

# Modelos semi-empíricos para o método do $^{137}\text{Cs}$ na determinação da erosão de um solo LRd

**Elias Antunes dos Santos**

Centro Universitário do Sudoeste do Paraná –UNICS

Curso de Física

85555-000, Palmas – PR, Brasil

Caixa Postal 210

*eliasantunes@yahoo.com.br*

**Carlos Roberto Appoloni, Avacir Casanova Andreello**

Universidade Estadual de Londrina, UEL,

Departamento de Física

Laboratório de Física Nuclear Aplicada

CEP 86051-990, Londrina, PR

*appoloni@uel.br*

**Ronaldo L. Rufino, Rui C. M. Biscaia**

Instituto Agronômico do Paraná, IAPAR,

CEP 86047-590, Londrina, PR

*rlrufino@pr.gov.br*

*(Recebido: 27 de julho de 2005)*

**Resumo:** Usando o método do  $^{137}\text{Cs}$ , foram estudadas duas parcelas de experimento convencional de erosão, em solo do tipo Latossolo Vermelho Distroférico, localizadas no Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) na cidade de Londrina. Através da redução percentual do conteúdo de  $^{137}\text{Cs}$  em relação ao local de referência, foram calculadas as perdas de solo utilizando os modelos proporcional, balanço de massa e distribuição de perfil. Usando a correlação entre as concentrações de  $^{137}\text{Cs}$  e a erosão medida pelo método convencional, obteve-se duas equações de calibração que foram aplicadas às medidas realizadas na bacia do rio Unda e comparados com três modelos encontrados na literatura.

Como local de referência foi escolhida uma floresta natural localizada próxima às parcelas. O inventário médio de  $^{137}\text{Cs}$  foi de  $555 \pm 16 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Os inventários das parcelas de erosão variaram de 112 a  $136 \text{ Bq.m}^{-2}$  para amostras coletadas até 30 cm de profundidade. As taxas de erosão estimadas pelos modelos variaram de 64 a  $85 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$  para os modelos proporcional e distribuição de perfil, de 137 a  $165 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$  para o modelo de balanço de massa, enquanto que a erosão média obtida pelo método convencional foi de  $86 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ . Das duas equações de calibração obtidas, a que leva em conta a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  com o perfil do solo foi a que apresentou maior consistência. Esta forneceu taxas de erosão para a bacia do rio Unda (que é da mesma classe de solo) no intervalo de 4 a  $48 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ . Os modelos proporcional e distribuição de perfil, forneceram taxas que variara, respectivamente, de 7 a  $45 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$  e de 6 a  $69 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ .

**Palavras-chave:** solo, erosão,  $^{137}\text{Cs}$ , espectrometria gama

**Abstract:** Using  $^{137}\text{Cs}$  method and gamma-ray spectrometry, soil samples of two plots erosion were studied at Londrina city. The soil class studied was a distroferic dark red soil (LRd) one, with erosion indexes measured by Agronomic Institute of Paraná State (IAPAR) using a conventional method employed since 1976. Through the percentage reduction of  $^{137}\text{Cs}$  concerning the reference site, the soil losses were calculated using the proportional, mass balance and profile distribution models. Making the correlation between the  $^{137}\text{Cs}$  concentrations and the erosion measured by IAPAR, two calibration equations were obtained and applied to the data set measured in the basin of the Unda river and compared to those models found in the literature. As a reference region, it was chosen a natural forest located close to the plots. The average inventory of  $^{137}\text{Cs}$  was  $555 \pm 16 \text{ Bq.m}^{-2}$ . The inventories of the erosion plots varied from 112 to  $136 \text{ Bq.m}^{-2}$  for samples collected up to 30 cm depth. The erosion rates estimated by the models varied from 64 to  $85 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$  for the proportional and profile distribution models, respectively, and 137 to  $165 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$  for the mass balance model, while the average measured erosion obtained by IAPAR was  $86 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$ . From the two calibration equations obtained, the one that takes into account the  $^{137}\text{Cs}$  distribution with the soil profile, was the one that showed the best consistence with the erosion rates for the basin of the Unda river ( the same soil class) in the range from 4 to  $48 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$ , while the proportional and profile distribution models applied rates from 7 to  $45 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$  and 6 to  $69 \text{ Mg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$ , respectively.

