

CONCENTRAÇÕES DE ^{226}Ra E ^{210}Pb EM PRODUTOS AGRÍCOLAS
CULTIVADOS NAS CIRCUNVIZINHANÇAS DA MINA E USINA DE URÂNIO DO
PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS, MINAS GERAIS*

- LUISA M.H. VASCONCELLOS¹, ELIANA C.S. AMARAL¹, EDUARDO
PENNA FRANCA² E M. ELIZABETH C.M. VIANNA¹

1 - Departamento de Proteção Radiológica Ambiental, Instituto
de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de
Energia Nuclear, Avenida das Américas KM 11,5 - Barra da
Tijuca - 22700, Rio de Janeiro, RJ.

2 - Instituto de Biofísica, UFRJ, Rio de Janeiro.

*Trabalho financiado por: CNEN, CNPq.

RESUMO

Um levantamento dos teores de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos principais produtos agrícolas e nos respectivos solos de cultivo foi realizado no Planalto de Poços de Caldas, como complementação ao programa de monitoração ambiental pré-operacional da primeira mina de urânio do Brasil. O trabalho objetivou determinar parâmetros de transferência específicos do local, visando estimar doses de radiação na população, resultantes da operação das instalações. As concentrações de ^{226}Ra e ^{210}Pb em solos são comparáveis entre si; os valores médios são semelhantes aos observados em regiões de radioatividade natural normal, mas os valores máximos, são uma ordem de grandeza superiores. Igualmente nos vegetais analisados (feijão, cenoura, milho e batata), os teores de ^{226}Ra são ligeiramente superiores aos de ^{210}Pb e os máximos observados são uma ordem de grandeza maiores do que aqueles medidos em áreas de radioatividade normal. Os valores médios obtidos para os fatores de transferência: solo-produto agrícola, para ambos os radionuclídeos, situam-se na ordem de 10^{-3} e 10^{-2} quando relacionados respectivamente ao teor total e ao trocável nos solos.

Concluiu-se deste trabalho que o ^{226}Ra e o ^{210}Pb são radionuclídeos importantes no que concerne a exposição da população via ingestão, sendo portanto necessária a monitoração, destes nuclídeos nos produtos agrícolas durante a operação das instalações. Os valores elevados normalmente existentes em alguns produtos agrícolas locais, no entanto, dificultam a detecção de pequenos incrementos consequentes de eventual impacto operacional.

ABSTRACT

As a complement to the pre-operational environmental monitoring program of the Brazilian first uranium mine and

mill, a survey of ^{226}Ra and ^{210}Pb in agriculture products, and in the corresponding soils, were carried out in the Poços de Caldas Plateau. The survey intended to determine site specific transfer factors, in order to better estimate radiation doses on the population, resulting from the plant operation. In local soils, ^{226}Ra and ^{210}Pb have similar concentrations. The average contents are comparable to the values found in areas of normal radioactivity, but the maximum values are higher by one order of magnitude. In the vegetables analyzed (beans, carrot, corn and potato), ^{226}Ra concentrations are slightly higher than those of ^{210}Pb , and the maximum values are also one order of magnitude greater than in normal regions. For both radionuclides, the average soil-to-plant transfer factors are of the order of 10^{-3} and 10^{-2} , when related to total and to exchangeable contents in soils, respectively.

These results led to the conclusion that ^{226}Ra and ^{210}Pb have similar importance, concerning the population exposure via the foodstuff ingestion pathway. Therefore, it was recommended to carry on routine monitoring program for both radionuclides in the main agriculture crops. However, the naturally elevated radionuclide concentrations, in some local vegetables, will decrease the sensitivity for detecting small increments resulting from the plant operation.

I. INTRODUÇÃO

Antes da autorização do funcionamento de uma indústria nuclear, o órgão responsável pela operação é obrigado a executar um programa de estudos pré-operacionais na região. Estes estudos abrangem o levantamento de dados meteorológicos, hidrológicos, sísmiológicos, distribuição demográfica, características sócio-econômicas da população, uso da terra e níveis de radioatividade naturalmente existentes na área. Os resultados desses estudos, juntamente com o projeto da instalação e o inventário dos radionuclídeos a serem eventualmente liberados no meio ambiente, são enviados ao órgão supervisor. Essas informações subsidiam a tomada de decisão e o estabelecimento de procedimentos de proteção radiológica, entre outros, os limites máximos permissíveis de liberação dos radionuclídeos no meio ambiente. A limitação da descarga é estabelecida de tal forma que, o grupo crítico (indivíduo(s) potencialmente mais exposto(s)) não receba uma dose de radiação superior ao valor estabelecido pelas normas de proteção radiológica aceitas no país (11). A estimativa de dose de radiação no grupo crítico é realizada através da utilização de modelos matemáticos que descrevam o transporte dos radionuclídeos desde a sua liberação no meio ambiente até o homem.

Durante a fase operacional, os níveis de atividade dos radionuclídeos na fonte e no meio ambiente são periodicamente medidos para assegurar a observância dos limites estabelecidos.

