

# DISTRIBUIÇÃO DE $^{137}\text{Cs}$ EM TRÊS SOLOS REPRESENTATIVOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO<sup>(1)</sup>

Patrik Diogo Antunes<sup>(2)</sup>, Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio<sup>(3)</sup>, Antônio Luiz Gonçalves Ferreira Júnior<sup>(4)</sup>, Izabel Cristina Luna Galindo<sup>(5)</sup> & Ignácio Hernan Salcedo<sup>(6)</sup>

## RESUMO

O  $^{137}\text{Cs}$  tem sido usado para quantificar perdas ou deposição de solo, com base em valores das concentrações em áreas de referência que tiveram pouca perturbação nas últimas décadas. Determinações em áreas assim ainda não foram feitas na região Nordeste do Brasil. Em Pernambuco, foram selecionadas três áreas com topografia plana, vegetação nativa e solos não perturbados, em Goiana, Sertânia e Araripina. Em cada área, foram marcados quatro pontos, distantes 20 a 50 m um do outro, e em cada um retiradas amostras de solo, em camadas consecutivas de 3 cm de espessura, até 30 cm. As atividades de  $^{137}\text{Cs}$  foram determinadas usando espectrometria gama com detector de germânio hiperpuro (HPGe). Os estoques médios de  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) foram de  $71,6 \pm 6,3$  em Goiana,  $64,0 \pm 13,8$  em Araripina e  $95,5 \pm 9,8$  em Sertânia. Valores nessa faixa têm sido relatados na Paraíba e na Bahia e, mais altos, na região Sudeste, confirmando a diminuição dos estoques em áreas mais próximas do Equador. As maiores atividades ocorreram nas camadas superficiais, variando de 0,5 a  $1,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ , e decresceram linearmente com a profundidade, até os limites de detecção: 18 cm em Araripina, 15 cm em Goiana e 9 cm em Sertânia. Em Goiana, acima dos horizontes inorgânicos havia um horizonte orgânico, com a mais alta atividade ( $2,06 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). Atividades e estoque altos e menor aprofundamento em Sertânia poderiam ser explicados pela predominância de argilominerais 2:1, em contraposição à de argilominerais 1:1 nos outros locais. Houve correlações positivas entre a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  e os valores de pH em água

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em abril de 2009 e aprovado em abril de 2010.

<sup>(2)</sup> Mestrando do Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Av. D. Manuel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: pdantunes@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor Titular do Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Av. Luiz Freire 1000, Cidade Universitária, CEP 50740-540 Recife (PE). E-mail: esampaio@ufpe.br

<sup>(4)</sup> Doutorando do Departamento de Energia Nuclear, UFPE. E-mail: antonio.ferreira@ariano.nlink.com.br

<sup>(5)</sup> Professora Adjunta do Departamento de Agronomia, UFRPE. E-mail: iclgalindo@uol.com.br

<sup>(6)</sup> Professor Titular do Departamento de Energia Nuclear, UFPE. E-mail: salcedo@ufpe.br

e KCl e correlação negativa com as concentrações de  $\text{Al}^{3+}$ . Confirma-se que, em áreas de referência, a maior atividade de  $^{137}\text{Cs}$  está na camada superior, com decréscimos regulares ao longo do perfil do solo.

**Termos de indexação:** céσιο-137, radionuclídeo, erosão.

**SUMMARY:** *DISTRIBUTION OF  $^{137}\text{Cs}$  IN THREE REPRESENTATIVE SOILS OF PERNAMBUCO STATE, BRAZIL*

*Contents of  $^{137}\text{Cs}$  have been used to quantify soil loss or accumulations, based on values of reference sites with little soil disturbance in the last decades. In Northeastern Brazil no such sites have been evaluated yet. Three areas with flat topography, native vegetation and undisturbed soil were selected in of Goiana, Araripina and Sertânia counties, state of Pernambuco. Four points in each area were marked at a distance of 20 to 50 m away from each other and soil samples were collected in 3 cm depth intervals, down to 30 cm. The  $^{137}\text{Cs}$  activities were determined using gamma spectrometry with a hyperpure germanium detector. Average contents of  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) were  $71.6 \pm 6.3$  in Goiana,  $64.0 \pm 13.8$  in Araripina and  $95.5 \pm 9.8$  in Sertânia. Values in this range have been reported in Paraíba and Bahia, and higher ones in the Southeastern region, confirming the reduction of stocks in areas closer to the equator. The highest activities occurred in the surface layers, ranging from 0.5 to 1.6  $\text{Bq kg}^{-1}$ , and decreased linearly with depth until the detection limits: 18 cm in Araripina, 15 cm in Goiana, and 9 cm in Sertânia. In Goiana, the activity was highest ( $2.06 \pm 1.0 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) in an organic horizon above a inorganic horizon. The high activities and stock and lower depth in Sertânia could be explained by the predominance of 2:1 clay minerals versus 1:1 clay minerals in the other areas.  $^{137}\text{Cs}$  activities were positively correlated with water and KCl pH values and negatively correlated with Al concentrations. The results confirm that, in the reference areas,  $^{137}\text{Cs}$  activities are highest in the surface layers, decreasing regularly down the soil profile.*