**Key-words:** calibration equations, soil,  $^{137}\text{Cs}$

## 1 Introdução

Os métodos convencionais de medidas de erosão em solos são estatísticos, necessitam de um longo período para a determinação de algumas variáveis e são aplicáveis somente para áreas próximas dos experimentos. Um método alternativo usando o radionuclídeo  $^{137}\text{Cs}$  apresenta a vantagem de ser mais rápido e eficaz. O  $^{137}\text{Cs}$ , um radionuclídeo artificial introduzido no meio ambiente pelo “fallout”

radioativo, é um emissor beta com meia vida de 30,2 anos que decai para o  $^{137m}\text{Ba}$ , que emite raios gama com energia de 661,62 keV e uma meia vida de 2,55 minutos.

Em contato com o solo, o  $^{137}\text{Cs}$  é rápida e fortemente adsorvido por sua fração de argila. Após ser adsorvido, o  $^{137}\text{Cs}$  não é facilmente removido, e sua mobilidade resulta de processos físicos associados a erosão, ao transporte e deposição de partículas e ao cultivo do solo, os quais representam a maior causa da redistribuição do  $^{137}\text{Cs}$  nos solos. Através desses processos, o radionuclídeo é transportado junto com o solo, podendo ser utilizado como uma espécie “marcação” (TAMURA, 1964), o que torna possível correlacionar perdas ou ganhos de solo observando-se a redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$ . Neste trabalho, foram analisadas amostras de solo coletadas em parcelas de erosão pela técnica de espectrometria gama de alta resolução, e o conteúdo de  $^{137}\text{Cs}$  foi correlacionado com as taxas de erosão observadas nas parcelas.

## 2 Metodologia

As amostras de solo não cultivado a serem analisadas por espectrometria gama foram coletadas em 1996, em duas parcelas de erosão e de solo nu, denominadas respectivamente de parcelas P1 e P2, as quais foram construídas lado a lado. A parcela P1 possui 11 metros de comprimento por 3,5 metros de largura e a parcela P2 possui 22 metros de comprimento e 3,5 metros de largura. Cada parcela foi dividida em três regiões de amostragem, inferior (próxima à calha), médio e superior. Cada região foi dividida em 3 perfis com profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30cm. Para cada perfil foram coletadas duas amostras, totalizando um total de 36 amostras para as duas parcelas. Cada amostra foi rotulada com as letras P1 e P2 representando as parcelas 1 e 2 respectivamente, seguida dos índices I, M e S representando respectivamente as regiões inferior, médio e superior.

As parcelas foram construídas no sentido do declive. Na parte inferior de cada parcela instalou-se um sistema de calha coletora do material erodido, na qual foi acoplada uma conexão tubular cuja declividade era suficiente para permitir o livre escoamento do material coletado para posterior análise. O monitoramento empregando esse método foi realizado no período de 1975 a 1996.

Escolheu-se uma área de floresta nativa, próxima às parcelas, a qual não apresentava sinais de erosão e/ou sedimentação de solo, denominada de local de referência, para servir de referência na determinação da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  devido ao “fallout”. Ao todo foram amostrados 7 perfis desta área. As amostras de cada perfil foram coletadas em 5 incrementos de 10 cm cada um (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50).

A região de amostragem está localizada no município de Londrina no norte do estado do Paraná, na sede do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, sua latitude é de 23°22' sul e a longitude é de 51°10' oeste.

O clima da região é classificado como sub-tropical úmido mesotérmico, sem estação seca definida, com média térmica anual em torno de 21°C e média pluviométrica anual de 1622 mm.