Com a implantação do Programa Nuclear Brasileiro foram incentivadas, em todo território nacional, pesquisas sistemáticas de depósitos uraníferos. A primeira região a ser investigada foi a do Planalto de Poços de Caldas, uma das maiores intrusões alcalinas do mundo, que está situada a sudoeste do Estado de Minas Gerais, na divisa com o Estado de São Paulo. A natureza alcalina da região foi reconhecida primeiramente por O. Derby, em 1877 (7). Em 1948, Frahya fez

referência à existência de minerais radioativos e, apenas, em 1952, por determinações radiométricas, foi constatada a presença de urânio (3, 7). Avaliações do potencial de urânio do Planalto levaram à identificação de vários depósitos "zircônio-uraníferos", sendo a região considerada uma das mais promissoras para a exploração de urânio no Brasil. O Planalto de Poços de Caldas possui uma radioatividade natural elevada devido à presença de inúmeras anomalias radioativas espalhadas ao longo do Planalto. Em algumas áreas, estas anomalias são bastante pronunciadas, apresentando diferentes tipos de minerais; o urânio encontra-se associado ao zircônio ou ao molibdênio, e o tório, aos óxidos de ferro e manganês. As quatro maiores anomalias são as do Horro do Ferro, Taquari, Campo do Agostinho e Campo do Cercado (3, 7).

Foi na área do Campo do Cercado que, em 1982, entrou em funcionamento o Complexo Mineiro Industrial do Planalto de Poços de Caldas (CIPC) sob a responsabilidade das Empresas Nucleares Brasileiras, NUCLEBRÁS (Fig. 1). Este complexo compreende uma mina de urânio onde se procede a extração do minério, uma instalação de processamento físico, que através de britagens e moagem reduz a granulometria do minério e uma usina de beneficiamento, onde se faz o processamento químico por métodos de extração e purificação, até a produção do diuranato de amônio, denominado de "yellow-cake". O conjunto dessas operações compõe a primeira fase do ciclo do combustível nuclear.

O funcionamento do CIPC envolve a produção de rejeitos sólidos que ficam expostos às intempéries e a liberação de efluentes líquidos e gasosos contendo material radioativo que se dispersam no meio ambiente, podendo eventualmente, contribuir para o aumento da dose de radiação na população. Seu funcionamento é portanto, mandatoriamente regido por normas de proteção radiológica que exigem tratamentos dos efluentes, cuja liberação só se autoriza, quando a concentração dos radionuclídeos for inferior aos limites estabelecidos. O efluente líquido proveniente da área

de mineração (água da mina e água de lixiviação natural) é parcialmente utilizado no processo da usina e o excesso, após neutralização com cal e decantação dos sólidos, é liberado na Bacia do Rio das Antas. Os efluentes da usina, após neutralização com cal e carbonato de cálcio, são sedimentados numa barragem de rejeitos e posteriormente, o efluente líquido é tratado com cloreto de bário para insolubilização do rádio, por co-precipitação com sulfato de bário. O sobrenadante é descarregado na Bacia do Rio Verde.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, como órgão normativo e supervisor não só estabelece diretrizes quanto aos procedimentos de radioproteção para o CIPC e controla a sua observância, como também, vem executando através do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD, estudos ambientais que permitam otimizar esse controle. Durante os anos de 1980-81, um Programa Pré-Operacional de Monitoração Ambiental foi realizado no Planalto de Poços de Caldas, objetivando caracterizar as concentrações naturais de ^{226}Ra , ^{210}Pb e ^{238}U nos diversos compartimentos que compõem os ecossistemas da região, de molde a permitir uma avaliação posterior dos possíveis incrementos decorrentes da fase operacional (2).

Os dados obtidos neste programa revelaram que o ^{226}Ra e o ^{210}Pb entram na cadeia alimentar por diferentes vias. O ^{226}Ra dispersa-se no meio ambiente através dos corpos d'água e é incorporado pelos vegetais irrigados. Quanto ao ^{210}Pb , descendente do gás radônio (^{222}Rn), tem como principal via de transporte, a atmosfera. É depositado por precipitação nos solos e superfícies foliares ou ainda incorporado por via radicular pelas plantas. O ^{226}Ra e o ^{210}Pb foram considerados os radionuclídeos de maior importância radiológica e a ingestão de alimentos, uma via potencialmente importante de exposição da população, não apenas porque os alimentos analisados apresentaram concentrações mensuráveis destes radionuclídeos, mas também devido a alta produção agrícola do Planalto (2).

