



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA**

LUIZ DIEGO MARESTONI

**ESTUDO DA REDISTRIBUIÇÃO DE SOLO SUPERFICIAL
EM ÁREAS CULTIVADAS E NÃO CULTIVADAS
UTILIZANDO O FALLOUT DO ⁷BE.**

Londrina
2007

LUIZ DIEGO MARESTONI

**ESTUDO DA REDISTRIBUIÇÃO DE SOLO SUPERFICIAL
EM ÁREAS CULTIVADAS E NÃO CULTIVADAS
UTILIZANDO O FALLOUT DO ^7Be .**

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Appoloni
Co-orientador: Prof. Dr. Avacir Casanova Andrello.

Londrina
2007

Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

M325e Marestoni, Luiz Diego.
Estudo da redistribuição de solo superficial em áreas cultivadas e não cultivadas utilizando o fallout do ^7Be / Luiz Diego Marestoni . – Londrina, 2007.
70f. : il.

Orientador: Carlos Roberto Appoloni.
Co-orientador: Avacir Casanova Andrello.
Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação Física, 2007.
Bibliografia: f. 68-70.

1. Física nuclear – Agronomia – Teses. 2. Metais – Erosão – Teses. 3. Espectrometria de raio gama – Teses. I. Appoloni, Carlos Roberto. II. Andrello, Avacir Casanova. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós – Graduação em Física. IV. Título.

CDU 539.14

LUIZ DIEGO MARESTONI

**ESTUDO DA REDISTRIBUIÇÃO DE SOLO SUPERFICIAL
EM ÁREAS CULTIVADAS E NÃO CULTIVADAS
UTILIZANDO O FALLOUT DO ⁷BE.**

BANCA EXAMINADORA

Carlos Roberto Ceppoloni

Marcio Cerruda Bocchi

Marcos de Castro Falleiros

Londrina, 22 de fevereiro de 2007.

DEDICO ESTE TRABALHO:

A meu Deus, que sempre me proporcionou energia e paz.

A meu filho, Murilo, pela alegria e a minha esposa, Fabiany, pelo carinho e incentivo.

A meus pais, Gilberto e Cida, pelo apoio e patrocínio aos estudos e à minha irmã, Thayse, pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **meu Deus** que me proporcionou saúde, inteligência, paciência, persistência e tolerância para que eu pudesse superar mais esta etapa de minha vida.

A meu filho **Murilo**, que foi motivo de grande alegria e incentivo para eu continuar crescendo sempre e me entretendo nos felizes finais de semana.

A minha esposa **Fabiany**, pela paciência, amor, apoio irrestrito aos meus estudos e por suportar a responsabilidade de cuidar sozinha de muitos afazeres durante o meio da semana.

Aos meus pais, **Gilberto e Cida**, por me trazer ao mundo e cuidar de mim como um pequeno presente de Deus. Agradeço pelo esforço, fazendo o possível e, na maioria das vezes, o impossível para que eu pudesse estudar, deixando de lado seus desejos pessoais para que eu pudesse realizar os meus. A minha irmã, **Thayse**, pelo incentivo aos estudos, e por seu esforço próprio que sempre admirarei.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto **Appoloni** pela orientação científica (I.C. e mestrado) durante 5 anos, e principalmente, pela amizade e ajuda nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. **Avacir** Casanova Andrello pela orientação do mestrado e pelo bom convívio durante tantos anos.

Aos amigos de Laboratório, **Rodrigo Bastos, Tonhão, Anderson, Leonardo, Fábio Melquiades, Fábio Lopes, Ricardo, Paulo Parreira, Viviane, Ademar, Wilson, Tiago, Jaquiel, Marcelo, Tannous, Melaine, Patrocínio, Filipe, Falleiros, Pedro e Otávio**, pelo ensinamento e amizade.

Ao Prof. Dr. **Cássio** Egidio Cavenaghi Prete pela atenção e disponibilidade quando requisitado.

A meus companheiros de república, **Leonardo, Paulo, Tiago e Evandro**, pela tolerância nos meus momentos de intransigência.

MARESTONI, Luiz Diego. **Estudo da redistribuição de solo superficial em áreas cultivadas e não cultivadas utilizando o Fallout do ^7Be** . 2007. 90f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

RESUMO

O monitoramento de fenômenos geológicos e hidrológicos apresenta grande interesse ambiental e econômico. Muitos radioisótopos, naturais e artificiais, têm sido usados para este propósito. Os mais utilizados são ^{137}Cs , ^{210}Pb não suportado e ^7Be . No presente trabalho o ^7Be foi usado para determinar a erosão em três áreas com diferentes configurações: uma com soja plantada no sentido do declive, uma com soja plantada perpendicular ao declive e uma sem plantio (pousio). O ^7Be é um radionuclídeo de origem cosmogênica, com meia vida de 53 dias, produzido por espalação de átomos de oxigênio e nitrogênio por raios cósmicos na troposfera e estratosfera. A deposição do ^7Be ocorre por deposição seca e úmida, sendo que a deposição úmida contribui com, aproximadamente, 95% do total. Isto pôde ser comprovado através das medidas do inventário de ^7Be , correlacionando com a precipitação pluviométrica que resultou em um bom ajuste linear. Foram utilizados 2 detectores de HPGGe: um com 66% e outro com 10% de eficiência relativa, ambos acoplados a eletrônica nuclear de espectrometria de raios gama padrão. As amostras de solo foram destorroadas, secadas e acondicionadas em béqueres Marinelli de 1 litro. A amostragem foi realizada em forma de grade, com 12 pontos em cada parcela e o solo foi coletado até a profundidade onde o ^7Be estava presente. Foi possível verificar que esta penetração no solo pode ser ajustada muito bem por uma função do tipo exponencial. A máxima penetração no solo nu sem erosão ficou em torno de 3 cm, ou seja, conclui-se que o ^7Be é adequado como traçador de erosão superficial de solo. Uma constante de fundamental importância para realização do trabalho, a constante de relaxação de massa h_0 , foi determinada como sendo $4,71 \pm 0,36$, resultado que concorda com outros trabalhos da literatura. Verificou-se que quando a soja foi plantada cortando o declive, ou seja, perpendicular ao sentido deste, a redistribuição de solo foi menor, fato este que agrega uma vantagem econômica grande devido à menor perda de nutrientes do solo. O solo sem nenhuma cobertura vegetal fica muito exposto aos fenômenos de erosão, pois não existe nenhuma barreira para conter o solo que flui no sentido do declive, tal fato foi confirmado neste trabalho, onde determinou-se que a área sem plantio apresentou a maior erosão de solo dentre as três áreas estudadas.

Palavras-chaves: Física nuclear. Agronomia. Metais. \x Erosão. Espectrometria de raio gama.

MARESTONI, Luiz Diego. **Superficial soil erosion assessment in agricultural land and bare land using ^7Be fallout.** 2007. 90f. Dissertation (Master in Physics) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

ABSTRACT

Geologic and hydrologic phenomenon monitoring presents great environmental and financial interest and several radioisotopes, natural and artificial, have been used for this purpose. The more used are ^{137}Cs , ^{210}Pb not supported and ^7Be . In the present work, ^7Be was used to determine the soil erosion in three areas: one with soy ploughed at the direction of the slope, one with it perpendicular to the slope and one in an area with bare soil. ^7Be is a cosmogenic radionuclide, with half-life of 53.3 days, produced by spallation of oxygen and nitrogen by cosmic rays in the troposphere and stratosphere. ^7Be deposition occurs by dry and wet deposition, although wet deposition contributed by 95%. This can be verified through the measures of the ^7Be inventory correlated with the precipitation, which resulted in a good linear adjustment. The experimental set up consisted of two HPGe detectors: one with 66% of relative efficiency and one with 10% of relative efficiency, both detectors coupled to standard gamma ray spectrometry nuclear electronic chain. Soil samples were packed in 1 liter Marinelli beakers. Sampling was accomplished until the depth where ^7Be was present and it was possible to verify that its penetration in the soils could be very well adjusted by an exponential type function. The maximum beryllium-7 penetration in the bare soil without sign of soil erosion was 3 cm, that is, beryllium-7 is a useful tool as tracer for superficial soil erosion determination. The constant of mass relaxation h_0 was determined as 4.71 ± 0.36 , result that is in agreement with other works in the international literature. It was verified that when the soy is ploughed perpendicular to the slope, the soil redistribution rate is smaller, resulting in economic advantage. The bare soil is very exposed to the erosion, because doesn't exist any barrier to contain the soil that flows at the direction of the slope, such fact was verified in this work, where it was determined that the bare soil area presented the largest soil erosion among the tree studied areas.

Keywords: Gammaray spectrometry. Nuclear physics. Metals \x Erosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Experimento realizado por Henri Becquerel.....	14
Figura 2 – Espectro da radiação eletromagnética.....	17
Figura 3 – Exemplo de transição gama em cascata.....	19
Figura 4 – Esquema de desexcitação nuclear do átomo de ^{137}Cs	20
Figura 5 – Representação esquemática da distribuição do momento das partículas beta	23
Figura 6 – Esquema de desexcitação do ^{40}K	25
Figura 7 – Esquema de movimentação de radionuclídeos no ar	34
Figura 8 – Radionuclídeos naturais e artificiais conhecidos	36
Figura 9 – Produção total de energia das armas nucleares nos testes de superfície e subterrâneos.....	38
Figura 10 – Esquema de desintegração do ^{137}Cs	38
Figura 11 – Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama.....	42
Figura 12 – Espectro gama característico de uma amostra ambiental analisada num detector de HPGe.....	43
Figura 13 – Ilustração comparativa das diferenças entre as energias de bandas de condução e valência de um isolante e um semicondutor	44
Figura 14 – Representação de como a energia é depositada no cristal de HPGe.....	45
Figura 15 – Esboço de dois cristais de HPGe, tipo-p e tipo-n.....	47
Figura 16 – Esboço de três formas de cristais de germânio utilizados em detectores.....	47
Figura 17 – Blindagens da Canberra (Modelo 747) e da Ortec (HPLBS1) com o dewar do detector	50
Figura 18 – Esboço de um béquer Marinelli	51
Figura 19 – Sistema metálico e prato raspador para amostragem em incrementos.....	52
Figura 20 – Prato raspador desenvolvido no LFNA/UEL.....	52
Figura 21 – Foto do prato raspador do LFNA/UEL	53
Figura 22 – Esboço das três áreas de estudo, dos pontos de amostragem e a orientação da plantação.....	60
Figura 23 – Foto da área de estudo sem plantio	61
Figura 24 – Foto da área de estudo com soja plantada no mesmo sentido do declive.....	61
Figura 25 – Foto da área de estudo com soja plantada perpendicular ao sentido do declive.	62
Figura 26 – Curva de Eficiência para ambos os detectores.....	68
Figura 27 – Validação da curva de eficiência obtida da amostra IAEA 327 soil.....	70

Figura 28 – Inventário de ^7Be associado com a precipitação mensal.....	72
Figura 29 – Ajuste linear entre a precipitação (mm) e inventário (Bq.kg^{-1})	73
Figura 30 – Perfis de distribuição de ^7Be no solo coletado na área de referência.....	75
Figura 31 – Ajuste dos pontos do perfil de ^7Be no solo referente à data 17/11/2005	76
Figura 32 – Ajuste dos pontos do perfil de ^7Be no solo referente à data de 15/03/2006	76
Figura 33 – Ajuste dos pontos do perfil de ^7Be no solo referente à data de 27/02/2006	77
Figura 34 – Pontos de menor altitude com acúmulo de solo (particulado fino).....	79
Figura 35 – Variação no inventário de ^7Be na área sem nenhum tipo de plantio.....	80
Figura 36 – Variação no inventário de ^7Be nas áreas com soja perpendicular ao sentido do declive.....	80
Figura 37 – Variação no inventário de ^7Be nas áreas de estudo com soja no mesmo sentido do declive.....	81
Figura 38 – Redeposição de solo na área de estudo sem nenhum tipo de plantio.....	82
Figura 39 – Redeposição de solo na área de estudo, soja plantada perpendicular ao sentido do declive.....	83
Figura 40 – Redeposição de solo na área de estudo com soja no mesmo sentido do plantio.	84

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.....	32
Tabela 6 – Dados da validação dos resultados utilizando amostra IAEA 327 soil	70
Tabela 7 – Atividade mínima detectável de ^7Be	71
Tabela 8 – Comparação dos resultados da profundidade de relaxação de massa.....	77
Tabela 9 – Propriedades físicas e químicas dos solos	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 RADIOATIVIDADE	14
2.1 ESTATÍSTICA DA DESEXCITAÇÃO E DESINTEGRAÇÃO NUCLEARES	15
2.2 FORMAS DE DESEXCITAÇÃO E DE DESINTEGRAÇÃO NUCLEARES	16
2.2.1 Desexcitação Gama	16
2.2.2 Desintegração Alfa	21
2.2.3 Desintegração Beta	21
2.3 RADIONUCLÍDEOS DAS SÉRIES NATURAIS	23
2.3.1 O Potássio-40 (^{40}K)	24
2.3.2 O Urânio (^{235}U e ^{238}U) e Tório (^{232}Th)	25
2.4 RADIONUCLÍDEOS COSMOGÊNICOS	30
2.4.1 Berílio-7 (^7Be)	32
2.4.2 Transporte de Radionuclídeos no Ar e do Ar para a Superfície da Terra.	34
2.5 RADIONUCLÍDEOS ARTIFICIAIS	35
2.5.1 Césio-137 (^{137}Cs)	37
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
4 EQUIPAMENTOS	41
4.1 SISTEMA DE ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA	41
4.1.1 Módulos Eletrônicos	41
4.1.2 Detector de HPGE	44
4.1.3 Blindagem	49
4.1.4 Béquer Marinelli	50
4.2 EQUIPAMENTO PARA AMOSTRAGEM	51
4.2.1 Prato raspador da IAEA	51
4.2.2 Prato Raspador Utilizado no Trabalho	52
5 MÉTODOS	54
5.1 DETERMINAÇÃO DA EROÇÃO	54
5.1.1 Métodos Convencionais	54

5.1.2 Método do ^7Be	56
5.1.2.1 Suposições para utilização do método do ^7Be	58
5.2 ÁREA DE AMOSTRAGEM.....	59
5.3 MÉTODO PARA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	62
5.4 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA.....	63
5.5 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE.....	63
5.5.1 Amostras Certificadas.....	64
5.5.2 Determinação da Curva de Eficiência do Detector.....	65
5.5.3 Validação da Metodologia.....	66
5.5.4 Limite Mínimo de Detecção.....	67
6 RESULTADOS E ANÁLISE.....	68
6.1 CURVA DE EFICIÊNCIA E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	68
6.2 ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL.....	71
6.3 INVENTÁRIO MENSAL.....	71
6.4 DISTRIBUIÇÃO VERTICAL E PROFUNDIDADE DE RELAXAÇÃO DE MASSA.....	74
6.5 DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL.....	78
7 CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo e a deposição de sedimentos são uns dos principais fatores que prejudicam o desenvolvimento sustentável da atividade agrícola em torno do mundo todo, visto que são os principais fatores de redução da fertilidade do solo, exigindo maiores investimentos para manter a mesma produtividade. Além destes agravantes, causa o assoreamento de reservatórios, rios e lagos, poluição do curso das águas com resíduos agrícolas absorvidos pelos sedimentos e eutrofização dos corpos d'água (IAEA, 2001). É estimado que a atividade humana tenha acelerado a erosão do solo em ~ 7 % das terras continentais (Lal, 1994; Aguilar, 1958). Em uma pesquisa realizada pela ISRIC/UNEP sobre a avaliação global da degradação de solo, é indicado que mais de um quarto dos solos cultiváveis do planeta tenham perdido uma substancial quantidade de sua fertilidade natural nos últimos 45 anos. O desmatamento e práticas agrícolas inadequadas são responsáveis por, aproximadamente, 30% da degradação destes solos. O custo econômico do impacto da erosão do solo “in site” e “on site” de terras agriculturáveis tem sido estimado em torno de US\$ 400 bilhões por ano (Zapata, 2003).

Ao longo dos últimos 50 anos, a erosão foi amplamente estudada no sentido de determinar suas causas e conseqüências. No entanto, o estudo da taxa de erosão é bastante complexo. O uso de técnicas convencionais para quantificação da taxa de erosão é bastante limitado e apresenta incertezas elevadas nos resultados obtidos, além do que, não permite determinar a redistribuição espacial do solo. A utilização da espectrometria de raios gama de radionuclídeos para determinação da taxa de erosão é bastante promissora, visto que o modelo de redistribuição de alguns radionuclídeos, tais como cézio-137 (^{137}Cs), chumbo-210 (^{210}Pb) e o berílio-7 (^7Be), reflete o modelo de redistribuição do solo, seu custo é baixo em relação às técnicas convencionais e os resultados são rápidos, possibilitando determinar a redistribuição espacial do solo.

O radionuclídeo mais utilizado é o ^{137}Cs . Pesquisas referentes a sua utilização estão bem estabelecidas (Ritchie and McHenry, 1990; Walling and Quine, 1992; Wallbrink and Murray, 1996; IAEA, 1998; Walling and He, 1998; 1999), no entanto, tal radionuclídeo permite determinar a erosão e a redistribuição de solos durante os últimos 45 anos. Tal fato pode ser vantajoso se considerado que a taxa de erosão tenha sido constante anualmente.

Pelo fato do ^{210}Pb ter meia vida de 22,26 anos e seu tempo de residência na atmosfera ser da ordem de uma semana, este tem sido usado para validar simulações de modelos globais de transporte e de tempo de residência de aerossóis na atmosfera. Além disso, o ^{210}Pb também tem sido aplicado na datação cronológica de sedimentos e na avaliação do processo erosivo em solos juntamente com o ^{137}Cs . Utilizando o ^{210}Pb pode-se determinar a taxa de erosão e redistribuição de solo durante os últimos 100 anos e, como o ^{137}Cs , também se torna vantajoso se a taxa de erosão for constante anualmente.

No entanto, com a utilização de tais radionuclídeos não podemos determinar a erosão durante um curto período. Tal estudo é possível com a utilização do ^7Be , devido a sua meia vida curta e a deposição aproximadamente constante durante o ano.

A espectrometria de raios gama é uma ferramenta poderosa para o monitoramento e pesquisa da radiação ambiental, visto que o raio gama é um tipo de radiação bastante penetrante. A vantagem de realização da espectrometria de raios gama é a possibilidade de realização de medidas posteriores em caso de dúvida em algum resultado, ou seja, as amostras de solo foram guardadas até realizarem-se as análises, em caso de dúvida pode-se obter uma nova medida da mesma amostra para certificação do resultado.

Como um dos grandes desafios da prática agrícola atual é conseguir minimizar os custos da produção e, desta forma, aumentar o lucro final, o estudo apresentado no presente trabalho torna-se bastante relevante, pois permite diferenciar quantitativa e qualitativamente a redistribuição de solo e o processo de erosão sob diferentes formas de plantio durante um curto período de tempo. Minimizando a erosão, a aplicação de fertilizantes e corretores de solo também é minimizada, diminuindo o custo final da produção.

2 RADIOATIVIDADE

Henri Becquerel, após expor uma chapa fotográfica a sulfato de urânio potássica em 1886, descobriu a radioatividade, sendo esta, parte natural do ambiente. Ao revelar a chapa fotográfica havia uma imagem forte e visível. Em sua experiência, Becquerel usou um esquema similar ao apresentado na Figura 1 para mostrar que a radiação que ele havia descoberto não poderia ser raios-X, descobertos em 1895 por Wilhelm Roentgen. Como os raios-X têm carga nula, eles não podem ser desviados por um campo magnético, sendo que a nova radiação que Becquerel havia descoberto era defletida pelo campo magnético, portanto possuía algum tipo de carga elétrica. Experimentos posteriores envolvendo vários pesquisadores demonstraram a existência de três classes de radiação emitida: a negativa, a positiva e a eletricamente neutra.

Radioatividade é um termo que foi introduzido pelo casal Curie quando começaram a investigar o fenômeno descoberto por Becquerel. Os Curies extraíram urânio de minérios e verificaram que o minério possuía maior atividade do que o urânio puro extraído, levando-os à descoberta dos radionuclídeos polônio e rádio.

Ernest Rutherford, em 1897, observou que amostras de minério de urânio e tório produziam continuamente dois tipos de partículas carregadas eletricamente, nomeando-as de alfa e beta. Qualquer material que emitia partículas alfa e beta era chamado de radioativo.

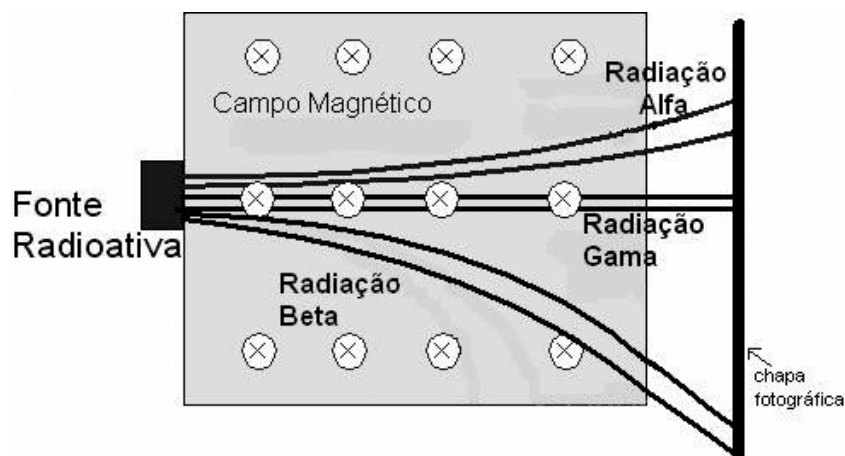


Figura 1 – Experimento realizado por Henri Becquerel para mostrar que a radiação descoberta não era raios-X. (Adaptada de http://www.physics.carleton.ca/~watson/410_notes/Modern_Physics/Gifs/Becquerel.gif)

A radioatividade ocorre espontaneamente devido à instabilidade do núcleo do átomo, que é devida ao desequilíbrio entre o número de prótons e nêutrons do núcleo. Núcleos atômicos instáveis possuem energia “excedente” e se desintegram para uma forma de núcleo mais estável do mesmo isótopo ou outro distinto.

Isótopos são átomos de elementos tendo o mesmo número atômico, mas com diferente número de nêutrons. O núcleo de um átomo é composto por Z prótons e N nêutrons. Costuma-se representar um núcleo usando a notação ${}^{Z+N}_Z X$, sendo X o símbolo do elemento químico representado. Isótopos possuem propriedades químicas semelhantes, mas propriedades físicas distintas.

2.1 ESTATÍSTICA DA DESEXCITAÇÃO E DESINTEGRAÇÃO NUCLEARES

Como a maioria dos fenômenos físicos, os eventos de desexcitação e a desintegração radioativa têm comportamento de natureza estatística. Cada desintegração ou desexcitação atômica ocorre completamente independente de todos os outros eventos nucleares, o intervalo de tempo entre os eventos não é constante.

Para um grande número de eventos aleatórios a frequência da desexcitação ou desintegração radioativa é dada pela distribuição de Poisson: se \bar{n} é a taxa média do evento, a probabilidade, P , que o número de núcleo atômico, n , irá decair ou desexcitar em um dado intervalo de tempo, t , é dado por:

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \exp(-\bar{n}) \quad (1)$$

Na distribuição de Poisson ocorre que a variância σ^2 da distribuição é igual ao valor médio, e σ é o desvio padrão. O intervalo de $\pm 1\sigma$ em torno da média abrange 68,3% da distribuição, $\pm 2\sigma$ abrange 95,5% da distribuição e $\pm 3\sigma$ abrange 99,7% da distribuição. A emissão de partículas e raios gama na desexcitação e desintegração radioativa é proporcional ao número de átomos que se desexcitam ou desintegram, e o desvio padrão pode ser usado para estimar a taxa de desvios e erros das medidas radiométricas. Se N contagens são medidas em um tempo t , então o desvio padrão das contagens medidas é:

$$\sigma(N) = \sqrt{N} \quad (2)$$

O desvio padrão fracionado de uma contagem (erro da medida de N) é:

$$\frac{\sigma(N)}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

Para uma taxa de contagem $n = N/t$ (cont/s), o desvio padrão é dado por:

$$\sigma(n) = \frac{\sqrt{N}}{t} = \sqrt{\frac{n}{t}}$$

e o desvio padrão fracionado da taxa de contagem n (erro da medida de n) é:

$$\frac{\sigma(n)}{n} = \frac{1}{\sqrt{nt}} \quad (4)$$

As equações (3) e (4) indicam que a precisão da medida radiométrica pode ser melhorada por i) aumento no número de contagens, N , ii) aumento na taxa de contagem, n , e iii) aumento do tempo de contagem, t . Isto pode ser realizado com o uso de equipamentos mais sensíveis, melhorando a geometria das medidas ou estendendo o tempo de contagem. Na prática, erros são também afetados pela radiação de fundo. Para minimizar tal influência utiliza-se uma blindagem ao redor do detector.