O relevo é praticamente plano e/ou suave ondulado, constituído por colinas de topos arredondados, com vertentes longas de centenas de metros de comprimento e declives suaves desde de 0 a 8%. No local da estação experimental o desmatamento iniciou-se em 1940 e estendeu-se até 1973. O solo estudado é da classe Latossolo Vermelho Distroférico, moderado, textura argilosa, fase floresta subperinifólia, relevo suave ondulado (EMBRAPA, 1999). Esta classe de solo apresenta elevada resistência à erosão, mas, após um contínuo preparo convencional, tem tendência a formar o chamado “pé de grade”, um adensamento do solo a uma profundidade de aproximadamente 15 cm, que favorece o processo erosivo.

Para a medida da atividade do  $^{137}\text{Cs}$ , as amostras foram secas ao ar livre por 48 horas, destorroadas e passadas em peneira com 2mm de malha. Em seguida foram acondicionadas em recipientes plásticos tipo Béquer Marinelli de 2 litros, preenchidos a  $\frac{3}{4}$  da altura, cujas massas e densidades foram calculadas.

As medidas de atividade do  $^{137}\text{Cs}$  foram realizadas usando um arranjo experimental, constituído de um detector coaxial de HP(Ge) com eficiência relativa de 10%, um analisador multicanal de 8192 canais, eletrônica nuclear padrão de espectrometria gama e blindagem de chumbo, alumínio e acrílico. Os espectros de fundo e das amostras foram tomados por um período não inferior a 48 horas para cada medida, e em seguida foi encontrado o resultado médio das medidas e seus respectivos desvios. A resolução em energia medida para a linha do  $^{137}\text{Cs}$  foi 1,75 keV. A atividade mínima detectável (AMD) das amostras foi de aproximadamente 40 Bq.m<sup>-2</sup>. A calibração do sistema foi monitorada periodicamente utilizando fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

De acordo com a publicação técnica IAEA 295 (1989), a atividade de um radionuclídeo pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$A = \frac{N_L}{\varepsilon \cdot P_\gamma \cdot m \cdot t} \quad (1)$$

Em que:

A é a atividade específica da amostra em Bq.kg<sup>-1</sup>.

N<sub>L</sub> é o número líquido de contagens medido abaixo do pico do  $^{137}\text{Cs}$ .

ε é a eficiência do sistema de detecção.

P<sub>γ</sub> é a probabilidade de transição absoluta do decaimento gama para a energia selecionada.

m é a massa líquida de amostra em quilogramas.

t é o tempo de contagem em segundos

O número de contagens depende da eficiência de detecção, que por sua vez, depende da quantidade de radiação de uma determinada energia que atinge o detector. Esta quantidade de radiação depende do fator de absorção, das dimensões e da densidade da amostra. Todos estes fatores determinam o fator de calibração ( $\alpha$ ), cuja expressão é apresentada a seguir:

$$\alpha = \frac{m \cdot A \cdot t}{N_L} \quad (2)$$

Para obter o fator de calibração para o raio gama do  $^{137}\text{Cs}$  foram preparadas quatro amostras de solo com quantidades conhecidas de  $^{137}\text{Cs}$ , cujas atividades variaram de  $3\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  a  $3500\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . As amostras foram preparadas com a mesma classe de solo, mesma geometria e densidades próximas às das amostras a serem analisadas. A média obtida para as 13 medidas do fator de calibração ( $\alpha$ ) acima referido, considerando os desvios experimentais envolvidos, foi de  $287 \pm 2 \text{ Bq}\cdot\text{cps}^{-1}$ .

Existem diversos modelos na literatura, para descrever o movimento do  $^{137}\text{Cs}$  no solo, a curto e a médio prazo, a maioria para solos encontrados no hemisfério norte. Como um meio de promover a padronização dos procedimentos de calibração, os autores Walling e He (1997), selecionaram seis modelos incluindo softwares compatíveis com microcomputadores. Três desses modelos foram usados neste trabalho para converter atividades de  $^{137}\text{Cs}$  em estimativas de redistribuição de solos em solos cultivados e não cultivados.

