



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ANTONIO CARLOS PATROCINIO JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE SEDIMENTAÇÃO NO LAGO
DA USINA TRÊS BOCAS PELA MEDIDA DO ^{137}Cs E ^7Be**

Londrina
2010

ANTONIO CARLOS PATROCINIO JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE SEDIMENTAÇÃO NO LAGO
DA USINA TRÊS BOCAS PELA MEDIDA DO ^{137}Cs E ^7Be**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello

Londrina
2010

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual De Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P314a Patrocinio Junior, Antonio Carlos.

Avaliação do histórico de sedimentação no lago da usina Três Bocas pela
medida do ^{137}Cs e ^7Be / Antonio Carlos Patrocinio Junior. – Londrina,
2010.
81 f. : il.

Orientador: Avacir Casanova Andrello.
Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina,
Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, 2010.
Inclui bibliografia.

1. Física nuclear – Teses. 2. Reservatório – Sedimentação – Teses. 3. Solos –
Erosão – Teses. 4. Análise de sedimentação – Teses. 5. Radioatividade –
Medição – Teses. 6. Césio – Teses. 7. Berílio – Teses. I. Andrello, Avacir Casanova.
II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de
Pós-Graduação em Física. III. Título.

CDU 539.14

ANTONIO CARLOS PATROCINIO JUNIOR

**AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE SEDIMENTAÇÃO NO LAGO DA
USINA TRÊS BOCAS PELA MEDIDA DO ^{137}Cs E ^7Be**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Fábio Luiz Melquíades
Unicentro

Londrina, 25 de março de 2010

À minha mãe (in memoriam).....

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as graças concedidas.

Ao Prof. Dr. Avacir, pela amizade, e por toda atenção prestada durante todas as etapas deste trabalho.

A minha família, pela confiança, motivação e apoio.

A Karla, pela paciência e pelo carinho dedicado durante as fases mais difíceis.

A família Tookuni, por toda ajuda e amparo.

Ao Nagata, Tiago, Appoloni, Leonardo, e Diogo, por ajudarem diretamente com idéias e críticas.

A todos do laboratório LFNA pelo companheirismo.

Aos amigos e colegas que até então fizeram parte da minha vida.

Aos funcionários do Parque Daisaku Ikeda que me apoiaram nas coletas e pela concessão de informações valiosas para a realização deste estudo.

Aqueles que me deram força nas horas mais difíceis.

Aos que não impediram a finalização deste estudo.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

**“O universo conhecido por nós é
apenas uma versão beta.”**

PATROCINIO JR, Antonio Carlos. **Avaliação do histórico de sedimentação no lago da usina três bocas pela medida do ^{137}Cs e ^7Be** . 2010. 81 fls. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2010.

RESUMO

A erosão do solo e a sedimentação associada têm sido muito estudada como um dos mais sérios problemas ambientais. A transferência de sedimentos erodidos para ambientes lacustres leva a prejuízos, tais como, assoreamento de rios, lagos, e canais de irrigação. Uma metodologia não convencional que vem se destacando é a utilização de radionuclídeos como traçadores de sedimento para estimar as taxas de redistribuição do solo por erosão ou assoreamento. Dentre estes radionuclídeos o ^{137}Cs , ^{210}Pb não-suportado e ^7Be têm sido usados com sucesso para esta prática. Neste trabalho foi aplicada a técnica de espectrometria gama para fazer um levantamento do perfil de ^{137}Cs e ^7Be presentes em sedimentos de um lago de uma mini-usina hidrelétrica localizada na cidade de Londrina, PR, para avaliar o histórico de deposição e obter informações sobre o processo erosivo na bacia. Foram amostrados quatro pontos ao longo do lago (U1, U2, U3 e U4). Embora não tenha sido possível coletar todo o perfil de sedimentação, observou-se que a distribuição de ^{137}Cs até a profundidade dos sedimentos coletados é similar a distribuição da precipitação pluviométrica anual a partir de 1982. A taxa de sedimentação para alguns pontos pôde ser determinada. Sendo que para os pontos U3 e U4 foi de aproximadamente 1,6 cm/ano. No ponto U2 foi verificado que a sedimentação é menor, sendo aproximadamente de 1,2 cm/ano. A análise feita para ponto U1 revelou que nesta área ocorre uma grande perturbação dos sedimentos presentes, não sendo possível se obter uma taxa recente de sedimentação. A metodologia adotada mostrou-se adequada para os fins propostos. Mais trabalhos futuros se fazem necessários para se obter dados ao longo de todo o reservatório, e obter uma maior representatividade dos processos erosivos e de sedimentação que ocorreram na bacia ao longo do lago desde a sua implementação.

Palavras-chave: Espectrometria gama. ^{137}Cs . ^7Be . Taxas de sedimentação. Lagos.

PATROCINIO JR, Antonio Carlos. **Evaluation of historical sedimentation in the lake of Três Bocas power plant by the measurement of ^{137}Cs and ^7Be** . 2010. 81 fls. Dissertation (Masters in Physics) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.. 2010.

ABSTRACT

Soil erosion and sedimentation have been widely studied as one of the most serious environmental problems. The eroded sediment transported to water bodies leads to losses such as silting of rivers, lakes and irrigation canals. An unconventional approach that has stood out is the use of radionuclides as tracers of sediment to estimate soil redistribution rates by erosion and siltation. The ^{137}Cs , ^{210}Pb unsupported and ^7Be have been used successfully as tracers. In order to evaluate the depositional historic and obtain information about the erosion of a lake of a mini-hydroelectric plant in the Londrina city, PR, the gamma spectrometry technique was applied to survey the profile of ^{137}Cs and ^7Be present in sediments in the lake. Four points were sampled along the lake (U1, U2, U3 and U4). Although it was not possible to collect all the sedimentation profile the distribution of cesium-137 until the depth of sediment collected is similar to the distribution of annual rainfall from 1982. The sedimentation rate for a few points could be determined. The sedimentation rate in the points U3 and U4 was approximately 1.6 cm/year. In the point U2 was found that the sedimentation rate is approximately 1.2 cm/year. The analysis for U1 revealed that in this area there is a great disturbance of these sediments that not allowed obtaining a recent sedimentation rate. The methodology was adequate for its intended purposes. More future studies are needed to take data throughout the reservoir, and improve representatively of erosion and sedimentation that occurred in the basin along the lake since the implementation of this.

Keywords: Gamma spectrometry. Cesium-137. Beryllium-7. Sedimentation rates. Lakes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{210}Po	21
Figura 2 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{40}K	23
Figura 3 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{226}Ra	24
Figura 4 - Radionuclídeos naturais e artificiais conhecidos.....	34
Figura 5 - Deposição de ^{137}Cs nos hemisférios norte e sul no período de 1948 a 1990	38
Figura 6 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{137}Cs	39
Figura 7 - Espalhamento Comptom.....	41
Figura 8 - Região de predominância dos três principais tipos de interação da radiação γ com a matéria	43
Figura 9 - Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama.....	45
Figura 10 -Esboço de três formas de cristais de germânio utilizados em detectores.	47
Figura 11 -Blindagem da Ortec (HPLBS1) e blindagem Camberra (Modelo 747).	48
Figura 12 -Diagrama ilustrando a resolução em energia de um detector (FWHM), em percentual de energia.	49
Figura 13 - Foto tirada por satélite do lago da usina Três Bocas.....	54
Figura 14 -Amostrador de sedimentos	56
Figura 15 -Espectro gama de uma amostra de sedimento obtida com um detector de 66%.	57
Figura 16 -Curva de eficiência para o detector de 66%	59
Figura 17 -Curva de eficiência para o detector de 10%.	60
Figura 18 -Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 66% com a amostra IAEA-314.	61
Figura 19 -Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 10% com a amostra IAEA-314.	62
Figura 20 -Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 66% com a amostra IAEA-444.	63
Figura 21 -Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U1.	65
Figura 22 -Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U2.	65
Figura 23 -Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U3.	65
Figura 24 -Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U4.	66

Figura 25- Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U1 na 1ª (esquerda) e 2ª medida (direita).....	66
Figura 26 -Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U4 na 1ª (esquerda) e 2ª medida (direita).....	67
Figura 27 -Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U1.	68
Figura 28 -Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U2.	68
Figura 29 -Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U3.	69
Figura 30 -Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U4.	69
Figura 31 -Índice pluviométrico de 1960 a 2009 no município de Londrina.....	70
Figura 32 -Índice pluviométrico de 2009 do município de Londrina.	71
Figura 33 -Vista panorâmica do lago.	80
Figura 34- Foto da barragem da mini-usina Três Bocas.	80
Figura 35 - Foto da coleta do ponto U3.	81
Figura 36 -Foto da coleta do ponto U4.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Série de desintegração do Netúnio.	27
Tabela 2 - Série de desintegração do ^{235}U	28
Tabela 3 - Série de desintegração do ^{238}U	29
Tabela 4 - Série de desintegração do ^{232}Th	30
Tabela 5 - Principais radionuclídeos cosmogênicos.	31
Tabela 6 - Principais nuclídeos liberados por testes nucleares e pelo acidente de Chernobyl.	35
Tabela 7 - Eficiências calculadas para os detectores para a energia do ^{137}Cs	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	18
3.1 RADIOATIVIDADE	18
3.2 DECAIMENTO E DESINTEGRAÇÕES NUCLEARES	19
3.2.1. Desintegração Alfa	20
3.2.2. Desintegração Beta	22
3.2.3. Radiação Eletromagnética	24
3.3 RADIONUCLÍDEOS DAS SÉRIES NATURAIS	26
3.4. RADIONUCLÍDEOS DE ORIGEM COSMOGÊNICA	30
3.4.1. ^7Be	32
3.5. RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL	33
3.5.1. Radioisótopos Presentes em Sedimentos de Lago.....	36
3.5.2. ^{210}Pb	36
3.5.3. ^{137}Cs	37
3.6. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	39
3.6.1. Efeito Fotoelétrico	40
3.6.2. Espalhamento Compton.....	41
3.6.3. Produção de Pares.....	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1. ESPECTROMETRIA GAMA	44
4.2. SISTEMA DE DETECÇÃO	45
4.2.1. Detector de HPGe.....	46
4.2.2. Blindagem de Detecção	47
4.3. EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO	48
4.4. RESOLUÇÃO EM ENERGIA	48
4.5. ATIVIDADE E EFICIÊNCIA.....	50
4.6. LIMITE MÍNIMO DE DETECÇÃO E ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL	51
4.7. CALIBRAÇÃO EM ENERGIA	52

4.8. VERIFICAÇÃO DA ACURÁCIA DO DETECTOR.....	52
4.9. SOFTWARE UTILIZADOS	53
4.10. LOCAL DE AMOSTRAGEM.....	53
4.11. COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	54
4.12. AMOSTRADOR	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. ESPECTRO DE UMA AMOSTRA DE SEDIMENTO	57
5.2. CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA OS DETECTORES	58
5.2.1. Eficiência para a Energia do ¹³⁷ Cs.....	58
5.2.2. Eficiência para a Energia do ⁷ Be	59
5.3. ACURÁCIA DOS DETECTORES	61
5.4. ATIVIDADES DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS E LIMITES DE DETECÇÃO	64
5.4.1. Atividade de ¹³⁷ Cs	64
5.4.2. Atividade de ⁷ Be.....	67
5.5. DADOS PLUVIOMÉTRICOS NA REGIÃO DE ESTUDO	70
5.5.1. Índice Pluviométrico de 1960 a 2009	70
5.5.2. Índice pluviométrico de 2009	71
5.6. DISCUSSÕES.....	71
6. CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXO A.....	80

1.INTRODUÇÃO

A erosão do solo e a sedimentação associada têm sido largamente estudada como um dos mais sérios problemas quando se trata do uso sustentável das fontes do planeta (LAL, 2001; PIMENTEL, 1995; CLARK et al., 1985). Degradando os recursos naturais, a erosão causa uma redução na produtividade e na área disponível para a agricultura. Do mesmo modo, a transferência de sedimentos erodidos para rios, bacias, lençóis ou reservatórios leva a prejuízos, tais como, assoreamento de rios, lagos, canais de irrigação, portos e degradação de ambientes hídricos. Além do mais, qualquer aumento na transferência de sedimentos, nutrientes e contaminantes associados para a superfície irá afetar o ciclo geoquímico dos ambientes em questão (ZAPATA, 2003).

Para reverter esse quadro, existe a necessidade de se ter conjuntos de informações confiáveis sobre a mobilização de sedimentos e erosão em escala regional e global, para prover uma melhora na avaliação da magnitude, natureza e outras características significantes do problema. Uma das providencias que pode ser tomada é a identificação, junto com a quantificação dos processos, dos locais chaves onde ocorre a mobilização de sedimentos e armazenamento, tais como as fontes de erosão, caminhos de transferência, e locais de origem dos sedimentos. Sendo assim, métodos que estabeleçam a cronologia dos sedimentos recentes são base central para tais investigações.

Várias técnicas têm sido desenvolvidas para se obter um conjunto de informações sobre taxas de perdas de solo e mobilização de sedimentos em ambientes dominados por processos fluviais. Estas técnicas podem ser classificadas em três grupos. A primeira envolve a utilização da medida de erosão, ou seja, perda de solo por eventos individuais sobre determinados períodos. A segunda constitui-se de medidas de sedimentos suspensos provenientes das bacias ou bases de rios, e com esta técnica pode-se obter uma estimativa da taxa média de erosão em bacias rio acima. A terceira envolve a utilização de radionuclídeos como traçadores de sedimento para estimar as taxas de redistribuição do solo por erosão ou assoreamento. ^{137}Cs , ^{210}Pb não-suportado e ^7Be têm sido usados com sucesso para esta pratica (ZHANG; WALLING, 2005). O potencial para a utilização de radionuclídeos como traçadores de sedimentos, tanto como uma alternativa às técnicas tradicionais de acompanhamento, ou como uma técnica complementar a essas, tem sido cada vez mais reconhecido e valorizado.

A base para usar o ^{137}Cs na cronologia de sedimentos é que este radionuclídeo é rápido e fortemente adsorvido às partículas finas de solo e que sua

distribuição no perfil de sedimento reflete diretamente a cronologia da deposição dos sedimentos. Assumindo que a migração pós-deposição é insignificante, a primeira identificação desse radionuclídeo no perfil de sedimento pode ser datado ao início da década de 1950 e a distribuição vertical de ^{137}Cs no perfil de sedimento pode ser relatado aos registros conhecidos de “fallout” para os períodos subseqüentes (PAYNE, 1985). O pico de “fallout” que ocorreu em 1964 tem sido frequentemente utilizado para datar sedimentos depositados nesse período. As variações encontradas nos perfis de ^{137}Cs nos sedimentos podem ser explicadas tomando em conta a mobilidade pós-deposicional do ^{137}Cs resultante de bioturbação, difusão molecular e ressuspensão dos sedimentos que são novamente depositados e a influência das entradas de sedimentos de solos rotulados com ^{137}Cs devido aos processos de erosão na bacia.

Outro radionuclídeo que tem sido investigado e apresenta boas perspectivas de aplicação no estudo da erosão laminar do solo é o ^7Be . O ^7Be é um radionuclídeo cosmogênico produzido pela espalação com raios cósmicos de átomos de nitrogênio e oxigênio na atmosfera superior, tem meia vida curta (53,3 dias) e energia gama de 478 keV, e é depositado na superfície terrestre por precipitação úmida ou seca. Quando o ^7Be alcança a superfície do solo, é rápido e fortemente fixado pelo solo da superfície (WALLBRINK; MURRAY, 1996). O uso potencial do ^7Be é na determinação de taxas de erosão ou deposição de solo geradas em curto prazo ou devido a um único evento de chuva, além de possibilitar o acompanhamento da redistribuição espacial do solo, que já tem sido comprovado (MARESTONI, 2007). Isso é possível devido à meia vida curta do ^7Be , que oferece um meio de identificar sedimentos que tenham estado em contato recente com o seu “fallout”. Entretanto, poucos estudos têm sido realizados utilizando o ^7Be como marcador de sedimentos em lagos provenientes de deposições recentes (ocorridas dentro de 1 ano) (BAI et al., 2002).

Como reconhecimento da importância da aplicação de radionuclídeos na agricultura, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) estabeleceu em 1996 um Programa Coordenado de Pesquisa integrado por pesquisadores de vários países, cujos relatórios técnicos publicados contêm informações sobre a metodologia do ^{137}Cs no estudo da erosão laminar que gerou um protocolo de utilização da metodologia, porém os dados utilizados não representam a realidade no Brasil (ZAPATA; GARCIA-AGUDO, 2000). Além disso, a IAEA ainda mantém atualizado todo o estafe da metodologia, sendo que em 2010 será lançado um novo handbook sobre os avanços dessas metodologias.

O objetivo deste trabalho é utilizar o perfil de ^{137}Cs e ^7Be em sedimentos de lago para avaliar o histórico de deposição e obter informações sobre o processo erosivo na bacia estudada. Para isso, serão avaliados os sedimentos de um lago de uma mini-usina hidrelétrica construída na década de 1940 na cidade de Londrina, norte do Paraná. Uma das principais motivações para a realização desta pesquisa é a falta de dados e *know how* sobre este tema, uma vez que existe muito pouco material relacionado ao assunto em questão na América Latina, principalmente em se tratando de lagos e bacias de água doce.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Um dos primeiros pesquisadores a utilizar o ^{137}Cs depositado por fallout para datar eventos de sedimentação em lagos foi Ritchie et al (1973), no início da década de 70. Eles analisaram amostras de quatro reservatórios situados na América do Norte, sendo que uma delas era proveniente de um lago do México. Dois períodos distintos de erosão e sedimentação (1959-1960 e 1963-1964) foram associados a períodos máximos de fallout.

Zapata F. (2003) discute sobre a urgente necessidade de se obter dados quantitativos confiáveis a nível mundial sobre a extensão e as taxas de erosão e de sedimentação em solo, bacias hidrográficas e ambientes lacustres, para fornecer uma avaliação mais abrangente da magnitude dos problemas e para apoiar a seleção de medidas eficazes de conservação destes ambientes. Para isso o autor relata a importância de se desenvolver técnicas eficazes para a obtenção destes dados, tais como o método do ^{137}Cs , ^7Be e ^{210}Pb não suportado.

Arnaud F. et al (2006) fizeram um estudo da cronologia de sedimentação e taxas de deposição/ano em lagos localizados na região do Chilean Lake District, região essa situada em um local com alta atividade geodinâmica. Os autores analisaram a concentração de ^{137}Cs por profundidade e compararam com dados estratigráficos e com dados da distribuição de ^{210}Pb não suportado, os resultados mostraram uma boa concordância, podendo assim se fazer uma boa cronologia de sedimentação com estes métodos.

Xiang L. et al (2002) utilizou as técnicas do ^{137}Cs e ^{210}Pb não suportado combinadas, para quantificar a sedimentação e seu papel na diminuição de armazenamento da bacia do Rio Yangtze. Para isso foram coletadas dezesseis amostras de oito lagos pertencentes à bacia do Rio Yangtze (incluindo rios Poyanghu e Dongtinghu). As análises indicaram altas taxas de sedimentação no Rio Dongtinghu, resultados coerentes, uma vez que há uma severa redução na sua capacidade de armazenamento. Para os lagos restantes as taxas foram menores e não refletem a erosão rio acima ou uma perda substancial na capacidade de armazenamento.

Putyrskaya V. et al (2007), estudou o comportamento do ^{137}Cs , desenvolvendo um modelo simulando sua entrada na superfície e a sua distribuição dentro do sedimento. O modelo consiste em equações de difusão-sedimentação. Este modelo pode abranger o período de tempo a partir do teste de armas nucleares até o tempo presente. Leva em conta a fixação e redissolução do radionuclídeo no ambiente, compactação de sedimentos, e outras características importantes. O resultado do modelo é comparado com medidas de água e sedimentos, feitas no Lago Maggiore (Itália). Os resultados mostram que o modelo

funciona bastante bem, e pode ser utilizado como uma ferramenta para se obter informações sobre o processo de sedimentação em lagos.