2.2 FORMAS DE DESEXCITAÇÃO E DE DESINTEGRAÇÃO NUCLEARES

Na desintegração nuclear o processo desenrola-se espontaneamente e exclusivamente no núcleo do átomo. Os tipos de radiação emitidos são dois: *radiações corpusculares*; elétrons ou beta menos (e^- ou β^-), pósitrons ou beta mais (e^+ ou β^+), nêutrons (n), prótons (p), partículas alfa (α), íons pesados e *radiações eletromagnéticas*; radiação gama, no processo subsequente de desexcitação do núcleo residual.

2.2.1 Desexcitação Gama

Quase todos os estados excitados dos núcleos 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 resulta na emissão de radiação gama, da mesma forma que a desexcitação atômica resulta na emissão de fótons de comprimento de onda desde o ultravioleta até o infravermelho. A diferença entre

a radiação gama e os fótons atômicos é a energia ou comprimento de onda entre eles, e decorre de que a separação dos níveis nucleares é da ordem de MeV, enquanto no caso dos níveis atômicos é da ordem de grandeza de eV até keV.

Qualquer radiação eletromagnética, não importando em que posição do espectro se encontre, pode ser caracterizada pelo comprimento de onda (λ), frequência (ν) ou energia equivalente (E).

$$\begin{aligned} c &= \nu \cdot \lambda \\ E &= h \cdot \nu \end{aligned} \quad (5)$$

onde:

c = velocidade da radiação eletromagnética

h = constante de Planck

Na figura 2 é mostrado um espectro contendo as principais formas de radiação eletromagnética existentes.

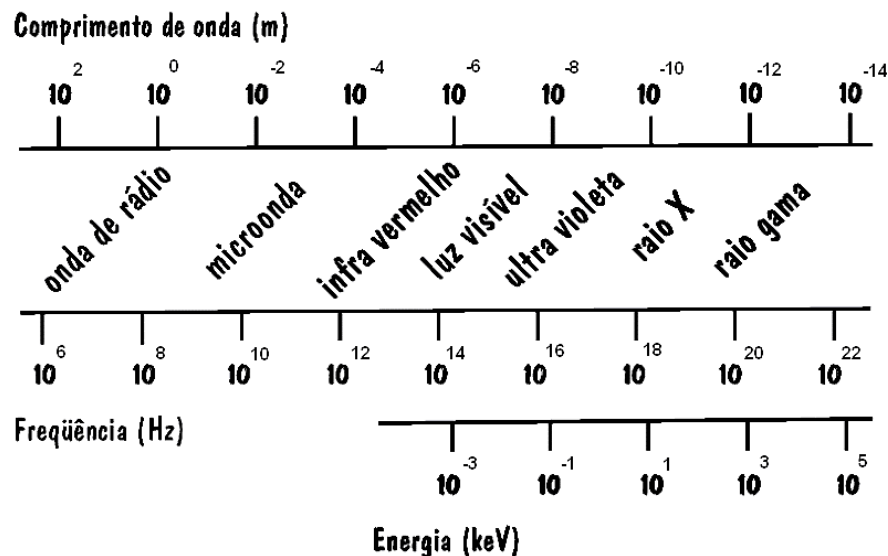


Figura 2 – Espectro da radiação eletromagnética em relação ao comprimento de onda, frequência e energia.

A radiação gama (γ) consiste na liberação de energia em excesso presente no núcleo de um átomo que, como mostrado teoricamente na mecânica quântica e verificado experimentalmente, é feita na forma de radiação eletromagnética com energia definida.

A emissão de radiação gama normalmente segue uma desintegração β ou α , visto que o núcleo, após uma desintegração, é em geral deixado em um estado excitado e

passa para um estado menos excitado emitindo um ou mais raios γ até atingir o estado fundamental.

De modo geral, a radiação eletromagnética do núcleo é separada em tipos distintos chamados de radiação multipolar. Esta separação é feita de acordo com a quantidade de momento angular L carregado por cada raio γ emitido, ou seja, um raio γ com uma certa energia pode ser emitido com diferentes momentos angulares. A probabilidade total de emissão é a soma das probabilidades parciais de emissão para cada tipo de raio γ (raios γ com diferentes momentos angulares), sendo que o primeiro termo não nulo é o que predomina, pois tem a maior probabilidade de ocorrer. Os fótons tem somente valores inteiros de momento angular L dado pela relação $|J_i - J_f| \leq L \leq |J_i + J_f|$ onde J_i e J_f são os números quânticos de spins do estado inicial e final, respectivamente, do núcleo emissor. Entretanto, transições gama entre os estados $J_i = 0$ e $J_f = 0$ são proibidas como consequência do fato que as ondas eletromagnéticas serem de natureza transversal.

As radiações multipolares são caracterizadas pela sua ordem dada por 2^L . A ordem representa o tipo de multipolo que é o emissor da radiação eletromagnética. Para cada valor de momento angular L , existem duas classes de radiação, a radiação do tipo elétrica (E) e a radiação do tipo magnética (M). Estas radiações diferem pelas suas paridades. A radiação elétrica tem paridade par quando o momento angular é par, tem paridade ímpar quando o momento angular é ímpar. A radiação magnética tem paridade ímpar quando o momento angular é par, e tem paridade par quando o momento angular é ímpar. A paridade para a radiação elétrica é dada por $(-1)^L$ e para a radiação magnética é dada por $-(-1)^L$ ou $(-1)^{L+1}$, onde +1 significa paridade par e -1 significa paridade ímpar.

Alguns radionuclídeos podem ter mais que um modo de desintegração. Mas, independentemente do tipo de radiação, a meia vida observada é sempre a mesma. Desintegração radioativa freqüentemente também ocorre em série com filhos radioativos que terminam em um isótopo estável. Dado um elemento pai, os filhos da série tendem a estabelecer um equilíbrio radioativo quando a meia vida do núcleo pai for muito maior que a do núcleo filho (equilíbrio secular). Assim, a atividade do pai e de todos os filhos tem que ser idênticas caso exista um equilíbrio radioativo. Desta forma podemos determinar a atividade do pai medindo a atividade de qualquer filho. Na figura 3 é mostrado um esquema de desintegração em que existe mais de uma maneira de o núcleo desexcitar até o estado fundamental. Exemplos de séries radioativas mais comuns são as séries dos radionuclídeos naturais: ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th .

No entanto, a estabilidade nuclear não é alcançada apenas com a emissão de radiação gama, pois esta somente libera o excesso de energia, o que não fornece estabilidade ao núcleo. A estabilidade de um núcleo só é alcançada variando a proporção entre nêutrons e prótons. Se um núcleo possui excesso de nêutrons ou de prótons estará sujeito a desintegração radioativa por emissão de partículas α ou de partículas β de modo a alcançar a condição de maior estabilidade.

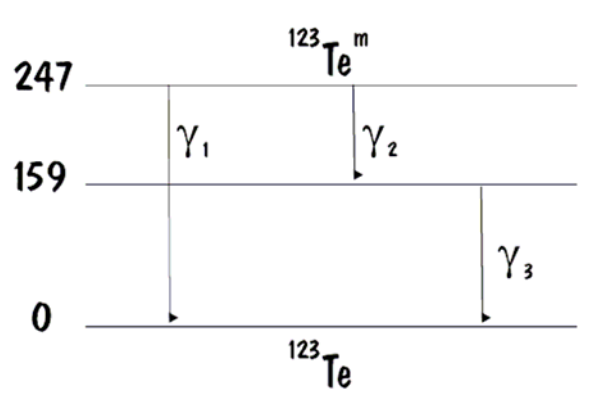


Figura 3 – Exemplo de transição gama em cascata.

Caso o núcleo excitado possua um excesso de nêutrons, o processo para estabilizá-lo será um desintegração do tipo β^- . No caso de haver excesso de prótons poderia haver três processos para alcançar a estabilidade, são eles: desintegração β^+ , captura eletrônica e desintegração alfa (α) para núcleos pesados. Na figura 4 é mostrado um exemplo de desexcitação nuclear completa do átomo de ^{137}Cs , onde existe duas formas de desexcitação nuclear: β^- direto para o estado fundamental e β^- gerando um átomo de ^{137m}Ba no estado excitado que por sua vez emite um raio gama com energia de 661,6 keV. A ocorrência mais comum de emissão de raios γ é em desintegração radioativa, após a emissão de partículas α ou β .

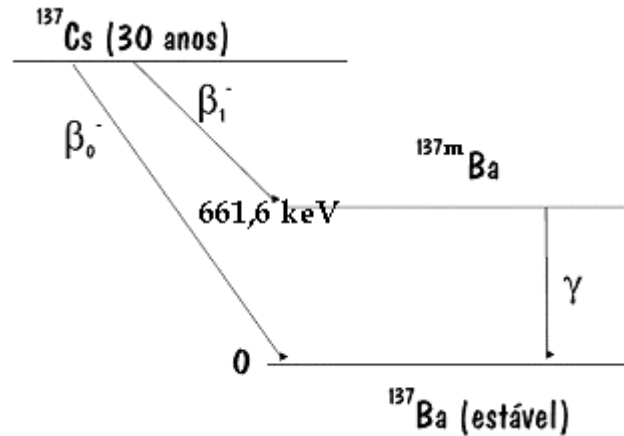


Figura 4 – Esquema de desexcitação nuclear do átomo de ^{137}Cs .(adaptado de web.cena.usp.br/apostilas/Elisabete/aula_gama.pdf)

No entanto, no caso deste trabalho, teve-se que determinar a correção da atividade em várias amostras: para que fosse possível calcular a atividade de amostras que foram certificadas anos antes e para corrigir a atividade de ^7Be , possibilitando comparar com amostras padrão que foram coletadas em datas diferentes. Para corrigir as atividades utilizou-se a Lei da Desintegração Radioativa, onde, se no tempo t existem $N(t)$ núcleos que ainda não decaíram, então, o número ($-dN$) de núcleos de decaem durante o intervalo de tempo entre t e $t+dt$ deve ser proporcional a N e também a dt , de modo que temos:

$$\frac{-dN}{N} = \lambda dt \quad (6)$$

Onde λ é a constante de desintegração. Integrando a equação (6) obtém-se:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Outra característica importante de um radionuclídeo é sua meia vida, definida como o tempo durante o qual a amostra do radionuclídeo é reduzida à metade do seu valor inicial. Desta forma com $N(t) = N_0/2$ em (7) determina-se:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (8)$$

Da equação (7) substituída em (6), obtém-se a expressão para a taxa de contagem:

$$\left(-\frac{dN}{dt}\right) = \left(-\frac{dN}{dt}\right)_{t=0} \cdot e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Em termos da atividade, tem-se:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (10)$$

2.2.2 Desintegração Alfa

As partículas alfa (α) são núcleos de átomos de hélio. A distância que uma partícula alfa percorre antes de parar é chamada de alcance. Num dado meio, partículas alfa de igual energia têm o mesmo alcance. Portanto, aumentando-se a energia das partículas alfas, aumenta-se o alcance para um dado meio, por outro lado, fixando-se a energia da partícula alfa, o alcance diminui se a densidade do meio aumentar. O alcance das partículas alfa é muito pequeno, ou seja, pouco penetrante, assim elas são facilmente blindadas (Appoloni, 2006).

Devido ao valor alto da energia de ligação da partícula alfa (28,3 MeV) a emissão espontânea alfa torna-se possível para o estado fundamental para núcleos com número de massa maior ou da ordem de 150. Contudo, para que tal emissão seja efetiva, a partícula alfa precisa vencer a barreira Coulombiana criada pelo núcleo residual.

Após a desintegração, o núcleo residual terá uma massa quatro unidades menor e uma carga duas unidades menor daquelas do núcleo original. A mudança no número de prótons impõe que o elemento filho é distinto do pai, processo este que denomina-se transmutação. A equação 11 mostra um desintegração alfa de um elemento genérico X (A, Z).



Quando ocorre desintegração alfa em um núcleo existe liberação de energia. Medidas cuidadosas mostram que a soma das massas do núcleo filho e a da partícula alfa é ligeiramente menor que a massa do núcleo pai. A relação de Einstein, $E = m.c^2$, explica o ocorrido, mostrando que a diferença de massa no processo é convertida em energia cinética dos produtos da reação.

2.2.3 Desintegração Beta

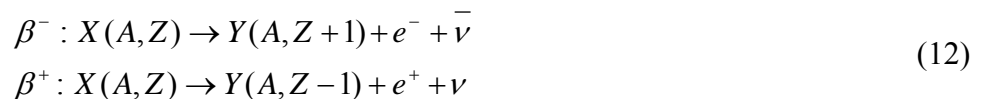
Partículas beta são partículas carregadas emitidas pelo núcleo, em módulo com a mesma carga e massa de um elétron. Como a massa do elétron é uma pequena fração da massa do núcleo, então a massa é alterada por uma quantidade muito pequena. Visto que o núcleo não possui elétrons, seu número de massa não será alterado durante a desintegração beta.

As partículas beta podem ser elétrons ou pósitrons e são muito mais penetrantes que as partículas alfa. Ao passar por um meio material a partícula beta também perde energia ionizando os átomos que encontra no caminho. A blindagem se torna suficiente com a utilização de películas de plástico ou alumínio. A densidade de ionização provocada é muito menor que as partículas alfa e, com a mesma energia inicial, seus percursos são muito maiores que o das partículas alfa.

O tratamento estatístico do processo de perda de energia é extremamente complexo devido à trajetória ser tortuosa em decorrência de colisões que ocorrem durante o percurso e a pequena massa da partícula. Essas colisões (excitação ou ionização) podem reduzir a energia da partícula beta a zero em uma curta distância ou em uma distância correspondente ao máximo de penetração.

Durante sua trajetória pode ocorrer o fenômeno de “Bremsstrahlung”, que aumenta com a energia da partícula beta e com o número atômico do absorvente. Quando a partícula beta colide com átomos do material por onde está atravessando, a energia perdida é emitida e forma um espectro contínuo de radiação eletromagnética denominado Bremsstrahlung.

Partículas beta de um mesmo núcleo são emitidas com energias variáveis de espectro contínuo, para cada radionuclídeo e, o restante da energia é carregada com os neutrinos. A equação 12 mostra as duas formas de desintegração beta, β^+ e β^- , para um elemento genérico X (A, Z).



Na figura 5 é mostrada a distribuição dos momentos das partículas beta para um dado emissor. Se fizermos uma análise desta distribuição, veremos que existe um certo número de linhas estreitas, aparentemente homogêneas, superpostas a uma distribuição contínua com um limite superior dado. Essas linhas são chamadas linhas de conversão interna e estão associadas com a emissão de radiação gama e não com o processo em si de emissão beta. Em geral estas linhas não aparecem se a fonte não emitir raios gama. A conversão interna é um processo alternativo de desexcitação do núcleo.

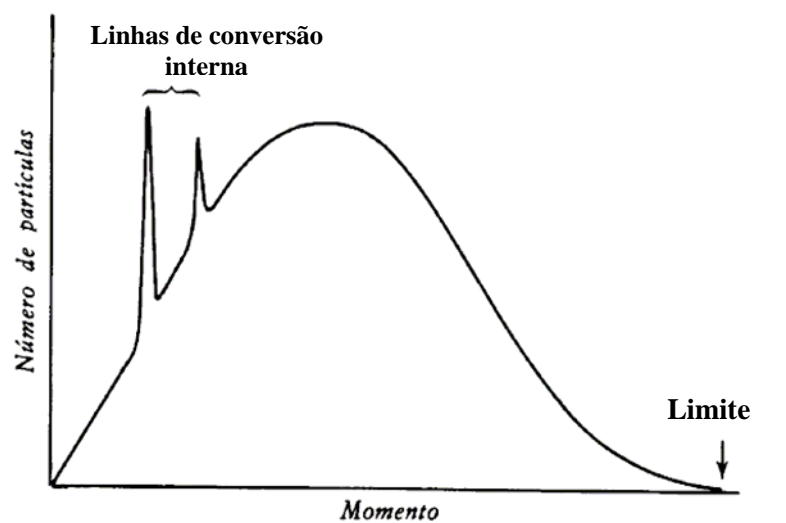


Figura 5 – Representação esquemática da distribuição do momento das partículas beta emitidas por uma fonte radioativa. (adaptada de Appoloni, 2006)

O nome desintegração beta também é aplicado à captura pelo núcleo de um elétron orbital, no entanto, neste caso, o processo é denominado captura eletrônica na desintegração beta. A captura eletrônica é o processo pelo qual um próton do núcleo captura um elétron da camada K ou L, sendo que a captura de um elétron da camada K tem uma maior probabilidade de ocorrer devido ao fato desta camada estar mais próxima do núcleo, processo este denominado de captura K. O resultado é a substituição de um próton do núcleo por um nêutron:



A captura eletrônica é seguida pela emissão de radiação eletromagnética pelo núcleo filho. O efeito da captura eletrônica sobre o núcleo é idêntico ao efeito produzido pela emissão β^+ .

2.3 RADIONUCLÍDEOS DAS SÉRIES NATURAIS

Teoricamente, as estrelas são os possíveis locais de desenvolvimento dos radionuclídeos que compõem as seres naturais. No processo de formação, a maioria dos núcleos dos elementos químicos é instável. Em um pequeno intervalo de tempo, a maior parte destes

decaem e se tornam estáveis por possuir uma meia vida muito pequena. No entanto, existem radionuclídeos, tais como ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{40}K , que possuem meia vida da ordem da idade da Terra, e podem ser encontrados, juntamente com seus filhos da 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.

Enquanto muitos radionuclídeos ocorrem naturalmente tendo isótopos radiativos, somente o potássio e as séries do urânio e tório, têm radioisótopos que produzem raios gama de energia e intensidade suficiente para ser medida por um espectrômetro de raios gama. Isto se deve ao fato de que eles são relativamente abundantes na natureza. A abundância média destes radionuclídeos na crosta terrestre citada na literatura estão em um intervalo de 2-2,5% para o potássio, $2 \cdot 10^{-4}$ - $3 \cdot 10^{-4}$ % para o urânio e $8 \cdot 10^{-4}$ - $12 \cdot 10^{-4}$ % para o tório.

2.3.1 O Potássio-40 (^{40}K)

Existem vários radionuclídeos naturais que ocorrem isoladamente, ou seja, sem pertencer a nenhuma cadeia radioativa. No entanto, do ponto de vista biológico-ambiental, o ^{40}K é o mais importante radionuclídeo, o segundo em importância seria o ^{87}Rb . Dos três isótopos naturais do potássio, o ^{40}K é o único radioativo, com meia vida de $1,28 \times 10^9$ anos e uma abundância isotópica de 0,0118%, que resulta numa atividade específica de 31,4 Bq/g.

O ^{40}K decai para o ^{40}Ca , com 89% de probabilidade, por emissão beta menos com energia de 1314 keV. Com exceção de uma pequena fração ($1 \times 10^{-3}\%$) que decai por captura eletrônica, os 11% restantes do ^{40}K decai por emissão beta mais para o ^{40}Ar num estado excitado. Para desexcitar, ocorre a emissão de um raio gama característico de 1460 keV, muito útil para identificação e quantificação do ^{40}K por espectrometria de raios gama, além de fornecer um excelente ponto de calibração, uma vez que o potássio está presente em quase todas as amostras ambientais. O esquema da desexcitação gama do ^{40}K é mostrado na figura 6.

O potássio é distribuído em toda a crosta terrestre com concentrações variando de 0,1 % em pedras calcárias até mais de 4% em alguns granitos. Entretanto, com a

intensa aplicação de fertilizantes devido à atividade agrícola, a concentração de potássio no solo tem sido alterada. Como consequência, o conteúdo de potássio tem aumentado de uma ordem de magnitude em solos sob cultivo há 20 anos (Klement, 1982). O potássio, e então o ^{40}K , é encontrado em todos os sistemas biológicos. Um homem de 70 kg contém em torno de 140 g de potássio, principalmente nos músculos, o que corresponde a 4,4 kBq de ^{40}K no corpo (ICRP, 1976).

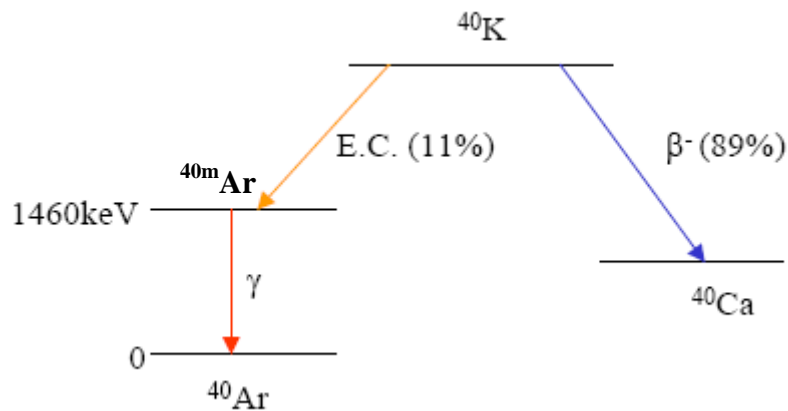


Figura 6 – Esquema de desexcitação do ^{40}K .

2.3.2 O Urânio (^{235}U e ^{238}U) e Tório (^{232}Th)

O urânio é um elemento metálico radioativo fraco, denso, existe naturalmente no ambiente e é encontrado na maioria dos ambientes naturais. Quando a Terra foi formada, há aproximadamente 4,5 bilhões de anos, existiam vários elementos que já estavam presentes em sua composição. Se um destes elementos é radioativo, então é denominado de radionuclídeo primordial. A partir de sua criação, os radionuclídeos primordiais estão sofrendo desintegração radioativa e somente permanecem presentes atualmente os que contêm meia vida maior do que 100 milhões de anos. Caso a meia vida seja menor que esta, encontram-se somente os filhos destes. Exemplos de radionuclídeos primordiais são o ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th .

Os isótopos radioativos pesados que ocorrem naturalmente 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.

$$A = 4n + m \quad (8)$$

onde A é o número de massa, n é o maior inteiro da divisão de A por 4 e m é o resto da divisão. Desse modo, existem quatro possíveis séries: $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ e $4n + 3$. Como a desintegração radioativa dos núcleos pesados é predominantemente por emissão alfa, que resulta na redução do número de massa de quatro unidades, ou por emissão beta que não afeta o número de massa, uma série pode somente ter radionuclídeos de um dos quatro possíveis tipos.

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 e encabeçada pelo plutônio 241 (^{241}Pu), não é mais observada devido a todos os membros desta série terem meia vida no mínimo três ordens de grandeza menor do que a idade da Terra. A única exceção é o produto final da série, que possui meia vida muito longa e é praticamente estável, o bismuto 209 (^{209}Bi). A série do netúnio está mostrada na tabela 1.

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. Um exemplo fácil de se entender é quando o rádio 226 (^{226}Ra) decai pela emissão de uma partícula alfa para o radônio 222 (^{222}Rn). Este filho, radônio, é um gás nobre e escapa facilmente para a atmosfera, não sendo encontrado na proporção correta onde os seus pais estão. As séries de desintegração do urânio (^{238}U e ^{235}U) são mostradas nas tabelas 2 e 3.

O Tório ocorre naturalmente com o radioisótopo ^{232}Th que tem como produto final da série o radionuclídeo estável ^{208}Pb . A meia vida do ^{232}Th é $1,405 \times 10^{10}$ anos e sua série é mostrada na tabela 4. Nem o ^{238}U nem o ^{232}Th emitem raios gama, as emissões são de seus filhos radioativos e estes são usados para estimar suas concentrações.