Modelo Proporcional: Este modelo é usado para solos cultivados, baseia-se na premissa de que o  $^{137}\text{Cs}$  depositado pelo “fallout” esteja completamente misturado na camada arável ou de cultivo, e que a perda de solo seja proporcional ao  $^{137}\text{Cs}$  removido do perfil desde o início do acúmulo de  $^{137}\text{Cs}$ . O modelo é descrito pela equação a seguir.

$$Y1 = 10 \cdot \frac{B \cdot d \cdot X}{100 \cdot T \cdot P} \quad (3)$$

Modelo de balanço de massa simplificado: Este modelo é usado para solos cultivados, assume que todo o conteúdo de  $^{137}\text{Cs}$  foi depositado no ano de 1963. A equação abaixo representa este modelo.

(4)

Modelo de distribuição de perfil: Este modelo é usado para solos não cultivados. Como as distribuições de  $^{137}\text{Cs}$  com a profundidade do solo são significativamente diferentes entre solos cultivados e não cultivados, é necessário levar-se em conta a forma de distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  com o perfil do solo. Uma maneira de estimar isso é ajustar uma função exponencial para a concentração de  $^{137}\text{Cs}$  em função da profundidade. A equação abaixo descreve este modelo.

$$Y3 = \frac{10}{(T-1963)P} \ln \left( 1 - \frac{X}{100} \right) h_0 \quad (5)$$

o termo  $h_0$  é o coeficiente que descreve a forma do perfil. Neste trabalho o valor estimado foi de 161,32 (kg.m<sup>-3</sup>);

Nas equações (3), (4) e (5), as variáveis Y1, Y2, Y3 representam as perdas anuais médias de solo (Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>);

$d$  é a profundidade da camada **arável ou de cultivo**;

$B$  é a densidade volumétrica do solo (kg.m<sup>-3</sup>);

$P$  é o fator de correção de tamanho de partícula;

$T$  é o tempo decorrido desde o início da acumulação de <sup>137</sup>Cs (em anos).

### 3 Resultados e discussão

As atividades específicas das amostras das parcelas e das amostras de referência foram determinadas usando-se a equação (1). Para cada amostra das parcelas foram realizadas duas repetições de 48 horas, das quais obteve-se o valor médio da atividade e seus respectivos desvios. Para os sete perfis coletados na floresta natural, foi realizada uma medida para cada amostra de cada nível do perfil considerado, para o cálculo do inventário de <sup>137</sup>Cs no mesmo. O valor médio dos sete inventários de referência foi de 555 ± 16 Bq.m<sup>-2</sup>. Observe-se o pequeno desvio padrão, 2,9%, que mostra a baixa variabilidade da concentração de <sup>137</sup>Cs na região da floresta amostrada. O resultado está coerente com os valores encontrados por outros pesquisadores para solos brasileiros (ANDRELLO, 1997), (APPOLONI, 2000), (SHUCH, 1994), (BACCHI, 2000) e (GUIMARÃES, 1988).

A tabela 1 apresenta os valores médios do inventário de <sup>137</sup>Cs (soma das atividades do <sup>137</sup>Cs na profundidade total) medido em cada ponto de amostragem. Os resultados estão expressos em Bq.m<sup>-2</sup> através do produto da atividade em (Bq.kg) pela densidade em (kg) e pela espessura em metros, do incremento. A tabela apresenta também os percentuais da redistribuição ( $X$ ) do <sup>137</sup>Cs na região de amostragem, dado pela equação (6).

$$X = \left( \frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

$A_{ref}$  é o inventário médio de referência.

$A$  é o inventário total do <sup>137</sup>Cs no ponto de amostragem.

A última coluna mostra os valores médios de erosão medidos nas parcelas pelo Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR (RUFINO e BISCAIA, 2000). Os dados correspondem ao período de 1975 a 1996.