Yan P. et al (2002) estudaram o perfil vertical de ^{137}Cs em amostras de sedimentos lacustres provenientes do lago Dalian (China). Com um gráfico de atividade (^{137}Cs) *versus* profundidade deste perfil, foram identificados três picos e um mínimo, onde: o pico principal (máximo) corresponde ao fallout ocorrido em 1963, os outros dois picos secundários correspondem ao vazamento do reator de Chernobyl em 1986 e uma seca completa do lago ocorrida em 1994. O mínimo corresponde à deposição eólica causadas por ampla dragagem realizada na década de 1980 e início de 1990. A datação com ^{137}Cs foi dividida em três períodos: dois com a deposição lenta (1963-1986 e 1994-1998), e um com uma deposição rápida (1986 - 1994).

Crickmore M. J et al (1990), fizeram uma publicação técnica com o objetivo de revisar três técnicas nucleares que têm contribuído no entendimento de processos sedimentares. Primeiro, a utilização de transmissão e espalhamento de raios gama para se medir variações granulométricas de sedimentos suspensos em cursos d'água, e mapear os sedimentos ao longo de rios. A outra técnica acompanha o papel que radioisótopos podem ter como traçadores para mostrar o comportamento e/ou desenvolvimento de argilas, areias e pedregulhos. Por ultimo, as contribuições que os métodos de datação, utilizando radionuclídeos naturais e artificiais, podem fazer estabelecendo uma escala de tempo de sedimentação, tanto recentes quanto de algumas décadas atrás. Os autores mostram também nesta publicação comparações entre vantagens e desvantagens das técnicas nucleares com metodologias conhecidas a fim de se conseguir uma orientação na seleção da técnica mais apropriada para um caso particular. Por fim, diversos casos estudados são apresentados para ilustrar os objetivos e decisões de se aplicar a metodologia nuclear mais apropriada para um problema específico.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 RADIOATIVIDADE

A radioatividade é um processo natural decorrente da liberação de energia, através da emissão de partículas ou radiação gama, de um núcleo atômico cuja relação entre o número de prótons e de nêutrons resulta em uma configuração instável; o processo modifica a relação próton/nêutrons do núcleo e leva a configurações estáveis (não radioativas).

O ambiente no qual vivemos é naturalmente radioativo.

A história da radioatividade começa com a descoberta dos raios-X por William Röntgen em 1895. O físico francês Henri Becquerel, associando a existência desses raios, até então desconhecidos, aos materiais fosforescentes e fluorescentes, testou uma série de substâncias com essas características e, em 1896, verificou que sais de urânio emitiam radiações capazes de velar chapas fotográficas, mesmo quando envoltas em papel preto. Observou ainda, que a quantidade de radiação emitida era proporcional à concentração de urânio e era independente das condições de pressão, temperatura ou estado químico da amostra, além de permanecer inalterada mesmo sob a ação de campos elétricos ou magnéticos.

Posteriormente, o casal Pierre e Marie Curie aprofundou estas pesquisas chegando, em 1898, à descoberta de dois novos elementos radioativos, o polônio e o rádio, tendo eles empregado pela primeira vez o termo radioatividade para descrever a energia emitida por esses elementos.

Ernest Rutherford, em 1899, por meio de uma experiência simples contribuiu para elucidar a natureza da radioatividade. Uma amostra de material radioativo foi colocada dentro de um recipiente de chumbo contendo um orifício. A radiação produzia um ponto brilhante em uma placa de sulfeto de zinco, colocada diante do orifício. Sob a ação de um campo magnético, o feixe de radiação dividia-se em dois, que foram denominadas radiação alfa (α) e beta (β).

Em 1900, Paul Villard, na França, descobriu uma forma de radioatividade que não apresenta carga elétrica. Villard constatou que um feixe de radiação proveniente de um recipiente contendo sais de rádio continha três tipos de radiação, e não somente duas como Rutherford havia descoberto. As já conhecidas partículas alfa (α) e beta (β), e um terceiro tipo de radiação que era muito penetrante e desconhecida até então. Paul Villard era um homem modesto e não nomeou o terceiro tipo de radiação. Porém, Ernest Rutherford que

já tinha caracterizado radiação de alfa (α) e beta (β) baseando-se no poder de frenamento dessas partículas em 1899, concordou plenamente com a radiação descoberta por Villard nomeando-a de radiação gama (γ), em 1903. Foi observado que a radiação gama (γ) não era desviada de sua trajetória sob a ação do campo magnético e apresentava as mesmas características dos raios-X, ou seja, uma onda eletromagnética, porém de alta energia.

Em 1909, Rutherford e Soddy demonstraram que a radiação α era constituída por núcleos de hélio, com dois prótons e dois nêutrons, apresentando, portanto, duas cargas positivas. A radiação β foi, posteriormente, identificada como sendo constituída por elétrons. Tanto as partículas α como as partículas β eram emitidas com altas velocidades, demonstrando que uma grande quantidade de energia estava armazenada no núcleo do átomo.

Esses trabalhos de pesquisa científica permitiram concluir que a radioatividade é a transformação espontânea de um núcleo atômico em outro.

A natureza das radiações emitidas é característica das propriedades nucleares do nuclídeo que está se desintegrando, denominado nuclídeo pai, que dá origem ao nuclídeo filho ao se desintegrar (Nuclídeo – espécie de núcleo caracterizado pelo número atômico (Z) e pelo número de massa (A)). Em alguns casos, o nuclídeo filho também é radiativo, formando, assim, uma cadeia radioativa.

3.2 DECAIMENTO E DESINTEGRAÇÕES NUCLEARES

A estabilidade de um núcleo é garantida pelo equilíbrio entre as forças nucleares e de repulsão eletrostática. Quando há um desequilíbrio entre estas forças, ocorre a instabilidade do núcleo. Nesta situação, o núcleo que se encontra num estado instável procura atingir o estado de maior estabilidade emitindo partículas ou radiações eletromagnéticas. O modo de decaimento depende do tipo de instabilidade nuclear, definida pela relação entre o número de nêutrons e o número de prótons. No fenômeno de desintegração radioativa os núcleos produtos podem ser formados no estado instável ou estável. Se os produtos são instáveis, então estes decairão produzindo outro núcleo que pode também ser radioativo e assim sucessivamente. Este processo pode continuar ao longo de vários estágios até que se forme um núcleo estável.

Estas transformações, chamadas também de decaimento radioativo, podem ocorrer por mecanismos diferentes, como emissão de partículas α e emissão de partículas *beta mais* (β^+), *beta menos* (β^-) e *captura eletrônica* (EC), podendo ou não acompanhar emissão de radiação γ . O modo com que cada decaimento ocorre, depende basicamente, da

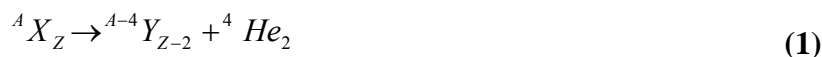
instabilidade nuclear do nuclídeo em questão. Esta instabilidade é determinada pela razão próton-nêutron, e o núcleo poderá emitir radiação para se aproximar desta estabilidade. O nuclídeo emissor de radiação, ou seja, um núcleo radioativo é denominado de radionuclídeo.

A taxa de decaimento de um radionuclídeo define sua atividade, que é geralmente expressa em duas unidades: *Curie (Ci)* ou *Becquerel (Bq)*. O Curie é definido como uma estimativa da atividade de 1g de ^{226}Ra e, por razões históricas, ainda é utilizado sendo definido como $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo. O Becquerel é a unidade usada no Sistema Internacional (SI), definida como uma desintegração por segundo.

3.2.1. Desintegração Alfa

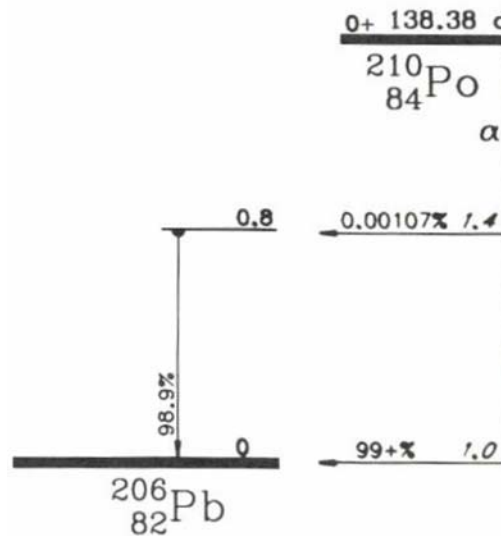
Um núcleo radioativo com um grande número de prótons e nêutrons, ou seja, valor de massa atômica elevado, pode emitir a chamada partícula α para que seja diminuída a sua energia interna. A partícula α é, na verdade, um núcleo de hélio (“ ^4He ”, composto por dois prótons e dois nêutrons ligados entre si), com alguma energia cinética.

Não existem isótopos estáveis para elementos químicos com número atômico (Z) maior que 83, sendo que a maior parte destes núcleos decaem por emissão α . Na emissão de uma partícula α , um dado núcleo (Z, A) radioativo transmuta para outro elemento ($Z-2, A-4$) dois números atômicos abaixo na tabela periódica. O esquema do decaimento alfa é dado por:



Como exemplo de decaimento α , temos o caso do ^{210}Po que faz parte da série radioativa do ^{238}U e é apresentado na **Figura 1**.

Figura 1- Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{210}Po



Fonte: Adaptado de Firestone (1999).

Aqui o ^{210}Po decai por α para o estado fundamental do ^{206}Pb com 99% de probabilidade de emissão e com 0,001% de probabilidade de decair, também por α , para o primeiro estado excitado do ^{206}Pb . Por serem muito massivas, as partículas α perdem energia cinética através de sucessivas colisões (inelásticas ou diretas) com os átomos e moléculas do meio. Como a partícula α é o *núcleo* do átomo de hélio emitido (isto é, sem os elétrons), portanto, ela é portadora de duas cargas positivas. Devido a essa carga elétrica dupla, a perturbação eletromagnética de uma partícula α em movimento é maior do que a de um elétron de alta energia no meio.

A perda de energia através de colisões com os átomos do meio é também maior, uma vez que a massa da partícula α dá a ela uma menor velocidade (quando comparada com um elétron de mesma energia) e uma grande inércia (portanto, uma maior tendência de manter essa velocidade). Por esses motivos, em comparação com um elétron de alta energia, o poder de ionização das partículas α é muito maior.

Devido a essa maior taxa de perda de energia por unidade de comprimento, o poder de penetração das partículas α é muito pequeno (poucos centímetros no ar, e alguns décimos de milímetros em tecido humano). Ao final da sua trajetória de ionizações, a partícula α terá agregado a si dois elétrons, e um átomo de hélio (em estado gasoso) resultará do processo.

3.2.2.Desintegração Beta

Partículas β são partículas carregadas emitidas pelo núcleo, com a mesma carga em módulo e massa do elétron. A desintegração β tanto pode ser β^- (emissão de elétrons, quando o núcleo está com excesso de nêutron em relação ao número de prótons) como β^+ (emissão de pósitrons, quando o núcleo está com excesso de prótons em relação ao número de nêutrons). Quando o núcleo possui um nêutron em excesso, este é convertido em um próton e uma partícula β^- .



Aqui, $\bar{\nu}$ representa o antineutrino, partícula sem carga, com massa de repouso extremamente pequena e que se desloca à velocidade da luz.

A partícula beta β^- possui as mesmas características dos elétrons atômicos, porém tem origem no núcleo. A emissão de partícula β^- é diferente das emissões α , uma vez que as partículas β^- são emitidas em um espectro contínuo de energia, variando de zero até um valor máximo, característico do núcleo pai. Esta energia máxima está na faixa de 0,05 a 3,5 MeV, para os radionuclídeos mais comuns. Como o núcleo possui níveis de energias discretos, a emissão de uma partícula com espectro contínuo de energia é explicada pela emissão de uma segunda partícula, neste caso o antineutrino. O antineutrino transporta a diferença de energia existente entre a energia da partícula β^- e a energia disponível, dada pela diferença de massa entre o núcleo pai e os produtos da desintegração (Q).

Quando o núcleo possui um próton em excesso, este é convertido em um nêutron e uma partícula β^+ (pósitron).



O pósitron possui a mesma massa do elétron e sua carga tem valor absoluto igual à do elétron, porém com sinal positivo. De maneira análoga às partículas β^- as partículas β^+ são emitidas em um espectro contínuo de energia. Neste caso, a energia máxima está na faixa de 0,3 a 1,4 MeV, para os núclídeos mais comuns.

Ainda no caso dos radionuclídeos com excesso de prótons há um outro tipo de processo que compete com a emissão β^+ : a captura eletrônica. Este processo consiste na

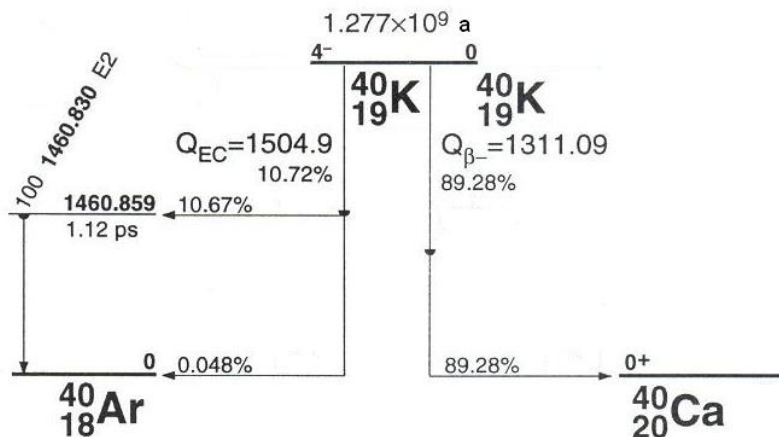
captura de um elétron orbital pelo núcleo que se junta a um próton para originar um nêutron. A expressão para esse tipo de decaimento é:



Logo que ocorreu a captura eletrônica, um raio X característico é emitido quando elétrons das outras camadas preenchem a lacuna deixada na que estava ocupada pelo elétron capturado. Além disso, o núcleo formado pode se encontrar em um estado excitado, necessitando emitir raios γ para atingir o estado fundamental.

Um exemplo de desintegração nuclear que envolve estes três tipos de decaimentos acima citados, é o ${}^{40}\text{K}$ que pode decair por β^- , β^+ ou captura eletrônica, como apresentado na **Figura 2**.

Figura 2 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ${}^{40}\text{K}$



Fonte: Adaptado de Firestone (1999).

Através da emissão β^- o núcleo decai para o estado fundamental do ${}^{40}\text{Ca}$, por emissão β^+ e da captura eletrônica, o núcleo pode decair para o estado excitado do ${}^{40}\text{Ar}$ de energia 1,46 MeV realizando uma transição para o estado fundamental pela emissão de um raio γ , cuja energia é de 1,46 MeV, muito utilizado para identificar o ${}^{40}\text{K}$ através de espectrometria de raios gama. A transição pode ocorrer para o estado fundamental do ${}^{40}\text{Ar}$ diretamente, mas com uma menor probabilidade.

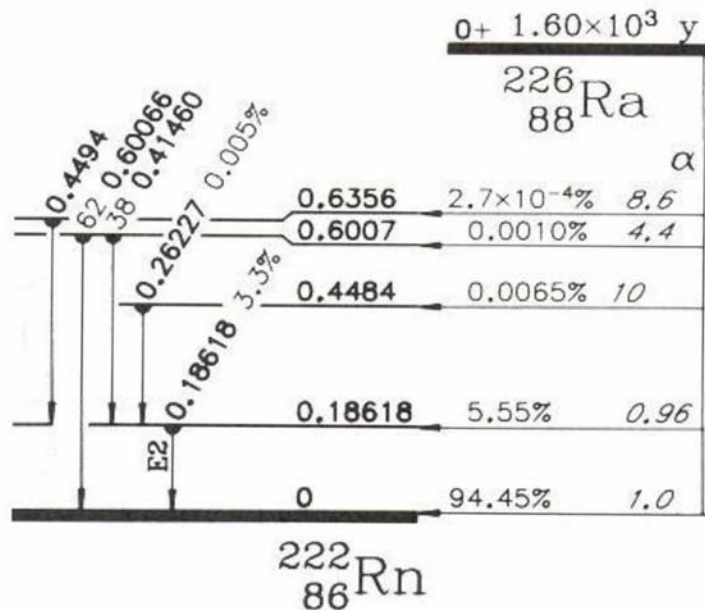
3.2.3.Radiação Eletromagnética

Quando núcleos atômicos se encontram em um determinado estado excitado, eles podem decair para estados menos excitados por emissão espontânea de radiação eletromagnética, cuja energia pertence à parte do espectro eletromagnético denominado radiação gama. A desexcitação nuclear consiste na emissão de radiação gama, da mesma forma que a desexcitação atômica resulta na emissão de fótons de diferentes comprimentos de onda. A diferença entre os tipos de radiação, gama e fótons atômicos (raio-X), é o local onde são originados, sendo que a radiação gama tem origem no núcleo, e raios-X são originados da eletrosfera.

Na emissão de um raio γ o núcleo não transmuta. Nestes eventos, o processo é dito “isomérico”, onde o número de prótons e nêutrons não muda. A energia do estado excitado é apenas transferida para fora do núcleo dito “meta-estável” que, após a emissão, se ajusta em um estado de menor energia.

Não existem emissores γ “puros” na natureza, sendo o estado meta-estável sempre produto de um decaimento radioativo anterior, ocorrido através da emissão de partículas α ou β . Em geral, a emissão de raios gama ocorre após a emissão das partículas α ou β . O ^{226}Ra , por exemplo, decai conforme o esquema da **Figura 3**.

Figura 3 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{226}Ra



Fonte: Adaptado de FIRESTONE, 1999).

No esquema, o ^{226}Ra decai por α seguido da emissão de um raio gama. Neste caso, o raio gama pode assumir vários valores de energia, dentre as mais prováveis estão as de 186 e 262 keV, com probabilidade de emissão de 3,3% e 0,5% respectivamente. As emissões de partículas alfa ou beta podem ser acompanhadas pela emissão de raios gama do núcleo, que pode ocorrer com a emissão de um ou mais fótons. A energia dos raios gama nessas emissões, geralmente é bem definida, e serve como “assinatura” do tipo de decaimento radioativo que ocorreu na amostra.

Os raios gama são bastante penetrantes e nesses casos, uma vez que não haja alguma interação com a matéria, não ocorrerá a ionização do meio e não poderá ser associado nenhum efeito em particular.

A energia dos raios X e dos raios γ são expressa em múltiplos de elétrons-volt (eV), normalmente keV ou MeV. Um eV é equivalente à energia necessária para acelerar uma partícula carregada de uma unidade de carga elétrica numa diferença de potencial de 1 volt.

3.3 RADIONUCLÍDEOS DAS SÉRIES NATURAIS

O ^1H é o elemento cósmico de maior quantidade no universo. A partir dele os demais elementos são sintetizados nas estrelas gerando o ^2He , e em sequência outros elementos de maior número atômico são fundidos nas estrelas até o elemento ^{56}Fe .

No fim do ciclo da “vida” de uma estrela, processo de aproximadamente dez bilhões de anos, as estrelas entram em colapso e, nesse estágio, lança no espaço matéria fundida com elementos de número atômico superior ao do ferro. A matéria presente na Terra e nos demais planetas do sistema solar provém do colapso de uma estrela que precedeu o sol há aproximadamente cinco bilhões de anos. Assim, no material produzido na grande explosão estelar aparecem muitos radioisótopos, sendo que na terra existem muitos desses radioisótopos, por exemplo o ^{40}K , o ^{87}Rb , o ^{115}In e os radioisótopos das famílias do ^{232}Th e do ^{238}U .

Na sua formação, a maioria dos núcleos dos elementos é estável. Dos elementos instáveis, a maior parte decai em um pequeno intervalo de tempo e se tornam estáveis por possuir uma meia vida pequena. No entanto, existem radionuclídeos, tais como ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K , que possuem meia vida muito longa, da ordem da idade da Terra, e podem ser encontrados juntamente com seus filhos de desintegração, até os dias atuais. A radiação gama proveniente destes radionuclídeos naturais e os radionuclídeos de origem cosmogênica representam a principal fonte terrestre de irradiação externa para a maioria dos seres humanos.