Para o estabelecimento dos limites de concentração dos radionuclídeos nos efluentes a serem liberados, e para a avaliação do impacto radiológico ambiental, é necessário efetuar o cálculo das doses de radiação no grupo mais exposto e na população local. Isto é realizado através de modelos matemáticos que levam em consideração o comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente, em seu trânsito até o Homem, e os seus fatores de transferência entre os diversos compartimentos. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) (11) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) (10) recomendam que estes dados sejam, sempre que possível, determinados em cada local de interesse, principalmente, aqueles que influenciam diretamente no valor final da dose de radiação. Assim, foi iniciado pelo IRD-CNEN um amplo projeto de estudos radioecológicos no Planalto de Poços de Caldas visando a determinação de alguns parâmetros relevantes, específicos da região. Dando continuidade a este projeto, no que diz respeito às vias de exposição por ingestão, foram determinadas neste trabalho, as concentrações médias de ^{226}Ra e ^{210}Pb em amostras dos principais alimentos cultivados no Planalto de Poços de Caldas e os fatores de transferência entre os compartimentos solo-produto agrícola. O fator de transferência (FT) é definido pela relação adimensional da concentração do radionuclídeo em um compartimento em relação a sua concentração no compartimento suporte.

$$FT = \frac{\text{Atividade do radionuclídeo por unidade de massa úmida do vegetal}}{\text{Atividade do radionuclídeo por unidade de massa seca do solo}}$$

Tem sido muito debatido o uso da fração trocável do elemento no solo para o cálculo do FT. A maior parte dos autores utiliza o teor total do elemento no solo para este cálculo. No entanto, Grzybowska (8), em experimentos realizados em diferentes tipos de solo, mostrou que apenas o

rádio trocável estava disponível para incorporação por vegetais. Assim, o uso da fração trocável no cálculo do FT deveria expressar de forma mais realista a capacidade da planta em absorver os íons nas diversas condições físico-químicas do solo.

Neste trabalho, determinou-se o conteúdo trocável e total de ^{226}Ra e ^{210}Pb no solo, a fim de se conhecer a ordem de grandeza do FT calculada com base nesses dois teores e, desta forma, fornecer alguma informação pertinente à análise mais adequada para o cálculo deste parâmetro de transferência no sistema solo-planta.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem

As fazendas selecionadas para a amostragem localizam-se numa área compreendida por um raio de 20 km em torno do CIPC, em diferentes direções e distâncias. Deu-se ênfase às fazendas localizadas na direção preferencial dos ventos (setor NE-SO) e ao longo das duas bacias hidrográficas (Fig. 1) que, eventualmente, serão utilizadas para irrigação das culturas agrícolas. As plantações concentram-se principalmente ao longo da Bacia do Rio das Antas, cujas águas são utilizadas em algumas fazendas para irrigação durante a época de seca. A bacia do Rio Verde, se caracteriza por uma topografia acidentada, ocasionando uma baixa atividade agrícola.

Figura 1

Três coletas de alimentos e dos respectivos solos de cultivo foram realizados nos meses de dezembro de 1981, janeiro e junho de 1982. Os alimentos selecionados foram a batata, feijão, milho e cenoura por serem estes, os de maior

produção e/ou consumo na região. Coletaram-se em 14 fazendas 35 amostras de alimentos sendo 16 de batata, 9 de milho, 5 de feijão e 4 de cenoura. A variabilidade do número de amostras de cada tipo de alimento reflete de certa forma, a abundância de cada tipo de cultivo na região.

Preparo e análise das amostras

No laboratório os alimentos foram lavados e tratados de forma a se determinar a concentração de ^{226}Ra e ^{210}Pb apenas na fração comestível. Posteriormente eram calcinados a 450°C por 48h. As cinzas resultantes adicionavam-se carreadores de bário e chumbo e procedia-se a solubilização por ataque com ácido nítrico concentrado. O resíduo era descartado porque testes preliminares demonstraram que a fração de ^{226}Ra e ^{210}Pb residual não era significativa. Após solubilização, procedia-se a precipitação do bário e chumbo sob a forma dos respectivos sulfatos, que carream o ^{226}Ra e o ^{210}Pb presentes.

Os precipitados de ^{226}Ra (BaSO_4) e de $^{210}\text{PbSO}_4$ eram dissolvidos em solução de EDTA alcalino. Posteriormente, reprecipitavam-se os sulfatos em diferentes pHs: o $^{226}\text{Ra}(\text{BaSO}_4)$ à pH 4,5 e o $^{210}\text{Pb}(\text{SO}_4)$ à pH 1 (1). O rendimento químico do bário foi medido por espectrometria de absorção atômica e o do chumbo por gravimetria. O ^{226}Ra foi determinado pelo clássico método de Lucas de emanção de radônio (4) e o ^{210}Pb pela medida da emissão beta do seu descendente ^{210}Bi , após atingir o equilíbrio, em um contador Geiger-Müller de fluxo gasoso contínuo, dotado de um sistema de anti-coincidência para redução da radiação de fundo (Searle Analytic Inc. - 1152).

As amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malhas de 2 mm. O peneirado foi subdividido em duas porções. Uma destinou-se à análise do teor trocável de ^{226}Ra e ^{210}Pb no solo, utilizando-se a técnica de extração com solução de acetato de amônio 1N pH 7; que é a mais empregada para a determinação padronizada da fração trocável de cations de

interesse agrícola (5). Após a extração, o procedimento empregado foi idêntico ao utilizado para análise radioquímica de ^{226}Ra e ^{210}Pb em alimentos (1). A outra parte, destinou-se à determinação do teor total deste radionuclídeo, por espectrometria gama com detector de germânio de 60 cm^3 de volume (ORTEC, GMX 15185), acoplado à espectrômetro multicanal (Nuclear Data-ND 65).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela I apresenta os teores médios, mínimos e máximos de ^{226}Ra total e trocável nas amostras de solo. A concentração total de ^{226}Ra variou por um fator de 15, desde o valor mínimo de 900 até o máximo de $13.650\text{ pCi kg}^{-1}$ solo seco. A fração trocável situou-se na faixa de 150 a 1.340 pCi kg^{-1} solo seco variando portanto, por um fator de 9. As variações encontradas são de certa forma esperadas visto ser o Planalto de Poços de Caldas muito mineralizado e apresentando inúmeras anomalias radioativas, algumas aflorando na superfície. A percentagem de ^{226}Ra trocável em relação ao conteúdo total no solo situou-se na faixa de 2,3 a 34,5% demonstrando disponibilidades diversas deste íon para absorção pelos vegetais. Estes valores estão de acordo com os obtidos por Grzybowska (8) que, constatou em seus experimentos, com diferentes tipos de solo, uma variação da fração trocável de ^{226}Ra de 3 a 30%.

Tabela I

De forma semelhante, os resultados das concentrações de ^{210}Pb total apresentados na Tabela II, são bastante variáveis. A concentração de ^{210}Pb total abrangeu de 1.224 a $11.435\text{ pCi kg}^{-1}$ solo seco, o que equivale a um fator de 9 vezes. Quanto ao conteúdo trocável de ^{210}Pb , este só pôde ser

determinado em duas amostras que apresentaram os valores superiores a atividade mínima detectável de 108 e 1.130 pCi kg⁻¹, correspondendo a 3,6 e 9,7% do teor total de ²¹⁰Pb nos respectivos solos.

Tabela II

Sheppard (18) cita em seu trabalho de revisão, concentrações médias de ²²⁶Ra nos solos de diversas áreas, excluindo as de radioatividade natural elevadas. Nos EUA, elas variam de 800 a 2.800 pCi kg⁻¹ solo seco e, na Europa são encontradas concentrações de 800 pCi kg⁻¹ nos solos do Reino Unido a 3.800 pCi kg⁻¹ nos solos da Tchecoslováquia. Comparando-se esses resultados com os obtidos nos solos das fazendas amostradas no Planalto de Poços de Caldas, verifica-se que as concentrações mínima e máxima de ²²⁶Ra são respectivamente 1,1 e 4,9 maiores do que os valores equivalentes encontrados nos EUA e 1,1 e 3,6 vezes maiores do que os observados em solos europeus. Conclui-se que, embora os valores encontrados no Planalto de Poços de Caldas sejam superiores quando o mineral radioativo encontra-se aflorado, os valores médios das concentrações deste radionuclídeo são da mesma ordem de grandeza dos existentes em áreas de radioatividade natural normal.

Dados relativos ao ²¹⁰Pb no solo são bastante escassos na literatura. Em estudo de Schuttelkopf e Kiefer (17), realizado na Floresta Negra localizada a sudoeste da República Federal de Alemanha, região altamente mineralizada, a concentração de ²¹⁰Pb encontrada variou de 600 a 3.300 pCi kg⁻¹ enquanto que a de ²²⁶Ra situou-se na faixa de 40 a 12.100 pCi kg⁻¹. Os valores para ²¹⁰Pb são duas e três vezes menores do que os respectivos mínimos e máximos obtidos na região do Planalto de Poços de Caldas.

Tabela III

A Tabela III apresenta as concentrações médias, mínimas e máximas de ^{226}Ra e ^{210}Pb nas amostras de alimentos analisados. As concentrações de ^{226}Ra situam-se na faixa de 1,6 a 22,7 pCi kg^{-1} massa úmida e as de ^{210}Pb de 1,1 a 12,1 pCi kg^{-1} . No entanto verifica-se que as concentrações médias, para os dois radionuclídeos, são próximas entre si e que o feijão e a cenoura apresentam os valores mais elevados para ambos. A grande dispersão encontrada nas concentrações de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos alimentos reflete, de certa forma, a variação encontrada no conteúdo destes radionuclídeos nos solos das diversas fazendas estudadas.

Testes de correlação foram realizados entre o conteúdo de ^{226}Ra nos vegetais e o teor total e trocável deste radionuclídeo nos respectivos solos de cultivo. O pequeno número de amostras analisadas não demonstrou correlação estatisticamente significativa. Este resultado é coerente com as observações de trabalhos anteriores realizados por Penna-Franca na região de alta radioatividade natural, localizada em Araxá-Tapira, Minas Gerais (16). Como o conteúdo de ^{210}Pb trocável foi mensurável em apenas duas amostras, testes de correlação idênticos foram aplicados apenas entre o conteúdo de ^{210}Pb no vegetal e o seu teor total no solo. Os resultados também não demonstraram correlação estatisticamente significativa.

Os níveis de ^{226}Ra nos principais componentes da dieta do Hemisfério Norte variam de 0,1 a 5 pCi kg^{-1} de massa úmida (20). Nos Estados Unidos, Fisenne e Keller (6) determinaram as concentrações de ^{226}Ra nos alimentos de maior consumo em três cidades americanas, encontrando valores de 0,1 - 2,3 pCi kg^{-1} para batata e 0,7-4,8 pCi kg^{-1} para o feijão. Comparando esses resultados com os obtidos neste trabalho, verifica-se que, para a batata são da mesma ordem de grandeza e para o feijão, as concentrações em Poços de Caldas são até uma ordem de grandeza superiores.