O acúmulo de  $^{137}\text{Cs}$  na posição inferior da parcela 2 pode ser explicado pela geometria do sistema de coleta, provavelmente ocorreu um acúmulo de partículas finas, mais ricas em  $^{137}\text{Cs}$ , próxima a calha coletora. Para o cálculo médio esse ponto foi descartado.

*Tabela 1. Redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em função dos inventários medidos em cada região de amostragem das parcelas de erosão, a última coluna mostra os índices de erosão medidos pelo IAPAR*

Parcela	Região de amostragem	Inventário (Bq.m <sup>-2</sup> )	Redist. X (%)	Medidas do IAPAR Mg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>
1	Inferior	136 ± 11	75,5	-85
	Médio	112 ± 18	79,9	
	Superior	118 ± 13	78,7	
	Média da Parcela	122 ± 8	78,0	
2	Inferior	947 ± 32	-70,7	-87
	Médio	151 ± 29	72,8	
	Superior	115 ± 21	79,3	
	* Média da Parcela	133 ± 18	76,1	

*\* Para o cálculo da média da parcela 2 o nível inferior foi descartado.*

A partir das concentrações de  $^{137}\text{Cs}$  medidas nas parcelas de erosão e utilizando os três modelos da literatura, calcularam-se os índices de erosão para cada nível conforme mostra a tabela 2. Observa-se que a erosão calculada pelo modelo proporcional variou de 77 a 85 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e para o modelo de distribuição de perfil variou de 64 a 78 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, as perdas de solos calculadas pelo modelo de balanço de massa simplificado variaram de 137 a 165 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, ou seja, aproximadamente duas vezes maiores que as taxas de erosão medidas pelo IAPAR. Verificou-se que os modelos proporcional e de distribuição de perfil fornecem valores que se aproximam mais daqueles obtidos nas parcelas de erosão.

Tabela 02. Erosão calculada para as parcelas 1 e 2, utilizando os modelos da literatura. A última coluna mostra a erosão medida pelo IAPAR

Parc.	Modelos	Proporcional *Y1	Bal. de massa *Y2	Distrib. De perfil *Y3	Erosão Medida pelo * IAPAR
	Níveis				
1	Inferior	-77	-141	-69	-85
	Médio	-82	-160	-78	
	Superior	-81	-155	-76	
	Média da Parcela	-80	-152	-74	
2	Inferior	+76	+58	+36	-87
	Médio	-78	-137	-64	
	Superior	-85	-165	-77	
	# Média da Parcela	-82	-150	-70	

\* Todos os valores estão expressos em (Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), o sinal negativo indica erosão e o sinal positivo deposição.

# Para o cálculo da média da parcela 2 o nível inferior foi descartado.

Os resultados da tabela 1 mostram diferenças muito pequenas nas taxas de erosão medidas pelo IAPAR e no percentual de redistribuição de <sup>137</sup>Cs obtidos para as parcelas. Isso deve-se ao fato das parcelas terem sido construídas uma ao lado da outra.

Usando-se os resultados da região superior das parcelas e a condição de contorno de que quando a erosão for zero não há redistribuição de <sup>137</sup>Cs, uma parametrização baseada nos modelos do tipo proporcional, balanço de massa simplificado e distribuição de perfil, fornece duas equações de calibração. A primeira equação de calibração está baseada no modelo proporcional, esta equação. Para a equação baseada no modelo proporcional foi usada uma expressão do tipo:

$$Y = -\frac{d.B}{(t - 1963).P}.X^a \quad (7)$$

Y é a perda anual média de solo em (Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>);

a é a constante de parametrização, cujo valor encontrado neste trabalho foi de 0,48173 ± 0,00158.