Tabela 1 – Série de desintegração do Netúnio (Kathren, 1998)

Radioisótopo	Meia vida
^{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

Tabela 2 – Série de Desintegração do ^{235}U (IAEA,2003)

Radioisótopo	Meia Vida
^{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
^{227}Ac 98.6% → ^{227}Th 1.4% → ^{223}Fr	18,2 dias 22 minutos
^{223}Ra	11,43 dias
^{219}Rn	4 segundos
^{215}Po	1,78 milisegundos
^{211}Pb	36,1 minutos
^{211}Bi	2,15 minutos
^{211}Bi 0.28% → ^{211}Po 99.7% → ^{207}Tl	0,52 segundos 4,79 minutos
^{207}Pb	Estável

Tabela 3 – Série de desintegração do ^{238}U (IAEA,2003)

Radioisótopo	Meia Vida
^{238}U	$4,468 \times 10^9$ anos
^{234}Th	24,1 dias
^{234}Pa	1,17 minutos
^{234}Pa 99,8% → ^{234}U 0,13% → ^{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% → ^{214}Pb 0,02% → ^{218}At	$26,8$ minutos 2 segundos
^{214}Bi	19,7 minutos
^{214}Bi 99,98% → ^{214}Po 0,02% → ^{210}Tl	164 microsegundos 1,3 minutos
^{210}Pb	21 anos
^{210}Bi	5,01 dias
^{210}Po	138,4 dias
^{206}Pb	Estável

Tabela 4 – Série de desintegração do ^{232}Th (IAEA,2003)

Radioisótopo	Meia Vida
^{232}Th	$1,405 \times 10^{10}$ anos
↓	
^{228}Ra	6,7 anos
↓	
^{228}Ac	6,13 horas
↓	
^{228}Th	1,91 anos
↓	
^{224}Ra	3,64 dias
↓	
^{220}Rn	55 segundos
↓	
^{216}Po	0,15 segundos
↓	
^{212}Pb	10,64 horas
↓	
^{212}Bi	60,6 minutos
↙ 64.06% ↘	
^{212}Po ^{208}Tl	304 nanosegundos 3,1 minutos
↘ ↙	
^{208}Pb	Estável

2.4 RADIONUCLÍDEOS COSMOGÊNICOS

Raios cósmicos e partículas energéticas solares podem ser formados por elétrons, prótons e núcleos complexos de alta energia. Sua produção pode se dar em uma diversidade de ambientes astronômicos. Essas partículas viajam através do universo e muitas delas acabam alcançando nosso planeta. Quando tais partículas atingem a atmosfera terrestre, outras partículas, diferentes das incidentes, são produzidas. Essas partículas então são freadas por colisões com outros átomos na atmosfera. A maioria dos raios cósmicos é muito energética podendo facilmente atravessar vários centímetros de chumbo. No entanto, nossa atmosfera é uma proteção natural eficiente.

As interações de raios cósmicos galácticos e partículas enérgicas solares de alta energia com átomos da atmosfera geram elementos químicos que podem ser radioativos ou não. Tais radionuclídeos são formados continuamente e possuem baixo número atômico.

Tais interações ocorrem através das reações de espalação e captura de nêutron, sendo que a maior parte dos radionuclídeos cosmogênicos são produzidos por reação de espalação. As partículas de alta energia devem apresentar um limiar ao redor de 50 MeV para ocorrência da reação, embora para algumas reações o limiar seja em torno de centenas de MeV. As reações de nêutrons estão envolvidas na produção de dois importantes radionuclídeos cosmogênicos, o ^{14}C pela reação de (n, p) no ^{14}N , e ^{81}Kr pela reação (n, γ) no ^{80}Kr . Além dos radionuclídeos cosmogênicos produzidos das reações citadas acima, existe uma pequena quantia de radionuclídeos cosmogênicos que é adicionada ao ambiente terrestre por poeira do espaço e meteoritos (Kathren, 1998).

Durante aproximadamente os últimos 1000 anos, a produção de radionuclídeos cosmogênicos tem se mantido constante. No entanto, a produção varia consideravelmente com a latitude e é significativamente maior em elevadas altitudes devido a menor camada de atmosfera. Os radionuclídeos cosmogênicos têm meia vida variando de dias até milhões de anos e são tipicamente radionuclídeos de baixo número atômico, como apresentado na Tabela 5.

Os radionuclídeos cosmogênicos produzidos na estratosfera tem um tempo de residência em torno de um ano e são transferidos para a troposfera; o tempo de residência na troposfera é em torno de seis semanas. A transferência para a superfície terrestre é realizada pela deposição gravitacional e pelos processos de precipitação. As variações sazonais e diárias das concentrações no ar são típicas e podem ser alteradas diversas ordens de magnitude no curso do ano. O processo de deposição é alterado pela altitude, com as condições atmosféricas e com o tempo do processo, resultando numa considerável variação na concentração durante o ano.

Dois radionuclídeos cosmogênicos são de particular importância do ponto de vista biológico: primeiramente o trítio (^3H), que é um radioisótopo do hidrogênio, com uma meia vida de 12,3 anos. É rapidamente oxidado ou trocado com o hidrogênio na atmosfera formando água tritiada, que cai a terra pela precipitação. Por ser um isótopo do hidrogênio, encontra-se em todas os organismos vivos, cuja origem é proveniente da água tritiada.

O segundo é o ^{14}C , produzido exclusivamente pela reação (n, p) no ^{14}N , que primariamente ocorre na estratosfera. Após a produção, o ^{14}C é oxidado, primeiro em ^{14}CO e

então em $^{14}\text{CO}_2$, num intervalo que leva dias ou até semanas pelas reações com radicais OH. A taxa de produção é razoavelmente variável, e está ligada à taxa de fluxo de raios cósmicos e ao espectro de energia dos raios cósmicos, tendo uma média de $1,4 \times 10^{16} \text{ Bq.ano}^{-1}$, com um inventário atmosférico total de ^{14}C produzido cosmogenicamente de $1,4 \times 10^{18} \text{ Bq}$.

O ^{14}C tem meia vida de 5760 anos, o inventário global do ^{14}C é estimado em $1,15 \times 10^{19} \text{ Bq}$ correspondendo a 68.000 kg, dos quais 94% se encontra nos oceanos, 4% nos solos e 2% na atmosfera (Kathren, 1998). O ciclo do carbono é quem determina a biodinâmica do ^{14}C , no qual o carbono cosmogênico é oxidado em dióxido de carbono e adquirido pela planta através da fotossíntese, em seguida esta planta é ingerida pelos animais. O carbono volta à atmosfera não somente pela evaporação, mas por combustão de fósseis, por atividades vulcânicas e intemperismo.

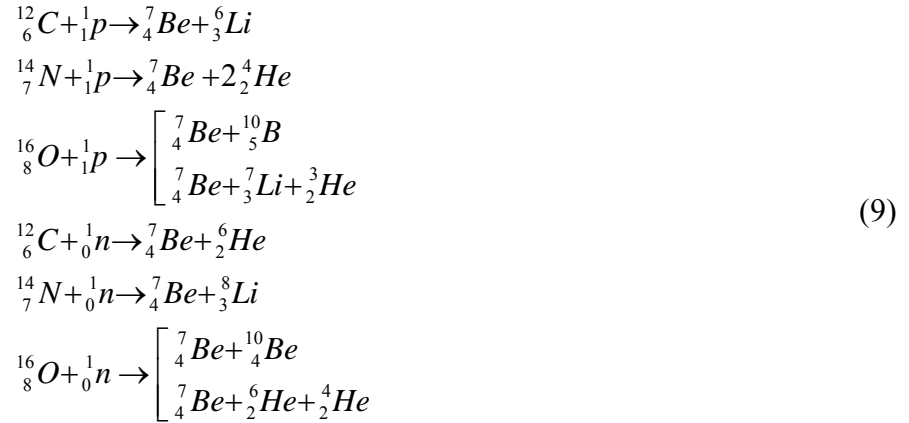
Tabela 5 – Principais Radionuclídeos Cosmogênicos (Kathren, 1998)

Isótopo	Meia - Vida	Taxa de Produção (átomo. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Inventário Global (kg)	Concentração no ar (Bq.m^{-3})
^3H	12,26 anos	0,25	3,5	0,167
^7Be	53,3 dias	0,08	0,0032	0,0017
^{10}Be	$2,5 \times 10^6$ anos	0,05	$3,9 \times 10^5$	10^{-7}
^{14}C	5760 anos	2,5	$6,8 \times 10^4$	0,067
^{22}Na	2,6 anos	$8,6 \times 10^{-5}$	0,0019	$1,7 \times 10^{-6}$
^{26}Al	$7,4 \times 10^5$ anos	$1,4 \times 10^{-5}$	1000	-
^{32}Si	280 anos	$1,6 \times 10^{-4}$	1,4	$3,3 \times 10^{-8}$
^{32}P	14,3 dias	$8,1 \times 10^{-4}$	0,0004	0,00033
^{33}P	24,4 dias	$6,8 \times 10^{-4}$	0,0006	0,00025
^{35}S	87,9 dias	0,0014	0,0045	0,00025
^{36}Cl	$3,8 \times 10^5$ anos	0,0011	$1,4 \times 10^4$	5×10^{-10}
^{39}Ar	270 anos	0,0056	23	-
^{81}Kr	$2,1 \times 10^5$ anos	10^{-6}	16,2	-

2.4.1 Berílio-7 (^7Be)

O ^7Be 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). 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):



Dois terços do ${}^7\text{Be}$ é formado na estratosfera e somente um terço na troposfera. O tempo de residência deste radionuclídeo 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. A reação nuclear produz BeO e $\text{Be}(\text{OH})_2$ que é rapidamente ligado a aerossóis atmosféricos.

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). 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. (Feely, 1989).

O ${}^7\text{Be}$ é um núcleo radioativo leve que decai para o ${}^7\text{Li}$ pela captura de um elétron orbital da camada mais interna da eletrosfera (camada K), com meia vida de 53,3 dias, e que pode ser detectado por espectrometria de raios 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, aprisionamento 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*, que são detalhados a seguir. Na forma iônica ($^7\text{Be}^{+2}$), o berílio 7 é rápida e firmemente fixado pela superfície do solo, não ultrapassando os primeiros 3 cm da superfície. Desta forma, foi assumido que toda a deposição de ^7Be é devida à precipitação úmida. A função que ajusta o perfil de penetração de ^7Be no solo é do tipo exponencial.

2.4.2 Transporte de Radionuclídeos no Ar e do Ar para a Superfície da Terra

Materiais radioativos na forma de gases ou partículas podem ser liberados no ar, a deposição pode ocorrer em um local distante devido aos processos de transporte, tais como vento e a nuvem. A relação entre a concentração de radionuclídeos no ar e depositados na superfície da terra depende do transporte atmosférico, difusão e processos de deposição que afetam o transporte de radionuclídeos do ponto onde se encontram para o local de exposição. Tais fenômenos são esquematizados na figura 7.

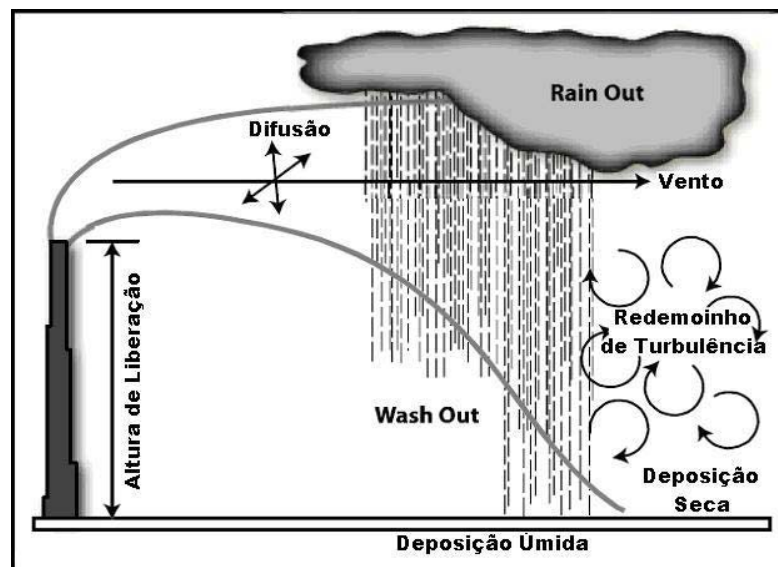


Figura 7 – Esquema de movimentação de radionuclídeos no ar (adaptado de Till , 1983).

Os fenômenos de vento e difusão juntos são denominados fenômenos de dispersão, tais fenômenos ocorrem devido a diferenças de condição atmosférica entre duas regiões. Existem duas principais causas dos redemoinhos de turbulência: turbulência mecânica causada por efeitos na superfície da Terra e turbulências térmicas, causadas por aquecimento ou resfriamento da superfície da Terra.

Como já mencionado anteriormente, os processos de deposição se dão por deposição seca e úmida. O processo de deposição úmida inclui dois outros processos: *rainout* e *washout*. *Rainout* é um processo que ocorre dentro das nuvens. A gota de chuva é formada ao redor do particulado e juntos eles são removidos da nuvem durante a precipitação. *Washout* ocorre abaixo da camada da nuvem. Durante a descida, a água da chuva entra em contato com o particulado, lavando-os para a superfície da terra. O processo de deposição seca inclui a remoção do particulado devido a ação gravitacional.

2.5 RADIONUCLÍDEOS ARTIFICIAIS

A partir das pesquisas de Jean Frederic Joliot (1900 – 1958) e Irene Curie Joliot (1897 – 1956), em 1934, descobriu-se que alguns radionuclídeos podiam ser produzidos artificialmente através do bombardeamento de folhas de alumínio e boro por partículas alfa. O bombardeamento do alumínio pelas partículas alfa produziu fósforo radioativo, até então não conhecido naturalmente na Terra. O fósforo radioativo decai com uma meia vida de 3 minutos para um isótopo estável do silício e o resultado foi confirmado por identificação química.

Desta forma, iniciou-se uma nova etapa para a física nuclear. Os radionuclídeos artificiais podem ser caracterizados por sua meia vida e pela radiação que emitem, analogamente aos radionuclídeos naturais. A figura 8 mostra um gráfico dos radionuclídeos artificiais e naturais conhecidos.

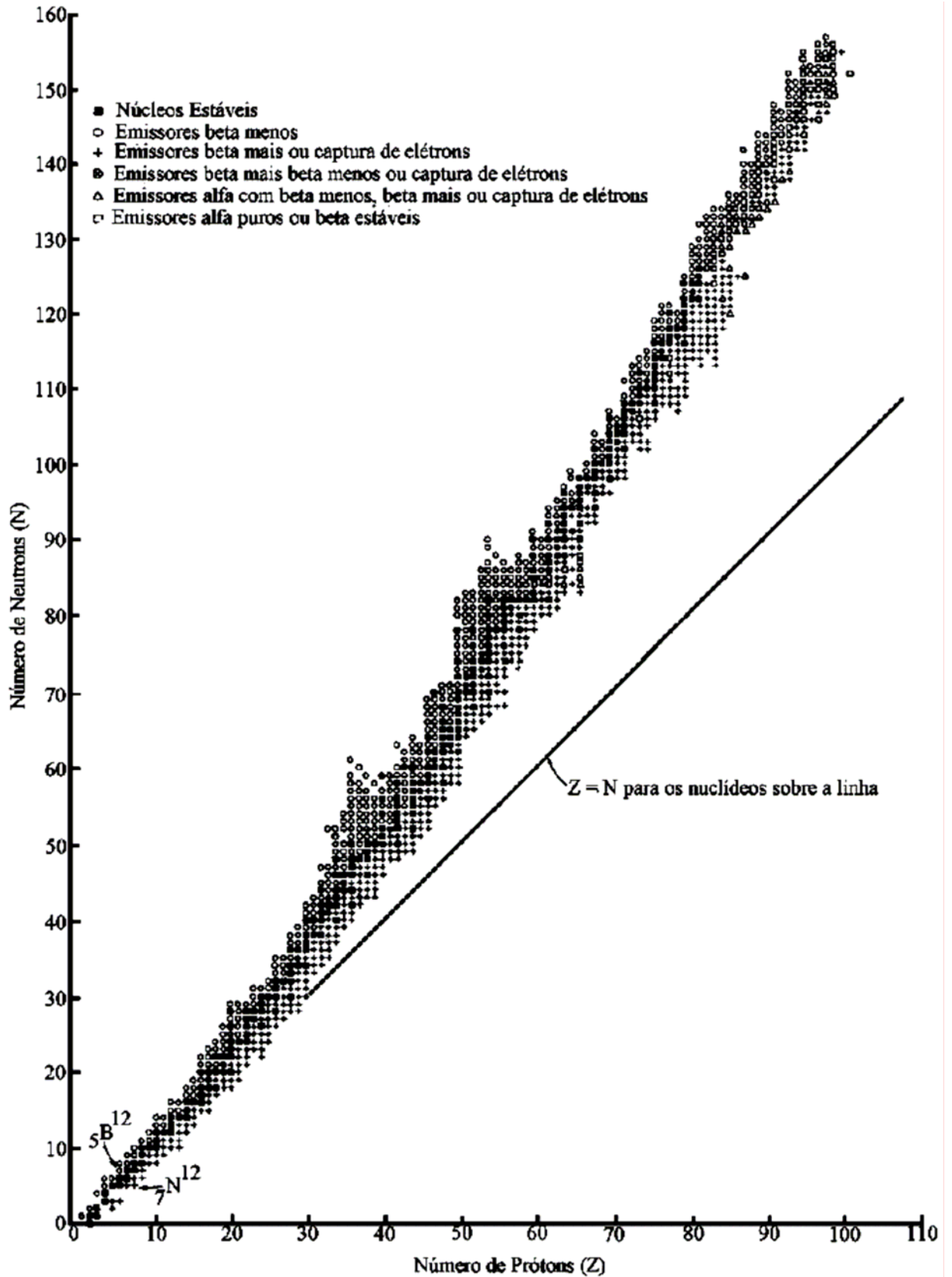


Figura 8 – Radionuclídeos naturais e artificiais conhecidos (extraída de KAPLAN, 1963)

É enorme a variedade de reações nucleares realizadas com os vários tipos de “projéteis” disponíveis, utilizados para produzir radionuclídeos artificiais. A produção de radioisótopos artificiais é hoje corriqueira e muito utilizada correntemente, por exemplo, na medicina nuclear e em controle de processos industriais, assim como na produção de fontes radioativas empregadas em laboratórios de pesquisa e de ensino.

2.5.1 Césio-137 (^{137}Cs)

O ^{137}Cs é um subproduto da fissão nuclear do urânio e do plutônio e foi introduzido no globo terrestre principalmente pelos testes termonucleares 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, tendo sua maior produção em 1963. Após o *Limited Nuclear Test Ban Treaty*, em 1963, a deposição de ^{137}Cs no globo terrestre diminuiu rapidamente, cessando subseqüentes deposições a partir de 1980. A figura 9 apresenta a produção total das armas nucleares dos testes atmosféricos e subterrâneos. As proporções de alcance do ^{137}Cs provenientes dos testes nucleares chegaram à escala global, desta forma diz-se que houve um *fallout* global.

Também ocorreu deposição de ^{137}Cs devido ao acidente com a usina nuclear de Chernobyl, em 1986, mas a deposição foi limitada à Ucrânia e aos países próximos, neste caso o *fallout* que ocorreu é denominado *fallout* local.

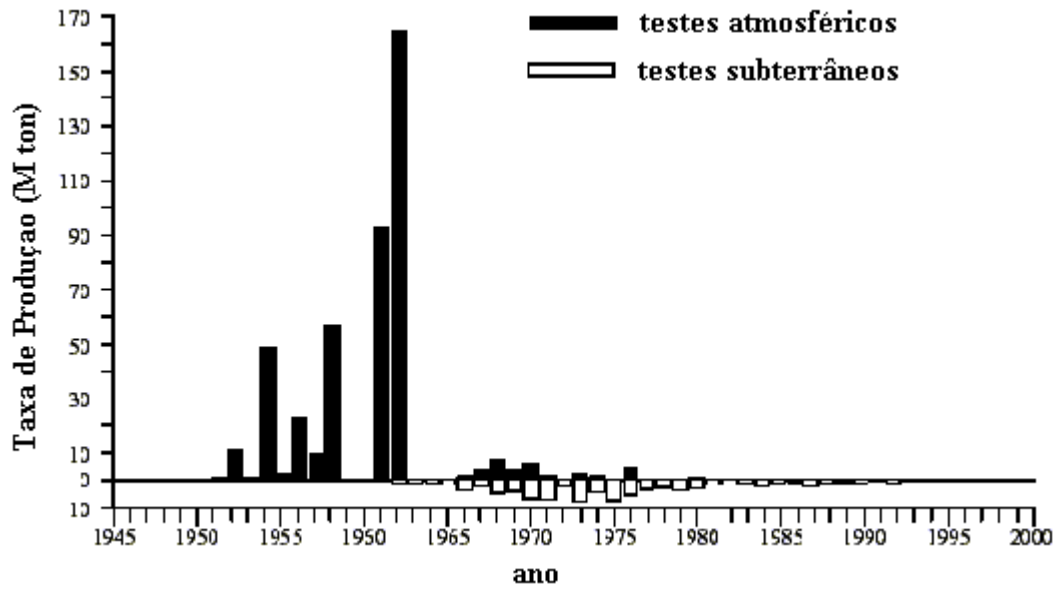


Figura 9 – Produção total de energia das armas nucleares nos testes de superfície e subterrâneos.

O esquema de desintegração do ^{137}Cs está apresentado na figura 10.

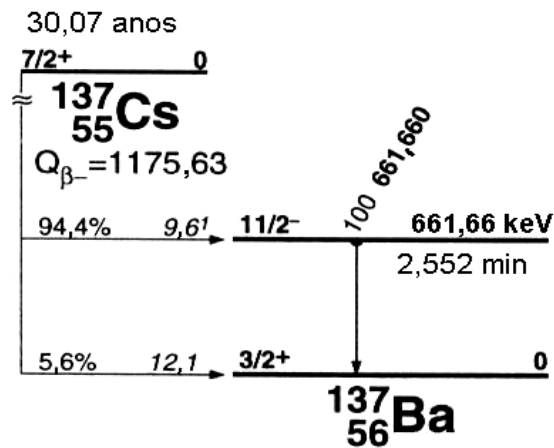


Figura 10 – Esquema de desintegração do ^{137}Cs .

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos mais significativos são discutidos a seguir. Em Blake e outros (1999), é apresentada a aplicação do berílio-7 em uma parcela de 6,7 ha de campo cultivado em Higher Walton Farm perto de Crediton, Devon, Reino Unido. Os autores apresentam o potencial da técnica de berílio-7 como traçador em investigação de erosão de solos, enfatizando no trabalho a característica de eventos de períodos curtos que o Berílio provê, característica esta que complementa as técnicas de utilização do ^{137}Cs e ^{210}Pb não suportado. Verificaram no artigo que uma substancial quantidade de solo foi transportado para fora da área de estudo.

Wallbrink e Murray (1996) verificaram que o “fallout” contínuo do ^7Be torna-o um útil traçador do movimento de sedimento das camadas mais superficiais do solo. O objetivo foi descrever a variabilidade e a profundidade de penetração do ^7Be sob diferentes coberturas do solo. Estudaram quatro posições: solo sem nenhuma cobertura, solo com cobertura de grama, solo de floresta de eucalipto com cobertura seca e solo de floresta de eucalipto sem cobertura seca.

Walling e outros (1999b), mostraram o potencial de uso do ^7Be como um sedimento traçador de erosão de solo. O objetivo foi mostrar que, devido à curta meia vida do radionuclídeo, este é útil para determinar a erosão em curtos períodos de tempo. Nele são apresentados resultados preliminares de uma investigação detalhada sobre erosão de solos e redistribuição de sedimentos em uma área de 6,7 ha. As medidas de ^{137}Cs e ^7Be tem sido empregadas para determinação, respectivamente, do médio e curto tempo da taxa de redistribuição de sedimentos.

Schuller e outros (2006), trataram o potencial de uso da medida do inventário do ^7Be para estimar modelos e quantidades de redistribuição de solo associado com eventos individuais durante o período de pós-colheita. A técnica de redistribuição do inventário de ^7Be foi empregada para estimar a redistribuição de solo associada com um período de chuvas pesadas em uma floresta que havia sido cortada há pouco tempo. Tal floresta está localizada na região dos Lagos do Chile ($39^\circ 44'7'' \text{ S}$, $73^\circ 10'39'' \text{ W}$, com 22% de inclinação e média anual de chuva de $2300 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$). Os resultados providos pela técnica foram validados comparando com medidas diretas de perda e ganho de solo obtidas usando *erosion pins*. As informações produzidas pelas duas formas de estudo foram similares. Os

resultados deste trabalho também mostram o potencial para o uso da medida do inventário de ^7Be para documentar eventos de erosão em áreas de floresta que foram cortadas recentemente.