Morse e Wellford (15), obtiveram para ^{226}Ra e ^{210}Pb em alimentos da cidade de New York, valores médios

respectivamente de 0,28 e 1,5 pCi kg⁻¹ para batata e 0,76 e 1,1 pCi kg⁻¹ para feijão, concentrações estas, inferiores as observadas em Poços de Caldas.

No estudo já citado de Shuttelkopf e Kiefer (17) realizado na Floresta Negra, onde a concentração de descendentes de urânio nos solos é elevada, os teores de ²²⁶Ra e ²¹⁰Pb variam de duas ordens de magnitude para o mesmo tipo de alimento. A faixa das concentrações de ²²⁶Ra foi de 1,8 - 240 pCi kg⁻¹ de massa úmida para milho e 1,2 - 40 pCi kg⁻¹ para a batata. As concentrações de ²¹⁰Pb obtidas para milho variam entre 5 - 26 pCi kg⁻¹.

As regiões de radioatividade natural elevada melhor estudadas estão localizadas no Estado de Kerala, na Índia e nos Estados do Espírito Santo e Minas Gerais, no Brasil. No Estado de Kerala, Lalit et al. (12) encontraram níveis de ²²⁶Ra de 86 pCi kg⁻¹ para os vegetais radiculares e uma concentração média de 10 pCi kg⁻¹ para frutas. Na região de Araxá-Tapira, no Estado de Minas Gerais, Penna Franca (16) encontrou concentrações muito elevadas de rádio na mandioca, de até 2.720 pCi ²²⁸Ra kg⁻¹ e 81 pCi ²²⁶Ra kg⁻¹. No Estado do Espírito Santo (Guarapari-Meaipe) o mesmo autor determinou a atividade alfa total nos alimentos cultivados nessas áreas, obtendo valores compatíveis com aqueles que são verificados em alimentos provenientes de regiões de radioatividade normal. Este fato talvez possa ser explicado pela baixa mobilidade do rádio presente nas areias monazíticas.

Embora se disponha de muitos dados de concentração de ²²⁶Ra e ²¹⁰Pb em alimentos produzidos em regiões de radioatividade natural elevada, pouco se conhece a respeito desses valores em áreas de mineração e beneficiamento de urânio. Tracy et al. (19), em estudos realizados sobre absorção de radionuclídeos em alimentos cultivados em Port Hope, Canadá, região com ampla faixa de contaminação do solo, observaram que as concentrações médias, em vegetais foliáceos, radiculares, caulinares e frutas eram de 2,71 pCi kg⁻¹ para ²²⁶Ra e 2,12 pCi kg⁻¹ para ²¹⁰Pb. Holtzman et al. (9) realizaram uma pesquisa na região de Anaconda, Novo México,

com o objetivo de obter dados para determinar uma possível contaminação por radionuclídeos liberados no meio ambiente pela indústria de processamento de urânio, e encontraram valores de ^{226}Ra e ^{210}Pb para alimentos cultivados em uma área residencial próxima à instalação de, respectivamente, 1,1 e 3,5 pCi kg^{-1} para tomate, 5,9 e 17 pCi kg^{-1} para feijão verde; 3,3 e 5,9 pCi kg^{-1} para cenoura e de 4,4 e 10,3 pCi kg^{-1} para beterraba. Estes resultados situam-se na faixa observada para os alimentos cultivados no Planalto de Poços de Caldas.

Tabela IV. e V

As Tabelas IV e V apresentam os fatores de transferência (F.T.) para ^{226}Ra e ^{210}Pb calculados em relação aos respectivos teores totais e trocáveis nos solos. Os valores dos F.T. para ^{210}Pb trocável foram estimados considerando-se a média dos limites mínimos detectáveis (28 amostras) como sendo o valor máximo de ^{210}Pb que estaria disponível no solo para a absorção pelos vegetais (139,4 pCi kg^{-1} solo seco).

Observa-se que, com exceção do F.T. médio para ^{210}Pb com base no teor total, calculado para batata, que é da ordem de 10^{-4} , todos os demais grupos de alimento apresentaram fatores de transferência da ordem de 10^{-2} relativo ao teor trocável no solo e da ordem de 10^{-3} relacionado ao conteúdo total. O amplo intervalo de resultados individuais reflete a variação encontrada nos teores dos radionuclídeos nos solos e nos alimentos. A cenoura, provavelmente devido à constância de localização na amostragem (uma única fazenda), apresentou a menor dispersão destes valores.

Os fatores de transferência de radionuclídeos encontrados na literatura apresentam uma ampla faixa de variação. As diferentes condições experimentais em campo e laboratório, para determinação dos F.T. contribuem para a grande variabilidade associada a estes valores. Os resultados obtidos neste trabalho são concordantes com os relatados por McDowell-Boyer et al. (13) para diversos tipos de vegetais. A

média é de 8×10^{-3} e o intervalo de valores individuais encontra-se entre 1×10^{-4} e 4×10^{-2} para o ^{226}Ra e 1×10^{-4} e 2×10^{-2} para o ^{210}Pb cuja média é de 5×10^{-3} .