Para a segunda equação, baseada no modelo de distribuição de perfil, foi usada uma expressão do tipo:

$$(8)$$

$Y'$  é a perda anual média de solo em ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ );

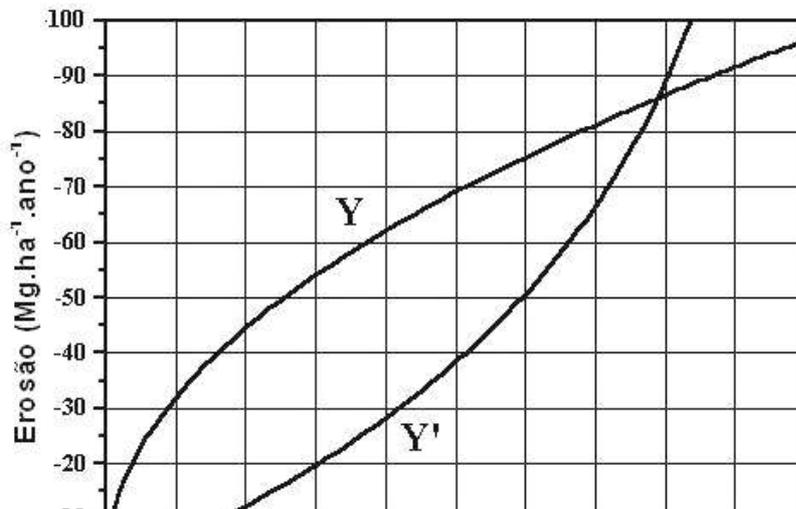
$b$  é a constante de parametrização, cujo valor encontrado neste trabalho foi de  $0,03266 \pm 0,00006$ . As demais variáveis são as mesmas definidas anteriormente.

A figura 1 mostra o resultado comparativo entre as duas equações de calibração  $Y$  e  $Y'$  para as duas parcelas, em todo intervalo possível de redistribuições.

Observa-se que para redistribuições até 80 % as perdas de solo calculadas pela equação baseada no modelo proporcional equação (7), são sempre maiores que as calculadas pela equação (8) baseada no modelo de distribuição de perfil. As maiores diferenças ficam no intervalo de redistribuição de 0 a 40 %, onde as perdas estimadas pela equação (8) crescem mais rapidamente que as estimadas pela equação (7), para redistribuições entre 40 a 80 % essas diferenças tendem a diminuir.

As duas equações de calibração e as equações da literatura foram aplicadas aos dados de redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  medidos em um local da bacia hidrográfica do rio Uná (ANDRELLLO, 1997), que possui a mesma classe de solo das parcelas estudadas.

Figura 1. Gráfico comparativo do comportamento da erosão em função da distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  para as equações de calibração