Dos isótopos naturais radioativos, somente o potássio e as séries do urânio e tório têm radioisótopos que produzem raios gama de energia e intensidade suficientes para serem medidas por um espectrômetro de raios gama. Estes últimos podem ser caracterizados em termos de quatro séries ou cadeias de desintegração. Cada série pode ser definida em termos da divisão dos números de massa dos seus constituintes individuais por 4, ou seja:

$$A = 4n + m, \quad (5)$$

onde A é o número de massa, n é o maior inteiro da divisão de A por quatro e m é o resto da divisão. Portanto, existem quatro possíveis séries: $4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n+3$. A desintegração radioativa dos núcleos pesados ocorre predominantemente por emissão alfa, o que resulta na redução do número de massa de quatro unidades, ou por emissão beta, que não afeta o número de massa.

Três séries são ainda encontradas na natureza, $4n$ (série do ^{232}Th), $4n+2$ (^{238}U) e $4n+3$ (^{235}U). A série $4n+1$, denominada série do Netúnio, não é mais encontrada na natureza devido a todos os membros desta série possuírem meias vidas no mínimo três ordens de grandeza menores do que a idade da Terra. A série do Netúnio está mostrada na tabela 1.

Tabela 1 - Série de desintegração do Netúnio.

<i>Radioisótopo</i>	<i>Meia vida</i>
^{241}Pu	14,4 anos
↓	
^{241}Am	433 anos
↓	
^{237}Np	$2,14 \times 10^6$ anos
↓	
^{233}Pa	27,0 dias
↓	
^{233}U	$1,59 \times 10^5$ anos
↓	
^{229}Th	$7,3 \times 10^3$ anos
↓	
^{225}Ra	14,8 dias
↓	
^{225}Ac	10,0 dias
↓	
^{221}Fr	4,8 minutos
↓	
^{217}At	32,3 milisegundos
↓	
^{213}Bi	45,6 minutos
↙ ↘	
^{213}Po ^{209}Tl	4 microsegundos 2,2 minutos
↘ ↙	
^{209}Pb	3,25 horas
↓	
^{209}Bi	$<2 \times 10^{18}$ anos

Fonte: Kathren (1998).

O urânio ocorre naturalmente com os radioisótopos ^{238}U e ^{235}U que terminam a série de desintegração com os isótopos estáveis ^{206}Pb e ^{207}Pb , respectivamente. Caso não exista nenhum processo físico ou químico que perturbe o sistema, o urânio deve apresentar-se em equilíbrio secular com seus filhos. No entanto, sabe-se que tal fato ocorre somente em pontos isolados da série. As séries de desintegração do urânio (^{238}U e ^{235}U) são mostradas na tabela 2 e na tabela 3.

Tabela 2 - Série de desintegração do ^{235}U .

<i>Radioisótopo</i>	<i>Meia Vida</i>
^{235}U	$7,038 \times 10^8$ anos
^{231}Th	25,5 horas
^{231}Pa	$3,25 \times 10^4$ anos
^{227}Ac	21,6 anos
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ^{227}Th 98.6% </div> <div style="text-align: center;"> ^{223}Fr 1.4% </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">18,2 dias</div> <div style="text-align: center;">22 minutos</div> </div>
^{223}Ra	11,43 dias
^{219}Rn	4 segundos
^{215}Po	1,78 milisegundos
^{211}Pb	36,1 minutos
^{211}Bi	2,15 minutos
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ^{211}Po 0.28% </div> <div style="text-align: center;"> ^{207}Tl 99.7% </div> </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">0,52 segundos</div> <div style="text-align: center;">4,79 minutos</div> </div>
^{207}Pb	Estável

Fonte: IAEA (2003).

Tabela 3 - Série de desintegração do ^{238}U .

<i>Radioisótopo</i>	<i>Meia Vida</i>
^{238}U	$4,468 \times 10^9$ anos
^{234}Th	24,1 dias
^{234}Pa	1,17 minutos
^{234}Pa 99,8% \swarrow ^{234}U 0,13% \searrow ^{234}Pa	$2,48 \times 10^5$ anos 6,7 horas
^{230}Th	$7,52 \times 10^4$ anos
^{226}Ra	1602 anos
^{222}Rn	3,823 dias
^{218}Po	3,05 minutos
^{218}Po 99,98% \swarrow ^{214}Pb 0,02% \searrow ^{218}At	26,8 minutos 2 segundos
^{214}Bi	19,7 minutos
^{214}Bi 99,98% \swarrow ^{214}Po 0,02% \searrow ^{210}Tl	164 microsegundos 1,3 minutos
^{210}Pb	21 anos
^{210}Bi	5,01 dias
^{210}Po	138,4 dias
^{206}Pb	Estável

Fonte: IAEA (2003)

O tório ocorre naturalmente com o radioisótopo ^{232}Th que tem como produto final da série o radionuclídeo estável ^{208}Pb . A série do ^{232}Th é mostrada na tabela 4.

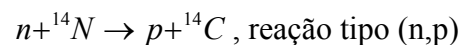
Tabela 4 - Série de desintegração do ^{232}Th .

<i>Radioisótopo</i>	<i>Meia Vida</i>
^{232}Th	$1,405 \times 10^{10}$ anos
\downarrow	
^{228}Ra	6,7 anos
\downarrow	
^{228}Ac	6,13 horas
\downarrow	
^{228}Th	1,91 anos
\downarrow	
^{224}Ra	3,64 dias
\downarrow	
^{220}Rn	55 segundos
\downarrow	
^{216}Po	0,15 segundos
\downarrow	
^{212}Pb	10,64 horas
\downarrow	
^{212}Bi	60,6 minutos
\swarrow 64,06%	
^{212}Po	304 nanosegundos
\searrow 35,94%	
^{208}Tl	3,1 minutos
\swarrow \searrow	
^{208}Pb	Estável

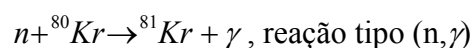
Fonte: IAEA (2003).

3.4. RADIONUCLÍDEOS DE ORIGEM COSMOGÊNICA

Vários radionuclídeos são produzidos pela interação dos raios cósmicos com o ar, em grande parte por espalação e captura de nêutron. Reações de espalação são interações de alta energia, tipicamente ao redor de 50 MeV. No entanto, para algumas reações essa energia pode chegar a 100 MeV. Reações com nêutrons térmicos são envolvidos na produção de dois importantes radionuclídeos, ^{14}C pela reação (nêutron, próton) em ^{14}N , e ^{81}Kr pela reação (nêutron, gama) em ^{80}Kr .



(6)



Radionuclídeos cosmogênicos são tipicamente leves, elementos de baixo número atômico com meias vidas variando de minutos a 2,5 milhões de anos. Na tabela 5 estão representados os principais radionuclídeos cosmogênicos.

A concentração desses radionuclídeos varia com a altitude e latitude, sendo significativamente maior a grandes altitudes. A radioatividade cosmogênica de meia vida maior, produzida na estratosfera, é transferida para a troposfera e, conseqüentemente, para a superfície terrestre por fixação gravitacional e processos de precipitação. Já os radionuclídeos cosmogênicos com meia vida mais curta, geralmente, decaem antes mesmo de chegarem à troposfera.

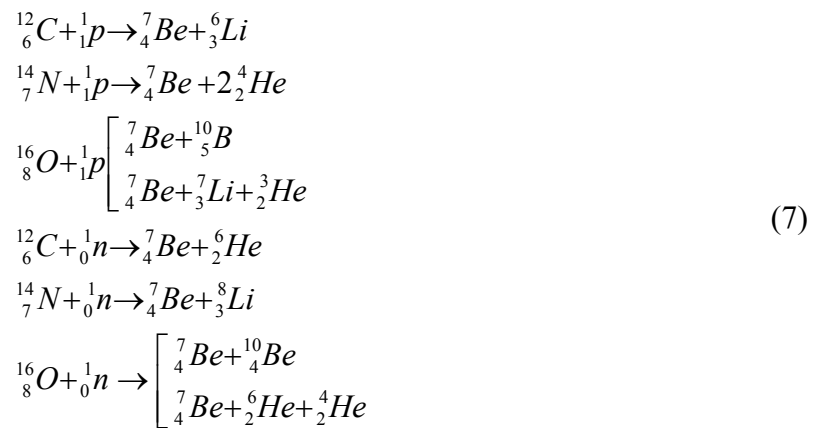
Tabela 5 - Principais radionuclídeos cosmogênicos.

<i>Nuclídeo</i>	<i>Meia vida</i>
^3H	12,26 anos
^7Be	53 dias
^{10}Be	$2,5 \times 10^6$ anos
^{14}C	5760 anos
^{22}Na	2,6 anos
^{26}Al	740000 anos
^{32}Si	280 anos
^{32}P	14,3 dias
^{33}P	24,4 dias
^{35}S	87,9 dias
^{36}Cl	380.000 anos
^{39}Ar	270 anos
^{81}Kr	210.000 anos

Fonte: Kathren (1998).

3.4.1. ${}^7\text{Be}$

O ${}^7\text{Be}$ tem meia vida de 53,3 dias, ocorre na troposfera superior e na estratosfera inferior e é produzido naturalmente por reação de espalação de raios cósmicos galácticos e partículas energéticas solares com átomos de nitrogênio, oxigênio e carbono (YOSHIMORI et al., 2003 *apud* MARESTONI, 2007). No processo de espalação, o núcleo alvo absorve prótons ou nêutrons dos raios cósmicos primários. A produção de ${}^7\text{Be}$ é representada pelas seguintes reações (PAPASTEFANOU, 1995 *apud* MARESTONI, 2007):



Na atmosfera terrestre, dois terços do ${}^7\text{Be}$ é formado na estratosfera e somente um terço na troposfera, sendo que seu tempo de residência na estratosfera é da ordem de alguns poucos anos e na troposfera, de poucos dias a semanas. Como a meia vida do ${}^7\text{Be}$ é curta quando comparada ao seu tempo de residência na estratosfera, e grande quando comparada ao tempo de residência na troposfera, a maior parte do ${}^7\text{Be}$ depositado é proveniente da troposfera.

O nível de concentração do ${}^7\text{Be}$ é influenciado principalmente pelos seguintes processos atmosféricos: deposição seca e úmida, troca de massa entre a estratosfera e troposfera, transporte vertical na troposfera e transporte horizontal dos subtropicais e latitudes médias para os trópicos e regiões polares (TALPOS, 1997 *apud* MARESTONI, 2007). A troca de massa entre a estratosfera e troposfera pode aumentar a concentração de ${}^7\text{Be}$ na troposfera e do ar que fica perto desta superfície. A troca máxima de massa entre a troposfera e estratosfera geralmente ocorre na primavera ou verão em médias latitudes (MARESTONI, 2007).

O ${}^7\text{Be}$ é um núcleo radioativo leve que decai para o ${}^7\text{Li}$, com meia vida de 53,3 dias, e que pode ser detectado por espectrometria gama através do raio gama de 477,8

keV emitido. Este radionuclídeo tem sido reconhecido como uma ferramenta útil no estudo e descrição dos processos ambientais, tais como: trânsito e tempo de residência de aerossóis na troposfera, velocidade de deposição dos aerossóis pela vegetação acima do solo, trânsito e tempo de residência de sedimentos em rios, avaliação de processos erosivos superficiais, sendo que nestes últimos dois casos, a meia vida curta do ^7Be oferece um meio de identificar sedimentos recém depositados.

O principal processo de *fallout* do ^7Be é a precipitação, 95% do total através dos processos de *washout* e *rainout* (TAKEUSHI; TAKASE, 1982). *Rainout* é o processo que ocorre dentro das nuvens. A gota de chuva é formada ao redor do particulado e juntos são removidos da nuvem após a precipitação. O *washout* ocorre abaixo da camada da nuvem. Durante a descida, a água da chuva entra em contato com o particulado levando-os para a superfície da terra.

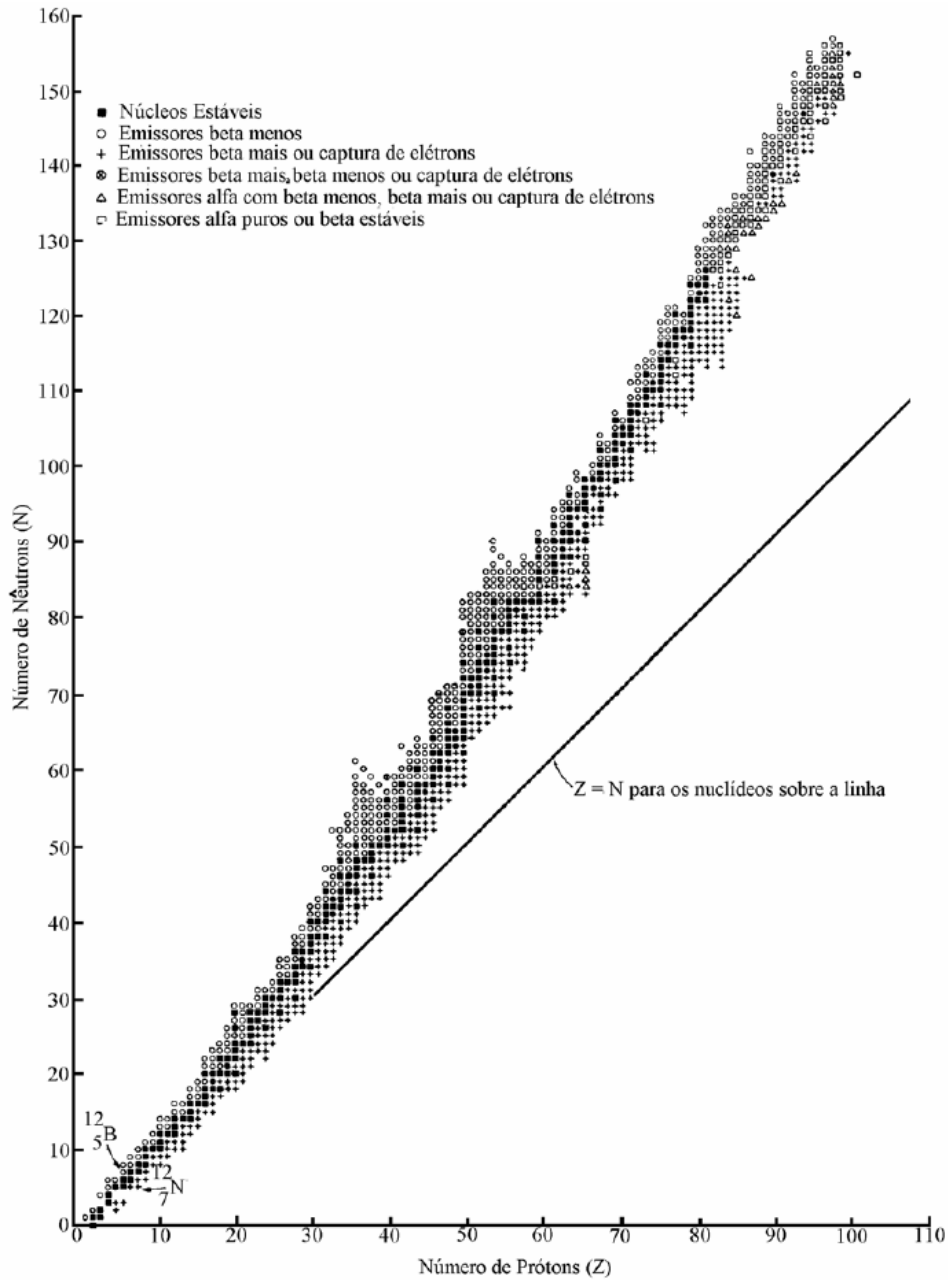
3.5.RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL

Em 1934, enquanto estudavam algumas características de elementos leves, o casal Frédéric Joliot e Irène Curie (filha de Pierre e Marie Curie), constatou que alguns núcleos atômicos, bombardeados com determinados tipos de radiações de partículas, tinham sua estrutura interna alterada e passavam a apresentar propriedades radioativas. Os procedimentos de transmutação artificial dos elementos químicos resultaram na obtenção de isótopos artificiais e radioativos da maioria dos átomos conhecidos e na descoberta de numerosos átomos novos, como os transurânicos (netúnio, plutônio, amerício e etc.).

Posteriormente à descoberta da radioatividade artificial, descobriu-se que reações nucleares induzidas por prótons, dêuterons, nêutrons e fótons também podem resultar em produtos radioativos, e do mesmo modo que os radionuclídeos naturais, um radionuclídeo artificial pode ser caracterizado por sua meia vida e pela radiação que ele emite.

A distribuição dos nuclídeos conhecidos pode ser mostrada por meio de um gráfico em que o número de nêutrons é lançado contra o número de prótons, o qual é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Radionuclídeos naturais e artificiais conhecidos



Fonte: Adaptado de Kaplan (1963)

Os núclídeos estáveis são indicados por quadrados escuros. Emissores alfa são indicados por triângulos abertos e quadrados; estes últimos são β -estáveis, enquanto que os primeiros também podem sofrer decaimento β . Emissores de elétrons são indicados com círculos abertos e emissores de pósitrons são indicados por cruze. Uma cruz num círculo aberto indica que o núclídeo decai por emissão β^- , emissão β^+ e captura de elétrons. As

linhas diagonais são linhas de número de massa constante, A , com $A=Z+N$; núclídeos que caem na mesma linha diagonal são chamados *isóbaros* porque tem o mesmo número de massa e, portanto, praticamente o mesmo peso atômico. Na sua maioria, os núclídeos radioativos artificiais ficam acima ou abaixo dos núclídeos estáveis; eles ou têm excesso de nêutrons (falta de prótons), ou nêutrons de menos (excesso de prótons) para serem estáveis (KAPLAN, 1963).

A maioria dos radionuclídeos artificiais existentes na biosfera são derivados de testes e uso de armas nucleares e acidentes com reatores nucleares. Dos acidentes nucleares ocorridos, o acontecido no dia 26 abril de 1986 na Usina de Energia Nuclear de Chernobyl foi o que mais contaminou a biosfera. A Tabela 6 apresenta um resumo dos principais radionuclídeos liberados por testes de armas e pelo acidente de Chernobyl (ANDRELLO, 2004).

Tabela 6 - Principais núclídeos liberados por testes nucleares e pelo acidente de Chernobyl.

<i>Nuclídeo</i>	<i>Meia vida</i>
³ H	12,32 anos
¹⁴ C	5730 anos
⁵⁴ Mn	312,5 dias
⁵⁴ Fe	2,74 anos
⁸⁵ Kr	10,7 anos
⁸⁹ Sr	50,55 dias
⁹⁰ Sr	28,6 dias
⁹¹ Y	58,5 dias
⁹⁵ Zr	64,0 dias
¹⁰³ Ru	39,3 dias
¹⁰⁶ Ru	371,6 dias
¹²⁵ Sb	2,73 anos
¹³¹ I	8,0 dias
¹³³ Xe	5,24 dias
¹³⁴ Cs	2,07 anos
¹³⁷ Cs	30 anos
¹⁴⁰ Ba	12,8 dias
¹⁴¹ Ce	32,5 dias
²³⁹ Np	2036 dias
²³⁸ Pu	87,7 anos
²³⁹ Pu	2,41 x 10 ⁴ anos
²⁴¹ Am	432,7 anos

Fonte: Andrello (2004).

3.5.1. Radioisótopos Presentes em Sedimentos de Lago

Sedimentos de lagos contêm radioisótopos devido tanto a fontes naturais quanto artificiais. Dentre eles, os utilizados para estudos de sedimentos incluem os naturais ^7Be e ^{210}Pb , e os artificiais ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ e ^{241}Am .