A maior parte dos valores de F.T. citados na literatura baseiam-se no teor total do radionuclídeo no solo. Os diferentes métodos utilizados para extração da fração trocável dos radionuclídeos tornam inviável a comparação dos resultados obtidos pelos diversos autores. Esforços tem sido feitos para desenvolver técnicas analíticas mais sensíveis e mais adequadas à extração de radionuclídeos específicos, na fração trocável do solo, porém, até o presente momento, não se tem nenhum procedimento padronizado e aceito universalmente. Pelos resultados obtidos neste trabalho, verifica-se uma relação constante, de uma ordem de grandeza, entre os valores de F.T. baseados nos teores trocável e total dos radionuclídeos no solo. Propõe-se que futuros estudos em outras áreas, sejam realizados com o objetivo de verificar se a constância da relação entre os dois valores dos F.T. encontrado neste trabalho, se mantém. Sugere-se a investigação de técnicas específicas para determinação da fração trocável, particularmente, para o ^{210}Pb .

IV. CONCLUSÕES

- As concentrações médias de ^{226}Ra total nos solos do Planalto de Poços de Caldas são da mesma ordem de grandeza das encontradas em áreas de radioatividade natural normal. Os valores máximos obtidos, uma ordem de grandeza superior, correspondem, provavelmente, a solos provenientes de fazendas localizadas em regiões com afloramento de anomalias radioativas. As concentrações de ^{210}Pb são comparáveis às de ^{226}Ra . Estes resultados demonstram a peculiar distribuição do material radioativo na região do Planalto de Poços de Caldas, conseqüente dos diversos processos de mineralização ocorridos.

- As concentrações de ^{226}Ra e ^{210}Pb trocáveis evidenciaram, nas condições experimentais utilizadas, uma grande variabilidade para ^{226}Ra (2,3 a 34,5%) entre os diferentes tipos de solo e pouca disponibilidade de ^{210}Pb .
- As concentrações médias de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos principais produtos agrícolas cultivados no Planalto de Poços de Caldas são comparáveis entre si. Os valores máximos obtidos são uma ordem de grandeza superiores aos provenientes de áreas de radioatividade natural normal. Estes resultados permitem concluir serem estes radionuclídeos importantes no que diz respeito a dose populacional por ingestão.
- A ocorrência de valores mais elevados de ^{226}Ra e ^{210}Pb nos alimentos da região tornam difícil detectar pequenos incrementos que possam resultar do lançamento de efluentes da mina e usina de urânio no meio ambiente local. No entanto, considera-se importante uma monitoração permanente destes dois radionuclídeos, particularmente nos produtos agrícolas irrigados com água dos rios onde são descarregados os efluentes das instalações.
- Os valores médios obtidos para o fator de transferência de ^{226}Ra e ^{210}Pb são da mesma ordem de grandeza, sendo respectivamente, 10^{-3} e 10^{-2} em relação ao teor total e trocável do radionuclídeo no solo. Observou-se a constância de uma ordem de grandeza na relação dos valores deste parâmetro com base nos dois teores em solo.

V. REFERÊNCIAS

1. Amaral, E.C.S., 1979. Comportamento do ²²⁶Ra no ambiente aquático da região de Poços de Caldas, M.G. Rio de Janeiro, Tese de Mestrado, Instituto de Biofísica, UFRJ. 99p.
2. Amaral, E.C.S., Azevedo, H.L.P. e Mendonça, A.H., 1984. Pré-operacional environmental survey at the uranium mine and mill site, Poços de Caldas, M.G. - Brazil. Sci. Total Env., 42: 257-266.
3. Ayres, J.G. 1981. Uranium in Brazil. In uranium deposits in Latin American, Geology y exploration de yacimientos de uranium in America Latina; Geology y exploration. Vienna, IAEA, p 315-55.
4. American Public Health Association (APHA). 1971. Radium 226 by radon in water. In standard methods for the examination of water and wastewater, Washington D.C., p. 617-29.
5. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 1979. Manual de métodos de análise de solo. Métodos 1.1 e 2.4. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação, SNLCS.
6. Fisenne, I.M. and Keller, H.W. 1969. Radium 226 in the diet of three United States cities. U.S. Atomic Energy Commission. (HASL-207), p. 1-2.
7. Frayha, R. 1962. Urânio e Tório no Planalto de Poços de Caldas. Departamento Nacional de Produção Mineral, M.M.E. Boletim nº 116, Rio de Janeiro, 75p.