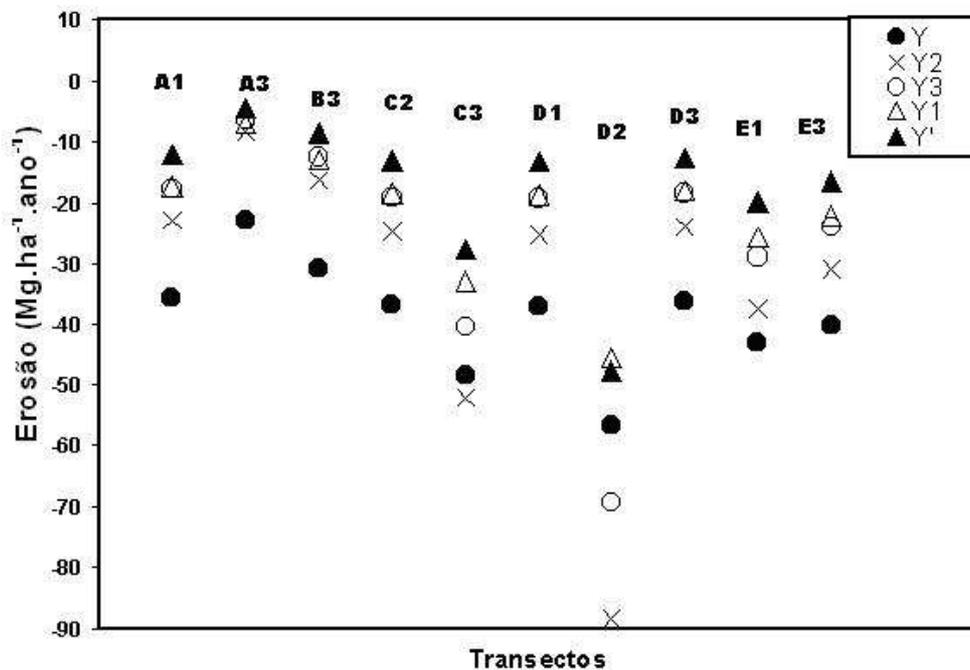


A figura 2 mostra os resultados das taxas de erosão em função da redistribuição para esses dados. Neste cálculo só foram considerados os pontos onde a redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  indicou perdas de solo. Os locais de amostragem foram chamados de transectos A, B, C, D e E e os índices 1, 2 e 3 correspondem

respectivamente às posições de topo, meia encosta e vale. Para o modelo proporcional (Y) as perdas de solo variaram de 7 a 45 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, para o modelo de balanço de massa simplificado (Y2) as perdas variaram de 8 a 88 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e para o modelo de distribuição de perfil (Y3) as perdas variaram de 6 a 69 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Aqui, a exemplo das parcelas, os modelos proporcional e de distribuição de perfil foram os que melhor se aproximaram das medidas do IAPAR (-85 e -87 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), e dos resultados obtidos pelo autor utilizando outros modelos.

A exemplo das parcelas, em relação aos outros modelos, o modelo de balanço de massa simplificado tende a superestimar perdas de solo.

Figura 2. Taxas de erosão em função da redistribuição de <sup>137</sup>Cs para os dados de (ANDRELLLO, 1997)



Os resultados encontrados pela aplicação das duas equações de calibração, obtidas neste trabalho, estão bem próximos dos resultados estimados com o modelo proporcional e distribuição de perfil. Na figura 2, observa-se que a equação (8) modelo (Y<sup>2</sup>) obtida neste trabalho, fornece resultado em bom acordo com as previsões dos modelos proporcional (Y1) e de distribuição de perfil (Y3), exatamente aqueles que melhor reproduziram os valores de erosão das parcelas. A equação (7) modelo (Y) em geral superestima os valores de erosão e fornece valores próximos do modelo de balanço de massa simplificado (Y2), que para as parcelas previu valores de erosão duas vezes maiores que os medidos pelo IAPAR, conforme a tabela 2.

## 4 Conclusões

A atividade mínima detectável (AMD) do sistema de medidas empregado foi de aproximadamente  $40 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Para se analisar amostras com atividades inferiores a esse valor, necessita-se melhorar bastante a blindagem do sistema de detecção para diminuir a radiação de fundo, já que a ampliação do tempo de contagens seria inexequível.

Na tabela 1, pode-se notar que as parcelas perderam quantidades consideráveis de  $^{137}\text{Cs}$ , com reduções percentuais variando de 70 a 80 %. Esses resultados não são estranhos, pois as parcelas foram construídas em 1976, portanto perderam solo no mínimo durante 20 anos, já que o histórico do terreno no período entre o “fallout” e a construção das parcelas não é bem conhecido e por isso não se pode afirmar se nesse período houve perda ou deposição de solo. Comparando esses inventários com as medidas com solo da floresta natural, pode-se ter uma estimativa da camada média de solo perdida por erosão durante o período que compreende a deposição pelo “fallout” e a coleta das amostras.

Na tabela 1, verifica-se, também, que as taxas de redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  tiveram valores próximos, o mesmo ocorrendo com os índices de erosão medidos IAPAR. Isso é explicado pela forma como as parcelas foram construídas, uma do lado da outra. Para obter uma melhor correlação entre as taxas de erosão e redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$ , seria desejável que as parcelas apresentassem entre si uma maior diferença nos índices de erosão e redistribuição. Para que isso acontecesse seria necessário que as parcelas fossem construídas em regiões com diferentes declividades, ou então, que amostras de solo coletadas em diferentes intervalos de tempo fossem medidas. Vale ressaltar que, para obter um maior número de pontos correlacionando taxas de erosão com as de redistribuição seria também necessário maior tempo para a pesquisa. Assim como seria necessário um número maior de parcelas disponíveis com diferentes taxas de erosão.