*Index terms:* Cesium-137, radionuclide, erosion.

## INTRODUÇÃO

A região semiárida tem o processo erosivo como o principal fator de degradação do solo (Silva, 2000; Sampaio et al., 2005). O aumento da população e da demanda de produção de alimentos aumentou a necessidade e a intensidade de exploração do solo com culturas anuais, em um processo que, por muitos anos, devido a manejos inadequados, levou extensas áreas agrícolas a uma acentuada degradação. A erosão não só degrada a camada superficial – rica em matéria orgânica e nutrientes para as plantas – como provoca o assoreamento dos rios e reservatórios de água, causando enchentes e diminuição do volume de água dos reservatórios.

Os métodos convencionais para quantificação da erosão, que vêm sendo utilizados há muito tempo, são oriundos de trabalhos empíricos, baseados em dados sobre perdas de solo, necessitando de um longo período para determinação de algumas variáveis, com aplicação restrita a condições semelhantes às dos experimentos (Correchel, 2003; Amorim et al., 2006). O método do  $^{137}\text{Cs}$  tem-se apresentado uma alternativa viável como ferramenta de avaliação direta das taxas de erosão (Correchel, 2003; Porêba, 2006). Esse método

é bem difundido no hemisfério norte e vem sendo utilizado em alguns Estados do Brasil, principalmente na região Sudeste (Bacchi et al., 2000; Guimarães, 1988; Andrello et al., 2002). No Nordeste, foram estimadas perdas de solo por erosão na Paraíba (Fraga et al., 2004; Santos, 2004).

Para estimativa da perda de solo pelo método do  $^{137}\text{Cs}$ , são necessários valores de referência para comparação com os valores dos pontos em estudo. Os valores de referência correspondem ao levantamento do estoque e da distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  no perfil do solo, em locais onde não houve perdas ou ganhos de solo, desde a época da deposição de  $^{137}\text{Cs}$ . Nos pontos de estudo, a erosão é calculada pelo decréscimo do estoque de  $^{137}\text{Cs}$  em camadas sucessivas de solo, e a deposição, pelo acréscimo no estoque.

A exatidão do método é fortemente dependente da qualidade do inventário de uma área de referência representativa dos pontos do estudo (Ritchie & Mchenry, 1990). Até hoje não foram determinados valores de referência para solos de Pernambuco, atendendo ao critério de ausência de perdas ou ganhos de solo. Dessa forma, este trabalho se propôs a estudar a distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em alguns solos de Pernambuco, determinando, assim, padrões de

referência para futuras determinações de erosão ou deposição, bem como a correlacionar as concentrações do radionuclídeo com os atributos mineralógicos, químicos e físicos dos solos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo e amostragem

Foram selecionadas três áreas, em Pernambuco, em latitudes variando de  $7^{\circ} 30''$  a  $8^{\circ} 00''$ , formando um transecto no sentido leste-oeste, ao longo do Estado: (1) em Goiana, na região da Mata Norte, próximo à costa, com precipitação pluvial média anual de 1.754 mm, vegetação de mata atlântica e solo classificado como Espodossolo Vermelho-Amarelo latossólico textura média; (2) em Sertânia, na microrregião do Moxotó, 300 km a oeste da costa, com precipitação pluvial média anual de 528 mm, vegetação de caatinga hiperxerófila e solo classificado como Neossolo Litólico; e (3) em Araripina, na microrregião da chapada do Araripe, cerca de 600 km da costa, com precipitação pluvial média anual de 712 mm, vegetação ecotonal dos biomas cerrado e caatinga e solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. As precipitações pluviais foram fornecidas pelo Lamepe (2008). Os solos foram coletados próximos a perfis classificados por Jacomine et al. (1972). Todas as áreas estão localizadas em estações experimentais do Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA, constituindo áreas de reserva, com vegetação nativa bastante preservada. Todas possuem topografia plana e solos não perturbados pelo homem, não tendo sido desmatados, arados, gradeados, plantados ou cultivados há pelo menos 50 anos.