A utilidade de um isótopo em particular depende da sua meia-vida e da acurácia do modelo associado. Por exemplo, a datação realizada com o ^{14}C (meia-vida de 5.730 anos) pode fornecer datas de um período que abrange milhares de anos, mas não terá uma boa acurácia quando usado convencionalmente para datar sedimentos mais jovens do que aproximadamente 1800 AD, por causa da entrada no meio ambiente do ^{14}C antropogênico; o ^7Be por outro lado, com uma pequena meia-vida (53,4 dias), é adequado somente para o estudo de sedimentação que ocorreram recentemente. O principal isótopo para datação em escala de tempo de um a dois séculos é o ^{210}Pb (meia-vida de 22,26 anos). Radioisótopos artificiais têm estado presentes no meio ambiente desde 1954 e podem ser utilizados somente para datação mais recente. Comparando registros estratigráficos destes isótopos com seus históricos conhecidos de “fallouts”, podem fornecer um guia ano a ano ou em incrementos maiores para entendimento do processo de sedimentação em colunas de sedimento. Muitos estudos publicados têm usado o ^{210}Pb e ^{137}Cs como principal base para estabelecer cronologia recentes de sedimentação (CRICKMORE et al, 1990).

3.5.2. ^{210}Pb

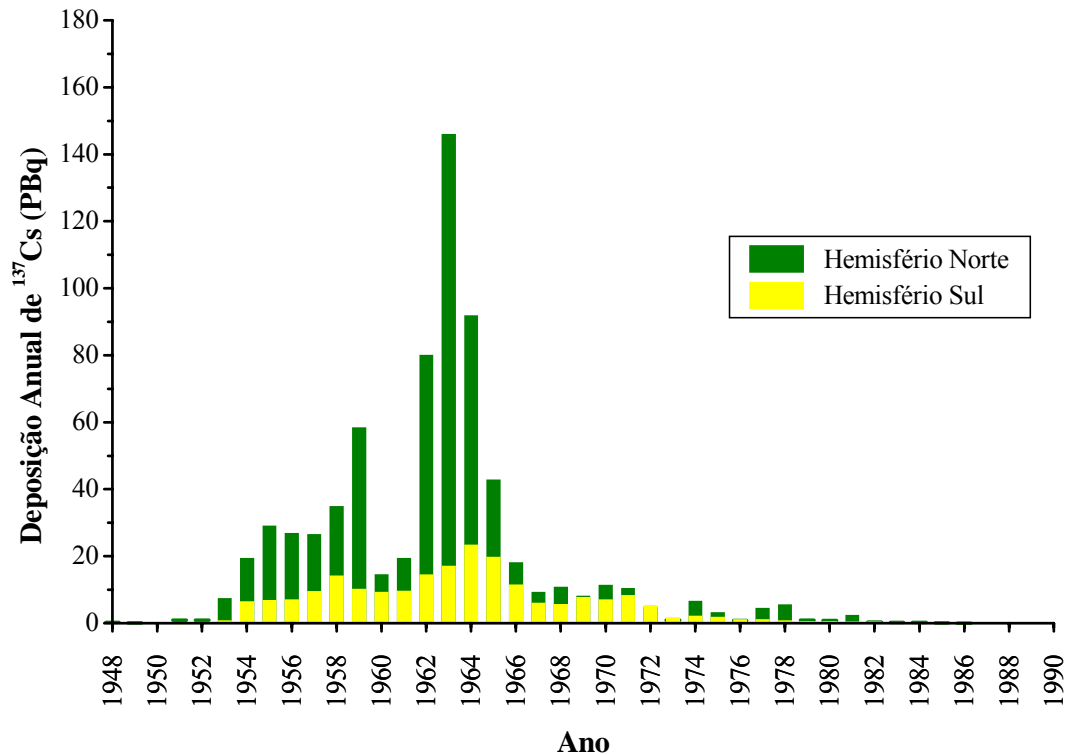
O ^{210}Pb ocorre em sedimentos de lagos naturalmente, surgindo como um produto da série de decaimento do ^{238}U presente no solo. Com uma meia-vida de aproximadamente duas décadas, é adequado para datar eventos sobre um período de 100-150 anos. A origem de todo ^{210}Pb presente nos ambientes lacustres tem uma parte proveniente da atmosfera e uma parcela produzida do decaimento do ^{226}Ra existente na água. O ^{210}Pb é rapidamente removido da água por reações inorgânicas e bioquímicas, adsorvido por matérias em suspensão e afunda com o fluxo de partículas de sedimentação, ele é preferencialmente adsorvido por minerais de argila, siltes finos e matérias húmicas (BENNINGER; KRISHNASWAMI, 1981; CUNDY E CROUDACE, 1995). O ^{210}Pb é um elemento derivado do decaimento *in situ* do ^{226}Ra , que é um isótopo encontrado naturalmente no solo e em partículas de rocha. Ele é transportado para dentro de lagos na forma de partícula (associado ao ^{226}Ra) como parte de processos de entrada de sedimentos nestes ambientes, como erosão e

assoreamento. Um segundo elemento, chamado de ^{210}Pb não-suportado, deriva da dissociação do ^{210}Pb a partir do ^{226}Ra através da difusão do gás do isótopo intermediário ^{222}Rn . Uma fração dos átomos do ^{222}Rn formados pelo decaimento direto do ^{226}Ra escapa do solo e difunde-se na atmosfera, onde ele decai em uma seqüência de pequenas meias-vidas para o ^{210}Pb . Ele é removido da atmosfera por precipitação seca e úmida, caindo sobre a superfície terrestre, incluindo lagos e oceanos. O ^{210}Pb que precipita diretamente dentro de lagos é resgatado pela água e é depositado no leito dos mesmos com os sedimentos. Na maioria das situações o chumbo suportado pode ser assumido estar em equilíbrio radioativo com o ^{226}Ra , e a atividade não-suportada em qualquer nível, é obtida subtraindo a atividade do ^{226}Ra do total de chumbo. O ^{210}Pb não-suportado em cada camada de sedimento diminui sua idade em concordância com a lei do decaimento radioativo, e assim pode ser utilizado para datar sedimentos, fornecendo sua atividade inicial quando foi assentado no leito do lago.

3.5.3. ^{137}Cs

O ^{137}Cs é um subproduto da fissão nuclear do urânio e do plutônio e foi introduzido na atmosfera principalmente por testes nucleares de superfície. A deposição de ^{137}Cs no globo terrestre começou a ser significativa a partir de 1952 com a explosão da primeira bomba termonuclear. Após o “Limited Nuclear Test Ban Treaty”, em 1963, a deposição de ^{137}Cs diminuiu rapidamente, não ocorrendo deposição a partir de 1980. Também ocorreu uma grande deposição de ^{137}Cs na biosfera devido ao acidente com a usina nuclear de Chernobyl, em 1986. Entretanto, essa deposição ocorreu somente em alguns países da Europa e antiga União Soviética. Na Figura 5 é mostrado o histórico de deposição do ^{137}Cs na superfície terrestre. Observa-se que a deposição foi maior no hemisfério norte do que no hemisfério Sul.

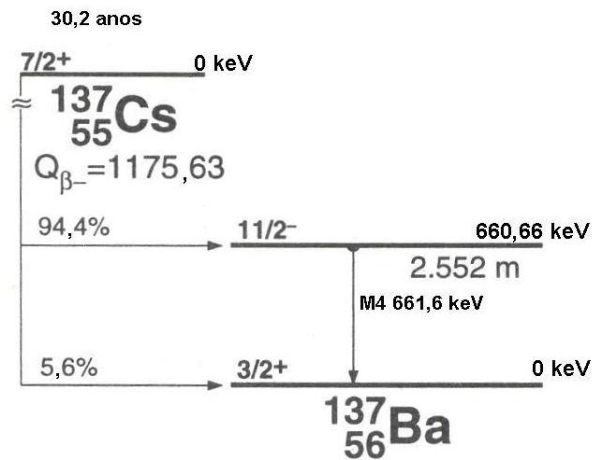
Figura 5 - Deposição de ^{137}Cs nos hemisférios norte e sul no período de 1948 a 1990



Fonte: UNSCEAR (2000)

O ^{137}Cs decai por beta menos (β) por dois caminhos diferentes. No primeiro caminho (probabilidade de 5,6%), o ^{137}Cs decai para o bário-137 no estado fundamental emitindo uma partícula β com energia de 1.175,6 keV. No segundo caminho (probabilidade de 94,4%), o ^{137}Cs decai para o ^{137}Ba no estado metaestável (meia vida de 2,552 minutos) que, através de uma transição isomérica, vai para o estado fundamental emitindo um raio gama de energia de 661,66 keV. Esse raio gama é usado para caracterizar o ^{137}Cs em espectrometria gama. O esquema de decaimento do ^{137}Cs está representado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema de níveis do processo de decaimento do ^{137}Cs



Fonte: Adaptado de Firestone (1999).

3.6. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

A interação da radiação com a matéria pode ser interpretada como um processo de transferência de energia, que acontece quando a radiação eletromagnética (REM), ao interagir com a matéria, transfere energia para os átomos e moléculas que estejam em sua trajetória. Fisicamente, ao interagirem com um meio material, podem provocar os seguintes efeitos: excitação atômica ou molecular, ionização, radiação de frenamento e ativação do núcleo. A excitação se dá quando elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente em forma de fótons ou raios X característicos. A ionização ocorre quando elétrons são removidos de suas orbitas por uma radiação incidente formando átomos eletricamente carregados, ou seja, íons, e resultando em elétrons livres de alta energia. Radiação de frenamento ocorre quando uma partícula carregada incide no campo elétrico (coulombiano) de um núcleo, e perde energia em forma de radiação eletromagnética ao sofrer desaceleração. A ativação do núcleo ocorre quando a radiação incidente possui energia superior a energia de ligação de nucleons, podendo provocar reações nucleares, resultando num núcleo residual e emissão de radiação.

Conhecer os processos de interação da radiação com a matéria é um fator de grande relevância na operação de detectores de radiação e, com esse objetivo, é possível separar as radiações em três grupos: partículas carregadas: partículas carregadas pesadas (α) e elétrons rápidos; partículas sem carga: nêutrons; e eletromagnéticas: raios X e raios γ . As

radiações constituídas por partículas carregadas são chamadas de radiação diretamente ionizantes, e as demais ditas indiretamente ionizantes.

A espectrometria gama, técnica empregada neste trabalho, depende diretamente da interação de raios γ com a matéria, pois o funcionamento dos detectores de radiação gama é baseado na transferência total ou parcial da energia do fóton incidente com elétrons do material, neste caso, do detector. Os três processos mais importantes de interação da REM com a matéria serão descritos a seguir.

3.6.1.Efeito Fotoelétrico

No efeito fotoelétrico os raios gama incidem no meio absorvedor de forma que o fóton desaparece completamente, sua energia é transferida totalmente para um elétron presente em uma das camadas do átomo, que é ejetado com uma energia cinética E_c , que pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_c = h\nu - E_b \quad (6)$$

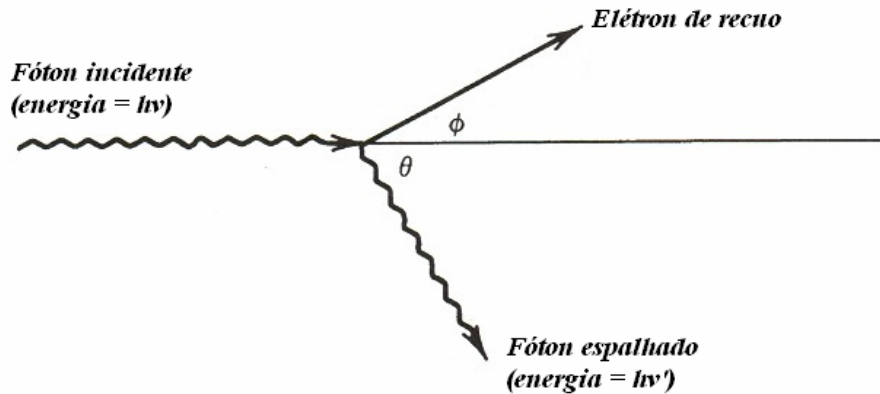
onde $h\nu$ é a energia do raio gama incidente e E_b é a energia de ligação do elétron. Após a ejeção do fotoelétron da camada, ocorrerá uma vacância que será ocupada rapidamente por elétrons de camadas mais externas ou por um elétron livre capturado do meio, emitindo raios X característicos. A probabilidade do elétron de camadas mais externas do átomo preencher a lacuna é maior do que a possibilidade de um elétron livre.

O efeito fotoelétrico é um processo predominante para baixas energias e sua ocorrência aumenta para absorventes de alto número atômico.

3.6.2. Espalhamento Compton

O espalhamento Compton ocorre quando um raio γ incidente interage com um elétron do material absorvedor e é espalhado com ângulo θ em relação a sua direção original. O fóton transfere parte de sua energia para elétron (assumido estar inicialmente em repouso), este chamado de elétron de recuo. Este fenômeno é predominante para raios gama na faixa de energia de 300 keV até alguns MeV. Devido ao fato de todos os ângulos de espalhamento serem possíveis, a energia transferida para o elétron pode variar de zero até uma grande fração da energia original do raio gama. A energia do fóton espalhado ($h\nu'$) em um ângulo θ pode ser obtida a partir das equações de conservação de energia e momento do esquema da Figura 7.

Figura 7 - Espalhamento Compton.



Fonte: Adaptado de Knoll (1999)

A energia $h\nu'$ pode ser escrita como:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (7)$$

onde m_0c^2 é a energia de repouso do elétron. Para pequenos ângulos de espalhamento muito pouca energia é transferida. A energia do fóton após a interação diminui à medida que o ângulo de espalhamento aumenta, atingindo seu mínimo para $\theta = 180^\circ$, situação em que ocorre o retroespalhamento.

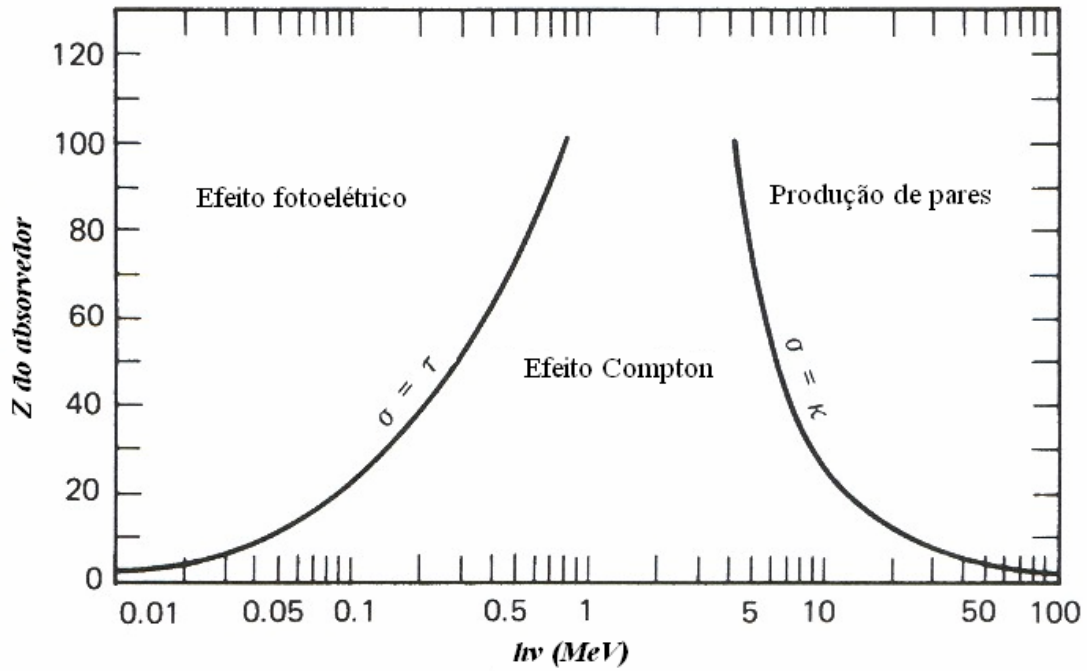
3.6.3. Produção de Pares

O efeito é resultado da interação entre o fóton e o campo eletromagnético do material, e ocorre normalmente nas vizinhanças do núcleo, podendo também acontecer devido à interação do fóton com o campo de qualquer partícula carregada, incluindo os elétrons atômicos. Neste processo, o fóton é absorvido e toda sua energia é convertida em massa de repouso e energia cinética de um par partícula/antipartícula – elétron/pósitron. Pode ser interpretado como a transição de um elétron de um estado de energia total negativa para um estado de energia total positiva; a diferença de energia entre os dois estados é a energia do fóton incidente, que é absorvido; a lacuna de um elétron no conjunto de estados de energia negativa é observada como um pósitron.

Este processo é uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia, pois quando a energia do raio γ incidente no material é o dobro da energia de repouso do elétron (1,022 MeV) a produção de pares passa a ser energeticamente possível. É possível a criação de outros pares de partícula/antipartícula, mas a energia necessária do fóton é muito mais elevada.

Os processos descritos anteriormente sobre a interação da REM com a matéria são de grande importância para estudos que envolvam a detecção de raios γ . Entretanto, a probabilidade de ocorrência desses processos apresenta uma dependência muito grande com o número atômico do material absorvedor e com a energia do raio γ incidente. A **Figura 8** mostra essa dependência, e também as regiões onde cada processo predomina.

Figura 8 - Região de predominância dos três principais tipos de interação da radiação γ com a matéria



Fonte: adaptado de Knoll (1999).

A linha da esquerda representa a energia na qual a absorção fotoelétrica e espalhamento Compton são igualmente prováveis em função do número atômico. A linha da direita representa a energia na qual a produção de pares e espalhamento Compton são igualmente prováveis.

4.MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.ESPECTROMETRIA GAMA

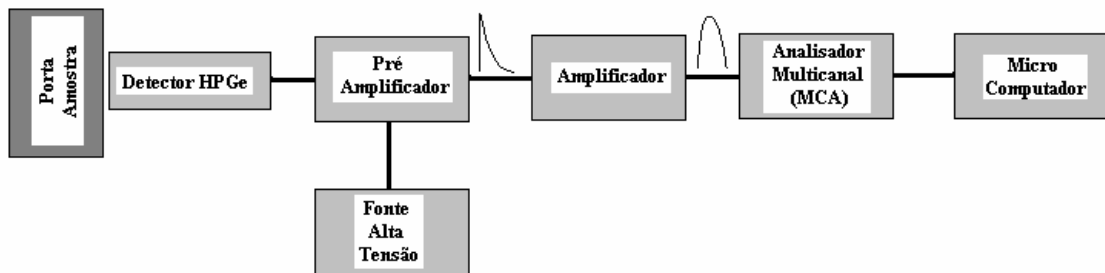
Para a determinação de radionuclídeos, basicamente utiliza-se a detecção de radiação alfa, beta ou gama. A espectrometria gama é a que permite a identificação e quantificação do maior número de nuclídeos simultaneamente e, devido ao alto poder de penetração deste tipo de radiação, é pouco exigente em tratamentos de amostras, podendo ser empregada até mesmo em materiais sem qualquer tipo de preparo.

A espectrometria gama divide-se basicamente em: baixo e alto poder de resolução. Na espectrometria de baixa resolução, desenvolvida através de detectores de NaI (TI), obtém-se maior eficiência de detecção, porém a separação por energia das diversas emissões gama é bem limitada (com resoluções da ordem de dezenas de keV). A espectrometria de baixa resolução é ideal para trabalhos com poucos radionuclídeos cujas emissões gama tenham energias bem distintas. A espectrometria de alta resolução, que é a utilizada neste trabalho, é desenvolvida com a utilização de detectores de HPGe, que oferecem melhores resultados quando se requer uma boa distinção entre emissões gama com energias poucos distintas.

Para se obter uma boa análise espectrométrica é necessário calibrar o sistema com amostras certificadas ou padrões dos radionuclídeos desejados. É necessário, ainda, ajustar parâmetros de acordo com o tipo de amostra (geometria), equipamentos disponíveis, a composição dos radionuclídeos e a atividade da amostra. O tempo de aquisição de dados varia de acordo com o limite de detecção desejado, com a eficiência de detecção e os radionuclídeos de interesse.