Matisoff e outros (2002) coletaram amostras de solo e sedimento suspenso em uma ilha e com a utilização dos radionuclídeos ^7Be , ^{210}Pb e ^{137}Cs analisaram os efeitos das práticas de cultivo e não cultivo na erosão de solos e redistribuição de sedimentos. Os resultados mostraram que os campos cultivados foram os principais responsáveis pelos sedimentos suspensos, chegando em torno de 6 a 10 vezes maior que os solos não cultivados. Nos solos não perturbados a atividade do ^{210}Pb decresceu até em torno de 10 cm, a partir do qual se manteve constante devido ao ^{210}Pb suportado pelo solo. Determinou-se, neste mesmo solo, que a máxima atividade do ^{137}Cs no solo é obtida em torno dos 10 cm de profundidade. Ao contrário, nas áreas que foram plantadas, a distribuição foi homogênea com a profundidade, mostrando que o solo é constantemente revolvido no ato do preparo e plantio. As atividades de ^{210}Pb e ^7Be foram linearmente maiores nos sedimentos suspensos derivados das sub-bacias não cultivadas, indicando que a superfície do solo é a fonte dos sedimentos suspensos. Este estudo demonstra que em solos não cultivados a erosão é menor e também é menor a quantidade de sedimentos suspensos. Demonstra também que os sedimentos erodidos têm uma assinatura correspondente à prática agrícola e à profundidade de erosão.

4 EQUIPAMENTOS

A década passada foi responsável por significantes mudanças na instrumentação e metodologia de espectrometria de raios gama. Com o aumento na capacidade de processamento dos computadores foram implementados métodos espectrais automáticos para redução dos ruídos e para processamentos dos dados do espectro. A partir destas melhorias, aumentou-se a quantidade de informações que podem ser extraídas de dados da espectrometria de raios gama e, por consequência, foi ampliado o interesse na aplicação da espectrometria para fins geológicos e ambientais.

4.1 SISTEMA DE ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA

O raio gama é uma forma de radiação bastante penetrante comparado com a maioria dos outros tipos de radiação existentes, em fontes radioativas naturais e artificiais. A espectrometria de raios gama permite a medida direta de emissores gama sem a necessidade da realização de separação química dos radionuclídeos da amostra, podendo ser tratada de método não destrutivo de análise, o que permite a realização de medidas posteriores em caso de dúvida. Desta forma, se torna uma ferramenta poderosa para o monitoramento e pesquisa da radiação ambiental, permitindo a identificação e a determinação da atividade de um radionuclídeo na amostra. Para gerenciamento da aquisição dos dados no microprocessador utilizamos o aplicativo MAESTROTM para Windows versão 3.2, de maneira que o espectro adquirido pode ser armazenado e analisado posteriormente. O tempo de aquisição dos espectros foi de 86400 s para o detector de HPGe de 66% de eficiência relativa e de 172800 s para o detector de HPGe de 10% de eficiência relativa.

4.1.1 Módulos Eletrônicos

A energia média perdida para a produção de um par elétron-buraco é 2,96 eV (Knoll, 1979). Dessa forma, a deposição de 1 MeV produz aproximadamente $3 \cdot 10^5$ pares.

Essa carga coletada produz um pulso de tensão pequeno para ser analisado por um conversor analógico digital ADC (sigla em inglês de analogic to digital converter). Por esse motivo, o sinal é tratado por um pré-amplificador e por um amplificador antes de ser convertido em sinal digital. Esses módulos estão conectados a um bastidor NIM (Nuclear Instruments Modular), que é um suporte que apenas fornece alimentação elétrica.

A figura 11 apresenta um diagrama de blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama, sem a blindagem utilizada com o sistema.

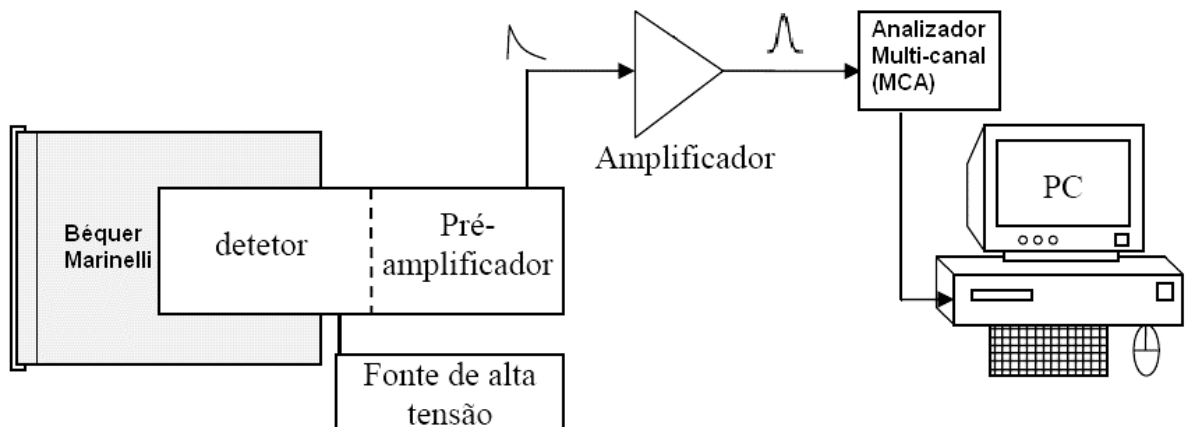


Figura 11 – Diagrama em blocos de um sistema típico de espectrometria de raios gama.

Os módulos de eletrônica NIM utilizados neste trabalho foram um amplificador Ortec modelo 575A, fonte de alta tensão Ortec modelo 659, e placa multicanal (MCA) TrumpTM de 4096 canais. O amplificador e a fonte de alta tensão estavam conectados num Minibin Ortec modelo 4006.

O pré-amplificador é o primeiro componente a analisar o sinal produzido pelo detector. O amplificador recebe o pulso de voltagem do pré-amplificador e produz um pulso de voltagem de saída com forma semi-Gaussiana que é contado no MCA. O MCA mede a altura do pulso (em volts), originado no detector, que é proporcional à energia do raio gama. Um conversor analógico-digital no MCA converte a altura do pulso de voltagem em um número de canal. Cada canal corresponde a uma faixa estreita de voltagem. Conforme os pulsos de voltagens vão chegando no MCA, este vai guardando na memória uma distribuição das contagens dos pulsos com respeito à altura dos pulsos. Esta distribuição arranjada em ordem crescente de altura de pulso (energia do raio gama detectado) é chamada de espectro. O aplicativo MAESTROTM gerencia a aquisição no microcomputador através da placa MCA de

maneira que o espectro coletado possa ser armazenado e analisado posteriormente. Para análise dos dados foi utilizado o programa Gamma Vision.

Os detectores de HPGe utilizados permaneceram durante toda a duração das análises sob voltagem de 3000 V fornecida pela fonte de alta tensão. A figura 12 apresenta um espectro gama característico de uma amostra ambiental adquirida por um detector de HPGe, juntamente com a tela do programa Gamma Vision. Nesta figura mostra-se também o pico de energia de 477 keV do ^{7}Be marcado em vermelho e em uma tela superposta ampliada na mesma figura.

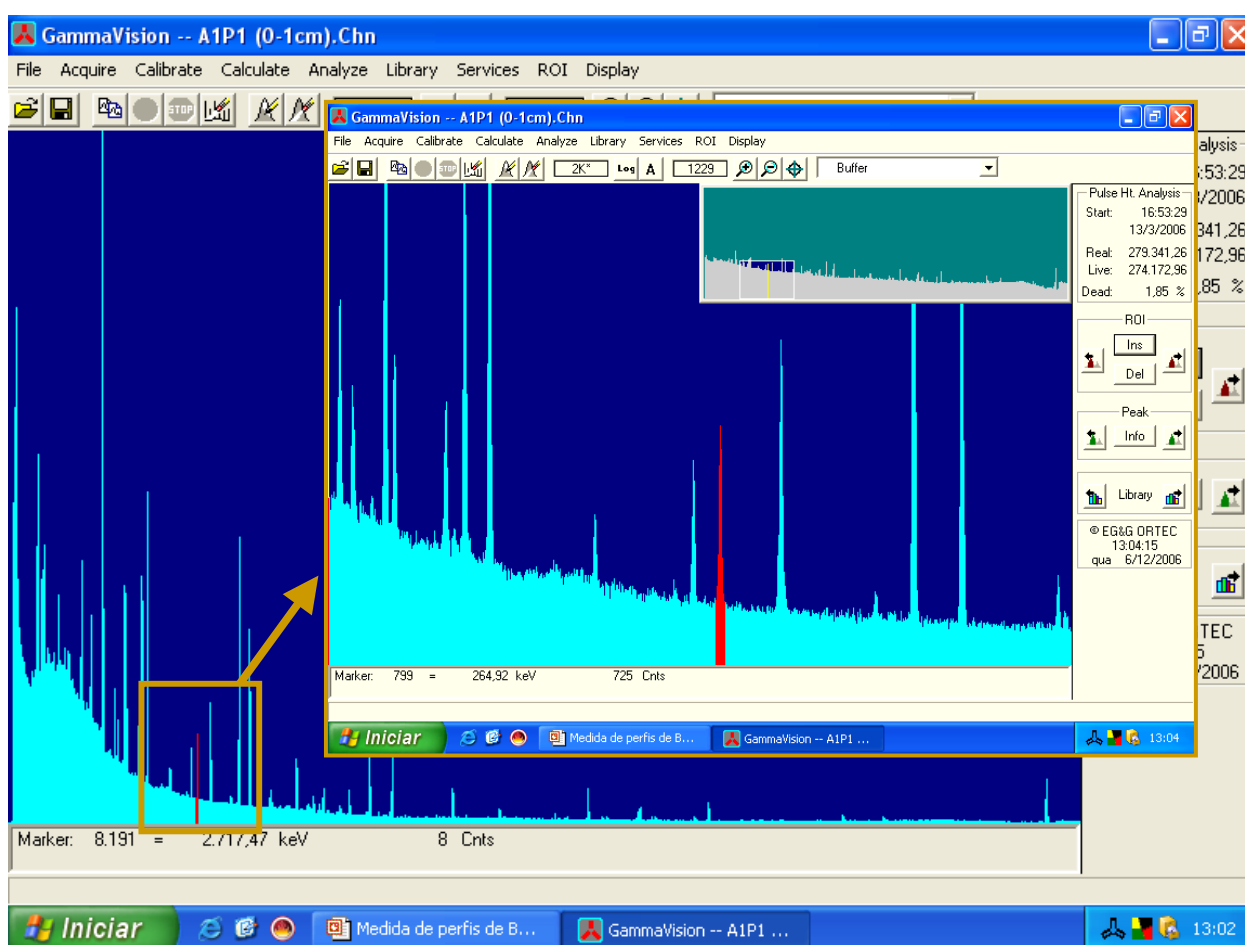


Figura 12 – Espectro gama característico de uma amostra ambiental analisada num detector de HPGe apresentando, achurada em vermelho, a linha gama do ^{7}Be com um zoom na sua região e a tela principal do aplicativo Gamma Vision.

4.1.2 Detector de HPGE

O detector semiconductor de HPGe (High Purity Germanium) é predominantemente utilizado para a detecção de raios gama. Ele é formado por um monocristal de germânio ao qual é aplicada alta tensão aos seus terminais, produzindo um campo elétrico da ordem de 500 V/cm no interior do cristal. Quando a radiação interage com o cristal do detector, ela transfere uma quantidade de elétrons para a banda de condução. A detecção é feita através da coleta desses elétrons. A estrutura eletrônica do cristal é formada por bandas onde os elétrons podem estar, a figura 13 mostra a comparação entre a banda proibida em um semiconductor e em um isolante.

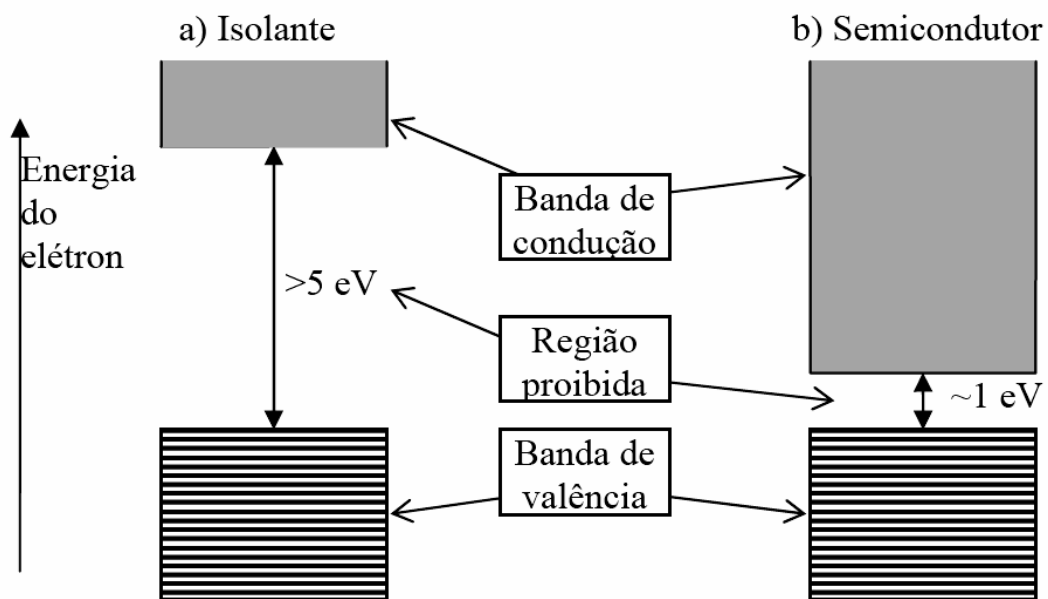


Figura 13 – Ilustração comparativa das diferenças entre as energias de bandas de condução e valência de um isolante e um semiconductor. (retirada de Guimarães C.O., 2005)

A diferença de energia entre a banda de condução e a banda de valência em um semiconductor é da ordem de 1 eV. Os elétrons na banda de condução são capazes de caminhar livremente pelo cristal, enquanto que os elétrons na banda de valência estão presos em suas posições no cristal. Para um elétron passar da banda de valência para a de condução, deve ganhar em uma única interação uma quantidade de energia maior do que a energia

necessária para a mudança de banda. Uma forma desse elétron ganhar energia é por agitação térmica, que para a temperatura ambiente é da ordem de $\frac{1}{40}$ eV (Guimarães C.O, 2005). Embora esse valor seja muito menor que a diferença de energia entre as bandas, uma pequena fração dos elétrons consegue mudar para a banda de condução. A movimentação desta pequena fração do número de elétrons presentes em um cristal de alguns cm^3 de volume produziria, em temperatura ambiente, uma corrente que seria maior do que o sinal produzido por um fóton, desta forma, não seria possível obter picos de energia. Para reduzir tal efeito, o cristal é refrigerado com nitrogênio líquido, à temperatura de 77 K.

Só é possível utilizar o cristal de HPGe como um espectrômetro gama devido à segunda maneira de um elétron ganhar energia e passar para a banda de valência para condução, ou seja, através da interação com um fóton, como mostrado na figura 14.a. Quando isso acontece, a energia ganha pelo elétron faz com que ele seja liberado para a banda de condução e ainda tenha energia cinética suficiente para que ao longo de seu percurso possa promover outros elétrons também para a banda de condução (figura 14. b). Quando os elétrons abandonam seu lugar no cristal eles deixam vacâncias ou buracos, os quais são denominados portadores de cargas positivas (figura 14. c). No final do processo, a quantidade de elétrons livres será proporcional à energia depositada pelo fóton, a não ser que o campo elétrico dentro do cristal seja suficientemente pequeno para permitir recombinação de pares elétrons-buraco.

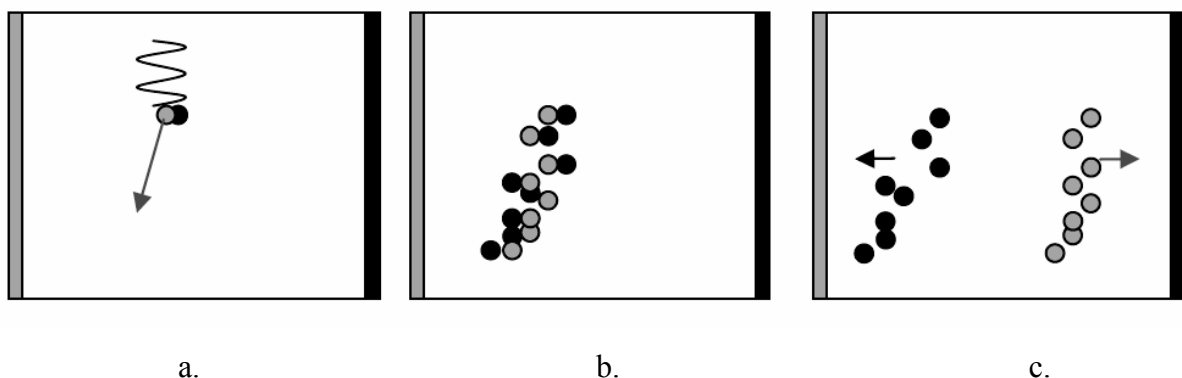


Figura 14 – Representação de como a energia é depositada no cristal de HPGe. Os círculos cinzas representam os elétrons, os círculos pretos os buracos e a linha ondulada os fótons. Em a. temos a primeira interação do fóton com o elétron, em b. o elétron se movimentando produz vários outros pares elétron-buraco e em c. os elétrons e os buracos se movimentam devido a existência do campo elétrico.

Os elétrons que foram promovidos para a banda de condução são atraídos para o pólo positivo e os buracos, para o outro pólo. Caso um elétron não tenha energia suficiente para produzir ionizações, sua energia cinética não aumentará enquanto ele se deslocar no campo elétrico do detector, devido à interação com o cristal ser de forma praticamente contínua, perdendo energia pelo caminho. Essas interações impedem que ele ganhe energia suficiente para promover de banda outros elétrons, o que provocaria um efeito avalanche no cristal.

O HPGe é o tipo de detector mais apropriado para análise de amostras ambientais de baixa atividade. A configuração do cristal pode ser de dois tipos, tipo-p (aceitadores de elétrons) ou tipo-n (doadores de elétrons), dependendo da concentração de átomos aceitadores ou doadores no cristal. As formas geométricas dos cristais são diversas. Na forma cilíndrica ainda podem ter um buraco central, o que possibilita construir cristais com maior comprimento, neste caso denomina-se de cristal coaxial. Além dos cristais cilíndricos, também existem cristais em forma de discos. Os detectores de HPGe da Ortec com cristal do tipo-p foram chamados de GEM, enquanto que os detectores com cristal do tipo-n foram chamados de GMX.

O contato elétrico do cristal para que as cargas geradas pelos raios gama absorvidos sejam recebidas como sinal elétrico é feita através da implantação de lítio e boro nas superfícies (externa e interna) do cristal. Dependendo do tipo do cristal, se n ou p, os contatos são feitos de maneiras diferentes. No cristal tipo-p a superfície externa do cristal recebe uma camada de lítio de aproximadamente 600 microns, enquanto a superfície interna recebe uma camada de íons de boro implantados de 0,3 micron. No cristal tipo-n é o contrário, a superfície externa do cristal recebe a camada de íons implantados de boro, enquanto a superfície interna recebe a camada de lítio. Devido à camada externa do cristal tipo-n ser extremamente fina, os detectores construídos com este tipo de cristal (detectores GMX) apresentam uma maior eficiência para raios gama de baixa energia, e por isso esses detectores normalmente vêm com uma janela de berílio. A figura 15 apresenta um esboço de dois cristais de HPGe tipo-p e tipo-n com as camadas para contato elétrico.

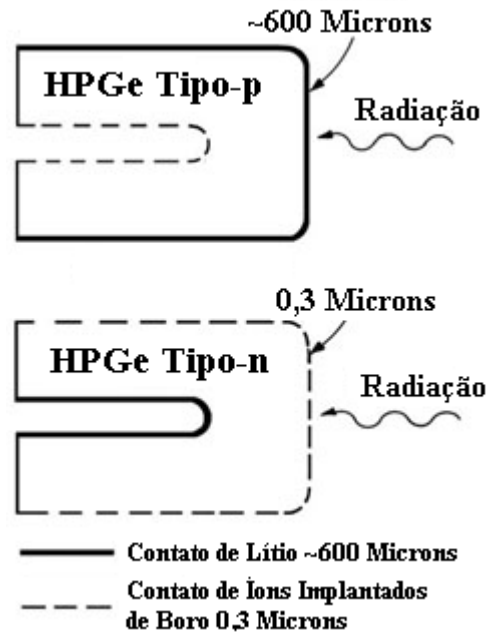


Figura 15 – Esboço de dois cristais de HPGe, tipo-p e tipo-n, apresentando as camadas para o contato elétrico (Adaptada de http://www.ortec-online.com/detectors/photon/a1_1.htm).

O cristal de germânio pode também ser feito com diâmetro e comprimento diferenciado. Possíveis formas de cristais são apresentados na figura 16. As três formas mostradas de cristais na figura 16 podem apresentar a mesma eficiência para a linha gama de 1332 keV de uma fonte pontual de ^{60}Co , entretanto apresentam eficiências diferentes quando submetidos a 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.

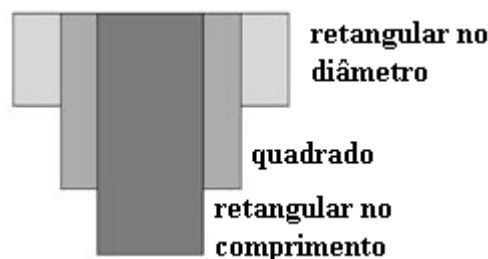


Figura 16 – Esboço de três formas de cristais de germânio utilizados em detectores.

Neste trabalho utilizamos dois detectores sendo: um detector modelo GEM10185-P com diâmetro e comprimento do cristal igual a 43,5 mm de 10% de eficiência relativa e outro modelo GEM-M-7080-P-S específico para geometria béquer Marinelli, com diâmetro do cristal igual a 69,9 mm e comprimento 84,2 mm, de 66 % de eficiência relativa.

A eficiência relativa de detectores de HPGe é definida para a linha gama de 1332 keV do ^{60}Co em relação à eficiência de um detector de NaI(Tl) com cristal de diâmetro e comprimento de 76,2 mm. Para isso, uma fonte de ^{60}Co com intensidade conhecida é posicionada a 25 cm de distância da face do detector de HPGe e o espectro com a linha gama de 1332 keV é adquirido num tempo de contagem fixo. A eficiência absoluta, que é definida como a razão do número de contagens no pico dividido pelo número de raios gama emitidos pela fonte, durante o mesmo tempo de contagem, é então determinada para o detector de HPGe. Essa eficiência absoluta é então dividida por $1,2 \times 10^{-3}$, que é a eficiência absoluta para o detector de NaI(Tl) com a mesma geometria. Essa razão especifica a eficiência relativa dos detectores de HPGe.

A resolução em energia é uma medida da capacidade do detector em distinguir duas linhas gama de energia muito próximas no mesmo espectro. A resolução em energia é dependente tanto da energia do raio gama quanto da temperatura de funcionamento do detector e é normalmente determinada pela combinação de três fatores: o alargamento do pico devido às flutuações no número de pares elétron/buraco produzidos no detector, que é uma função da energia do raio gama; a variação na coleta das cargas produzidas no cristal; e a contribuição de ruídos eletrônicos.

A resolução em energia pode ser determinada de várias maneiras, no entanto, normalmente é determinada através da largura total à meia altura do pico FWHM (“full width at half maximum”).

Outra característica importante do detector de HPGe 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. 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.

4.1.3 Blindagem

A radiação ambiental é composta tanto da radiação natural quanto da artificial. A radiação natural é proveniente dos isótopos radioativos naturais encontrados no solo e da radiação cósmica, enquanto que a radiação artificial é decorrente de fontes produzidas pelo homem, tais como a precipitação radioativa devido a testes de artefatos nucleares na atmosfera, a liberação de efluentes de instalações nucleares, o uso de radioisótopos na medicina e na indústria, a ocorrência de acidentes radioativos ou nucleares, etc, os quais, eventualmente, não mais contribuirão para a dose devido à desintegração radioativa. Quando se realiza a espectrometria de raios gama em amostras ambientais, deve-se utilizar blindagens que possam minimizar a influência da radiação gama proveniente do ambiente ao redor.

No presente trabalho, utilizamos blindagens padrões de baixo fundo. Tais blindagens são constituídas de vários materiais em ordem decrescente de número atômico de fora para dentro, possibilitando a atenuação quase total dos raios gama externos e os raios X provenientes da interação dos raios gama com a própria blindagem. No detector de 10% foi utilizada uma blindagem modelo 747, fabricada pela CANBERRA, para o detector de 66% foi utilizada uma blindagem modelo HPLBS1, fabricada pela ORTEC.