Em cada área, foram coletadas amostras de solo, em quatro pontos, distantes entre 20 e 50 m uns dos outros. Em cada ponto, as amostras foram retiradas em camadas sucessivas de 3 cm de espessura, até 30 cm ou até encontrar-se substrato rochoso. Em Goiana, um horizonte superficial orgânico, com profundidade média de 2,2 cm, foi coletado separadamente. Cada amostra continha cerca de 3 kg de solo, suficiente para a realização de análises químicas, físicas, mineralógicas e para quantificação da atividade do  $^{137}\text{Cs}$ . Para determinação da densidade global do solo de cada camada, foram retiradas, em cada local, na lateral da trincheira que ia sendo aberta, amostras indeformadas, utilizando o coletor de Uhland com anel (Embrapa, 1997).

As amostras foram levadas para análises nos Laboratórios de Fertilidade e de Instrumentação Nuclear, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, e no Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE.

### Análises físicas, químicas e mineralógicas das amostras de solo

As amostras foram secas ao ar por um período de 72 h, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm. Subamostras foram retiradas para determinação da granulometria (Quadro 1) pelo método proposto por Embrapa (1997) e para análise dos cátions trocáveis (Quadro 2), sendo o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  dosados por espectrometria de absorção atômica, após extração com  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ , e o Na e K dosados por fotometria de chama, após extração com solução duplo-ácida (Mehlich-1). O  $\text{Al}^{3+}$  foi dosado pelo método volumétrico, por titulação com hidróxido de Na, após extração com  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ , e o pH, em água e em  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ , na relação 1:2,5. Também foram determinados os teores de carbono orgânico do solo, usando o método Walkley-Black modificado (determinado por oxidação via úmida com dicromato de K). Os métodos seguiram as recomendações de Embrapa (1997).

A composição mineralógica foi determinada por difratometria de raios X (DRX). A preparação das lâminas orientadas das frações silte e argila, saturadas com K, foi feita segundo Jackson (1975). As lâminas saturadas com K foram processadas somente em temperatura ambiente.

### Análise da atividade do $^{137}\text{Cs}$

Para determinação da atividade do  $^{137}\text{Cs}$  nas amostras de solo, foi utilizada a espectrometria gama com detector de germânio hiperpuro (HPGe), Canberra, com 8.192 canais, e software Genie-2000, Canberra. O analisador multicanal permite a transformação dos pulsos lineares em sinais digitais, realizando o processamento de separação por intervalos de energia. O  $^{137}\text{Cs}$  é um átomo instável, com meia-vida de 30,2 anos, que decai por emissão beta ( $\beta^-$ ) para o  $^{137}\text{Ba}$ , metaestável, com meia-vida de 2,55 min, que se torna estável após a emissão de um raio gama de energia 661,6 keV. Esta emissão do  $^{137}\text{Ba}$ , formado a partir do  $^{137}\text{Cs}$ , é considerada característica da presença do  $^{137}\text{Cs}$  e usada para sua detecção.

O resultado é apresentado no monitor do computador na forma de um gráfico, que correlaciona o número de contagens e a amplitude de pulso (energia). Foi determinado o cálculo da eficiência de contagem do detector de Ge, utilizando uma solução-padrão aquosa, com atividade conhecida de 30,70 kBq  $\text{L}^{-1}$ , do IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro), misturada a uma amostra de solo cuja contagem da atividade era conhecida. Após a adição da solução contendo  $^{137}\text{Cs}$ , a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 24 h e cuidadosamente homogeneizada, para contagem no dia seguinte. As atividades de  $^{137}\text{Cs}$  das amostras de solo são expressas em Bq  $\text{kg}^{-1}$  de solo e não foram corrigidas pelo decaimento radioativo, pois as amostras foram coletadas e analisadas durante um intervalo de tempo curto, comparado com a meia-vida do  $^{137}\text{Cs}$ , de 30,2 anos.

