelines on quality criteria for diagnostic radiography images in pediatrics. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR 16261 EN, 1996.
 16. European Commission. European Guidelines on quality criteria for diagnostic radiography images. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR 16260 EN, 1996.
 17. ICRP – 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP **21(1-3)**, 1990.
 18. ICRP Publication 87. Managing patient dose in computed tomography. Annals of the ICRP **30(4)**, 2000.
 19. Yano R, Saito R H, Severo L S, Yoshimura E M, Costa P R – Estudo comparativo das doses efetivas em exames de tomografia computadorizada de cabeça e abdome. Aceito para apresentação em painel no VIII Congresso Brasileiro de Física Médica, 13 a 16 de maio de 2003, Centro de Eventos da PUCRS, Porto Alegre/RS.
 20. Atherton J V, Huda W – Energy imparted and effective doses in computed tomography. Medical Physics **23(5)**, 735-741, 1996.
 21. Huda W, Chamberlain C C, Rosenbaum A E, Garrisi W – Radiation dose to infants and adults undergoing head CT examinations. Medical Physics, **28(3)**:393-399, 2001.
 22. Shrimpton P C, Jones D G, Hillier M C, Wall B F, Le Heron J C, Faulkner K – Survey of CT practice in the UK. Part 2. Dosimetric aspects. National Radiological Protection Board, Oxon, R249, 1991.
 23. Wang L, Lovelock M, Chui C-S – Experimental verification of a CT-based Monte Carlo dose-calculation method in heterogeneous phantoms. Medical Physics **26(12)**, 2626-2634, 1999.
 24. Becker P H B – Espectrometria de feixes de raios X com detector de telureto de cádmio e zinco. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
 25. Debertin K, Helmer R G – Gamma and x-ray spectrometry with semiconductor detectors. Ed. North Holland, Netherlands, 1988.
 26. Redus R, Squillante M, Lund J, Cirignano L, Waer P, Pantazis J, Huber A – High resolution CdTe detector systems. Nuclear Instruments and Methods **A353**, 1994.
 27. Miyajima S, Kotaro I, Matsumoto M – CdZnTe detector in diagnostic x ray spectroscopy. Medical Physics **29(7)**, 1421-1429, 2002.
 28. Miyajima S – Thin CdTe detectors in diagnostic x ray spectroscopy. Medical Physics **30(5)**, 771-777, 2003.
 29. Freitas M B, Medeiros F H M, Yoshimura E M – Study of the properties of detection of the CdZnTe semiconductor for diagnostic x-ray spectroscopy applications. Enviado para o First International Meeting on Applied Physics, 14 a 18 de outubro de 2003, Badajoz, Espanha.

IV. NOTAS FINAIS: a título de conclusão

Estão explicitadas aqui as conclusões do conjunto de trabalhos, agrupadas em contribuições metodológicas e resultados obtidos, seguidas de sugestões para trabalhos futuros.

IV.1 Contribuições metodológicas:

- Nossa contribuição tem sido importante para a detecção de radônio com fins dosimétricos: desenvolvemos monitor que permite avaliação em separado de radônio e filhos em condições muito próximas às da grande maioria de ambientes fechados de convívio humano;
- nosso monitor de radônio permite avaliar o ingresso de filhos de radônio no volume sensível, caso ocorra, com hipóteses bastante plausíveis;
- ainda com respeito à detecção de radônio, a metodologia desenvolvida para associação de características de traços a energia e direção das partículas alfa, se bem explorada, permitirá um avanço em diversas características do sistema (melhora da sensibilidade, superação de limitações) e uso em dosimetria de radônio;
- introduzimos o uso de metodologia de amostragem, que não é usual em nosso meio, para avaliação mais fiel de doses populacionais;
- quanto à dosimetria gama *in situ*, colocamos em operação um sistema detector com cintilador de iodeto de sódio, que é robusto, confiável e prático para obtenção de resultados rápidos, mesmo em situações de contaminação, a despeito da baixa resolução em energia;
- o uso desse detector para avaliar a dose dentro de um orifício relativamente profundo no solo (70 cm) permite fazer uma estimativa da contribuição do solo para a dose ambiental, em situações em que o solo possa ser considerado homogêneo em grandes extensões;
- na radiologia diagnóstica, a introdução do kit postal para avaliação de doses tem sido inestimável para avaliações de DEP (doses de entrada na pele) de um grande número de pacientes;
- o uso do detector de telureto de cádmio para avaliação de espectros de raios X semelhantes aos utilizados em radiologia permitirá que se avalie melhor as doses em órgãos internos e, conseqüentemente, que se estime uma dose efetiva representativa para a população;
- avaliações de perfil de dose com detectores TL em simuladores especiais para tomografia computadorizada mostraram que o uso de câmaras de ionização específicas é confiável;
- temos usado códigos comerciais para a simulação do transporte de fótons e elétrons por métodos de Monte Carlo (MCNP e EGS-4), o que vem auxiliando o projeto de experimentos e a validação de algumas hipóteses.