8. Grzybowska, D. 1978. Uptake of Ra 226 by plants from contaminated soils-Nukleoniko. Warszawa, 19: 71-9.
9. Holtzman, R.B., Urnezis, P.W., Padova, A. and Bobula, C.M., 1978. Progress report on a study of contamination of the human food-chain by uranium mill tailings pile. Annual Report. Argonne National Laboratory, Illinois. 176-95.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA), 1982. Safety series n° 57. Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Vienna, 96p.
11. International Commission on Radiological Protection. 1977. Recommendations of the ICRP. Publication 26, Pergamon Press, Oxford, 53p.
12. Lalit, B.Y. and Shukla, V.K., 1982. Natural radioactivity in foodstuffs from high natural radioactivity areas of southern India. In Natural Radiation Environment. Wiley Eastern Ltd. Bombay, India, p. 43-9.
13. McDowell, Boyer, L.M., Watson, A.P. and Travis, C.C. 1980. A review of parameters describing terrestrial food-chain transport of lead-210 and radium-226. Nuclear Safety: 486-95.
14. Moniz, A.C. 1975. Elementos de Pedologia, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 460p.
15. Morse, R.S. and Wellford, G.A., 1971. Dietary intake of Pb-210. Health Physics 21: 53-5.
16. Penna-Franca, E. 1967. Radiochemical and radioecological studies on Brazilian areas of high natural radiation. In annual Report to USAEC, NYO - 3273-7 - Rio de Janeiro, UFRJ, p: 4-1/4-5.

17. Schüttelkopf, H. and Kiefer, H. 1981. The Ra-226, Pb-210 and Po-210 contamination of black forest. In Natural Radiation Environment, Willy Eastern Ltd., Bombay India. p. 194-200.
18. Sheppard, M.I. 1980. The environmental behavior of radium. Atomic Energy of Canada Ltd., AECL-6796, 29p.
19. Tracy, B.L., Prantl, F.A. and Quinn, I.M., 1983. Transfer of ^{226}Ra , ^{210}Pb and uranium from soil to garden produce: assessment of risk, Health Physics 44: 469-77.
20. United Nations, 1977. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly. United Nations publication, sales No. E. 77. IX. New York, 725p.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nestor Figueredo e Marco Aurélio, da Empresas Nucleares Brasileiras, NUCLEBRÁS, pelas facilidades concedidas durante a coleta das amostras. Ao Eng^o Sergio Ramos, Furnas Centrais Elétricas, pela disponibilidade de utilização do detector Geiger-Müller. Ao IRD pelo apoio direto ou indireto na realização deste trabalho, em particular, ao Dr. Carlos Eduardo de Almeida, diretor, ao Eng^o João Marques, chefe do Dept^o de Apoio Técnico e à Anamélia Habib, chefe do Dept^o de Proteção Radiológica Ambiental.