**Quadro 1. Características físicas e classe textural dos solos de três áreas de Pernambuco, com diferentes características edafoclimáticas, em amostras coletadas em camadas consecutivas, até 30 cm de profundidade**

Profundidade	Densidade	Areia	Silte	Argila	Classe textural
cm	kg dm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>			
		Goiana			
0- 3	1,09	882	65	53	Areia
3- 6	1,25	882	55	63	"
6- 9	1,28	887	55	58	"
9-12	1,26	890	48	63	"
12-15	1,32	887	55	58	"
15-18	1,30	887	55	58	"
18-21	1,47	897	45	58	"
21-24	1,44	897	40	63	"
24-27	1,43	905	33	63	"
27-30	1,46	907	35	58	"
		Sertânia			
0- 3	1,18	687	145	168	Franco-Arenoso
3- 6	1,34	677	135	188	"
6- 9	1,32	672	163	165	"
9-12	1,39	662	173	165	"
12-15	1,35	670	175	155	"
15-18	1,37	677	153	170	"
18-21	1,31	667	168	165	"
21-24	1,38	672	158	170	"
24-27	1,40	687	150	163	"
27-30	1,42	692	135	173	"
		Araripina			
0- 3	1,31	732	45	223	Franco-argiloarenoso
3- 6	1,43	707	40	253	"
6- 9	1,39	702	35	263	"
9-12	1,38	727	20	253	"
12-15	1,35	707	38	255	"
15-18	1,39	717	30	253	"
18-21	1,40	712	35	253	"
21-24	1,43	722	40	238	"
24-27	1,44	727	20	253	"
27-30	1,49	727	25	248	"

O solo foi colocado em um béquer tipo Marinelli de 3 L, com massa constante de 1.700 g. Segundo Bajracharya et al. (1998), as amostras devem ser contadas por um período de 80 ks, mas optou-se por contagens acumuladas durante 86,4 ks (um dia), tanto para as amostras de solo das áreas em estudo como do padrão, para garantir melhor precisão de resultados. A eficiência de detecção foi determinada a partir da seguinte equação (Kachanoski & Jong, 1984):

$$Ef = \frac{(cgs_{solo+padr\tilde{a}o} - cgs_{solo})}{(Bq_{padr\tilde{a}o} \times 0,84cgs \text{ Bq}^{-1})}$$

em que Ef = eficiência de contagem; e cgs = contagem gama por segundo.

A densidade do solo foi usada para converter as concentrações do <sup>137</sup>Cs para estoques (Bq m<sup>-2</sup>), por camada de 3 cm de profundidade.

## Análise dos dados

Os dados de atividade do <sup>137</sup>Cs de cada área foram ajustados a modelos matemáticos, com regressões em função da profundidade, usando o programa Statistica (Statsoft, 1995). Os estoques totais por local foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey (p < 0,05). Foram determinadas as correlações dos teores de <sup>137</sup>Cs com os teores de argila, de matéria orgânica, pH e teores de cátions trocáveis, usando os conjuntos de dados de todas as camadas que todos os três solos apresentassem e, separadamente, para cada uma dessas camadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram detectadas atividades de <sup>137</sup>Cs até 18, 15 e 9 cm de profundidade, em Araripina, Goiana e Sertânia, respectivamente (Figura 1). As camadas superficiais do solo tinham as maiores concentrações,

**Quadro 2. Análises químicas dos solos de três áreas de Pernambuco, com diferentes características edafoclimáticas, em amostras coletadas em camadas consecutivas, até 30 cm de profundidade**