O sistema de espectrometria de raios gama geralmente utilizado é totalmente integrado e compreende os seguintes componentes: Detector de germânio (HPGe); pré-amplificador; fonte de alta tensão; amplificador; analisador multicanal (MCA); blindagem; microcomputador. A Figura 9 apresenta um diagrama de blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama sem a blindagem.

Figura 9 - Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama.



O esquema mostrado na figura acima pode ser descrito sinteticamente da seguinte forma: o cristal do detector absorve a energia de um raio gama incidente e produz um pulso de corrente, cuja carga é proporcional à energia absorvida. Este pulso é convertido em um pulso de voltagem no pré-amplificador e adquire a forma gaussiana no amplificador.

Os pulsos de saída deste amplificador vão para o analisador de altura de pulso onde são classificados e armazenados por um número de canais de acordo com suas alturas de pulso. Assim um espectro adquirido pelo analisador de altura de pulso (placa multicanal) representa o número de contagens como uma função da altura do pulso ou da energia.

4.2.SISTEMA DE DETECÇÃO

Apesar do termo radiação ser aplicado a todas as formas de emissão de energia em eventos nucleares, existem na verdade diferenças significantes e características entre vários tipos de radiações que podem ser emitidas sob varias circunstâncias de excitação nuclear. Basicamente é possível distinguir entre emissão de radiação eletromagnética (fótons) resultante de transições entre estados excitados de um dado núcleo, e radiação de partícula, representando transformações ou ejeção de um ou mais nucleons do núcleo atômico. As partículas podem ser carregadas ou não e são diferenciadas com base na massa, carga e spin.

O sistema detector desenvolvido para uma radiação procura utilizar suas interações características, intercalando um meio de propriedades apropriadas em que um sinal detectável seja produzido, seja por um processo de excitação, ionização ou transferência de momento. Este pode ser contado de modo acumulado (sem discriminação em energia) ou classificado e acumulado com discriminação em energia, para fornecer as desejadas

informações sobre a radiação de interesse. Frequentemente surgem problemas para se encontrar uma configuração apropriada que permita à radiação incidente entrar num volume sensível sem alterar suas características. Deve-se tomar muito cuidado para que o próprio detector também não modifique a radiação.

Existem vários tipos de detectores de radiação, sendo que os tipos mais utilizados na espectrometria gama são os detectores semicondutores, os quais definem a espectrometria de alta resolução.

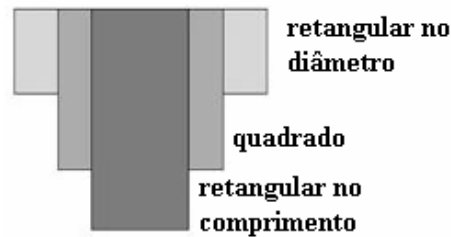
4.2.1. Detector de HPGe

O tipo de detector mais apropriado para análise de amostras ambientais de baixa atividade é o detector com cristal de germânio de alta pureza, normalmente chamado de HPGe (“high purity germanium”). O cristal de germânio pode ser do tipo-p (aceitadores de elétrons) ou do tipo-n (doadores de elétrons) dependendo da concentração de átomos aceitadores ou doadores no cristal. Os cristais podem ter várias formas, sendo que na forma cilíndrica ainda podem ter um buraco central, o que possibilita construir cristais com maior comprimento. Este tipo de cristal é chamado de coaxial. Além dos cristais cilíndricos, também existem cristais em forma de discos.

O cristal de germânio pode também ser feito com diâmetro e comprimento diferenciado. Quando o diâmetro é igual ao comprimento forma um cristal quadrado, quando o diâmetro é maior do que o comprimento forma um cristal retangular em diâmetro e quando o diâmetro é menor do que o comprimento forma um cristal retangular em comprimento. Estas três formas de cristais são apresentadas na Figura 10.

Estas três formas de cristais podem apresentar a mesma eficiência para a linha gama de 1332 keV de uma fonte pontual de ^{60}Co , entretanto apresentam eficiências diferentes quando a amostra apresenta uma outra geometria. Como a maioria das amostras analisadas em laboratório está em porta-amostra do tipo béquer Marinelli, filtros ou pequenos potes, é possível escolher e adquirir um detector com a forma de cristal que apresente a melhor eficiência para o tipo de porta-amostra utilizado.

Figura 10 - Esboço de três formas de cristais de germânio utilizados em detectores.



Neste trabalho foram utilizados os detectores modelo GEM10185-P com diâmetro e comprimento do cristal igual a 43,5 mm e o modelo GEM-M-7080-P-S, com diâmetro do cristal igual a 69,9 mm e comprimento 84,2 mm, situados no Laboratório de Física Nuclear Aplicada/UEL.

4.2.2. Blindagem de Detecção

Para a medida de amostras ambientais de baixa atividade por espectrometria gama, são necessárias blindagens específicas para estas determinadas práticas. Blindagens padrões para o uso em espectrometria gama são fabricadas com materiais de grande número atômico, por exemplo o chumbo, e outros materiais de número atômico menor, para absorção dos raios-X derivados da interação dos raios gama com a blindagem de número atômico maior. A espessura da blindagem depende da atenuação desejada e da energia de um dado raio gama. Para aplicações ambientais, 10 cm de chumbo são suficientes para atenuar os raios gama com energia na faixa de 0 a 2 MeV.

Neste trabalho foram utilizadas duas blindagens, sendo uma produzida pela Ortec e outra produzida pela Canberra. A blindagem da Canberra, modelo 747, tem 10 cm de chumbo de baixo fundo com parte interna recoberta de 1 mm de estanho, que é recoberto por 1,6 mm de cobre para diminuir a incidência no detector dos raios-X gerados no chumbo, sendo recoberta externamente por 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono. A blindagem da Ortec, modelo HPLBS1, tem 10 cm de chumbo de baixo fundo recoberto internamente por 0,5 mm de estanho e 1,6 mm de cobre para diminuir a incidência no detector dos raios-X gerados no chumbo, sendo recoberta externamente por 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono. Tanto a blindagem da Ortec quanto da Canberra tem uma cavidade

com diâmetro interno de 27,9 cm por 40,6 cm de profundidade. A Figura 11 apresenta as blindagens utilizadas.

Figura 11 - Blindagem da Ortec (HPLBS1) e blindagem Camberra (Modelo 747).



4.3. EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO

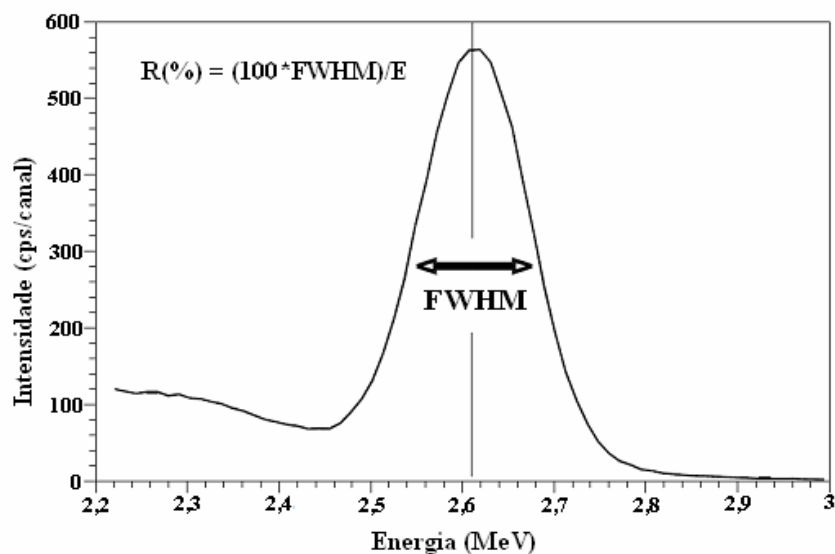
A eficiência de detecção é definida como a capacidade dos detectores de produzirem um pulso de saída para cada fóton de radiação que interage com o volume ativo do detector.

A eficiência dos detectores pode ser dividida em três classes: eficiência absoluta, eficiência intrínseca e eficiência relativa. A eficiência absoluta é definida como a razão entre o número de pulsos registrados no detector e o número de quanta de radiação emitido pela fonte. A eficiência intrínseca é a razão entre o número de pulsos registrados no detector e o número de quanta de radiação incidente no detector. A eficiência relativa é a razão entre a eficiência absoluta do detector considerado e a eficiência absoluta de um detector de cintilação de NaI(Tl), de 3" x 3", a 25 cm de distância da fonte, como definido em *“Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Rays Detectors”* (I.E.E.E., 1971). A eficiência relativa dos detectores de HPGe usados neste trabalho são de 66% (modelo GEM-7080-P-S) e 10% (modelo GEM10185-P) de acordo com o fabricante.

4.4. RESOLUÇÃO EM ENERGIA

A resolução em energia é uma medida da capacidade do detector em distinguir duas linhas gama de energia muito próximas no mesmo espectro. Esta é geralmente determinada através da largura total à meia altura do pico FWHM (“full width at half maximum”). Neste sentido, quanto menor for a largura a meia altura do pico, ou quanto menor for o FWHM do pico, maior é a habilidade do detector de identificar a energia da radiação incidente. Normalmente o FWHM é medido em canais ou como um percentual da energia do fotopico, mas pode ser medido em energia, dando diretamente a resolução em energia, através da calibração em energia do detector, na Figura 12 é apresentada uma ilustração do FWHM.

Figura 12 -Diagrama ilustrando a resolução em energia de um detector (FWHM), em percentual de energia.



Fonte: IAEA (2003).

Outra característica importante de um detector é a razão pico/Compton que é um indicador da capacidade do detector em distinguir picos de raios gama de baixa energia na presença de fontes de alta energia. O platô Compton resulta das interações Compton no detector na qual um fóton escapa do volume ativo do cristal ainda com uma parte da sua energia. A razão pico/Compton é obtida dividindo a altura do pico da linha gama de 1,33 MeV do ^{60}Co pela média do platô Compton entre 1,04 MeV e 1,096 MeV.

O detector GEM-M-7080-P-S tem uma resolução em energia de 1,95 keV com uma eficiência relativa de 66% e uma razão pico/Compton de 75:1. O detector GEM10185-P tem resolução em energia de 1,85 keV com uma eficiência relativa de 10% e uma razão pico/Compton de 37:1.

4.5.ATIVIDADE E EFICIÊNCIA

A atividade de um dado radionuclídeo em uma amostra, em Becquerel por kilograma (Bq.Kg^{-1}), é dada pela equação:

$$A = \frac{N}{\varepsilon m_a P_\gamma t} \quad (8)$$

Onde:

- A é a atividade do radionuclídeo (Bq.Kg^{-1}).
- N é o número de contagens líquidas correspondentes ao raio gama considerado.
- m_a é a massa da amostra (Kg).
- t é o tempo de contagem, live time (s).
- ε é a eficiência absoluta de contagem para energia do raio gama.
- P_γ é a probabilidade absoluta de transição para o raio gama medido.

Na equação acima são apresentadas duas variáveis que são desconhecidas, A e ε . Assim, torna-se necessário determinar uma para se conhecer a outra. Isso se faz através do uso de amostras padrões com a atividade conhecida e/ou certificada dos radionuclídeos de interesse. Essas amostras podem ser preparadas no próprio laboratório ou adquiridas de alguns órgãos que realizam tal serviço e certificam seus produtos, tal como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). A partir das amostras certificadas com as atividades conhecidas de vários radionuclídeos é determinada a eficiência de contagem para cada detector utilizado neste trabalho através de um rearranjo da Equação 8, como mostrado a seguir.

$$\varepsilon = \frac{N}{A m_a P_\gamma t} \quad (9)$$

Em algumas situações onde não se tem uma amostra conhecida que contenha o radionuclídeo que se quer encontrar em outra, costuma-se criar uma curva de eficiência. Esta curva é construída calculando-se várias eficiências, contendo dentro de seu intervalo de energia, aquela característica do elemento radioativo presente na amostra com atividade desconhecida. Feito isso, com um auxílio de um software se faz um ajuste e obtêm-se uma equação para o cálculo de valores desconhecidos de eficiências.

Sabendo-se da eficiência do detector para uma dada energia, é possível então, calcular as atividades dos radionuclídeos presentes na amostra.

As amostras certificadas utilizadas neste trabalho para o cálculo das eficiências foram IAEA-312, IAEA-327 e SL-2 obtidas junto a Agencia Internacional de Energia Atômica (IAEA).

4.6. LIMITE MÍNIMO DE DETECÇÃO E ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL

Na espectrometria gama, sempre que se é obtido um espectro, este terá um fundo devido à radiação natural, aos ruídos da eletrônica e ao fundo Compton. Então, é indispensável determinar o Limite Mínimo de Detecção (LMD). O LMD serve para definir qual procedimento tomar em relação a certos valores obtidos, ou seja, se a partir do valor determinado pode ser assumido que tal área corresponde ou não a uma atividade real.

O LMD de um espectrômetro de raios gama é a medida de sua habilidade em detectar um raio gama na presença de radiação de fundo. Pode-se determinar o LMD através da avaliação de qual é a área líquida que pode ser discriminada da área líquida do fundo. Para isso, a IAEA sugeriu o uso da seguinte equação (IAEA, 1989):

$$L_D = 4,66\sigma_B \quad (10)$$

onde σ_B é o desvio padrão da área líquida de contagem do fundo determinada para a linha gama de interesse na amostra. Essa equação determina qual valor mínimo da contagem que poderá representar uma atividade com grau de confiança de 95%.

Achando o valor do limite mínimo de detecção, é possível então, determinar a atividade mínima detectável (AMD) utilizando a equação da atividade descrita anteriormente:

$$AMD = \frac{4,66\sigma_B}{\epsilon m_a t P_\gamma} \quad (11)$$

4.7. CALIBRAÇÃO EM ENERGIA

Um ponto fundamental na análise das linhas gama presentes no espectro de uma amostra, adquirido por um sistema de espectrometria gama, é a exata identificação em energia destas linhas gama. A relação entre o canal em que a linha gama aparece e sua respectiva energia não é necessariamente linear. Desta forma, torna-se necessário realizar a calibração em energia, garantindo a identificação das linhas gama presentes no espectro.

A realização da calibração em energia é feita através da medida de espectros de fontes de radionuclídeos conhecidos, fazendo-se a associação dessas energias de cada um com seu respectivo canal MCA por inspeção manual ou via análise computacional. Normalmente, essa calibração é realizada com três ou mais linhas gama conhecidas de energias distribuídas dentro da faixa de energia de interesse. Após a calibração em energia de interesse é possível associar ao canal da centróide de um pico a energia correspondente e através de tabelas de radionuclídeos determinar a que radionuclídeo pertence o raio gama. Para fazer essa calibração foi utilizada uma fonte padrão de ^{137}Cs e outra de ^{60}Co , que possuem energias de dezenas de keV a MeV.

4.8. VERIFICAÇÃO DA ACURÁCIA DO DETECTOR

Para existir uma confiabilidade nos valores calculados das atividades das amostras, torna-se necessário verificar os resultados das eficiências calculadas, sejam elas obtidas para energias pontuais, ou para um intervalo de energia, como em uma curva de eficiência. Com um bom ajuste no cálculo de uma eficiência, numa dada geometria e um dado detector, pode-se determinar a atividade de qualquer radionuclídeo dentro de uma amostra desconhecida, desde que a energia seja igual ou esteja dentro daquela utilizada para construir a curva de eficiência.

Geralmente para a verificação da acurácia de um dado detector, costuma-se calcular valores de atividades de amostras com valores de energia conhecidos, amostras estas diferentes das utilizadas no cálculo da eficiência. Comparando os valores calculados com os fornecidos pelas agências, pode-se conferir o quão confiável ou não, é o valor obtido com o auxílio do detector. As amostras usadas na verificação da acurácia do detector foram IAEA-314 e IAEA-444.

4.9 SOFTWARE UTILIZADOS

Neste trabalho foi utilizado o software GammaVision modelo A66-B32, acoplado a uma placa multicanal de hardware específico, que funciona como um multicanal, ou seja, é um instrumento que seleciona e acumula eventos em tempo real. As contagens adquiridas são organizadas em um espectro em tempo real. Através do software GammaVision é possível identificar os picos do espectro, sua energia e radionuclídeo, assim como, utilizando a função ROI, obter a área sob o pico desejado.

O software BrOffice Calc foi utilizado para obtenção das curvas de eficiência com seus respectivos ajustes, e também na construção das planilhas de dados medidos neste trabalho, programando equações para determinação do fator de calibração, atividades e seus respectivos desvios.

4.10 LOCAL DE AMOSTRAGEM

O local de amostragem é um lago de uma mini-usina hidrelétrica construída na década de 1940 na cidade de Londrina-Pr. Essa mini-usina é conhecida como Usina Três Bocas e foi utilizada na colonização da cidade para a produção de energia elétrica, implantada em 1943 pela Copel e desativada em 1983, entretanto, o lago não foi desativado e permanece onde foi criado há oito anos o Parque Ecológico Daisaku Ikeda que passou, recentemente, por revitalização num projeto desenvolvido pela Sema (Secretaria do Meio Ambiente de Londrina) e pela Associação Brasil Soka Gakkai International (BSGI). No local, foi instalada uma área de lazer com bosque, playground, mirante, passarela, além de sanitários e estacionamento. Fotos com vista panorâmica da Usina, e de algumas coletas são apresentadas no Anexo.

Nos arredores do lago existem vários tipos de ocupações. A montante da barragem do lago, na margem direita há uma estreita faixa de terra, em torno de 50 metros de largura, que era utilizada como cultivo até a implantação do parque. Ainda na margem direita, 300 m acima da barragem, existe um riacho (córrego Pira) que deságua no lago. Este riacho é uma grande fonte de sedimentos que assoreiam o lago. A partir desse riacho, 300 m pela margem direita, inicia-se a área agrícola da margem direita. A montante da barragem, à margem esquerda, próximo à barragem existe uma pequena área íngreme onde há uma residência, e a partir de 50 m acima da barragem, começa uma vasta área agrícola que se

estende por toda a margem esquerda da barragem e continua rio acima. Ao longo dos anos, várias mudanças no manejo do solo das terras em torno do lago ocorreram. Até meados da década de 70, as terras em torno do lago eram manejadas em cultivo de pasto. A partir do final da década de 70, essas terras começaram a serem mecanizadas e a agricultura foi introduzida nas terras em torno do lago e até a data de hoje ainda são mantidas como terras agrícolas. O manejo dessas terras também passou por mudanças ao longo dos anos. No início, final da década de 70, o tipo de manejo utilizado era do tipo convencional, onde o solo é arado e depois gradagem para plantio. No final da década 80 e início da década de 90 foi introduzido o manejo sob plantio direto.

Figura 13 - Foto tirada por satélite do lago da usina Três Bocas



Fonte: Disponível em www.maps.google.com.br/maps

4.11 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram coletadas amostras de sedimentos em quatro pontos distintos (U1, U2, U3 e U4) ao longo do lago, conforme mostrado na Figura 13. A amostragem foi realizada entre março e outubro de 2009, sendo que a coleta da amostra U1 foi feita na primeira metade do mês de março, as amostras U2 e U3 foram coletadas no fim do mês de agosto e U4 ao fim do mês de outubro. As amostras foram retiradas em colunas verticais de aproximadamente 50 cm e seccionadas em incrementos de quatro centímetros. Depois de seccionadas, as amostras foram colocadas em sacos plásticos e levadas para o laboratório. Na preparação, todas as

amostras foram secas em estufa num período de três dias a uma temperatura de aproximadamente 100 °C. Após este tempo, as amostras foram moídas para granulometria menor que 2 mm, e acondicionadas em potes plásticos cilíndricos de 250 ml.