O material externo da blindagem é constituído de chumbo. Sua espessura depende da atenuação desejada para um dado raio gama. Para aplicações ambientais, 10 cm de chumbo são suficientes para atenuar completamente os raios gama com energia na faixa de 0 a 2 MeV. A blindagem da Canberra tem 10 cm de chumbo de baixo fundo com a 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 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. Toda a superfície externa é recoberta com poliuretano e as superfícies internas (chumbo e cobre) são polidas e revestidas com 0,5 mm de verniz de acrílico. Tanto a blindagem da Ortec quanto da Canberra tem uma cavidade com diâmetro interno de 27,9 cm por 40,6 cm de profundidade que podem acomodar béqueres Marinelli de até 4 litros. A figura 17 apresenta as blindagens utilizadas.



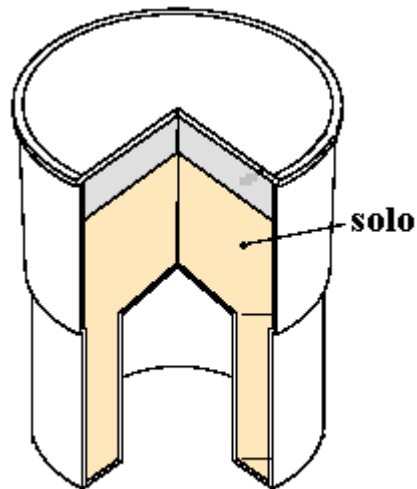
Figura 17 – Blindagens da Canberra (Modelo 747) e da Ortec (HPLBS1) com o dewar do detector.

4.1.4 Béquer Marinelli

Na espectrometria de raios gama os porta-amostra podem ter diferentes formas e composições químicas, podendo ser pequenos copos de náilon ou acrílico, cilindros de alumínio com tampas, sacos plásticos ou béqueres Marinelli. Para se definir qual o tamanho e forma ideal de porta-amostra, procura-se a geometria que dê a máxima eficiência de contagem para a energia de interesse. O tamanho ótimo de amostra e geometria a ser utilizada depende da massa de amostra disponível, do número atômico efetivo, da densidade da amostra e da energia do raio gama de interesse.

Além da necessidade de se diminuir a radiação de fundo incidente no detector para a análise de amostras ambientais de baixa atividade, também se deve maximizar o tamanho de amostra analisada quando isso é possível. Como as amostras analisadas neste trabalho eram amostras de solo de baixa atividade e a quantidade disponível de cada um era suficientemente grande, foi utilizado porta-amostra do tipo béquer Marinelli de 1 litro,

permitindo analisar grande quantidade (aproximadamente 1 kg) de solo de modo a obter uma boa estatística de contagem num tempo de contagem satisfatório. Os béqueres Marinelli utilizados foram adquiridos da “GA-MA Associates Incorporation”, sendo fabricados de polietileno de baixo fundo radioativo. O béquer Marinelli utilizado possuía um volume de 1 litro. A figura 18 apresenta um esboço de um béquer Marinelli.



Béquer Marinelli

Figura 18 – Esboço de um béquer Marinelli.

4.2 EQUIPAMENTO PARA AMOSTRAGEM

4.2.1 Prato raspador da IAEA

Segundo as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, IAEA (sigla em inglês), para a realização da amostragem em incrementos, utiliza-se um prato raspador que consiste de uma base metálica retangular de área interna conhecida e um prato metálico, como apresenta a figura 19.

A base metálica é inserida no solo, definindo a área de amostragem. O prato é puxado raspando o solo da área delimitada. A profundidade pode ser controlada com o auxílio de uma barra fixadora do prato raspador em que existem marcações de profundidades pré-definidas, possibilitando a amostragem em profundidades conhecidas.

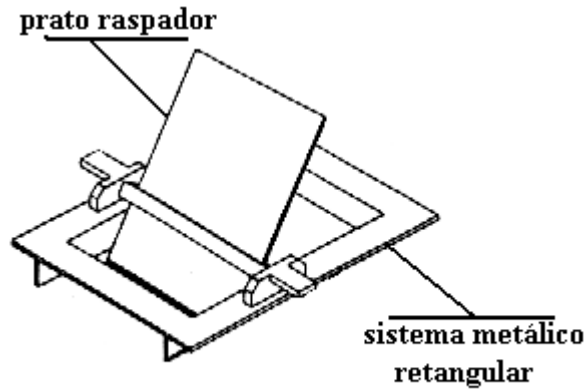


Figura 19 – Sistema metálico e prato raspador para amostragem em incrementos.

4.2.2 Prato Raspador Utilizado no Trabalho

As amostras foram coletadas utilizando um prato raspador desenvolvido no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) mostrado na figura 20 abaixo. Pode-se observar que, intencionalmente, existe uma certa semelhança entre o prato recomendado pela IAEA (item 4.2.1) e o desenvolvido pelo LFNA/UEL. Na figura 21 é apresentada a foto do prato raspador durante a coleta das amostras das áreas de estudo.

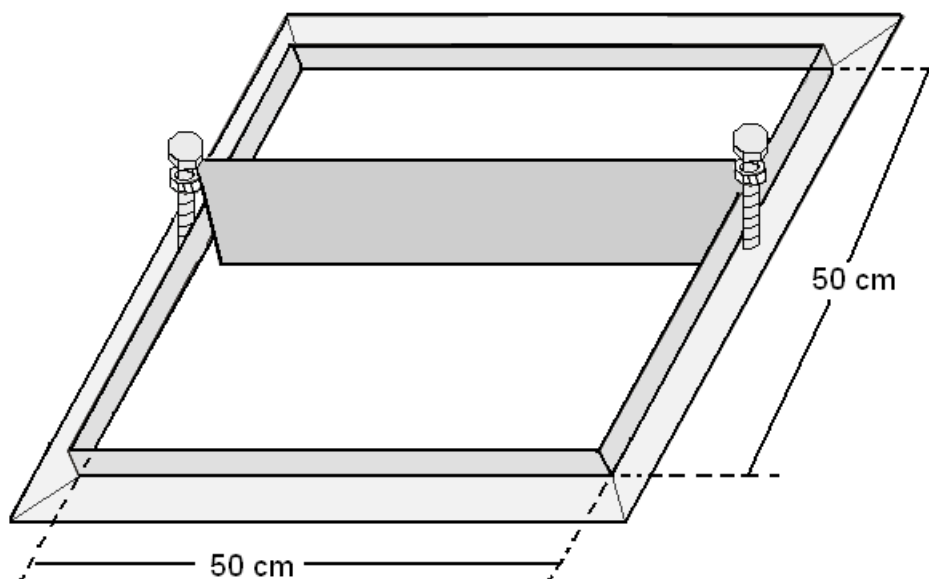


Figura 20 – Prato raspador desenvolvido no LFNA/UEL.

O prato raspador do LFNA/UEL consiste de uma base metálica de 2500 cm² de área e um prato raspador com 50 cm de comprimento. Nas extremidades do prato raspador existem dois parafusos que permitem controlar a profundidade com passo mínimo de 1,5 mm.



Figura 21 – Foto do prato raspador com a pá para auxílio da coleta das amostras e a lona onde esta ficava temporariamente antes de ser acondicionada nos saquinhos e transportada para o Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Estadual de Londrina

5 MÉTODOS

5.1 DETERMINAÇÃO DA EROSIÃO

A erosão de solo é um dos principais fatores responsáveis pelo decréscimo na produtividade agrícola, provocando perdas de solo, água e nutrientes. O efeito em curto prazo gerado pela erosão do solo numa área é a redução na quantidade e qualidade da biomassa do solo, exigindo maior entrada de tecnologia para obter as mesmas taxas de produção, desta forma, aumentando os gastos com a produção e reduzindo o lucro final do plantio. Dois importantes impactos desfavoráveis da erosão do solo fora da área erodida são os que atuam sobre a qualidade da água e do ar. Os impactos que atuam sobre a qualidade da água são as fontes de poluição não pontuais, que geram o material dissolvido e suspenso transportados pelas enxurradas. As perdas hídricas e químicas provocadas pela enxurrada podem, ainda, causar a eutrofização da água. Os efeitos que atuam na qualidade do ar são devido à emissão de material particulado e de gases do solo/sedimento na atmosfera.

Desse modo, é de suma importância predizer a magnitude e severidade dos impactos da erosão do solo sobre a produtividade da biomassa e na qualidade do meio ambiente tanto em escala local, como nacional e até global. Muitos modelos para predição da erosão e deposição de solo têm sido desenvolvidos e aplicados para obter dados qualitativos e quantitativos de erosão e deposição de solo. Nos subitens que seguem apresenta-se alguns deles.

5.1.1 Métodos Convencionais

As técnicas para medir a erosão do solo, tanto a gerada pela chuva quanto a gerada pelos ventos, podem ser divididas em parcelas e armadilhas. As parcelas para medir perdas de solo são essencialmente de dois tipos: parcelas fechadas e parcelas abertas. Em ambos os tipos, a enxurrada (ou deflúvio) e o sedimento são capturados em um cocho ou tabuleiro e conduzidos através de um tubo aos tanques coletores que retêm todo ou uma porção fixa do sedimento escoado da parcela. A água e o sedimento produzido podem ser

medidos com base em um único evento de chuva, ou em outros intervalos de tempo mais conveniente, dependendo do propósito do experimento. Devido à escala de operação (parcelas com área de 22 a 80 m²), as parcelas são usadas para medir a erosão de sulcos e entressulcos, invés de erosão por valas ou voçoroca (Loughran, 1989).

As parcelas fechadas são retangulares com as arestas do retângulo feitas de madeira, folhas de asbesto, concreto, metal ou qualquer material impermeável, inseridas no solo para delimitar a área da parcela. Como a área da parcela é facilmente determinada, a perda de solo pode ser expressa em unidade de kg.m⁻².ano⁻¹, desde que seja assumido que a perda de solo é uniforme em toda a parcela. As parcelas fechadas não podem, sem alguma aproximação, serem usadas para representar a perda de solo sob condições naturais. Para representar as condições naturais, usam-se as parcelas abertas, onde um cocho ou tabuleiro é colocado aproximadamente perpendicular ao eixo de inclinação do terreno, permitindo a coleta da água e sedimentos nos tanques coletores.

O equivalente às parcelas para estudo da erosão do solo pelo vento são as armadilhas de sedimento. Nestes tipos de estudos, o sedimento fino é aprisionado em uma caixa de metal que deve ter uma eficiência de aprisionamento ligada às condições do tempo. Outros métodos de medida de erosão podem ser pinos e profilômetros (medidor de perfil), fotogrametria e levantamentos topográficos aéreos.

Vários modelos têm sido desenvolvidos e utilizados para quantificar as taxas de erosão, dos quais citamos alguns deles:

- ◆ RUSLE (“Revised Universal Soil Loss Equation”): é amplamente usada nos EUA e outros países. Cuidadas calibrações têm sido realizadas com base em vários solos, fases de solo, práticas de manejo e conservação e uso de solo. Este é um modelo empírico, onde vários parâmetros são multiplicados, o que faz que qualquer erro na estimativa de algum parâmetro seja amplificado no resultado final.

- ◆ WEPP (“Water Erosion Prediction Project”): é um modelo para predição da erosão baseado em processos, parâmetros distribuídos e simulação contínua para uso em computadores. Este modelo é aplicável aos processos de erosão em encostas (erosão em sulcos e entressulcos) e também na simulação de processos hidrológicos e erosivos em pequenas bacias.

- ◆ EUROSEM (“European Soil Erosion Model”): este modelo é baseado na modelagem de destacamento e transporte das diferentes fases do solo separadamente, e então a erosão é computada com base na fase mais limitante. Este modelo simula a erosão com base em um evento para campos e pequenas bacias, usando descrições físicas para

descrever o processo de erosão de solo sendo totalmente dinâmico. Este modelo foi desenvolvido para ter um bom compromisso entre modelos empíricos (como a RUSLE) e modelos que atentam para um refinamento na descrição do processo (como a WEPP).

Outros modelos para avaliar o efeito da decisão de manejo sobre uma bacia, para planejamento de sistema de conservação e para simulação da erosão aeólica, entre outros, têm sido desenvolvidos e maiores detalhes sobre estes modelos podem ser encontrados no site http://www.itc.nl/~rossiter/research/rsrch_ss_apps.html.

5.1.2 Método do ^7Be

Devido ao estudo do ^7Be representar somente atividades imediatamente na superfície, o modelo padrão irá refletir somente redistribuição de solos de pequeno intervalo de tempo devido à erosão de água. Observando a forma da distribuição do perfil de ^7Be no solo pode-se aproximar um modelo exponencial como a equação (10) a seguir:

$$C(x) = C(0).e^{-x/h_0} \quad (10)$$

onde x (kg.m^{-2}) é a profundidade de massa da superfície do solo para deposição positiva, $C(x)$ (Bq.kg^{-1}) é a concentração de ^7Be na profundidade x , $C(0)$ (Bq.kg^{-1}) é a concentração inicial de ^7Be na superfície do solo, h_0 (kg.m^{-2}) é a profundidade de massa de relaxação que descreve a forma do perfil inicial na profundidade do ^7Be .

Para um perfil exponencial de profundidade, 63% do ^7Be estará retido na profundidade de $0-h_0$. Pode-se concluir desta maneira que, quanto maior for o valor de h_0 maior será a profundidade de penetração do ^7Be no solo.

O inventário de referência do ^7Be , A_{ref} (Bq.m^{-2}), para uma determinada área de estudo é dado pelo inventário total de ^7Be medido em uma posição estável não erodida, como mostrado abaixo.

$$A_{ref} = \int_0^{\infty} C(x)dx = \int_0^{\infty} C(0).e^{-x/h_0} dx = C(0).(-h_0) \int_0^{\infty} \frac{e^{-x/h_0}}{h_0} = C(0).(-h_0).e^{-x/h_0} \Big|_0^{\infty}$$

$$A_{ref} = C(0).h_0 \quad (11)$$

O inventário, $A_{Be}(x)$ (Bq.m^{-2}), abaixo de uma profundidade x da distribuição inicial pode ser expresso na forma da equação (12).

$$A_{Be}(x) = \int_x^{\infty} C(y)dy = C(0)h_0 e^{-x/h_0} = A_{ref} e^{-x/h_0} \quad (12)$$

Assumindo que a erosão remove somente uma fina camada da superfície do solo, o inventário de ${}^7\text{Be}$ que permanece no ponto erodido A_{Be} irá ser menor que o de referência A_{ref} . Se h ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) é a profundidade de solo erodido, o inventário de ${}^7\text{Be}$ que permanece pode ser calculado de (12) fazendo a substituição de x por h .

$$h = h_0 \cdot \ln \frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{Be}}} \quad (13)$$

A equação (13) indica que o parâmetro h_0 é um importante parâmetro para determinar a taxa de erosão de solo da medida total do inventário de ${}^7\text{Be}$ e é uma relação linear entre a taxa de erosão e o logaritmo natural da razão do inventário de referência do inventário de ${}^7\text{Be}$ medido.

Quando o inventário de ${}^7\text{Be}$ medido para um ponto de amostragem é maior que o inventário de referência, podemos assumir que houve deposição. A taxa de deposição h' ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) poderá ser considerada somente quando o inventário de ${}^7\text{Be}$ exceder o valor de referência. Desde que somente eventos com períodos curtos de redistribuição de solo serão considerados e variações temporais de longos períodos serão negligenciadas devido à meia vida curta, a taxa de deposição h' pode ser calculada como:

$$h' = \frac{(A_{\text{Be}} - A_{\text{ref}})}{C_d} \quad (14)$$

A concentração de ${}^7\text{Be}$ depositado C_d pode ser assumida para representar a média ponderada das concentrações C_e de sedimento mobilizado dos pontos superiores da área:

$$C_d = \frac{1}{\int_S h dS} \int_S C_e \cdot h \cdot dS \quad (15)$$

A concentração de ${}^7\text{Be}$ dos sedimentos erodidos de um ponto particular C_e ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) pode ser estimada da distribuição inicial e da taxa de erosão no ponto, isto é:

$$C_e = \frac{A_{\text{ref}} (1 - e^{-h/h_0})}{h} \quad (16)$$

No entanto, para que se possa utilizar o método do ${}^7\text{Be}$, algumas condições devem ser satisfeitas e, no presente trabalho, assumidas como verdadeiras quando não foi possível comprová-las.

5.1.2.1 Suposições para utilização do método do ^7Be

O procedimento para utilizar as medidas de inventário de ^7Be para estimar a taxa de erosão e redistribuição de solos descrita no item 5.1.2 envolve três suposições.

A primeira suposição leva em consideração que a deposição do fallout de ^7Be associado com o evento de erosão é espacialmente uniforme. A segunda hipótese leva em consideração que algum ^7Be preexistente na superfície do solo da área de estudo é também uniformemente distribuído em toda a área. E a terceira é que o ^7Be depositado durante o evento é rapidamente fixado pelo solo no ponto onde ele incidiu e então pode ser mobilizado somente por erosão das partículas de solo.

A primeira condição é satisfeita visto que a área de estudo tem dimensões pequenas, onde a intensidade de precipitação, e desta forma a deposição de ^7Be , podem ser tratadas como uniforme. No segundo caso, a meia vida curta do ^7Be assegura que alguma variabilidade espacial preexistente causada no passado por eventos de erosão será rapidamente desfeita devido à rápida desintegração radioativa, levando em conta que os eventos de erosão são separados por um período de suficiente duração (i.e. pelo menos duas meias-vidas ou 106 dias). Contribuições no inventário de ^7Be associado com eventos de chuva que não causam erosão significativa, podem ser assumidos como espacialmente uniforme. Ainda, a segunda hipótese só deve ser considerada no caso de plantio direto, onde o solo não é revolvido durante o plantio. No caso de solo mecanizado, o ^7Be existente é todo misturado ao perfil do solo até a profundidade do cultivo, diluindo-se sua atividade de 2 cm para aproximadamente 25 cm.

Para se obter uma compreensiva validação da terceira condição, trabalhos posteriores deverão ser realizados. No entanto, existem evidências que sugerem que na maioria das incidências de ^7Be no ambiente acontece uma rápida e firme fixação pela superfície do solo que a recebe (Wallbrink, P.J. e outros, 1999, e Blake, W.H. e outros, 1999).

Além disso, o método do ^7Be fornece informações da erosão restrita à profundidade de penetração do ^7Be ; alguma variação nas propriedades do solo entre o local da área de referência e a área de estudo, ou transversalmente na área de estudo, não deve influenciar a distribuição vertical do ^7Be no solo.

5.2 ÁREA DE AMOSTRAGEM

As três áreas estudadas se localizavam em torno da cidade de Londrina, norte do estado do Paraná, Brasil, em torno do ponto 23°20'34,0''S e 51°12'34,0''W, e apresentaram aproximadamente 10% de inclinação. As áreas foram cedidas pela Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina. Para confiabilidade dos resultados, tais áreas foram isoladas e preservadas durante todo o período de estudo. O solo da área de amostragem e da área de referência é classificado como sendo da classe LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, textura argilosa, fase floresta subtropical subperenifólia, relevo suave ondulado (Embrapa, 1999). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido, com chuvas em todas as estações, podendo ocorrer seca no período de inverno. A temperatura média anual fica em torno de 20,7 °C (Corrêa, 1982).

O período de estudo do presente trabalho foi de novembro de 2005 a maio de 2006 e refere-se ao ciclo de cultivo da cultura de soja para o hemisfério sul. Foram utilizadas três áreas de iguais dimensões (15 m X 30 m) em três diferentes configurações: soja plantada no sentido do declive, perpendicular ao sentido do declive e sem plantio. Em cada uma das três áreas foi realizada uma amostragem em grade de 4x3. O tempo para coleta das amostras da área estudo foi de quatro dias durante o mês de março de 2006. A figura 22 apresenta um esboço da topografia da área estudada, juntamente com os pontos amostrados. As amostras de solo foram coletadas em incremento de 1 cm até a profundidade de 3 cm. Nos pontos onde a deposição de solo era visível, a amostragem foi realizada em incremento de 2 cm até a profundidade de 10 cm. O total de amostras foi 43. Foram empregados aproximadamente 29 dias de análise para cada área de estudo, num total de 87 dias de análise.

Com exceção dos pontos de menor altitude, cada ponto dista cerca de 6,5 metros de outro no mesmo nível e cerca de 14 metros do ponto com nível inferior. Na região de menor altitude os pontos estão mais próximos, pois, no ato da coleta das amostras foi verificado visualmente uma maior deposição de solo nesta região. Para construção do modelo digital de terreno mostrado na figura 22 foi utilizado o programa SURFER, versão 5.01, fabricado pela Golden Software, Inc.

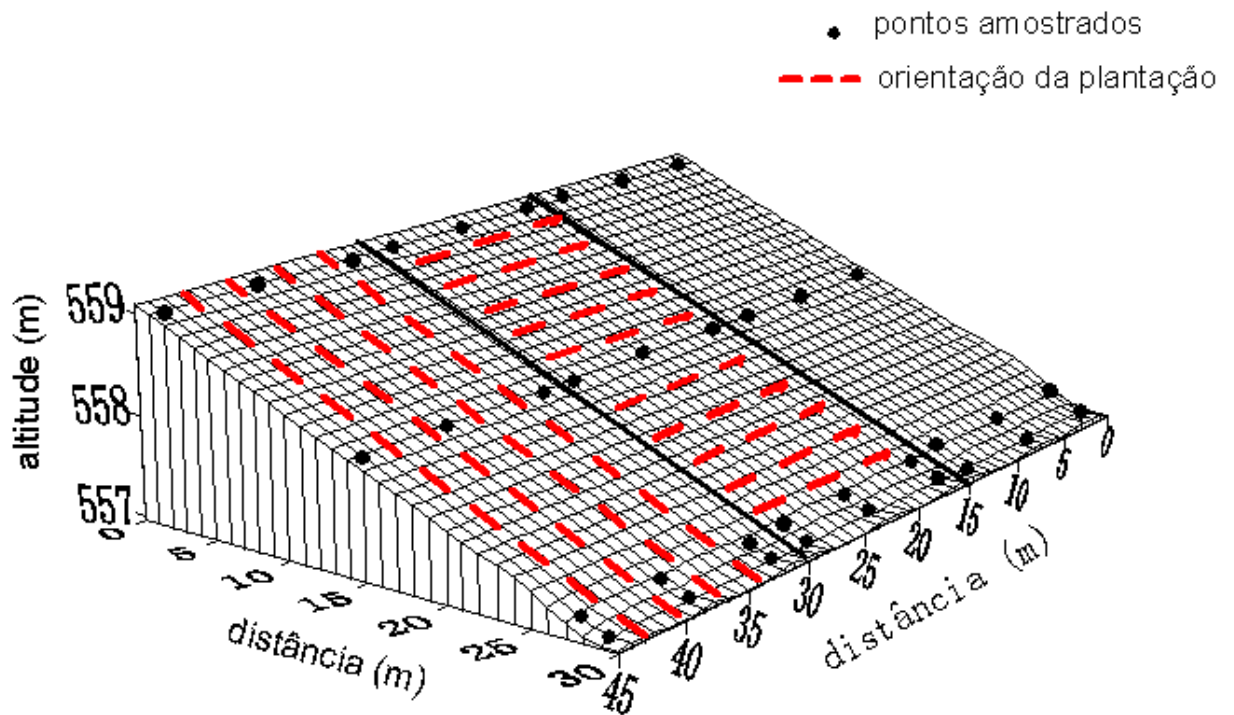


Figura 22 – Esboço das três áreas de estudo, dos pontos de amostragem e a orientação da plantação.

A área selecionada para a coleta das amostras do inventário de referência é de vital importância para a utilização da técnica do ^7Be . Para a escolha de tal área levamos em consideração três fatores: proximidade da área de estudo, altitude similar e ângulo de inclinação mínimo. Os dois primeiros, proximidade da área de estudo e altitude similar, são exigidos para se possa afirmar que houve a mesma quantidade de precipitação em ambas as áreas (de estudo e referência). O último fator, ângulo de inclinação mínimo, é exigido devido ao fato de que o solo na área de referência não pode sofrer erosão ou deposição de solo, para, desta forma, servir como parâmetro de inventário de referência, ou seja, sem nenhuma perda ou ganho de solo.

A área para coleta das amostras de referência utilizada neste trabalho localizava-se em torno do ponto: $23^{\circ}20'25,7''\text{S}$ e $51^{\circ}12'29,5''\text{W}$, distando aproximadamente 300 metros da área de estudo e com ângulo de inclinação em torno de 0%. A área de referência também foi cedida pela Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina. As figuras 23, 24 e 25 apresentam fotos das áreas de estudo pouco antes da coleta das amostras.