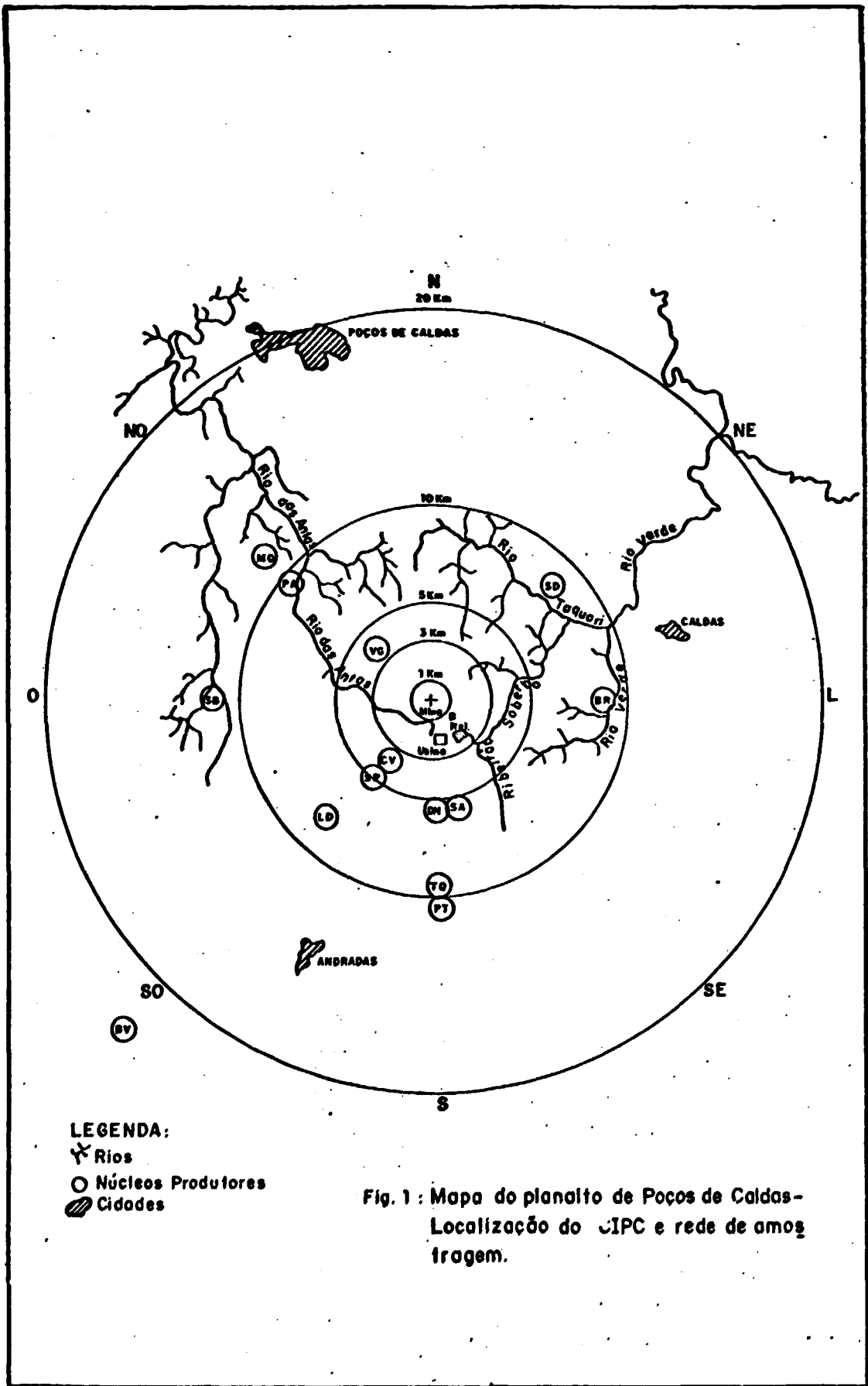


TABELA I

TEORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DE ^{226}Ra TOTAL E TROCÁVEL EM SOLOS

RÁDIO - 226 NO SOLO	CONCENTRAÇÃO DE ^{226}Ra (pCi kg ⁻¹ SECO)		
	MÉDIA	MÍNIMA	MÁXIMO
Total (30)	4.054 ± 525*	977	13.560
Trocável (30)	451 ± 52*	150	1.340

() - Número de Amostras

* - Erro Padrão σ/\sqrt{N}

TABELA II

TEORES MÉDIOS, MÍNIMOS E MÁXIMOS DE ^{210}Pb TOTAL EM SOLOS

CONCENTRAÇÃO DE ^{210}Pb (pCi kg ⁻¹ SECO) (28)		
MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
4.991 ± 503*	1.200	11.435

() - Número de Amostras

* - Erro Padrão σ/\sqrt{N}

TABELA III

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS, MÍNIMAS E MÁXIMAS DE ^{226}Ra E ^{210}Pb EM ALIMENTOS

TIPO DE ALIMENTO	CONCENTRAÇÃO DE ^{226}Ra			CONCENTRAÇÃO DE ^{210}Pb		
	(pCi kg ⁻¹ UMIDO)			(pCi kg ⁻¹ UMIDO)		
	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
FELJÃO (6)	11,6 ± 2,6*	4,5	22,7	9,4 ± 1,4*	3,0	12,1
CENOURA (4)	11,1 ± 1,0*	8,9	13,1	6,9 ± 0,7*	5,9	8,6
BATATA (16)	4,4 ± 1,1*	1,6	18,8	2,9 ± 0,4*	1,1	6,4
MILHO (9)	3,2 ± 0,8*	1,9	6,5	3,9 ± 0,5*	2,7	6,0

() - Número de Amostras

* - Erro Padrão σ/\sqrt{N}

TABELA IV

**FATORES DE TRANSFERÊNCIA MÉDIOS PARA ^{226}Ra E ^{210}Pb EM RELAÇÃO
AOS TEORES TOTAIS DOS RADIONUCLÍDEOS NO SOLO**

TIPO DE ALIMENTO	Nº DE	FT	Nº DE	FT
	AMOSTRAS	(^{226}Ra TOTAL)	AMOSTRAS	(^{210}Pb TOTAL)
FELJÃO	6	(5,9 ± 4,3) 10 ⁻³	6	(4,2 ± 3,3) 10 ⁻³
CENOURA	4	(4,1 ± 1,4) 10 ⁻³	3	(2,6 ± 1,2) 10 ⁻³
BATATA	16	(1,0 ± 0,4) 10 ⁻³	16	(7,6 ± 5,8) 10 ⁻⁴
MILHO	9	(1,5 ± 1,3) 10 ⁻³	6	(1,1 ± 1,3) 10 ⁻³

TABELA V

FATORES DE TRANSFERÊNCIA MÉDIOS PARA ^{226}Ra E ^{210}Pb EM

RELAÇÃO AOS TEORES TROCÁVEIS DOS RADIONUCLÍDEOS NO SOLO

TIPO DE ALIMENTO	N° DE AMOSTRAS	FT (^{226}Ra TROCÁVEL)	N° DE AMOSTRAS	FT (^{210}Pb TROCÁVEL) (ESTIMADO)
FELJÃO	6	$(5,2 \pm 5,4) 10^{-2}$	6	$(6,6 \pm 2,6) 10^{-2}$
CENOURA	4	$(2,9 \pm 1,1) 10^{-2}$	4	$(4,9 \pm 0,9) 10^{-2}$
BATATA	16	$(1,1 \pm 0,5) 10^{-2}$	16	$(2,1 \pm 1,2) 10^{-2}$
MILHO	9	$(1,2 \pm 0,7) 10^{-2}$	6	$(2,5 \pm 1,4) 10^{-2}$