4.12.AMOSTRADOR

O amostrador utilizado foi construído junto a Oficina de Mecânica Fina do Departamento de Física/CCE/UEL. Ele consiste em um tubo de alumínio de 90 cm ligado a hastes de metal numa extremidade, que alcançam uma profundidade de 5 m. Para evitar que as amostras escoassem pelo tubo após introduzi-lo no leito do lago, ele foi equipado na outra extremidade com um sistema de “borboleta” ligado a um gatilho que, ao acioná-lo, fechava o dispositivo evitando a saída do material coletado. Uma foto do equipamento de amostragem é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Amostrador de sedimentos



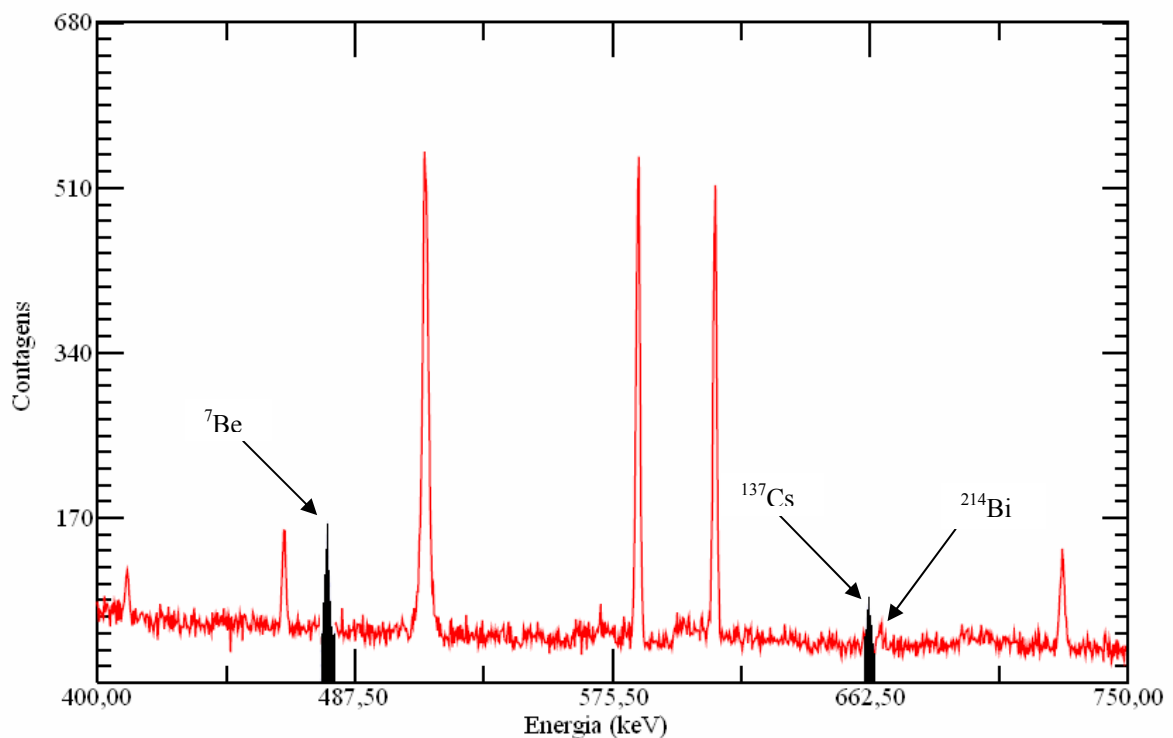
Na Figura 14 é mostrado também um pistão com duas pás de metal. Este sistema funciona da seguinte forma: ligado às hastes o amostrador é introduzido no local de coleta, depois era acionado o gatilho com um fio de nylon que se estendia até a superfície, assim o sedimento era retido dentro do tubo sem sofrer perturbação ao longo do tubo. Já em terra firme, as hastes eram desencaixadas e inserido o pistão, que tem a finalidade de não deixar a amostra escoar e também empurrar a amostra aos poucos para que pudessem ser separadas com as pás nos incrementos desejados. Os incrementos foram medidos com trena.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.ESPECTRO DE UMA AMOSTRA DE SEDIMENTO

Na Figura 15 é apresentado um espectro obtido de uma das amostras, em contagens versus energia. Em destaque são mostrados os picos do ^7Be e do ^{137}Cs .

Figura 15 - Espectro gama de uma amostra de sedimento obtida com um detector de 66%.



Aqui pode ser observado porquê se faz necessário a utilização de detectores hpge na técnica de espectrometria gama para baixas atividades, pois o pico localizado ao lado do pico do ^{137}Cs é o do ^{214}Bi , de 665 keV, e se não for bem discriminado pelo sistema de detecção acarretará em um grande erro na determinação da atividade de ^{137}Cs presente na amostra.

5.2 CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS PARA OS DETECTORES

Como descrito no tópico 4.8, é muito importante calcular a eficiência para o sistema de detecção de maneira rigorosa, pois é o item que mais influencia o cálculo da atividade, principalmente neste trabalho, onde as atividades encontradas para a energia de 661 keV do ^{137}Cs são muito baixas, com valores na faixa de 0,3 a 1,5 Bq/Kg. Outro aspecto de extrema importância para o qual devemos atentar é a geometria usada, pois os detectores utilizados são otimizados para geometria Marinelli, ou seja, possuem uma área de contato com a amostra de 4π . Nas medidas realizadas para este trabalho, a superfície ativa de contato entre detector e amostra era de 2π ocasionando uma diminuição de eficiência, lembrando que isto não leva ao cálculo incorreto da atividade. Este tipo de situação também foi enfrentado por vários pesquisadores em seus trabalhos, dentre eles Bastos (2008) e Sheibel (2006). O motivo da escolha desta geometria para as medidas de radionuclídeos em sedimentos foi a pequena quantidade de amostra coletada para cada incremento, impossibilitando o uso de porta amostras maiores que 300 ml, como os béqueres Marinelli de 1 litro que o laboratório possui.

5.2.1 Eficiência para a Energia do ^{137}Cs

A eficiência para a energia de 661 keV foi calculada com a atividade da amostra certificada SL-2 fornecida pela IAEA. A escolha desta amostra foi feita porque ela contém apenas dois radionuclídeos, o ^{137}Cs e ^{40}K , o que acarreta em um baixo nível de fundo Compton, sendo que o ^{137}Cs é um dos nuclídeos a ser encontrado e a atividade para a energia do seu raio gama característico ser da ordem da encontrada nas amostras de sedimentos. Os valores da atividade dos radionuclídeos presentes nesta amostras juntamente com os valores encontrados para eficiência são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Eficiências calculadas para os detectores para a energia do ^{137}Cs .

	Eficiência	Desvio
Detector de 66%	0,02200	0,00022
Detector de 10%	0,00520	0,00019

5.2.2. Eficiência para a Energia do ^7Be

Para o cálculo de eficiência para energia característica do ^7Be foi feita uma curva de calibração em eficiência. Devido à meia-vida deste radionuclídeo ser curta (cerca de 50 dias), fica inviável a obtenção de uma amostra certificada contendo este elemento. Esta curva foi construída com elementos da amostra de solo IAEA-327, que contém uma grande faixa de energia de raio gama, dentre eles elementos produtos do ^{226}Ra e ^{232}Th . Com o programa GammaVision foram determinadas as contagens relacionadas às energias desses elementos. Com a Equação (9), foi calculada a eficiência para cada pico de energia e em seguida feito um ajuste desses pontos no programa Origin. Para se conseguir um bom ajuste, foram utilizados apenas raio gamas com uma probabilidade de emissão maior que 15%.

Os ajustes são mostrados na Figura 16 e **Figura 17**.

Figura 16 - Curva de eficiência para o detector de 66%

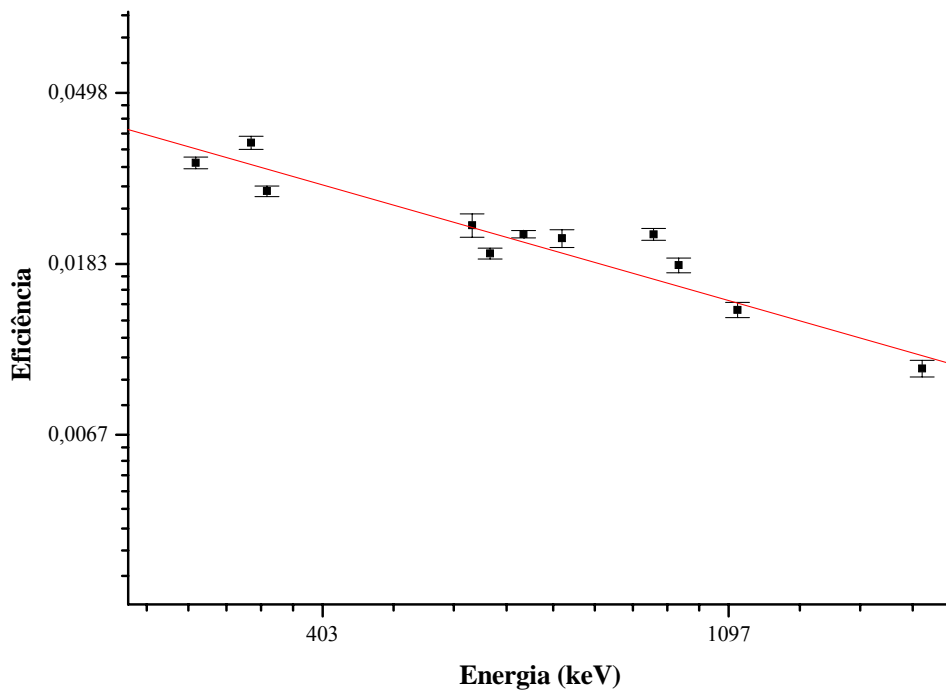
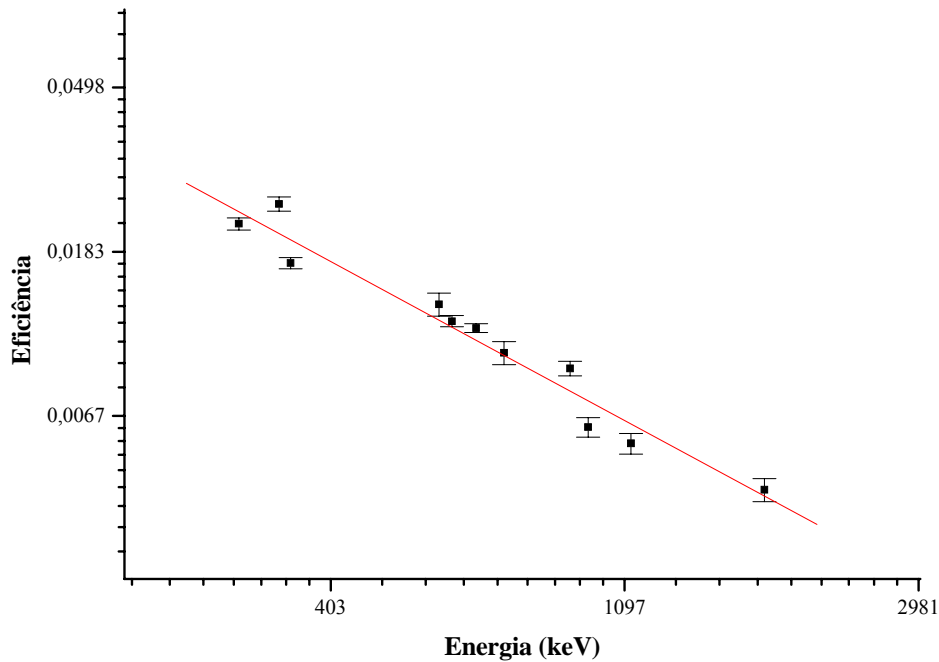


Figura 17 - Curva de eficiência para o detector de 10%.

Os dados foram linearizados alterando-se a escala do gráfico para logarítmica, sendo possível assim, realizar um ajuste linear dos pontos medidos.

A equação da curva fornecida pelo programa foi:

$$\ln(\varepsilon) = A + B \cdot \ln(E), \quad (12)$$

onde, os valores dos parâmetros encontrados foram: $A = (0,51 \pm 0,49)$, $B = (-0,67 \pm 0,07)$, com $R = -0,95$, para o ajuste do detector de 66%; $A = (1,74 \pm 0,48)$, $B = (-0,96 \pm 0,07)$, $R = -0,97$, para o com detector de 10%. Os ajustes obtidos foram satisfatórios, uma vez que o comportamento esperado de uma curva de eficiência nesta faixa de energia utilizada, para detectores de HPGe, ser linear. A confiabilidade na curva obtida pode ser confirmada comparando valores de atividades conhecidas com atividades calculadas com a eficiência obtida com o ajuste, conforme item a seguir.

5.3.ACURÁCIA DOS DETECTORES

Para a verificação da acurácia do detector foram calculadas atividades de uma amostra certificada. Foi realizada uma comparação entre os valores de atividades conhecidas e as calculadas para ambos os detectores. A amostra certificada utilizada foi a IAEA-314, que é uma amostra de solo que contém ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{235}U . Um gráfico com os resultados das atividades calculadas e as certificadas, para o detector com 66% de eficiência, é apresentado na Figura 18. Os resultados para o detector com 10% de eficiência são mostrados na Figura 19. Todos os erros dos valores calculados são desvios propagados, e dos valores certificados são apresentados com 95% de confiança.

Figura 18 - Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 66% com a amostra IAEA-314.

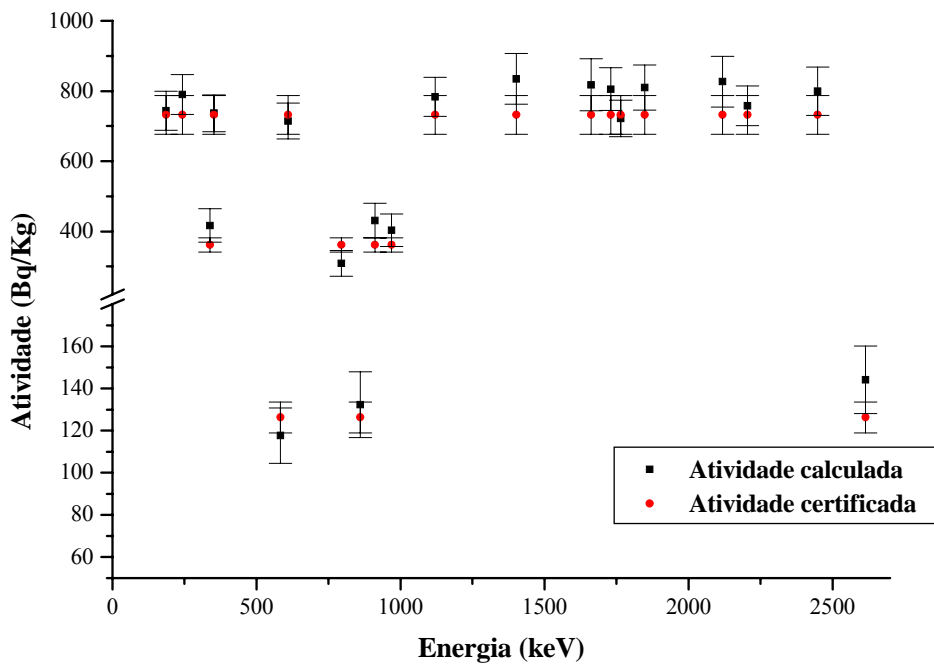
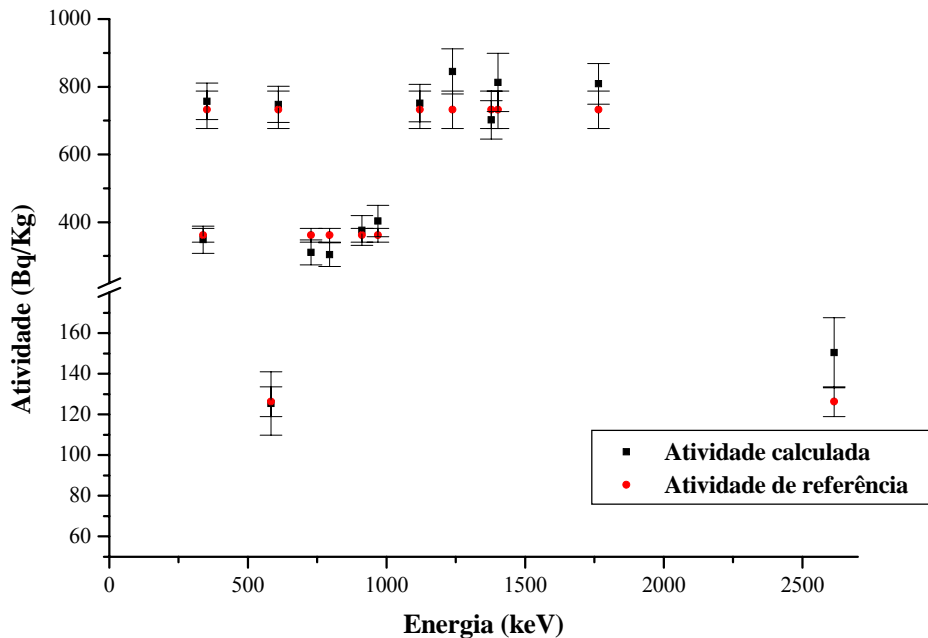


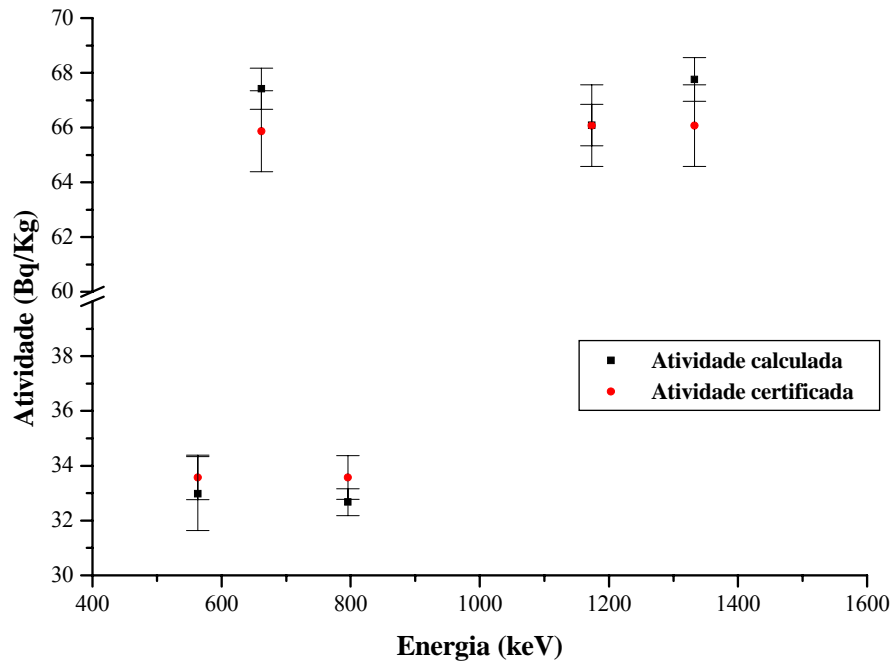
Figura 19 - Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 10% com a amostra IAEA-314.



Pode-se observar que ambos os detectores apresentam boa acurácia. Isto é verificado na concordância dos pontos, estando todos dentro do intervalo de desvios estatísticos. O gráfico com resultados do detector de 10% possui menos pontos porque foram excluídos aqueles que não apresentavam boa estatística, pois dificultam a análise dos dados, podendo levar a resultados não confiáveis.

Fazendo o mesmo tipo de procedimento para verificar a qualidade da curva de eficiência obtida para o detector de 66%, é apresentado a seguir um gráfico contendo valores de atividades calculadas e certificadas. Os dados foram obtidos com a amostra de solo IAEA-444, que contém ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co .

Figura 20 - Comparação entre as atividades calculadas e certificadas para o detector de 66% com a amostra IAEA-444.



Novamente, as atividades estão dentro de seus desvios estatísticos, mostrando que a curva de eficiência tem boa qualidade. A justificativa para a utilização de outra amostra para este teste é que as atividades dos elementos presentes nas amostras IAEA-314 e IAEA-444 apresentam diferença de uma a duas ordens de grandeza. Na espectrometria gama procura-se sempre que possível trabalhar com faixas de atividades parecidas. Como os valores de atividades presente nas amostras de sedimento (deste trabalho) tendem a ser pequenos, na ordem de unidades a poucas dezenas de Bequerel, a curva foi construída com uma amostra que também continha baixa atividade, neste caso a IAEA-327, que tem atividade na mesma faixa da IAEA-444. O mesmo acontecendo com as amostras IAEA-312 e IAEA-314.