A tabela 2 apresenta a erosão estimada nas parcelas usando os modelos da literatura. Observa-se uma variação de 77 a  $85 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  para os modelos proporcional e distribuição de perfil, enquanto que para o modelo de balanço de massa as taxas de erosão ficaram entre 141 a  $165 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Portanto, com os dados disponíveis, as equações que mostraram maior consistência com as medidas do IAPAR, taxas de erosão variando de 85 a  $87 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , foram os modelos proporcional e distribuição de perfil. Em função disso, as equações de calibração obtidas neste trabalho foram baseadas nesses dois modelos.

A partir das taxas de erosão estimadas para a bacia do rio Unda, apresentadas na figura 02, usando as equações parametrizadas (7) e (8) e os modelos da literatura, pode-se concluir que a equação de calibração que apresentou maior consistência foi a equação (8), cuja parametrização está baseada no modelo que leva em conta a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  com o perfil do solo.

As taxas de erosão medidas para as parcelas do IAPAR pelo método convencional são maiores que as estimadas pelas duas equações parametrizadas para a bacia do rio Unda (de mesma classe de solo), pelo fato deste solo ser um local com vários tipos de culturas e, portanto, esta menos sujeito à erosão do que as parcelas (solo nu) com índices de erosão maiores.

## 5 Referências

- [1] ANDRELLO, A. C. Metodologia do  $^{137}\text{Cs}$  para Determinação da Erosão e Deposição de Solo em uma Bacia de Solo LRd do Norte do Paraná. *Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual de Londrina*, 107p, 1997.
- [2] BACCHI, O.O.S., REICHARDT, K., SPAROVEK, G., RANIERE, S.B.L. Soil Erosion Evaluation in a Small Watershed in Brazil through  $^{137}\text{Cs}$  Fallout Redistribution Analysis and Conventional Models. *Acta Geologica Hispânica*, V.35, n° 3-4p, pp 251-259, 2000.
- [3] EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília. *Embrapa Produção de Informação*. Rio de Janeiro., Embrapa Solos. 412p, 1999.
- [4] GUIMARÃES, M. F.  $^{137}\text{Cs}$  da Precipitação Radioativa (“fallout”) no Estudo da Erosão e Sedimentação de Solo. *Tese de Doutorado apresentada à Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo*. 136p, 1988.
- [5] IAEA 295. International Atomic Energy Agency, Measurements of radionuclides in food and the environment. *Technical Reports Series 295*. Vienna, 1989.
- [6] RUFINO, R.L.; BISCAIA, R.C.M. Relatório final do Projeto ; 3202000000-2 “Avaliação da erosão do solo” – PSA. *Programa Manejo de Solo e Água*. Atividade de pesquisa, 3202021400-2, “Estudo da erodibilidade do Solo Latossolo Roxo Distrófico”. 1976-1999. IAPAR-PR. outubro de 2000.
- [7] SCHUCH, L. A., NORDERMANN, D. J. R.; BARRETO, W. O. Natural and Artificial Radionuclides in Soils from Parana State, Brazil. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 177, pp. 39-49, 1994.
- [8] TAMURA, T., Selective sorption reactions of cesium with mineral soil. *Nucl. Safety*, v.5, p. 262-268, 1964.
- [9] WALLING, D.E., HE, Q. Models for converting  $^{137}\text{Cs}$  measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils. *A contribution to IAEA., coordinated Research Programmes on Soil Erosion (D1.50.05) and Sedimentation (F3.10.01)*. University of Exeter, Exeter, UK, p. 29, 1997.