Figura 23 – Foto da área de estudo sem plantio.

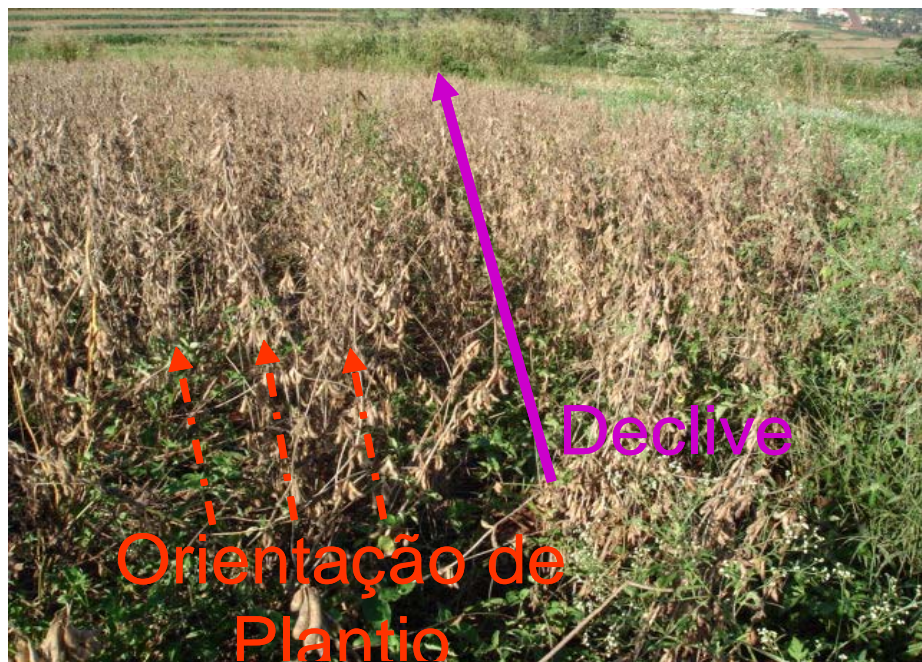


Figura 24 – Foto da área de estudo com soja plantada no mesmo sentido do declive.



Figura 25 – Foto da área de estudo com soja plantada perpendicular ao sentido do declive.

5.3 MÉTODO PARA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos para transporte da área até o LFNA. No LFNA as amostras foram destorroadas suavemente e secas ao ar por um período de 48 horas. Após secas, as amostras foram novamente destorroadas de modo a desagregar torrões minerais ou orgânicos. Após completamente destorroadas, foram passadas em peneira de 2 mm, para separar a fração maior que 2 mm, as quais foram descartadas. A amostra de solo composta pela fração menor que 2 mm foi pesada e acondicionada em porta amostra do tipo béquer Marinelli de 1 litro. A quantidade da massa de solo utilizada depende da atividade de ^7Be presente no solo amostrado, da eficiência do detector utilizado e do tempo disponível para realizar as medidas. No presente trabalho, a atividade média do ^7Be foi em torno de 20 Bq.kg^{-1} . Para os detectores utilizados, em um tempo de análise das amostras de no mínimo 24 horas, tais características permitiram utilizar béqueres Marinelli de 1 litro, ao invés de 2 litros, e massa de solo de aproximadamente 1 kg.

5.4 CALIBRAÇÃO EM ENERGIA

Um requerimento essencial para a análise das linhas gama presentes no espectro de uma amostra, adquirido pelo sistema de espectrometria de raios 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 calibração em energia é realizada através da medida de espectros de fontes de radionuclídeos dos quais se conhecem os raios gama emitidos, fazendo-se a associação destas energias com o seu respectivo canal no 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 do sistema, é possível associar ao canal da centróide de um pico a energia correspondente e através de tabelas de radionuclídeos determinar a que radionuclídeo pertence tal raio gama. Neste trabalho, a calibração em energia foi realizada diretamente no programa MAESTRO™, responsável pelo controle e armazenamento dos dados adquiridos pelo MCA, que faz um ajuste linear quando duas linhas de energia são definidas e um ajuste quadrático se três ou mais linhas de energia são definidas. Para fazer esta calibração foi utilizada uma fonte padrão de ^{137}Cs e outra de ^{60}Co .

5.5 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE

Quando o espectro de raios gama de uma amostra é obtido, tendo realizado a calibração em energia (ver item 5.4), é possível identificar as linhas gama e os respectivos radionuclídeos emissores destas presentes na amostra.

Além de identificar quais radionuclídeos estão presentes no espectro, pode-se determinar também qual a atividade média de cada radionuclídeo na amostra utilizando a seguinte equação:

$$A = \frac{N}{\varepsilon m_a t P_\gamma} \quad (17)$$

Onde:

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

Pode-se observar que, na equação 17, são apresentadas duas variáveis que não se conhece *a priori*, A e ε . Desta forma, torna-se necessário determinar uma (ε) para se conhecer a outra (A). 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). Neste trabalho foram utilizadas amostras preparadas no próprio laboratório através da dissolução de amostra IAEA em solo com atividade conhecida e amostra pura da IAEA como explicado no item 5.5.1.

5.5.1 Amostras Certificadas

Imediatamente após o acidente na usina nuclear de Chernobyl, os laboratórios da Agência Internacional de Energia Atômica iniciaram coletas de vários tipos de amostras ambientais para o programa permanente do Serviço de Controle de Qualidade Analítico AQCS (sigla em inglês de *Analytical Quality Control Services*). Tais amostras iriam servir como material para estudos de intercomparação. Foi antecipado que a concentração dos radionuclídeos nas amostras deveria ser maior que em materiais de intercomparação distribuídas antes do acidente de Chernobyl. Algumas destas amostras são constituídas de solo.

Duas amostras de solo certificadas da IAEA foram utilizadas no presente trabalho. “IAEA-375 soil” para determinação da curva de eficiência e “IAEA-327 soil” para validação da metodologia, ambas em equilíbrio secular. A amostra “IAEA-327 soil” foi diluída em outra amostra de solo conhecida, pois a quantidade disponível de tal amostra não era suficiente para reproduzir a geometria da amostra utilizada para determinação da curva de eficiência. Para a diluição foram utilizados 178,4 gramas da amostra IAEA-327 e 937,7 gramas de solo de espectro gama previamente conhecido. Tal solo conhecido foi coletado de uma profundidade de 40 – 50 cm. Isso foi realizado para minimizar o espectro da amostra final, pois, nesta profundidade, verificou-se anteriormente que a atividade do ^{137}Cs era nula.

5.5.2 Determinação da Curva de Eficiência do Detector

A eficiência de detecção é a capacidade dos detectores de produzir um pulso de saída para cada quantum de radiação que interage com o volume ativo do detector. No presente trabalho, a eficiência intrínseca dos detectores utilizados sempre é menor que 1, visto que as radiações secundárias têm um livre caminho médio muito grande, conseguindo passar pelo detector sem interagir ou interagindo parcialmente com seu volume ativo.

Após o sistema ser calibrado em energia, é possível identificar os radionuclídeos dentro de uma amostra e, portanto a quantidade de contagens que este gerou (N). A partir das amostras certificadas com as atividades de vários radionuclídeos conhecidas (citadas no item 5.1.1.), foi determinada a eficiência de contagem ε para cada detector utilizado neste trabalho através de um rearranjo simples da equação 17, como mostrado na equação 18.

$$\varepsilon = \frac{N}{A m_a t P_\gamma} \quad (18)$$

5.5.3 Validação da Metodologia

Para que exista confiabilidade nos ajustes obtidos da curva de eficiência, e desta forma, para que exista a confiabilidade da atividade de ^7Be obtida na área de estudo, torna-se necessário validar os resultados da curva de eficiência.

Conhecendo-se o ajuste da curva de eficiência de contagem, numa dada geometria e um dado detector, pode-se determinar a atividade de qualquer radionuclídeo dentro de uma amostra desconhecida, desde que a energia esteja dentro daquela utilizada para construção da curva.

Isto pode ser facilmente realizado utilizando uma amostra que seja antecipadamente certificada por alguma agência ou laboratório, amostra esta que deve ser diferente daquela utilizada para construir a curva de eficiência.

No trabalho, como discutido no item 5.5.1, utilizou-se a amostra “IAEA 327 soil”, diluída e em equilíbrio secular, para realizar a validação dos resultados. O tempo de aquisição foi idêntico ao tempo médio de aquisição dos dados das amostras da área de referência, ou seja, 24 horas para o detector de 66% de eficiência relativa e 48 horas para o detector de 10 %.

A atividade da amostra de solo preparada é obviamente distinta da amostra de solo certificado puro. Para se calcular a atividade da amostra final (A_{fin}), foram utilizadas as duas equações que seguem abaixo. Primeiramente, tem-se que obter a atividade do solo certificado referente aos 178,4 g ($A_{178,4}$) em Bequerel (Bq). Na equação 19 é apresentado o modo de se obter tal resultado:

$$A_{178,4} = A_{ref} * 0,1784 \quad (19)$$

onde A_{ref} representa a atividade certificada pela IAEA em Bq.kg^{-1} e a constante multiplicativa é nada mais do que o valor da massa para qual deseja-se corrigir a atividade expressa em kg. Para se determinar a atividade da amostra no final (A_{fin}) em Bq.kg^{-1} basta aplicar a equação 20, onde m_{total} é a massa total da amostra já diluída em kg.

$$A_{fin} = \frac{A_{178,4}}{m_{total}} \quad (20)$$

Desta forma pode-se utilizar novamente a equação 17, determinar experimentalmente o valor da atividade e comparar com o obtido na equação 20. O desvio no

valor obtido na equação 20 pode ser facilmente obtido a partir da propagação de erros, como mostrado na equação 21.

$$\sigma_{A_{fin}} = \sqrt{\left(\frac{1}{m}\right)^2 \cdot \sigma_{A_{178,4}}^2 + \left(\frac{-A_{178,4}}{m^2}\right)^2 \cdot \sigma_m^2} \quad (21)$$

5.5.4 Limite Mínimo de Detecção

Visto que em todo espectro adquirido existe um fundo devido à radiação natural, ruído da eletrônica e fundo Compton, é imprescindível 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 usado para expressar a habilidade de detecção de um sistema de medida, ou seja, é a medida de sua habilidade em detectar um raio gama na presença da 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 (IAEA, 1989) o uso da seguinte equação:

$$L_D = 4,66 \sigma_B \quad (22)$$

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 o valor mínimo da contagem que pode ser assumido representar uma atividade com um grau de confiança de 95%. Através do LMD, equação 22, pode-se determinar a atividade mínima detectável utilizando a equação 17.

$$A = \frac{4,66 \cdot \sigma_B}{\varepsilon m_a t P_\gamma} \quad (23)$$

6 RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 CURVA DE EFICIÊNCIA E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A realização do trabalho só é possível com a determinação das curvas de eficiência para os detectores utilizados no trabalho. Neste trabalho utilizou-se a amostra “IAEA-375 Soil” (IAEA,1996), produzida pela IAEA, para calibração de ambos os detectores.

Possuindo uma amostra certificada, sabe-se que a eficiência absoluta ϵ de um detector irá ser determinada pela razão entre o número líquido de contagens sob o fotopico N_L (contagens) e a atividade A ($Bq.kg^{-1}$) da amostra certificada, a massa m (kg) da amostra e o tempo de medida t (s), como mostrado na equação 18 no item 5.5.2. Desta forma, verificaram-se as contagens líquidas sob o fotopico de interesse, substituiu-se os parâmetros da amostra e assim, obteve-se as curvas de eficiência para os detectores de 10% e 66% como mostrado na figura 26.

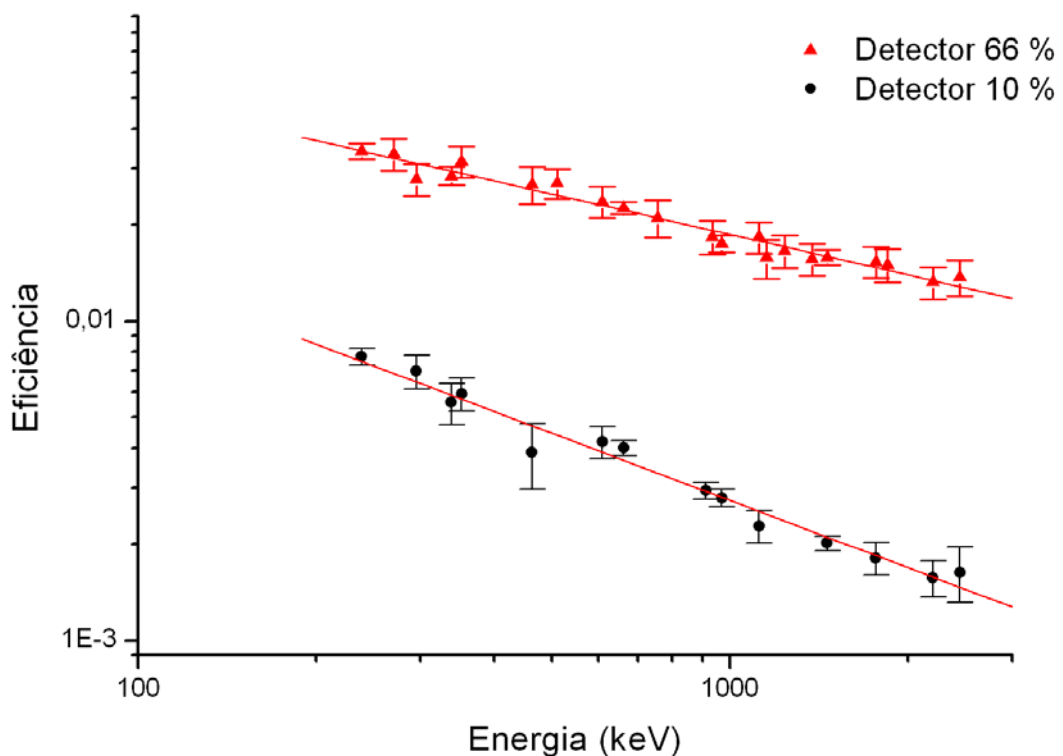


Figura 26 – Curva de Eficiência para ambos os detectores.

Os dados foram linearizados alterando-se a escala do gráfico para logarítmica. Assim, foi possível realizar um ajuste linear dos pontos medidos. Os parâmetros encontrados no ajuste, mostrados na figura 26 e as equações que os representam são apresentados nos quadros 24 e 25 respectivamente para os detectores de 66% e 10%. Pode-se verificar que a qualidade do ajuste foi muito boa (valor de R), assim como os desvios nos parâmetros do ajuste também foram relativamente pequenos (4,8% e 4,3% para o coeficiente angular do detector de 66% e 10%, respectivamente, e 10,6% e 19,1% para o coeficiente linear do detector de 66% e 10%, respectivamente).

$\log(\epsilon) = A + B \cdot \log(E) \text{ [keV]}$		
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Erro</i>

A	-0,47	0,05
B	-0,42	0,02

R		
	0,98	

(24)

$\log(\epsilon) = A + B \cdot \log(E) \text{ [keV]}$		
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Erro</i>

A	-0,47	0,09
B	-0,69	0,03

R		
	0,99	

(25)

Como descrito no item 5.5.3. um importante passo no trabalho é a validação dos dados ou validação da metodologia, como alguns autores preferem denominar. Mediram-se amostras certificadas e foi calculada a atividade com base nos valores da curva de eficiência mostrada nos quadros 1 e 2, para verificar a confiabilidade dos resultados. A seguir os dados são mostrados de duas maneiras, na tabela 6 e, para melhor visualizar os resultados, no gráfico da figura 27.

Tabela 6 – Dados da validação dos resultados utilizando amostra IAEA 327 soil; resultados apresentados com 95% de confiabilidade

Radionuclídeo	Energia (keV)	Atividade de Referência (Bq.kg ⁻¹)*	Atividade Medida (Bq.kg ⁻¹)	
			Detector 10%	Detector 66%
²¹² Pb	238,63	4,7 - 7,7	7,54 - 9,02	6,43 - 7,69
²¹⁴ Pb	295,21	3,8 - 6,6	5,2 - 7,2	4,78 - 6,36
²²⁸ Ac	338,32	4,7 - 7,7	7,2 - 10,4	5,26 - 7,14
²¹⁴ Pb	351,92	3,8 - 6,6	6,6 - 8,6	6,9 - 9,0
²²⁸ Ac	463,00	4,7 - 7,7	5,4 - 8,8	5,4 - 7,9
²⁰⁸ Tl	583,14	4,7 - 7,7	4,70 - 6,20	6,14 - 7,72
²¹⁴ Bi	609,31	3,8 - 6,6	6,09 - 8,03	5,20 - 6,80
¹³⁷ Cs	661,62	2,7 - 3,3	2,52 - 2,94	2,71 - 3,11
²²⁸ Ac	911,07	4,7 - 7,7	5,26 - 6,69	5,15 - 6,55
²²⁸ Ac	969,11	4,7 - 7,7	7,3 - 9,6	6,00 - 7,68
²¹⁴ Bi	1120,30	3,8 - 6,6	8,5 - 11,4	5,1 - 7,2
⁴⁰ K	1460,78	90 - 108	85,1 - 97,9	86,0 - 99,2
²¹⁴ Bi	1764,50	3,8 - 6,6	5,5 - 7,9	6,3 - 8,4
²¹⁴ Bi	2204,20	3,8 - 6,6	6,2 - 11,9	5,5 - 9,0
²¹⁴ Bi	2447,90	3,8 - 6,6	6,6 - 21,8	6,6 - 17,7

* Atividade de referência fornecida pela IAEA (Bojanowski, 2001) calculada para 178,4 gramas de solo misturado a 937,7 gramas de solo padrão do LFNA.

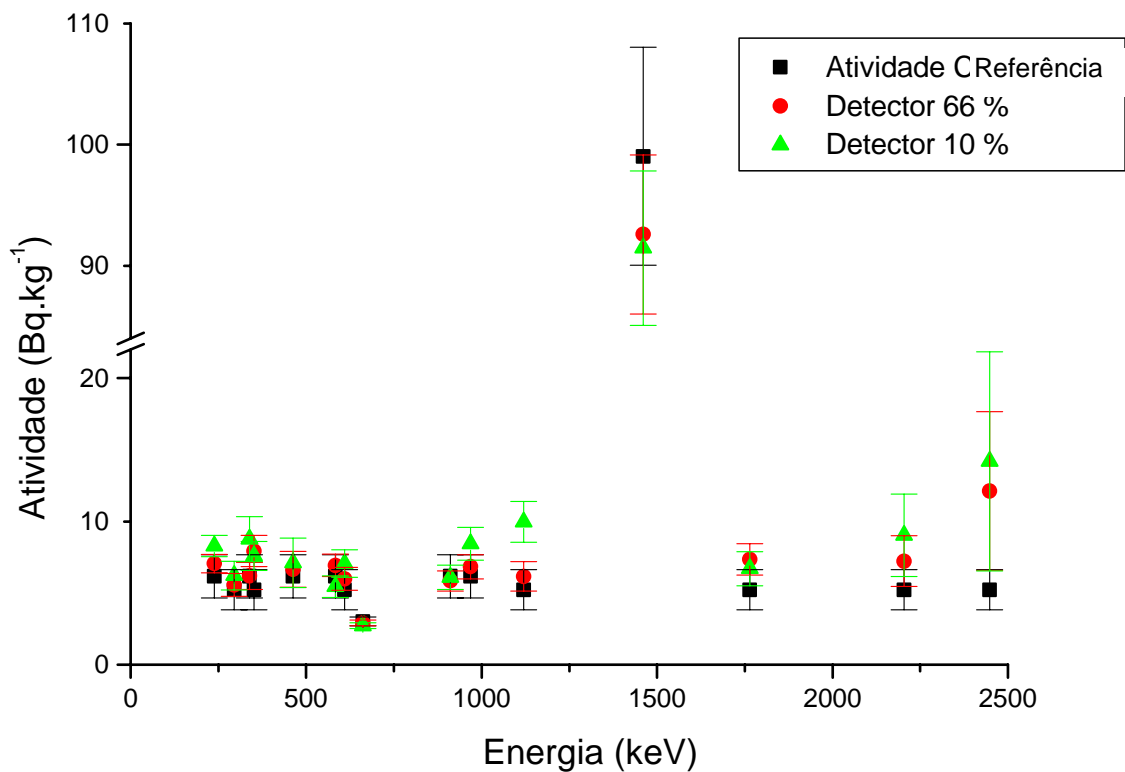


Figura 27 – Validação da curva de eficiência obtida da amostra IAEA 327 soil.

Pode-se verificar que, dentro dos desvios experimentais, dentre as 15 atividades comparadas, apenas em um caso para cada detector os intervalos não se superpuseram, mas ficaram muito próximas. Desta forma, considera-se que houve uma boa validação da curva de eficiência.

6.2 ATIVIDADE MÍNIMA DETECTÁVEL

O limite mínimo de detecção de um espectrômetro de raios gama é a medida de sua habilidade em detectar um pico de raio gama na presença de interferência da radioatividade natural e do espalhamento Compton de raios gama de alta energia originados na fonte. A Tabela 7 apresenta os valores da atividade mínima detectável de ^7Be para detectores utilizados neste trabalho usando a equação 23.

Tabela 7 – Atividade mínima detectável de ^7Be utilizando geometria béquer Marinelli com 1,5 kg de solo para um tempo de detecção de (*) 8 e () 24 horas**

Detector	AMD (Bq kg^{-1})
GEM10185-P (LFNA) **	0,20
GEM-M-7080-P-S (LFNA) *	0,09

6.3 INVENTÁRIO MENSAL

Durante o trabalho, foram realizadas medidas da precipitação pluviométrica diária pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) para a cidade de Londrina. O ponto de amostragem da precipitação se localizava a aproximadamente 2 km da área onde foram coletadas as amostras de solo. O dispositivo instalado para determinar a precipitação possui uma resolução de 0,5 mm, resolução esta suficientemente boa para a realização do estudo.

Amostras de solo foram coletadas da área de referência mensalmente em incrementos de 1 cm até a profundidade onde fosse possível encontrar ^7Be , profundidade esta que não ultrapassou os 3 primeiros centímetros de solo. Deste modo foi possível realizar um estudo da correlação entre a precipitação mensal e o inventário de ^7Be que ficou retido no

solo. O método para preparação destas amostras foi idêntico ao descrito no item 5.3. Foi construído um gráfico do inventário mensal de ^7Be e da precipitação em função do período de estudo, como mostrado na figura 28. A precipitação pluviométrica média anual para a região de estudo tem valor em torno de 1100 mm.ano^{-1} .

Para construir o gráfico da figura 28 e 29, no início do trabalho, 17 de novembro de 2005, foi medido o inventário inicial de Berílio-7, sendo este utilizado na próxima medida, 22 de dezembro de 2005, como padrão zero e assim sucessivamente. Ou seja, para que fosse possível obter o valor do inventário mensal é necessário descontar a contribuição do mês anterior, visto que os pontos de coleta eram distintos para cada mês. Desta forma, o valor do inventário de um dado mês foi subtraído do mês anterior, levando em consideração a desintegração radioativa ocorrida durante o período, e assim pode-se construir a equação 24 que foi utilizada para construção do gráfico:

$$I_m = I_{me} - I_{am} e^{-\lambda T} \quad (24)$$

onde, I_m é o inventário mensal, I_{me} é o inventário medido, I_{am} é o inventário do mês anterior, λ é a constante de desintegração radioativa do Berílio-7 e T é o tempo decorrido entre os dois eventos.