Todos os cálculos de eficiência e verificação da qualidade dos ajustes foram realizados para vários níveis de atividades porque a geometria utilizada neste trabalho não estava sendo praticada no laboratório LFNA para determinação de ^{137}Cs e ^7Be , necessitando assim de uma investigação mais rigorosa das respostas dos detectores para este tipo de geometria.

Durante a fase de medidas foi detectado um problema na placa de aquisição de dados (MCA) que gerenciava a aquisição dos dados do detector de 10%, impossibilitando a

finalização das medidas até o término do trabalho com este detector. Por esta razão não é mostrado o gráfico de atividades calculadas e certificadas da amostra IAEA-444 para este detector de 10% de eficiência.

5.4.ATIVIDADES DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS E LIMITES DE DETECÇÃO

As atividades calculadas de ^{137}Cs e ^7Be presentes nas amostras de sedimentos coletadas serão apresentadas na forma de gráficos de atividade para cada incremento de profundidade, lembrando que foram coletados incrementos de 4 cm. O tempo utilizado para cada medida foi de 86400 s. O cálculo da atividade mínima de detecção para o sistema foi feito com o auxílio da Equação (11), onde a contagem de fundo usada foi a diferença entre área líquida e bruta, fornecidas pelo próprio programa de aquisição. Deste modo, os valores de atividade mínima detectável (AMD) do sistema puderam ser mostrados individualmente. Para uma melhor visualização a atividade mínima detectável é apresentada nos gráficos junto a cada atividade correspondente.

5.4.1.Atividade de ^{137}Cs

Os perfis de atividade pela profundidade obtidos com detector de 66% de eficiência, para os pontos amostrados, são mostrados nas Figura 21 a 24, junto com suas respectivas Atividade Mínima Detectável. Os desvios propagados das atividades de ^{137}Cs para todos os pontos são todos sendo da ordem de 15% do valor apresentado.

Figura 21 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U1.

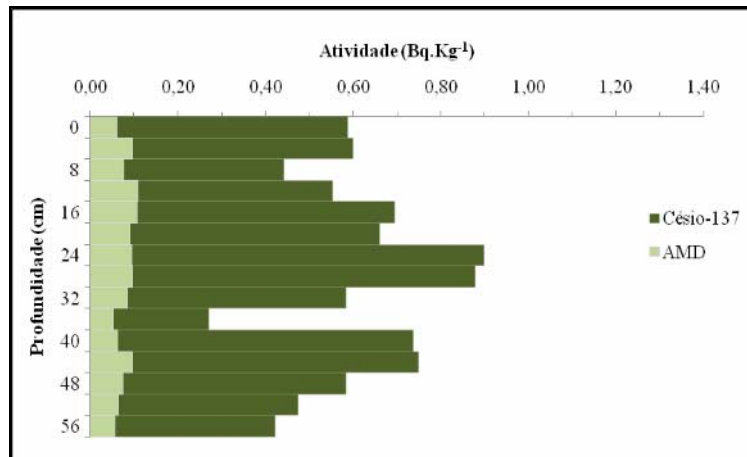


Figura 22 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U2.

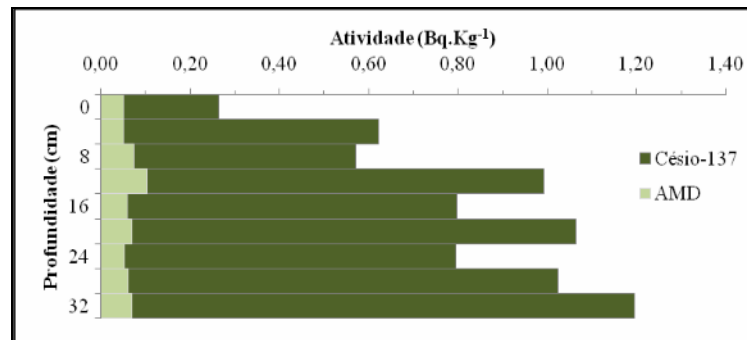


Figura 23 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U3.

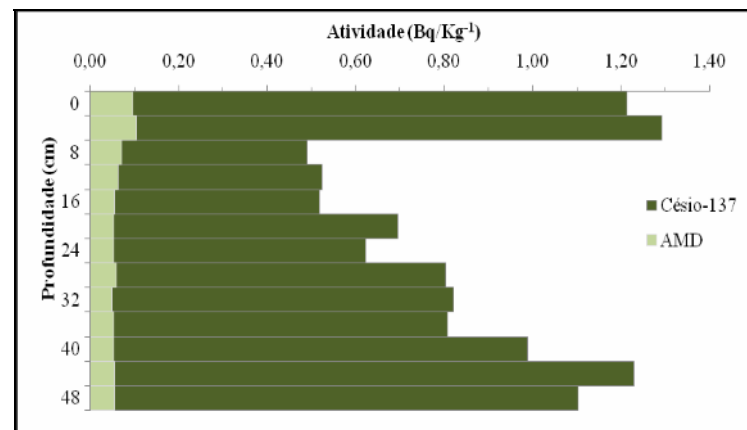
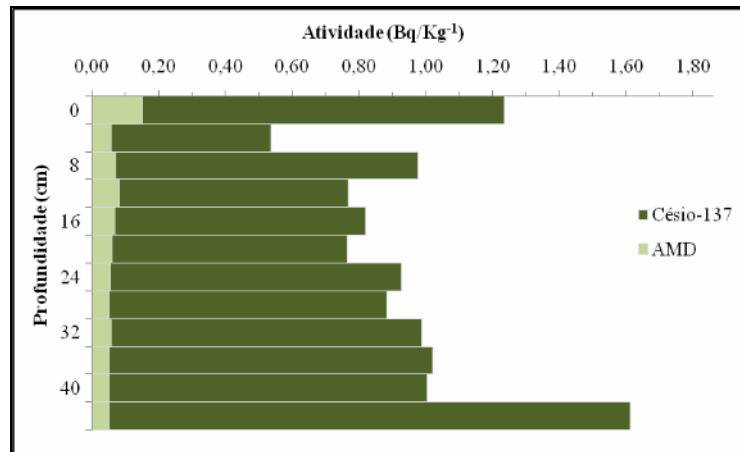


Figura 24 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U4.



Analisando-se as figuras, observa-se que a distribuição de ^{137}Cs para o primeiro ponto coletado é diferente da distribuição obtida para os três últimos pontos coletados, sugerindo uma perturbação no ponto U1. Uma análise mais rigorosa destes perfis será feita mais adiante, onde são apresentados os índices pluviométricos na região.

Para testar a reprodutibilidade do sistema, algumas medidas foram refeitas, alterando-se o tempo de medida para 172800 s. Esta investigação foi realizada para os pontos U1 e U4. Na Figura 25 e Figura 26 são apresentados os resultados para a distribuição em perfil desses pontos, juntamente com os medidos com um tempo menor.

Figura 25 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U1 na 1ª (esquerda) e 2ª medida (direita).

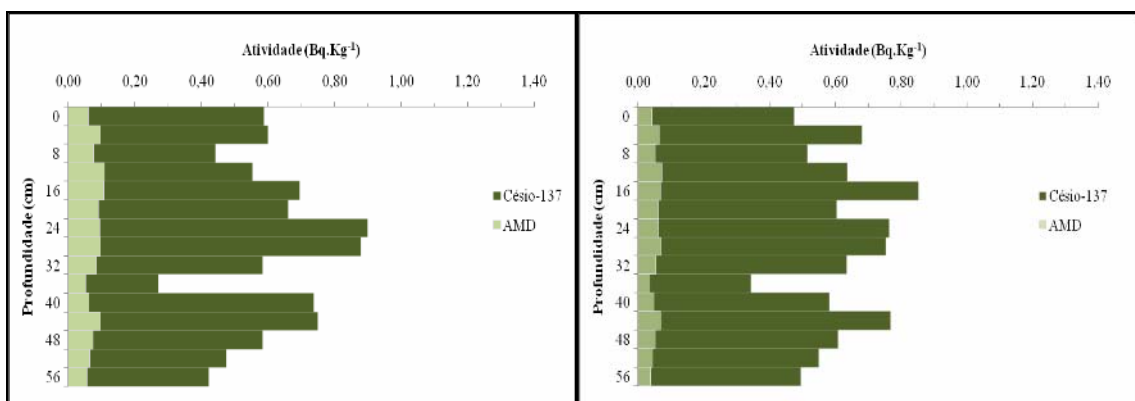
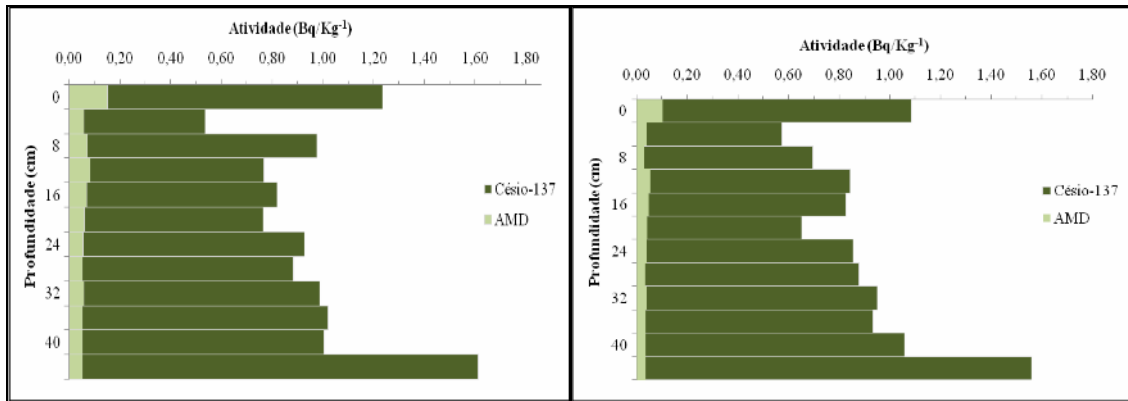


Figura 26 - Perfil da atividade de ^{137}Cs pela profundidade para o ponto U4 na 1ª (esquerda) e 2ª medida (direita).



Os perfis do lado esquerdo da Figura 25 e da Figura 26 foram medidos com um tempo de 86400 s e o da direita com 172800 s. Os gráficos apresentam a mesma distribuição, comprovando a boa reprodutibilidade do sistema. Sendo que as diferenças entre valores de um e outro são mínimas, além de estarem todas dentro do desvio estatístico. Este teste foi realizado devido a uma preocupação com a quantidade de amostra usada em cada medida, que era pequena (aproximadamente 160 g cada), gerando baixas taxas de contagens.

As Figuras que apresentam os perfis obtidos com o detector de 10% de eficiência não são apresentados, pelo problema citado no item anterior, o qual aconteceu durante a aquisição dos dados com o tempo de 172800 s.

5.4.2. Atividade de ^7Be

As Figuras 27 a 30 apresentam os perfis de distribuição em profundidade de ^7Be em cada ponto amostrado, obtidas com contagens fornecidas pelo detector de 66% de eficiência, junto com suas respectivas Atividade Mínima Detectável. Os desvios propagados das atividades de ^7Be para todos os pontos são todos sendo da ordem de 13% do valor apresentado.

Figura 27 - Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U1.

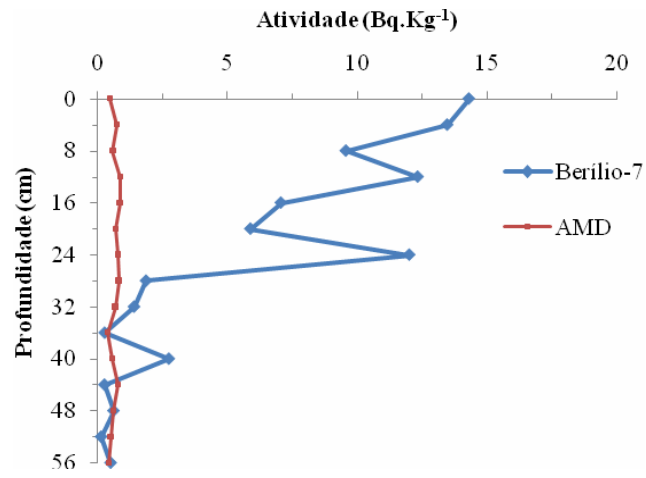


Figura 28 - Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U2.

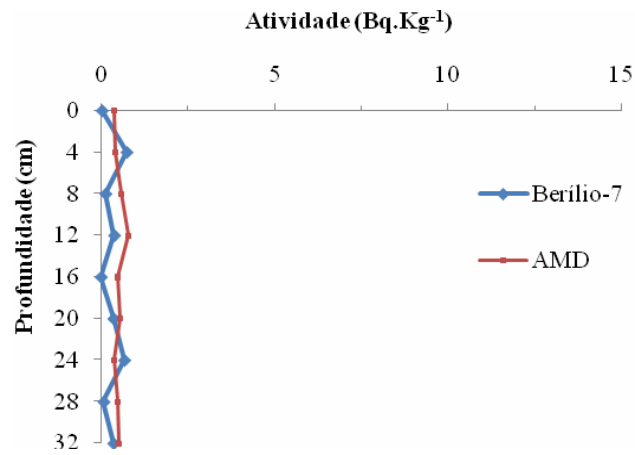


Figura 29 - Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U3.

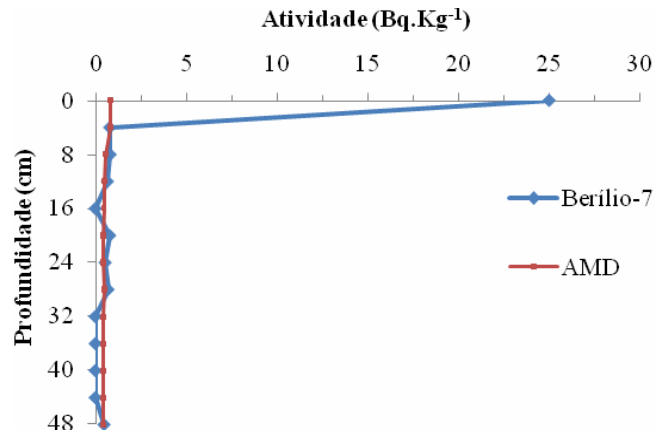
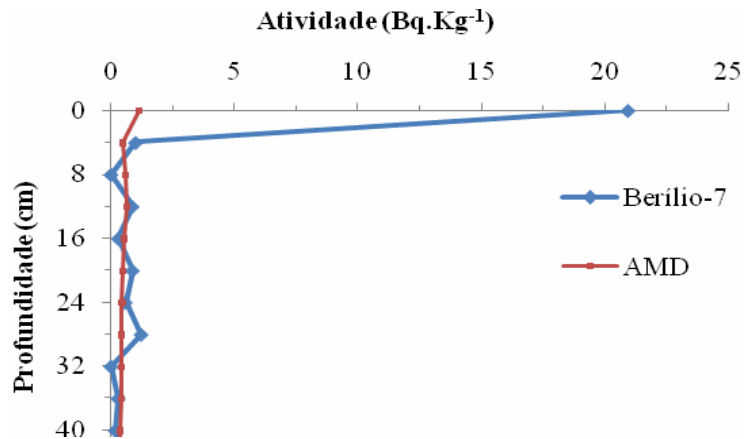


Figura 30 - Perfil da atividade de ^7Be pela profundidade para o ponto U4.



Os gráficos mostram uma quantidade de berílio nos primeiros quatro centímetros nos pontos U3 e U4. No ponto U1, vê-se que há um grande acúmulo de sedimentos recentes. Esse resultado é coerente visto que esse ponto foi coletado próximo à desembocadura do Rio Três Bocas.

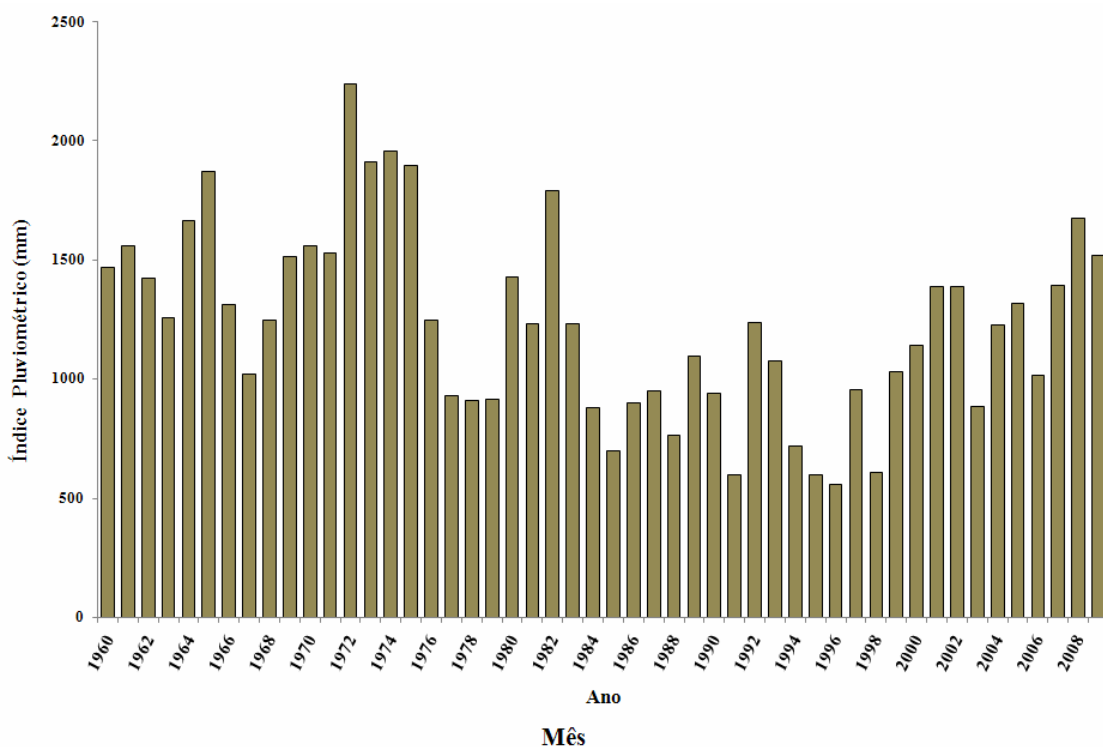
5.5.DADOS PLUVIOMÉTRICOS NA REGIÃO DE ESTUDO

Índices pluviométricos registrados na região de amostragem são mostrados a seguir. Estes índices foram obtidos pelo Sistema de Meteorologia do Paraná (SIMEPAR), e disponibilizados no site www.agritempo.gov.br.

5.5.1.Índice Pluviométrico de 1960 a 2009

Na Figura 31 são mostradas medias anuais de precipitação em milímetros do período de 1960 a 2009.

Figura 31 - Índice pluviométrico de 1960 a 2009 no município de Londrina.