IV.2 Resultados obtidos:

- ✓ 70 monitores de radônio e concentração de emissões alfa foram colocados em residências espalhadas em diversos distritos da cidade, constituídos em uma amostra aleatória resultado de um sorteio em dois estágios: 14 setores censitários

pertencentes a 3 estratos escolhidos dos 13.000 setores da cidade, e 5 residências em cada um deles. Há nos monitores também um detector TL para radiação gama;

- ✓ foi montada uma câmara para irradiação em atmosfera de radônio e filhos, com concentrações de ^{222}Rn variáveis até 170 kBq.m^{-3} ;
- ✓ temos hoje um melhor conhecimento da situação da radiação ambiental na cidade de São Paulo. Sabemos ainda que essas taxas ambientais gama, relativamente elevadas quando comparadas às de outros locais do mundo, têm aqui uma componente considerável (~30% para locais abertos) que pode ser atribuída à presença de edificações em geral;
- ✓ o trabalho realizado em Goiânia, além de ter funcionado como um grande estímulo ao estabelecimento do grupo de Física Nuclear Aplicada na UFF, possibilitou, com o uso conjunto de diversas técnicas de medida de radiação, que fizéssemos a estimativa de doses efetivas para o grupo de catadores de papel. Além disso, o resultado do trabalho e sua divulgação responsável fizeram com que a CNEN adotasse medidas reparadoras;
- ✓ do trabalho de Goiânia resultaram também duas publicações didáticas, mostrando que um trabalho cuidadoso permite a obtenção, por alunos de graduação, de resultados importantes no âmbito da dosimetria ambiental.
- ✓ quanto às doses recebidas por pacientes (DEP) em exames radiológicos convencionais de tórax, pudemos constatar que, na maioria das clínicas da cidade de São Paulo avaliadas por nós, os resultados estão abaixo dos valores de referência estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Com a extensão ao Estado de São Paulo, incluindo a amostra aleatória de clínicas, e realizando medidas na pele dos pacientes e não na superfície do simulador, o desempenho foi pior quanto aos valores de dose nos pacientes, mas ainda assim dentro dos padrões da Portaria 453;
- ✓ os valores de DEP acima dos níveis de referência estão compreendidos, em geral, numa faixa muito larga, levando-nos a crer que muito pode ser feito em termos de procedimentos e controle de qualidade para reduzir esses valores, sem prejuízo da qualidade diagnóstica da imagem produzida;
- ✓ apesar de os valores de DEP satisfazerem em grande parte às recomendações, há um conjunto grande de clínicas que realiza esses exames sem os cuidados necessários para a colimação do feixe, irradiando desnecessariamente diversos órgãos dos pacientes;
- ✓ na área da radiologia pediátrica, os primeiros resultados obtidos mostram que a situação é mais grave pois muitas das doses observadas são comparáveis às recebidas por pacientes adultos, não há legislação sobre níveis de referência ou sobre procedimentos específicos, e a frequência de exames é elevada;
- ✓ também na tomografia computadorizada há ampla diversidade de doses absorvidas nas irradiações de simuladores homogêneos. O uso cada vez mais intenso da técnica e os altos valores de dose efetiva, quando comparados aos da radiologia convencional, apontam para a necessidade de se estabelecer protocolos de procedimento, evitando-se doses desnecessárias.

IV.3 Perspectivas (trabalhos futuros):

- Na área de saúde pública considero de relevância a obtenção dos níveis de radônio ambiental que teremos brevemente, tanto para residências como para locais de

trabalho. Esses resultados nos dirão se é razoável propor algum estudo epidemiológico de algum grupo observado;

- também a amostragem de DEP para diversos exames, em São Paulo, juntamente com a avaliação de espectros e testes de controle de qualidade de alguns dos locais amostrados será de grande valia, até para ponderar se os níveis de referência sugeridos pela Vigilância Sanitária são sustentáveis;
- na área de radiologia pediátrica e de tomografia computadorizada há muito trabalho a fazer, incluindo simulações por Monte Carlo dos feixes nas situações de irradiação usuais, para obtenção de grandezas de proteção radiológica relevantes. Será necessário um investimento grande de aprendizado e prática, que leve à sugestão de procedimentos e parâmetros de técnicas a utilizar para os exames;
- entendo como quase concluído o trabalho em radiação gama ambiental na cidade de São Paulo, pois já temos metodologia implantada e muitos resultados. Faltam a análise dos detectores colocados na amostra de residências e um exame mais detalhado da distribuição geográfica dos valores encontrados na cidade, com softwares específicos que contemplam estatística espacial (Spring ou Sigepi). Uma possível aplicação da metodologia desenvolvida em outros locais do Brasil seria também de interesse;
- na detecção de radônio há mais possibilidades de trabalho, principalmente no que se refere ao funcionamento do detector, pois entendo que o exploramos muito pouco, e agora isso é possível com o uso do sistema analisador de imagens: irradiações do LR115 com íons de $^4\text{He}^{2+}$ sob diversos ângulos de incidência e energias (utilizando o feixe do LAMFI – IFUSP) traria uma melhor calibração de áreas, formatos e opacidades de traços com essas grandezas. Há assim há possibilidade de aplicar o detector (descoberto ou envolto por filtros) para conhecer a distribuição de radônio e filhos no ar, determinar volume sensível para as diversas situações e comparar com previsões de cálculos por simulação, admitindo-se algumas hipóteses sobre a dinâmica desses radionuclídeos no ar, obtendo informações sobre o auto plate-out;
- extensão dos resultados para a comunidade, através de trabalho educativo em escolas públicas, preparação de cartilha sobre radiação ambiental, colocação de monitores de radônio nas escolas e em residências de alguns alunos para ampliar nossa amostra;

A avaliação, com boa qualidade, de valores de dose recebidos por populações as mais diversificadas, seja em irradiações médicas seja no meio ambiente, permite subsidiar melhor o conhecimento de efeitos biológicos de baixas doses de radiação. Acredito que esta linha de trabalho contribui nessa direção.