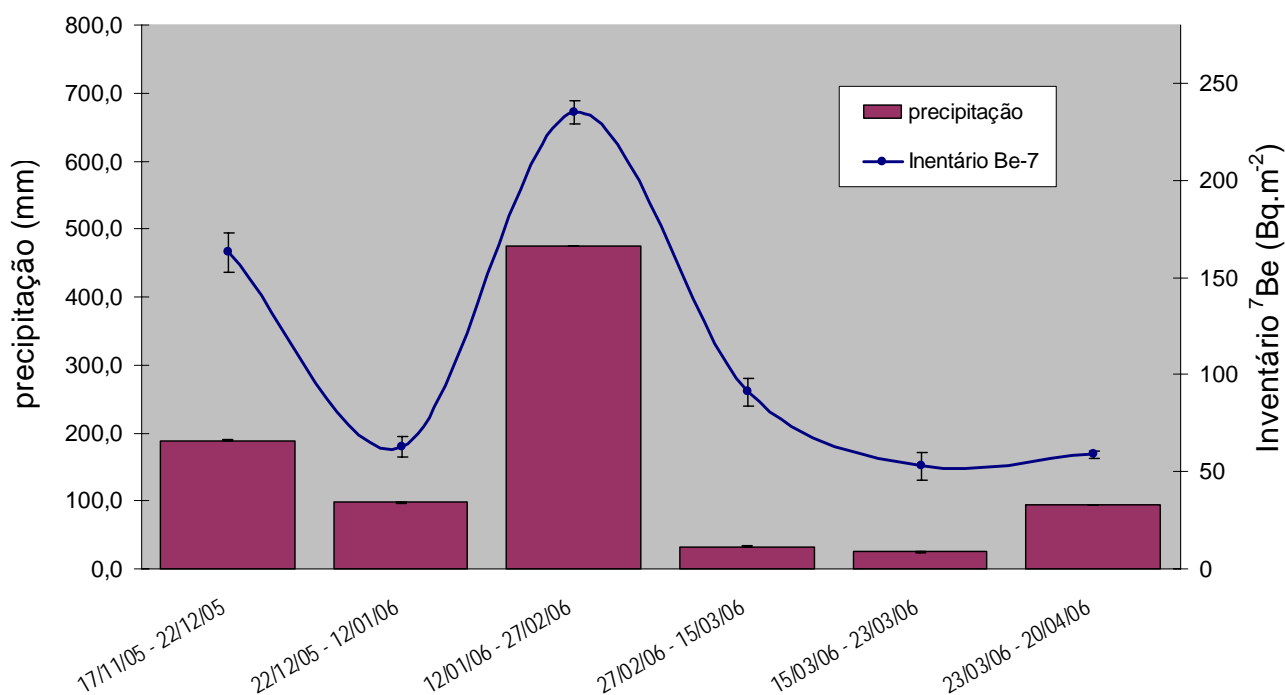


Figura 28 – Inventário de ^7Be associado com a precipitação mensal durante o período de 17 de Novembro de 2005 até 20 de abril de 2006.

No entanto tal figura não permite visualizar a qualidade do ajuste dos dados do inventário em função da precipitação. Para melhorar a percepção de tal relação, os dados de inventário foram ajustados em função da precipitação em um gráfico cartesiano, como apresentado na figura 29.

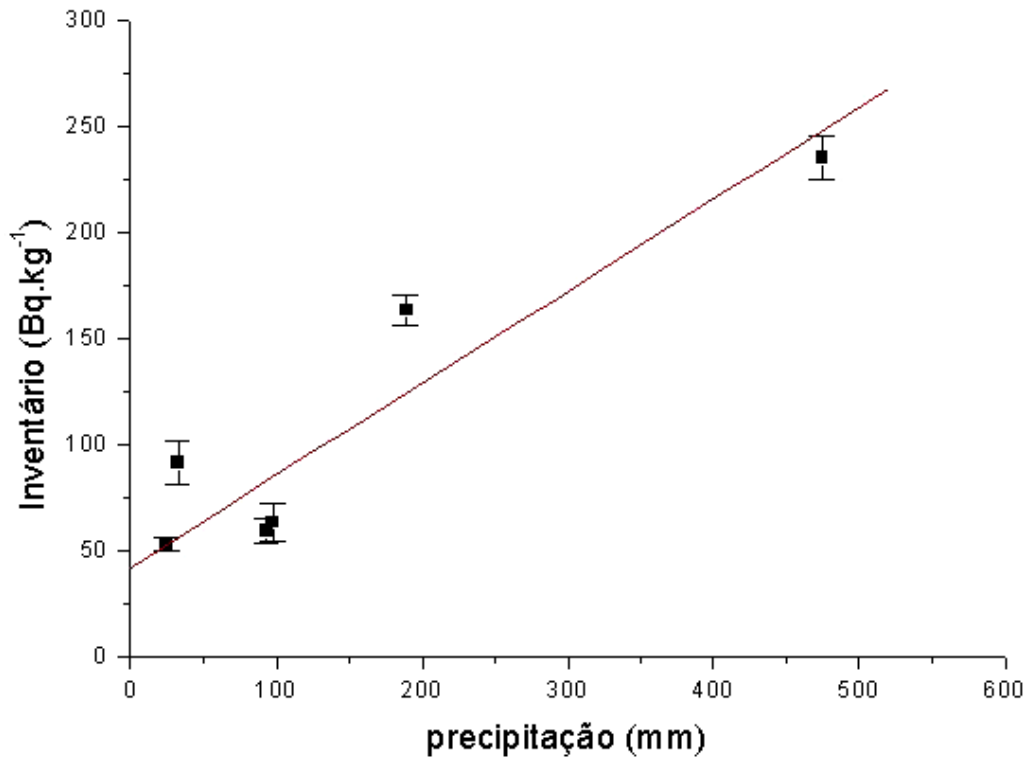


Figura 29 – Ajuste linear entre a precipitação (mm) e inventário (Bq.kg⁻¹).

Observando os dados da figura 29 percebe-se uma tendência de correlação de 1ª ordem, deste modo foi realizado um ajuste linear dos pontos. Os parâmetros encontrados no ajuste e a equação que os representam estão apresentados no quadro 25.

Inventário(Bq.kg ⁻¹) = A + B.precipitação (mm)		
Parâmetro	Valor	Erro
A	41,93	11,25
B	0,433	0,087
R	0,93	

(25)

Ao analisar os dados obtidos do ajuste dos pontos, pode-se perceber um bom ajuste linear dos dados, demonstrado pelo valor de R e dos desvios nos parâmetros do ajuste.

6.4 DISTRIBUIÇÃO VERTICAL E PROFUNDIDADE DE RELAXAÇÃO DE MASSA.

Com a precipitação, principalmente úmida, o ^7Be chega à superfície do solo e nele se liga rapidamente. Devido à sua pequena meia vida, o ^7Be realiza movimento de difusão no solo muito pequeno, chegando, no máximo a 3-5 centímetros de profundidade.

Os fatores que determinam a variação da atividade com a profundidade do solo incluem a condição atmosférica, o conteúdo de umidade do solo, a estrutura do solo e a taxa na qual a água pode infiltrá-lo, além das características de sorção do solo.

Para determinação da profundidade da erosão e da redistribuição horizontal do solo é necessário realizar a distribuição vertical de berílio no solo, determinando desta forma como deverá ser a forma da distribuição em solos não perturbados e o coeficiente de relaxação de massa.

Para determinação da distribuição vertical coletamos amostras dentro da área de referência com o auxílio do prato raspador mostrado no item 4.2.2. Para determinar o perfil de ^7Be no solo e ajustar uma função matemática para este, foram coletadas amostras em incrementos de 1 cm de profundidade. Na figura 30 são apresentados 3 perfis de distribuição para diferentes datas. Pode-se considerar que tais perfis representam muito bem o perfil de distribuição de todos os pontos não perturbados.

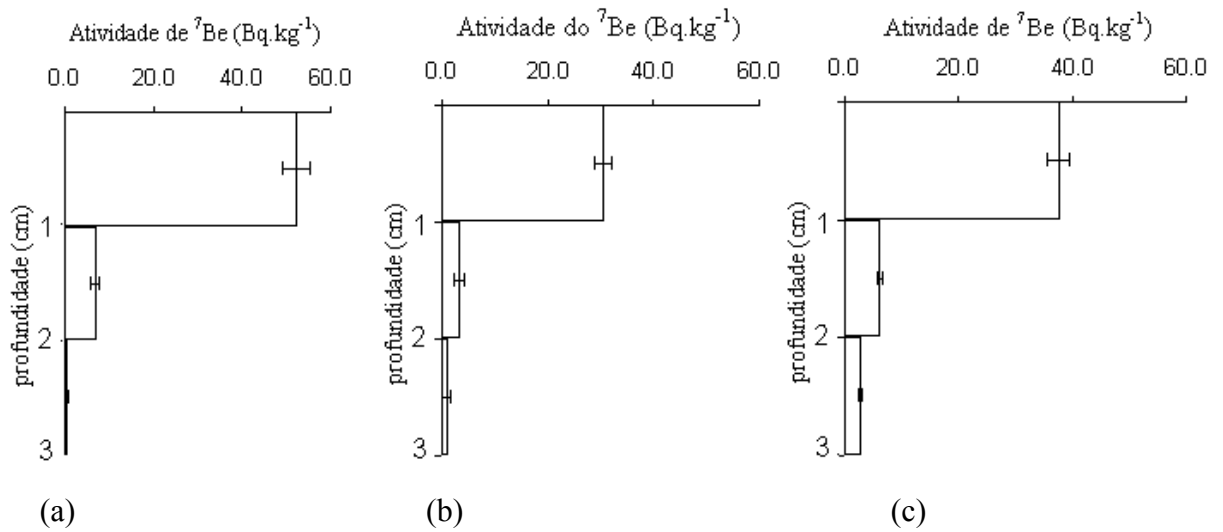


Figura 30 – Perfis de distribuição de ^7Be no solo coletado na área de referência para as datas de (a) 17/11/2005 (b) 27/02/2006 e (c) 15/03/2006.

Como já visto anteriormente nas equações (13) e (14), as estimativas de erosão e deposição de solo providas pelas medidas do inventário de ^7Be são fortemente dependentes dos valores do coeficiente de relaxação de massa, h_0 , e da concentração inicial de ^7Be na superfície do solo, $C(0)$, que devem ser determinados. Desta forma, uma atenção especial foi tomada na determinação destes dois parâmetros em relação ao tempo de aquisição dos dados e o número de amostras necessárias.

A distribuição vertical da atividade do ^7Be observado no local de referência foi também utilizada para determinar a profundidade abaixo da qual a concentração de ^7Be é menor que o limite de detecção. Tal profundidade foi usada para definir a profundidade dos *cores* das amostras coletadas ao longo da área de estudo, para desta forma maximizar a eficiência de contagem. Solos acima desta profundidade foram analisados para determinar o inventário do ponto, o restante do solo foi descartado.

Assumindo que o perfil de ^7Be , associado às datas de 17/11/2005, 27/02/2006 e 15/03/2006, da área de referência são representativos da distribuição de berílio no solo, como apresentado na figura 30, podemos determinar o valor da profundidade de relaxação de massa e o inventário de referência para cada uma destas datas, ajustando uma função exponencial decrescente para o perfil, como mostrado nas figuras 31, 32 e 33.

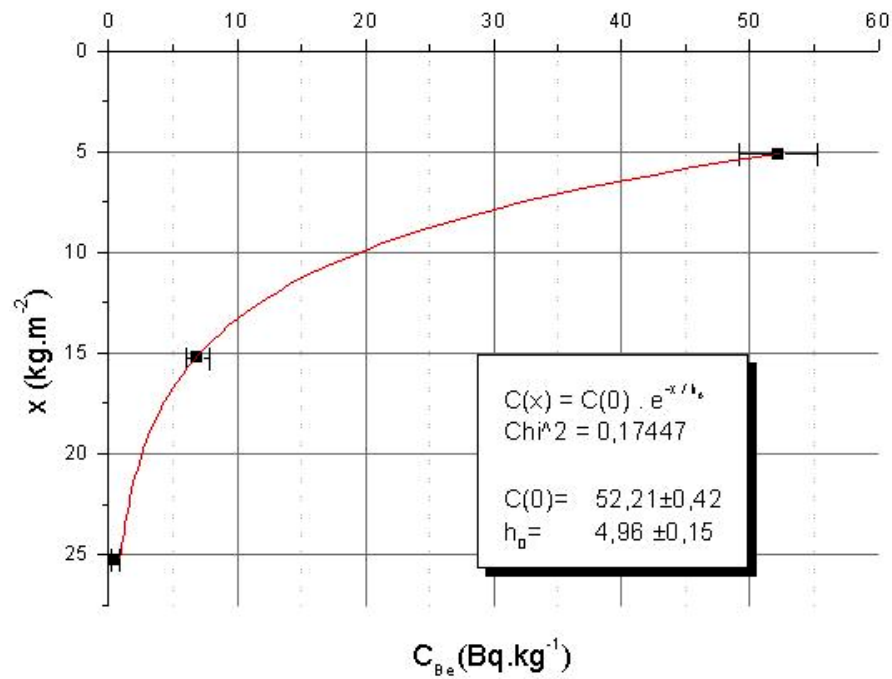


Figura 31 – Ajuste dos pontos do perfil de ${}^7\text{Be}$ no solo referente à data 17/11/2005.

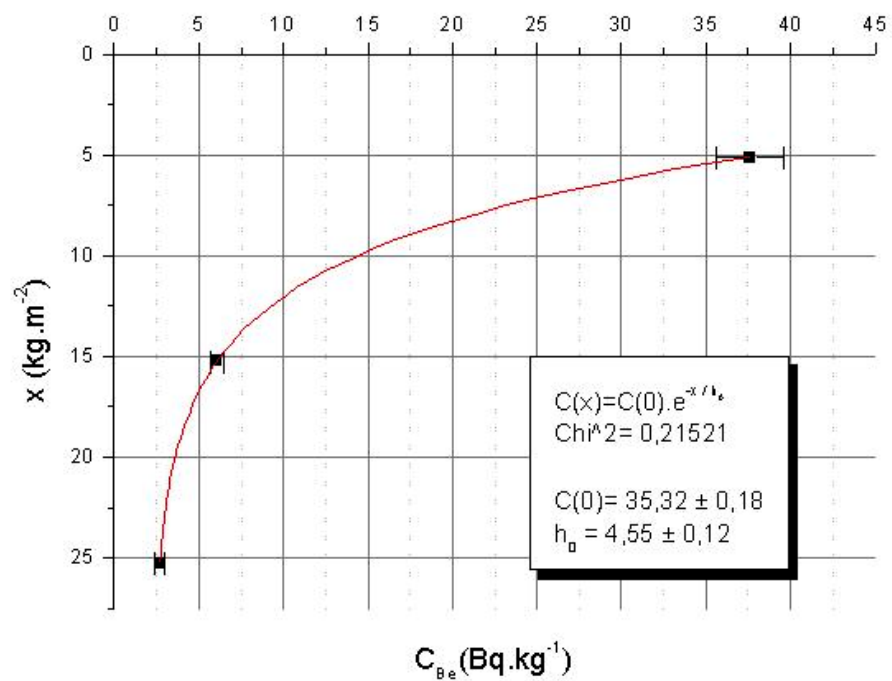


Figura 32 – Ajuste dos pontos do perfil de ${}^7\text{Be}$ no solo referente à data de 15/03/2006

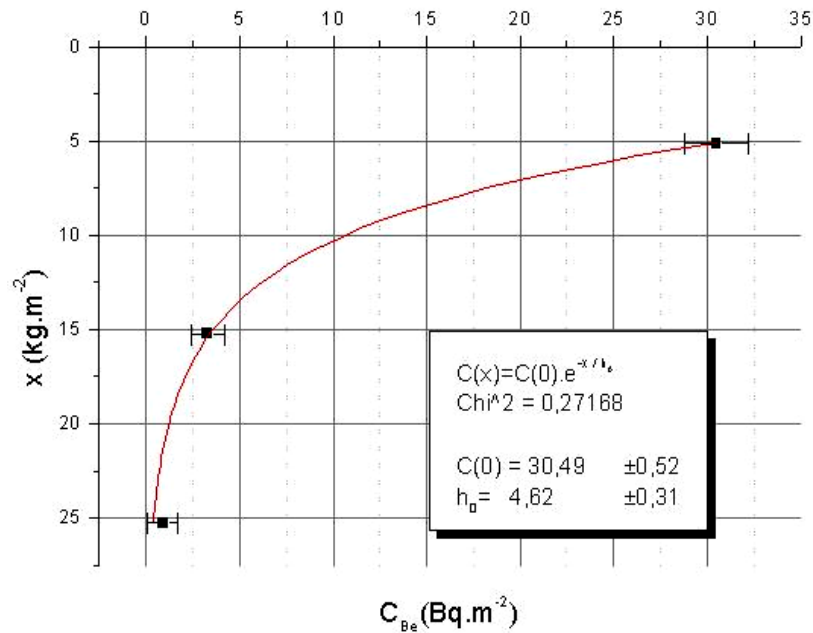


Figura 33 – Ajuste dos pontos do perfil de ^7Be no solo referente à data de 27/02/2006.

A partir dos dados dos parâmetros de h_0 apresentados nas figuras 31, 32 e 33, pode-se fazer a média dos valores de h_0 e determinar seu desvio padrão como mostrado na equação abaixo:

$$h_{0m} = \frac{h_{0a} + h_{0b} + h_{0c}}{3} = 4,71$$

$$\sigma_{h_0} = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \left(\sum (h_{0x} - h_{0m})^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 0,22 \quad (26)$$

onde h_{0m} representa a média dos h_0 's obtidos nas figuras 31, 32 e 33 e σ_{h_0} representa o desvio na profundidade de relaxação de massa média (h_{0m}). Tal resultado pode ser comparado com outros encontrados na literatura internacional, como apresentado na tabela 8. A diferença no resultado do presente trabalho e o de Schüller pode ser devido a diferença no tipo de solo utilizado. Na tabela 9 são apresentadas as propriedades físicas dos tipos de solo apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Comparação dos resultados da profundidade de relaxação de massa

Referência	Tipo de Solo	H_0 (kg.m^{-2})
Blake, 1999	Não mencionado	5,4
Schüller, 2006	Ultissolo	2,14
Presente Trabalho	Latossolo	4,71

Tabela 9 – Propriedades físicas e químicas dos solos (adaptado de Rosadi,2007)

Tipo de Solo	Conteúdo Orgânico (kg/kg)	pH (H ₂ O)	Textura do solo		
			Areia	Silte	Argila
Ultissolo	0,0296	5,51	0,80	0,12	0,08
Latossolo	0,0292	4,93	0,10	0,20	0,70

O mesmo procedimento foi tomado em relação à concentração inicial de ⁷Be na superfície do solo.

$$C(0)_m = \frac{C(0)_a + C(0)_b + C(0)_c}{3} = 39 \text{ Bq.m}^{-2} \quad (27)$$

$$\sigma_{C(0)} = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \left(\sum (C(0)_x - C(0)_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 11 \text{ Bq.m}^{-2}$$

Onde $C(0)_m$ representa a concentração inicial média de ⁷Be na superfície do solo obtido a partir da concentração inicial da figura 31, $C(0)_a$, da figura 32, $C(0)_b$, e da figura 33, $C(0)_c$. $\sigma_{C(0)_m}$ representa o desvio padrão na concentração inicial de ⁷Be no solo.

6.5 DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL

As amostras foram coletadas durante o período de 09/03/2006 a 23/03/2006 antes de ocorrer a colheita da soja nas áreas que se encontravam plantadas. Para que fosse possível quantificar a redistribuição de solo na área foi realizada uma amostragem em grade de 4x3 com distância máxima entre os pontos de 14 metros. No total foram coletadas e analisadas 128 amostras de solo.

Para a maioria das amostras a profundidade de coleta não excedeu os 3 primeiros centímetros da superfície do solo, visto que a partir de tal profundidade não se encontra ⁷Be. Nos pontos onde visualmente percebeu-se que houve grande quantidade de deposição de solo, as amostras foram coletadas até uma profundidade maior, chegando até a 10 cm de profundidade para os pontos de menor altitude e conseqüentemente maior deposição. A figura 30 apresenta uma foto do local de menor altitude da área sem plantio,

onde se percebe visualmente que, nestes pontos, a quantidade de particulado fino se apresenta em grande quantidade na superfície.



Figura 34 – Pontos de menor altitude com acúmulo de solo (particulado fino).

Como o período de estudo corresponde a aproximadamente três meias-vidas do ^7Be , pode-se concluir que, mesmo que houvesse alguma não homogeneidade inicial de ^7Be , esta foi totalmente desprezada devido ao período de redistribuição de solo que estamos interessados e principalmente devido a mecanização do solo que ocorreu antes do plantio.

A variação no inventário de ^7Be ocorrida nas áreas está mostrada nas figuras 34, 35 e 36. As áreas são divididas em três partes devido à imposição do programa SURFER, que foi utilizado tanto para construção do modelo digital de terreno quanto da redistribuição do inventário e da taxa de erosão e deposição de solo.

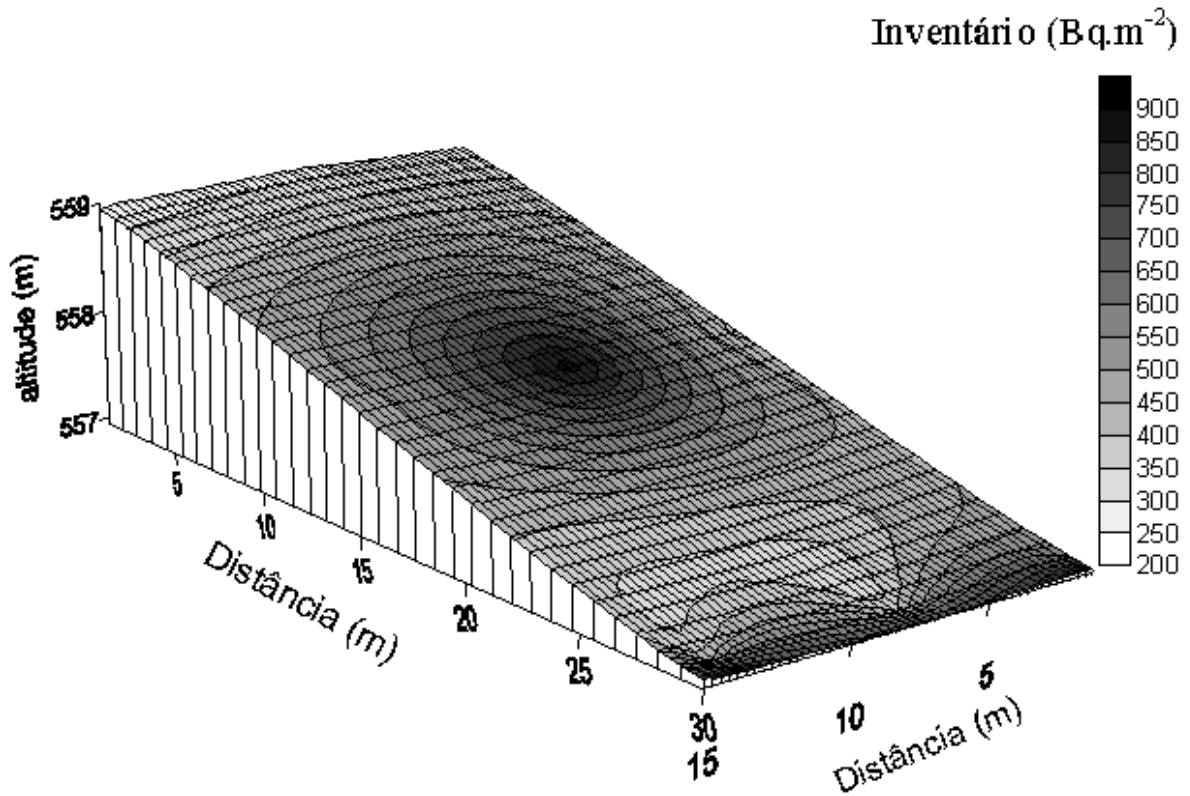


Figura 35 – Variação no inventário de ⁷Be na área sem nenhum tipo de plantio.