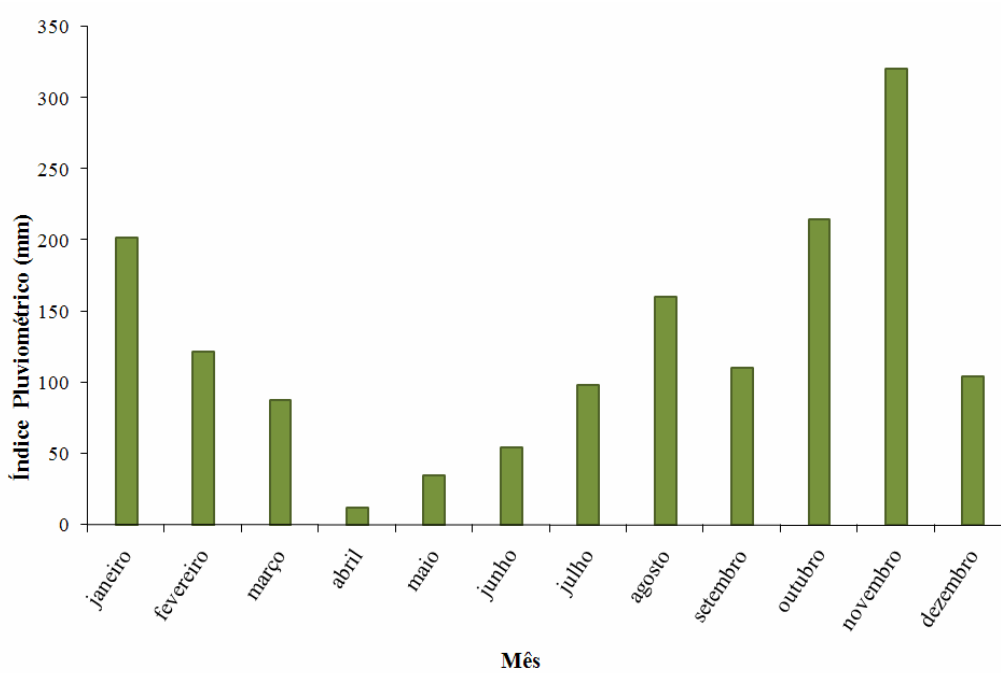


A Figura 31 mostra que durante os anos de 1965, 1972, 1983 e 2008 ocorreram grandes quantidades de chuvas na região, sendo seguidas de intervalos com medias menores de precipitação, tendo um mínimo entre os anos de 1991 e 1998.

5.5.2. Índice pluviométrico de 2009

Na Figura 32 são mostradas medias mensais de precipitação em milímetros do ano de 2009.

Figura 32 - Índice pluviométrico de 2009 do município de Londrina.



No ano de 2009 o pico de precipitações ocorreu no mês de novembro, tendo um mínimo no mês de abril.

5.6.DISSCUSSÕES

Analisando as distribuições de césio nos perfis coletados, notam-se indícios claros de que na região do ponto U1 há uma grande perturbação, uma vez que a atividade ao longo da profundidade se comporta de maneira aleatória, sem um padrão, mostrando que há uma constante sedimentação. Analisando o mesmo ponto, mas com a distribuição de berílio presente no sedimento (Figura 27), se confirma a situação de perturbação deste ponto, visto que o berílio encontrado no sedimento é recente, de no máximo 1 ano de deposição. Além disso, comparando as distribuições de ^{137}Cs e ^7Be para esse ponto, verifica-se que existe uma similaridade na deposição de sedimentos, ou seja, até os 32 cm de profundidade, as distribuições de ^{137}Cs e ^7Be seguem o mesmo padrão, diferente dos pontos U3 e U4, onde o

berílio é detectado apenas nos primeiros 4 cm. Um fato importante que pode ser observado é que na Figura 27 a atividade de berílio detectada concorda com o gráfico do índice pluviométrico do ano de 2009. Como a coleta deste ponto foi realizada numa época de pouca precipitação de chuva (realizada no início de junho), é esperado que se houver atividade de berílio neste ponto, deve ser atribuída às chuvas ocorridas nos meses de janeiro e fevereiro, que apresentaram uma intensidade muito maior. Pensando desta maneira, até a época de amostragem já deveria ter decorrido uma meia-vida do berílio. Isto é prontamente confirmado com o valor da atividade deste ponto, que é aproximadamente metade da atividade medida nos pontos U3 e U4, que foram coletados logo após grande precipitação de chuva. Esta situação era previamente esperada porque este ponto se encontra num local de deságüe de um riacho, ou seja, constantemente este ambiente está sendo perturbado pela ação da água. Este fato também é corroborado com a pouca profundidade em que se encontra o leito do lago nesta região, sendo de aproximadamente 1,5 metros, sugerindo que nesta área ocorreram muitos eventos de sedimentação.

Já nos pontos restantes temos uma situação que permite uma análise mais conclusiva, pois os perfis de césio têm distribuições semelhantes, sugerindo uma tendência. Observando a Figura 31, que mostra o índice pluviométrico das últimas décadas na região, a representação no gráfico dos anos de 1982 a 2008 é muito semelhante àquela dos pontos U3 e U4, com picos nas extremidades, existindo um pequeno vale entre eles. Como é sabido que as sedimentações ocorrem com mais frequência em períodos de grande precipitação de chuva, podemos assumir que o pico referente às chuvas no período de 1982 estão representados nos gráficos da distribuição de ^{137}Cs (Figura 23 e Figura 24) na profundidade de 44 cm, ou seja, o pico de ^{137}Cs em 44 cm indica a camada de sedimentos que foi depositada no ano de 1982. Isto daria uma taxa de sedimentação de aproximadamente 1,6 cm/ano nas proximidades dos pontos U3 e U4. Estas afirmações podem ser comprovadas numa análise das distribuições de ^7Be nestes pontos.

A taxa de sedimentação obtida a partir dos perfis de ^{137}Cs foi calculada dividindo-se a profundidade em que o pico se encontra no gráfico pela “quantidade de anos” do pico. O pico utilizado aqui é aquele no qual foi atribuído o evento. A expressão para o cálculo da taxa de sedimentação é mostrada na equação 13.

$$\text{taxa de sed} = \frac{\text{profundidade do pico}}{\text{"idade do pico"}} \left(\frac{\text{cm}}{\text{ano}} \right) \quad (13)$$

No caso do gráfico com a distribuição de ^7Be o cálculo foi realizado de uma maneira diferente. Tomando como base a meia-vida deste radionuclídeo (aproximadamente 50 dias), podemos assumir que seu tempo de residência no sedimento será de aproximadamente 1 ano. Chega-se a este valor calculando quantas meias-vidas são necessárias para que a atividade diminua da ordem do valor da atividade mínima detectável. O valor de atividade usado foi a calculada no ponto U4, pois a coleta desta amostra foi realizada poucos dias após um longo período de chuva. Uma consideração a ser feita, é a de que o berílio presente no lago não está todo ele localizado nos 4 cm de incremento de maneira uniforme. Neste estudo ele está distribuído desta maneira porque os incrementos foram seccionados desta forma (4 cm) e homogeneizados. A distribuição mais correta deste nuclídeo deveria ser uma exponencial, o que mostraria uma maior concentração no primeiro 1,5 cm de camada. Assumindo que esta pequena faixa representa a quantidade de berílio acumulada em um ano, a taxa de sedimentação calculada com este radionuclídeo seria de aproximadamente 1,5 cm/ano, o que concorda com a análise a partir do ^{137}Cs .

Na Figura 28, a atividade de ^7Be do ponto U2 sugere que não ocorreu sedimentação significativa nos últimos meses, devido a atividade detectada de ^7Be ao longo de todo o perfil ser da ordem da atividade mínima detectável. Isto se confirma analisando o perfil de ^{137}Cs neste ponto, pois este não apresenta o pico relacionado à sedimentação ocorrida no fim de 2008 e começo de 2009, como indicada pela análise dos pontos U3 e U4. O pico que está relacionado com o ano de 1982 se encontra numa profundidade menor do que nos outros pontos (U3 e U4), mostrando que a taxa de sedimentação é menor. Outro fato que ratifica a baixa taxa de sedimentação neste ponto é que ele é localizado próximo a uma área de recente reflorestamento (iniciada nos últimos 4 anos), ou seja, a sedimentação que ocorria proveniente desta área para o ponto amostrado não acontece mais. Por outro lado, esta área antes do reflorestamento era uma antiga área de manejo, explicando o porquê de o perfil de ^{137}Cs no ponto U2 apresentar apenas eventos de sedimentação mais antigos.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados os perfis de ^{137}Cs e ^7Be em amostras de sedimento de um lago de uma mini-usina hidroelétrica na região da cidade de Londrina-PR, para se obter dados para uma avaliação do histórico de sedimentação neste local.

A análise destes radionuclídeos foi realizada utilizando a técnica de espectrometria gama. Esta técnica provou ser uma ferramenta bastante útil para detecção de baixa atividade destes radionuclídeos. Principalmente porque os detectores utilizados não possuem a geometria otimizada para se trabalhar com amostras na faixa de 180 gramas de massa. Mas os testes realizados para acurácia do equipamento revelaram que uma vez tomado os cuidados devidos, os resultados são muito satisfatórios.

Após a análise pode-se verificar claramente que a área do ponto U1 é uma região onde ocorre grande sedimentação, fato esperado, pois esta área é localizada próxima a desembocadura da principal fonte de água do lago, transportando sedimento de outras para o reservatório.

No ponto U2 foi verificado que a sedimentação é menor que nos pontos lago acima, sendo de aproximadamente 1,2 cm/ano. A construção da mata auxiliar mostrou-se eficaz, pois ajudou na diminuição da taxa de sedimentação.

Pode-se concluir a partir das análises feitas das distribuições de ^{137}Cs e ^7Be nos locais onde se encontram os pontos de amostragem U3 e U4, a taxa de sedimentação é de aproximadamente 1,6 cm/ano.

A metodologia adotada mostrou-se adequada para os fins. Mas, um trabalho mais minucioso necessita ser realizado para uma melhor avaliação do histórico de sedimentação deste local. Algumas medidas que podem ser tomadas para o enriquecimento deste estudo são: a coleta de sedimentos mais profundos, que possam exibir todo o histórico do lago, desde fallout de 1964; mais pontos podem ser amostrados para a avaliação de toda a área do lago; seccionar os pontos em incrementos menores, para uma melhor análise dos perfis de ^7Be e ^{137}Cs . Como o lago se encontra cercado de propriedades que utilizam diferentes técnicas de manejo, pode ser realizada também uma análise de metais pesados presentes nos sedimentos, para um levantamento de possíveis contaminantes, procurando suas origens.

REFERÊNCIAS

- ANDRELLO, A. C. *Aplicabilidade do ^{137}Cs para medir erosão do solo: modelos teóricos e empíricos*. 2004. Tese de Doutorado em Física - Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR.
- ARNAUD, F. et al. *Radionuclide dating (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am) of recent lake sediments in a highly active geodynamic setting (Lakes Puyehue and Icalma - Chilean Lake District)*. Science of the Total Environment. Vol. 366, p. 837–850, 2006.
- BAI, Z. G. et al. *A comparison on the accumulation characteristics of ^7Be and ^{137}Cs in lake sediments and surface soils in western Yunnan and central Guizhou, China*. Catena, Vol. 49, p. 253 – 270, 2002.
- BASTOS, R. O. *Radioatividade de rochas provenientes das formações geológicas pertencentes a bacia hidrográfica do Rio Tibagi*. 2008. Tese de Doutorado em Física - Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR.
- BENNINGER, L.K.; KRISHNASWAMI, S. *Sedimentary processes in the inner New York Bight: evidence from excess ^{210}Pb and $^{239,240}\text{Pu}$* . Earth and Planetary Science Letters. Vol. 53, p. 158-174, 1981.
- CLARK, E.H., HAVERKAMP, J.A. and CHAPMAN, W. *Eroding soils: The off-farm impacts*. The Conservation Foundation, New York, 1985.
- CRICKMORE, M. J.; TAZIOLI, G. S.; APPLEBY, P. G.; OLDFIELD, F. *The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems*. Technical Documents en Hydrology. UNESCO, 1990.
- CUNDY, A. B.; CROUDACE I. W. *Physical and chemical association of radionuclides and trace metals in estuarine sediments: an example from Poole Harbour*. Journal Environmental Radioactivity. Vol. 29, p.191-211, 1995.
- FIRESTONE, R. B. *Table of Isotopes*. John Wiley, New York, 1999.
- I.E.E.E. *Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Rays Detectors* 325, 1971, (reaffirmed in 1979).
- IAEA. 1989. *Measurements of radionuclides in food and the environment: a guidebook*. Technical Reports n° 295.
- IAEA. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Technical Reports n° 1363.
- KAPLAN, I. *Nuclear Physics*, Addison-Wesley Publishing Comp., Inc., 1963.
- KATHREN, R. L. *NORM Sources and their Origins*. Applied Radiation and Isotopes. Vol. 49 (3), p. 149-168, 1998.

- KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurements*. 3^a ed. John Willey: New York, 1999.
- LAL, R. *Soil degradation by erosion*. Land Degradation & Development. Vol. 12, p. 519–539, 2001.
- MARESTONI, L.D. 2007. *Estudo da redistribuição de solo superficial em áreas cultivadas e não cultivadas utilizando o fallout do ⁷Be*. Tese de Mestrado em Física – Universidade Estadual de Londrina. Londrina - PR.
- PAPASTEFANOU, C., IOANNIDOU, A. *Aerodynamic size association of ⁷Be in ambient aerosols*. Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 26. p.273-282, 1995.
- PAYNE, B. R. *Measurements of rates of accumulation of sediments from radioisotope data*. In: *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*, UNESCO Technical Report in Hydrology, UNESCO, p. 219-224, 1985.
- PIMENTEL, D. *Environmental and economic cost of soil erosion and conservation benefit*. Science. Vol. 267, p. 1117–1123, 1995.
- PUTYRSKAYA, V.; KLEMT, E. *Modeling ¹³⁷Cs migration processes in lake sediments*. Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 96, p. 54-62, 2007.
- RITCHIE, J. C.; McHENRY, J. R.; GILL, A. C. *Dating recent reservoir sediments*. Limnology and Oceanography. Vol. 18, p. 254-263, 1973.
- SCHEIBEL V. *Determinação das doses efetivas por ingestão de farinhas de cereais através da espectrometria gama*. 2006. Tese de Doutorado em Física - Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR.
- TALPOS, S., CUCULEANU, V. *A study of the vertical diffusion of ⁷Be in the atmosphere*. J. Environ., Vol. 36, p. 93-106, 1997.
- TAKEUSHI, N., TAKASE, A. *Rainout-Washout Model for Variation of Environmental Gamma-Ray Intensity by Precipitation*. Journal of Nuclear Science and Technology. Vol. 19, p. 393-409, 1982.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Repor. Vol. I, United Nations, New York, 2000.
- WALLBRINK, P. J.; MURRAY, A. S. *Distribution and variability of ⁷Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes*. Water Resources Research. Vol. 32, p. 467-476, 1996.
- XIANG, L.; LU, X. X.; HIGGITT, D. L.; WANG, S. M. *Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze basin inferred from ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb measurements*. Journal of Asian Earth Science. Vol. 21, p. 77-86, 2002.
- YAN, P. et al. *¹³⁷Cs dating of lacustrine sediments and human impacts on Dalian Lake, Qinghai Province, China*. Catena. Vol. 47, p. 91-99, 2002.

YOSHIMORY, M. et al. *⁷Be nuclei produced by galactic cosmic rays and solar energetic particles in the earth's atmosphere*. Pergamon, Vol. 32, p. 2691-2696, 2003.

ZAPATA, F. *The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments*. Soil & Tillage Research. Vol. 69, p. 3-13, 2003.

ZAPATA, F.; GARCÍA-AGUDO, E. *Future prospects for the ¹³⁷Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates*. Acta Geologica Hispânica. Vol. 35, p. 197-205, 2000.

ZHANG, X.; WALLING, D. E. *Characterizing Land Surface Erosion from Cesium-137 Profiles in Lake and Reservoir Sediments*. Journal of Environmental Quality. Vol. 34, p. 514-523, 2005.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ANDRELLO, A. C. *Metodologia do ^{137}Cs para determinação da erosão e deposição de solo em uma bacia de solo LRd do norte do Paraná*. 1997. Dissertação de Mestrado em Física - Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR.
- ARGOLLO, R. M. de *Cronologias de sedimentação recente e de deposição de metais pesados na baía de Todos os Santos usando Pb^{210} e Cs^{137}* . 2001. Tese de Doutorado em Ciências Geofísica – Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA.
- ANDRELLO, A. C. et al. *Use of Cesium-137 methodology in the evaluation of superficial erosive processes*. Brazilian Archives of Biology and Technology, Brazil, v. 46, n. 3, p. 307-314, 2003.
- ARNAUD, F. et al. *Flood and earthquake disturbance of ^{210}Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps)*. Terra Nova. Vol. 14, p. 225–232, 2002.
- BLAKE, W. H.; WALLING, D.E.; HE, Q. *Using cosmogenic beryllium-7 as a tracer in sediment budget investigations*. Geografiska Annaler. Vol. 84A, p. 89–102, 2002.
- CLAVAL, D. et al. *Erosion of atmospherically deposited radionuclides as affected by soil disaggregation mechanisms*. Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 77, p. 47-61, 2004.
- COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. L. *Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique*. Catena. Vol. 29, p. 1-27, 1997.
- DAVIS, R. B. et al. *^{137}Cs and ^{210}Pb dating of sediments from soft-water lakes in New England (USA) and Scandinavia, a failure of ^{137}Cs dating*. Chemical Geology. Vol. 44, p. 151-185, 1984.
- DÉTRICHÉ, S. et al. *Caesium-137 in sandy sediments of the River Loire (France): Assessment of an alluvial island evolving over the last 50 years*. Geomorphology. Vol. 115, p. 11-22, 2010.
- DOMINIK, J.; BURRUS, D.; VERNET, J.-P. *Transport of the environmental radionuclides in an alpine watershed*. Earth and Planetary Science Letters. Vol. 84, p. 165-180, 1987.
- FOSTER, I. D. L.; BEARING, J. A.; GREW, R.; OREND, K. *The sedimentary data base: an appraisal of lake and reservoir sediment based studies of sediment yield*. Erosion, Transport and Deposition Processes (Proceedings of the Jerusalem Workshop, March-April 1987). IAHS Publ. no. 189, p. 19-43, 1990.
- HE, Q.; WALLING, D. E. *Interpreting Particle Size Effects in the Adsorption of ^{137}Cs and Unsupported ^{210}Pb by Mineral Soils and Sediments*. Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 30, p. 117–137, 1996.
- HE, Q.; WALLING, D. E.; OWENS, P.N. *Interpreting the ^{137}Cs profiles observed in several small lakes and reservoirs in southern England*. Chemical Geology. Vol. 129, p. 115-131, 1996.

- KANSANEM, P.H.; JAAKKOLA, T. *Assessment of pollution history from recent sediments in Lake Vanajavesi, Southern Finland. I. Selection of representative profiles, their dating and chemostratigraphy*. *Annales Zoologici Fennici*. Vol. 22, p. 13-55, 1985.
- KUMAR, U. S. et al. *Determination of recent sedimentation rates and pattern in Lake Naini, India by ^{210}Pb and ^{137}Cs dating techniques*. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 51, p. 97-105, 1999.
- LAL, R. *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA. (ed.) 1994.
- PLATO, P. A.; JACPOBSON, A. P. *Cesium-137 in Lake Michigan sediments; aerial distribution and correlation with other man-made materials*. *Environmental Pollution*. Vol. 10, p. 19-34, 1976.
- RITCHIE, J.C.; McHENRY, R.J. *Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review*. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 19, p. 215-233, 1990.
- ROBBINS, J. A. *The coupled lakes model for estimating the long-term response of the great lakes to time-dependent loadings of particle-associated contaminants*. NOAA Technical Memorandum ERL GLERL-57. 1985.
- ROBBINS, J. A.; EDINGTON, D. N. *Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 39, p. 285-304, 1975.
- SCHULLER, P.; VOIGT, G.; HANDL, J.; ELLIES, A.; OLIVA, L. *Global weapons' fallout ^{137}Cs in soils and transfer to vegetation in south-central Chile*. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 62, p. 181-193, 2002.
- WALLING, D. E. *Using environmental radionuclides to trace sediment mobilisation and delivery in river basins as an aid to catchment management*. *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*. p. 121-135, 2004.
- WALLING, D. E.; HE, Q. *Use of fallout ^{137}Cs in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains*. *Catena*. Vol. 29, p. 263-282, 1997.
- WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C.; NICHOLAS, A. P. *A Multi-parameter approach to fingerprinting suspended-sediment sources*. *Tracers in Hydrology (Proceedings of the Yokohama Symposium)*. IAHS Publ. n° 215, 1993.

ANEXO A

Fotos

Figura 33 - Vista panorâmica do lago.



Figura 34- Foto da barragem da mini-usina Três Bocas.



Figura 35 - Foto da coleta do ponto U3.



Figura 36 - Foto da coleta do ponto U4.