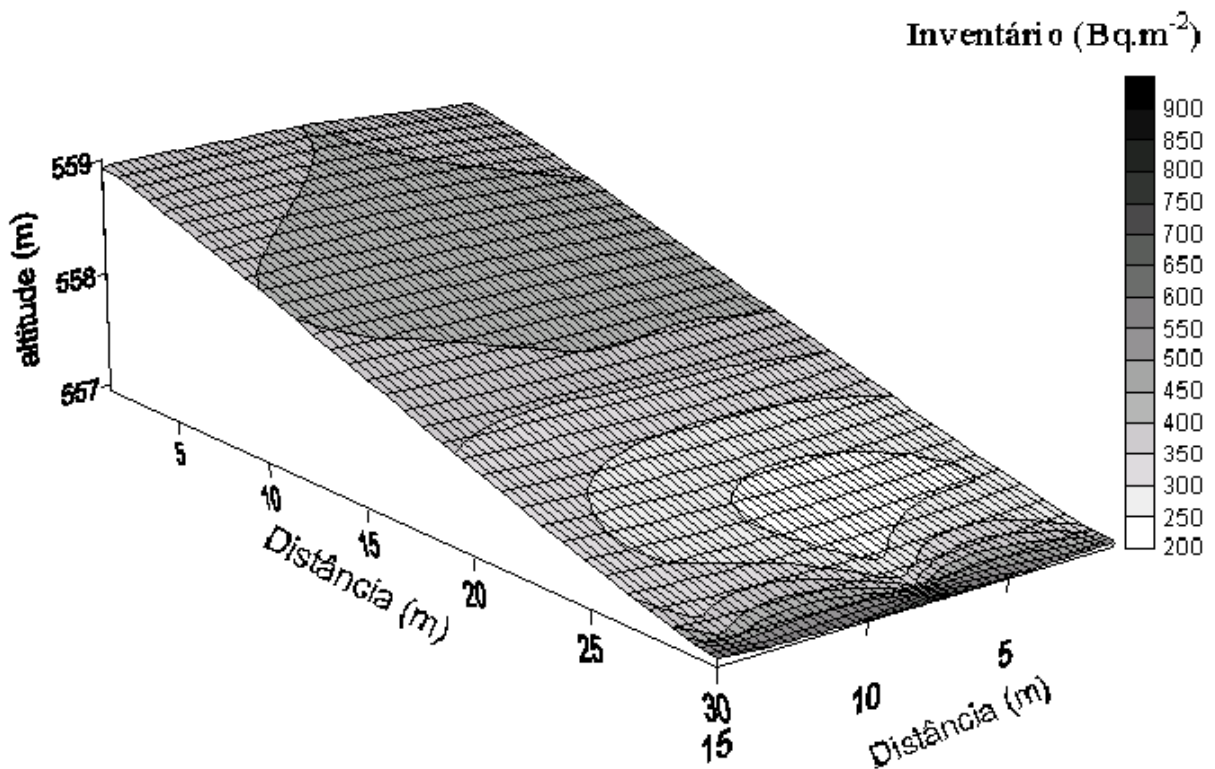


Figura 36 – Variação no inventário de ⁷Be nas áreas com soja plantada perpendicular ao sentido do declive.

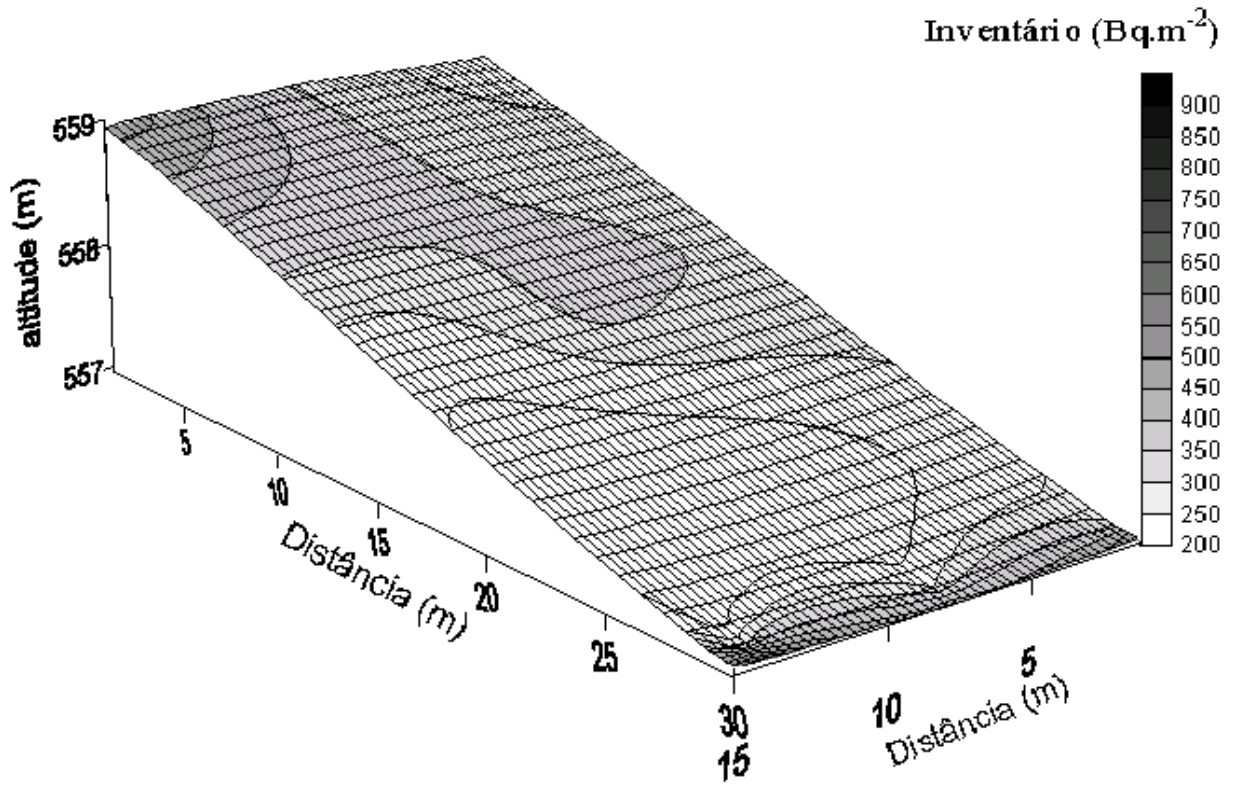


Figura 37 – Variação no inventário de ${}^7\text{Be}$ nas áreas de estudo com soja no mesmo sentido do declive.

A magnitude da taxa de redistribuição de solo, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, obtidas com o auxílio das equações (13) e (14) estão mostradas nas figuras 37, 38 e 39. Nestas os valores negativos indicam que houve erosão de solo, os valores positivos estão indicando que houve deposição e os zeros indicam que não houve nenhum tipo de movimento ou a taxa de erosão de solo foi idêntica à taxa de deposição.

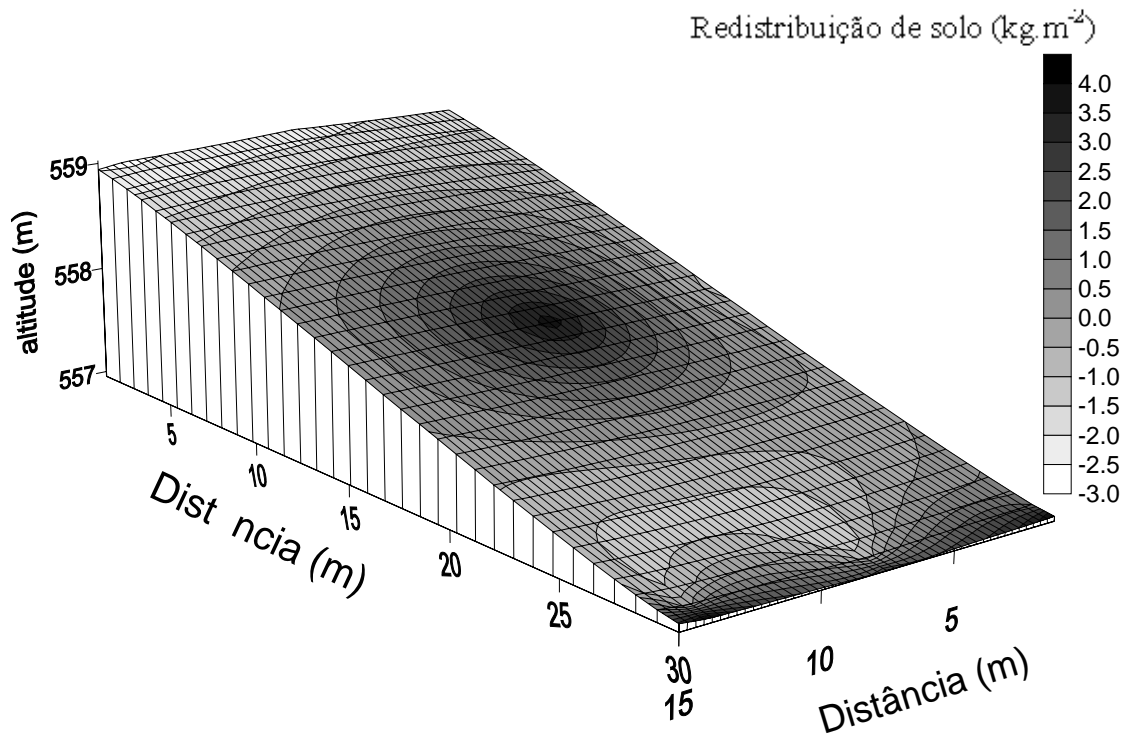


Figura 38 – Redeposição de solo na área de estudo sem nenhum tipo de plantio (valores negativos indicam erosão e valores positivos correspondem à deposição de solo).

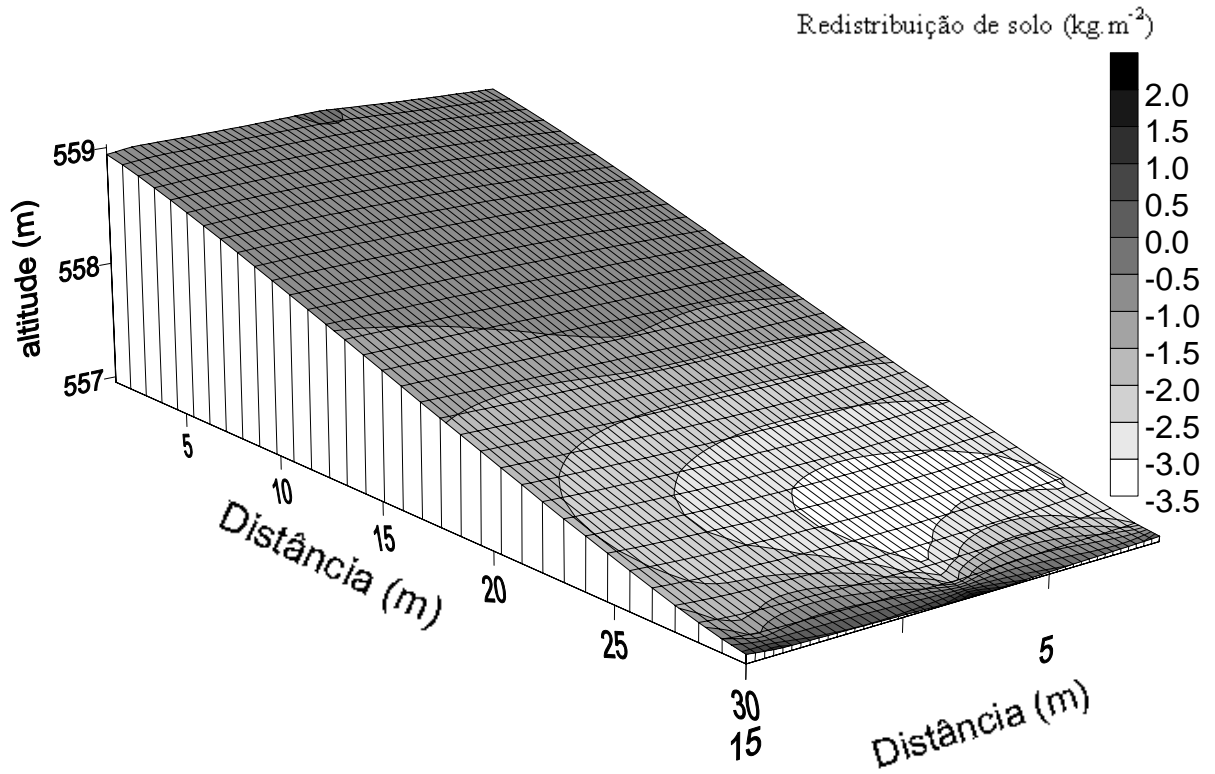


Figura 39 – Redeposição de solo na área de estudo com soja plantada perpendicular ao sentido do declive (valores negativos indicam erosão e valores positivos correspondem à deposição de solo).

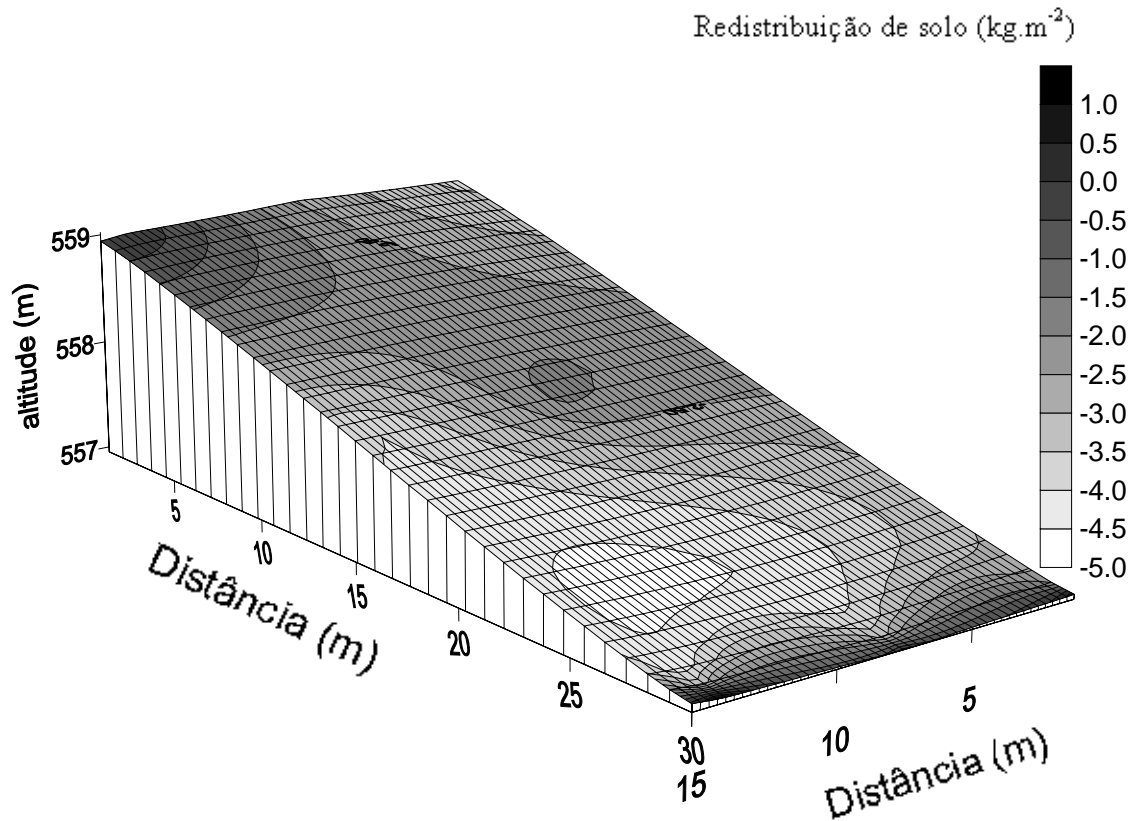


Figura 40 – Redeposição de solo na área de estudo com soja no mesmo sentido do plantio (valores negativos indicam erosão e valores positivos correspondem à deposição de solo).

Estes resultados mostram visualmente que existe erosão por quase a toda a extensão das áreas, menos nos pontos inferiores onde o solo foi depositado. Entretanto, alguns pontos apresentaram um comportamento anômalo, não condizendo com a macro topografia do terreno. Pode-se perceber tais pontos na figura 37, solo sem plantio, onde uma certa quantidade de solo foi depositada no meio do terreno, na figura 39, soja plantada no sentido do declive, onde no canto superior esquerdo do terreno existe um ponto em que não houve movimentação de solo, e na figura 38, soja plantada perpendicular ao sentido do declive, onde a metade superior do terreno apresenta uma movimentação muito pequena de solo.

Uma possível explicação para as duas primeiras anormalidades, figura 37 e 39, pode estar na ocorrência de algumas micro topografias que interferem no resultado final de redistribuição do solo. Tais micro topografias são constituídas de pequenas alterações no relevo, alterações estas que não foram representadas no modelo digital de terreno devido a pequena variação e ao limitado número de pontos que foram tomados para construção deste modelo.

A terceira anormalidade, figura 38, provavelmente seja devido a forma como a soja foi plantada no terreno. Pode-se perceber que nesta área ocorreu a menor redistribuição de solo, seguido da área onde a soja foi plantada no sentido do declive e por último, onde houve maior quantidade de redistribuição de solo, a área que permaneceu durante o estudo sem nenhum tipo de cobertura viva, ou seja, sem plantio.

7 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram o potencial da técnica de espectrometria de raios gama com berílio-7 para determinação da erosão e redistribuição de solos superficiais em curtos períodos de tempo e constituem a primeira aplicação desta metodologia no Brasil. A técnica do ^7Be é uma valiosa ferramenta para o complemento das técnicas de uso do ^{137}Cs e ^{210}Pb não suportado que tem sido mais amplamente utilizada na literatura de estudos de redistribuição de solo. O ^{137}Cs e ^{210}Pb não suportado fornecem somente informações de longos períodos de redistribuição, enquanto que o ^7Be permite o estudo de pequenos períodos. Tal perspectiva de curto período tem sua relevância sendo constantemente aumentada em estudos de impacto ambiental pela variação climática, formas de plantios e outras ações humanas.

É apresentada no item 6.1. a validação dos resultados e pode-se notar que a técnica de espectrometria de raios gama pode ser utilizada com grande confiança nos resultados. Observa-se que a distribuição de ^7Be com a profundidade, mostrada no item 6.4, é similar aos resultados apresentados em outros trabalhos, tais como Wallbrink & Muray (1996) and Blake et al. (1999). Pode-se também observar que o ^7Be é fortemente absorvido pelo solo, não ultrapassando as primeiras camadas (3 – 5 cm), o que reforça o uso da técnica para determinação da erosão superficial de solo.

Através das medidas de amostras de solo e da correlação com a precipitação durante o intervalo de tempo de tais medidas, apresentadas no item 6.3. pode-se perceber que a deposição do ^7Be é devida principalmente à deposição úmida, fato este que é comprovado visto o bom ajuste dos dados apresentados na figura 29.

Uma constante de fundamental importância para realização do trabalho, a constante de relaxação de massa h_0 , foi calculada no item 6.4 e apresentou resultado similar ao obtido por Blake (1999), como apresentado na tabela 8. A diferença em relação ao resultado de Schüller (2006) pode ser explicada levando em consideração que diferentes tipos de solo resultam em diferentes constantes de relaxação de massa. Como continuidade deste trabalho deverá ser realizada amostragem de solo com incrementos mais precisos na profundidade, resultando em mais pontos para o ajuste da curva de penetração de berílio-7 no solo, desta forma precisando melhor o resultado obtido. Assim sendo será possível confirmar o resultado obtido no presente trabalho.

Foi possível observar nas figuras 37, 38 e 39 a diferença quantitativa da erosão e redistribuição de solo para duas formas de plantio da soja, assim como comparar, durante o mesmo período, a erosão ocorrida em uma área que se encontrava em pousio. Verificou-se que quando a soja é plantada cortando o declive, ou seja, perpendicular ao sentido deste, a redistribuição de solo foi menor, fato este que agrega uma grande vantagem econômica devido a menor perda de nutrientes do solo. O solo sem nenhuma cobertura vegetal fica muito exposto aos fenômenos de erosão, pois não existe nenhuma barreira para conter o solo que flui no sentido do declive, tal fato pôde ser confirmado no trabalho onde é apresentada a área sem plantio com a maior erosão de solo das três áreas estudadas. Pretende-se que o presente trabalho sirva de base para posteriormente auxiliar na quantificação do custo/benefício da forma de se realizar o plantio.

Sugere-se também como continuidade deste trabalho a medida do coeficiente de relaxação de massa para diferentes tipos de solo, a quantificação da redistribuição de solo para diferentes tipos de cultura e um estudo que abranja uma área de estudo com maiores dimensões, minimizando a influência de áreas vizinhas.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, J., Araéz, E.G., Villarroya, A., 1958. *Atlas universal Aguilar*. Ed. Aguilar, Madri.

APPOLONI, C.R., 2006. *Notas de aula de física nuclear*

BLAKE W.H., Walling D.E., He Q., 1999, *Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations*. Applied Radiation Isotopes v51, pp.599-605.

BOJANOWSKI, R., Radecki, Z., Campbell, M.J., Burns, K.I., Trinkl, A., 2001. *Report of the intercomparison run for the determination of radionuclides in soil.*, IAEA, Vienna, Austria.

CORRÊA, A. R., Godoy, H., Bernardes, L. R. M. 1982. *Características climáticas de londrina*. Curitiba. Instituto Agrônômico do Paraná. (Circular 5). 20pp.

EMBRAPA. 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 412pp.

FEELY, H.W., R.J. Larsen, and C.G. Sanderson. 1989. *Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air*. J. Environ. Radioact. v9, pp.223-249.

GUIMARÃES, C.O., 2005, *Eficiência de detectores HPGe para fótons de 4 a 10 MeV*. – Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.

IAEA. 1989. *Measurements of radionuclides in food and the environment: a guidebook*. Technical Reports n° 295. 169 pp.

IAEA, 1996. *Report on the intercomparison run IAEA-375: determination of radionuclides in soil sample IAEA-375*. IAEA, Vienna.

IAEA, 1998. *Use of ¹³⁷Cs in the study of soil erosion and sedimentation*, IAEA-TECDOC-1028, IAEA, Vienna.

IAEA, 2001. *Assessment of Soil Erosion Through the Use of ¹³⁷Cs and Related Techniques as a Basis for Soil Conservation, Sustainable Agricultural Production and environmental Protection*, IAEA-311-D1-RC-629.4, IAEA, Vienna.

IAEA, 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Vienna.

ICRP - International Commission on Radiological Protection - *References Man: Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristic*. ICRP, publication 23. Pergamon Press, Oxford. 1976.

KATHREN, R. L. 1998. *NORM sources and their origins*. Applied Radiation and Isotopes, v. 49, pp.149-168.

KLEMENT, Jr. A. W. 1982. *Natural sources of environmental radiation*. In Handbook of Environment Radiation, pp. 15 - 21, CRC Press, Boca Raton, FL.

KNOLL, G.F., 1979, *Radiation detection and measurements*, John Wiley & Sons.

LAL, R., 1994. *Soil erosion by wind and water: problems and prospects*. In: Lal, R. (Ed.), Soil erosion research methods, 2nd. Ed. Soil and water conserve. Soc. Amer., Akeny, IA pp. 1-9.

LOUGHRAN, R. J. 1989. *The measurement of soil erosion*. Progress in Physics Geographical, v. 13, pp. 216 – 233.

MATISOFF, G., Bonniwell, E.C., Whiting, P.J., 2002. *Soil erosion and sediment sources in an Ohio Watershed using berillium-7, cesium-137, and lead-210*. J. Environ. Qual. v.31. pp. 54-61.

PAPASTEFANOU, C. and Ioannidou, A. 1995. *Aerodynamic size association of ⁷Be in ambient aerosols*. Journal of Environmental Radioactivity. v.26. pp.273-282.

RITCHIE, J.C., McHenry, J.R., 1990. *Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review*. J. Environ. Qual. v.19. pp.215-233.

ROSADI, R. A. B., Afandi, Senge, M., Ito, K., Adomako, J. T., 2007. *The effect of water deficit in typical soil types on the yield and water requirement of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) in Indonesia*. JARQ v.41. pp.47–52.

SCHULLER, P., Iroumé, A., Walling, D.E., Mancilla, H.B., Castillo, A., Trumper, R.E., 2006. *Use of beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations*. J. Environ. Qual. v.35. pp.1756-1763.

TALPOS, S., Cuculeanu, V., 1997. *A study of the vertical diffusion of ^7Be in the atmosphere*. J. Environ., v.36. pp. 93-106.

TILL AND MEYER, 1983. Till, J.E. and H.R. Meyer. *Radiological assessment – A textbook on environmental dose analysis*. NUREG/CR-3332. ORNL-5968. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC 1983.

WALLBRINK P.J., Murray A.S., 1996. *Distribution and variability of ^7Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes*. Water Resource Research, 32.

WALLING, D.E., He, Q., 1998. *Use of fallout ^{137}Cs measurements for validating and calibrating soil erosion and sediment delivery models*. IAHS Publ. No. 249, pp.267-278.

WALLING, D.E., He, Q., 1999. *Improved models for estimating soil erosion rates from ^{137}Cs measurements*. J. Environ. Qual. v.28. pp.611-622.

WALLING, D.E., He, Q., Blake, W., 1999b. *Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short - and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land*. Water Resources Research 35 n° 12. pp.3865 - 3874.

WALLING, D.E., Quine, T.A., 1992. *The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys*. In: Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. IAHS Publ. No. 210, 143±152.

WEB.cena.usp.br/apostilas/Elisabete/aula_gama.pdf , acessado dia 26 de dezembro de 2006.
Yoshimory, M., Hirayama, H., Mori, S., Sasaki, K., Sakurai, H., 2003. *^7Be nuclei produced by galactic cosmic rays and solar energetic particles in the earth's atmosphere*. Pergamon, v.32. pp.2691-2696.

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