Profundidade cm	pH		Na	K	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	C orgânico g kg <sup>-1</sup>
	H <sub>2</sub> O	KCl						
			— mg kg <sup>-1</sup> —		— cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> —			
	Goiana							
0– 3	3,93	2,54	40,9	296,2	1,04	3,23	1,54	65,55
3– 6	4,03	2,44	26,9	195,7	0,96	1,23	0,50	26,25
6– 9	4,10	2,61	14,6	122,8	0,73	1,00	0,29	13,42
9–12	4,04	2,60	16,6	114,0	0,80	1,09	0,32	9,83
12–15	4,07	2,70	11,6	97,4	0,72	0,69	0,17	10,30
15–18	4,07	2,74	11,1	54,3	0,73	0,84	0,18	9,52
18–21	4,28	2,86	8,8	62,1	0,59	0,59	0,07	8,00
21–24	4,34	2,91	5,6	38,9	0,51	0,58	0,05	7,77
24–27	4,30	2,94	7,8	36,7	0,50	0,47	0,06	6,76
27–30	4,60	3,01	5,6	37,8	0,45	0,55	0,05	6,27
	Sertânia							
0– 3	6,18	5,78	21,4	236,6	0,14	4,67	1,21	22,79
3– 6	5,86	5,16	19,2	200,7	0,24	2,97	0,83	12,62
6– 9	5,67	4,84	18,9	175,4	0,27	2,76	0,80	11,26
9–12	5,64	4,64	19,7	141,7	0,10	2,44	0,79	8,63
12–15	5,52	4,41	22,9	124,8	0,17	2,28	0,85	7,85
15–18	5,46	4,14	27,7	110,1	0,26	2,00	0,91	7,37
18–21	5,45	4,05	34,2	91,1	0,17	1,93	1,02	7,08
21–24	5,43	3,91	42,3	91,1	0,20	1,98	1,30	6,05
24–27	5,65	4,01	40,6	96,7	0,15	2,12	1,04	6,13
27–30	5,74	3,92	49,0	57,3	0,16	2,28	1,68	5,97
	Araripina							
0– 3	4,28	3,59	4,8	303,9	0,68	1,07	0,28	11,20
3– 6	3,97	3,40	3,8	405,5	0,73	0,78	0,16	11,18
6– 9	3,92	3,42	4,3	374,6	0,83	0,72	0,12	9,94
9–12	3,79	3,45	3,3	299,5	0,79	0,66	0,09	9,92
12–15	3,70	3,47	3,6	264,2	0,79	0,57	0,06	7,74
15–18	3,73	3,51	3,3	224,4	0,70	0,64	0,06	7,78
18–21	3,79	3,55	2,6	197,9	0,78	0,54	0,06	8,09
21–24	3,72	3,58	2,1	162,6	0,69	0,57	0,05	7,67
24–27	3,80	3,61	2,6	144,9	0,75	0,52	0,04	7,83
27–30	3,75	3,63	2,3	114,0	0,73	0,51	0,03	7,39

variando de 0,5 até 1,6 Bq kg<sup>-1</sup>. Nas camadas abaixo, as concentrações decresciam linearmente, mostrando um perfil bastante típico de distribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em áreas de referência (Walling & Quine, 1990; Wallbrik et al., 1999). Em Goiana, acima dos horizontes minerais havia um horizonte orgânico, com a mais alta atividade entre todas as camadas analisadas (2,06 Bq kg<sup>-1</sup>).

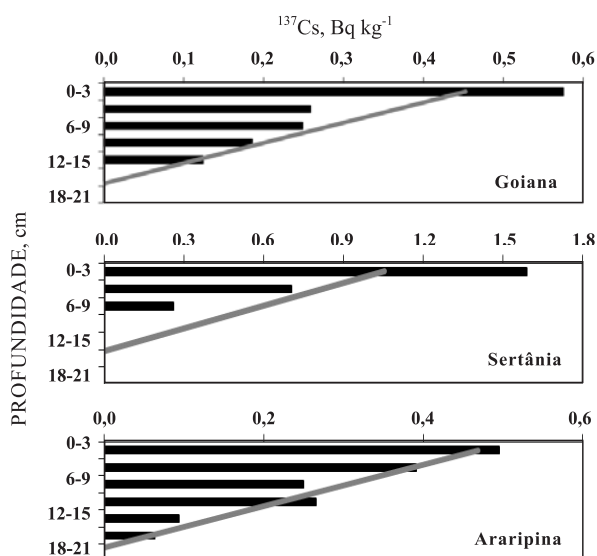
Os estoques de  $^{137}\text{Cs}$ , na camada superficial, correspondem a 26, 30 e 59 % do estoque total, respectivamente, em Goiana, Araripina e Sertânia (Quadro 3). O estoque do horizonte orgânico, em Goiana, correspondia a 30 % do estoque total. Isso confirma o que foi descrito por Zygmunt et al. (1998) e por Lauria et al. (2007), que a maior fração deste radionuclídeo concentra-se nas camadas superiores do solo, mesmo muitos anos após sua deposição.

A alta atividade (Quadro 3) encontrada em Sertânia pode ter ocorrido pela menor precipitação pluvial anual na área e pelo fato de o solo conter argilominerais 2:1, ausentes nas demais áreas (Figura 2). Sabe-se que o

$^{137}\text{Cs}$  pode ser fixado pelos argilominerais 2:1, entre os quais estão a illita e a vermiculita, e em menor proporção pelos óxidos de Fe e argilominerais 1:1, como a caulinita (Cremers et al., 1988; Dumat & Staunton, 1999; Chibowski & Zygmunt, 2002).

Em Sertânia, o uso do método do  $^{137}\text{Cs}$  só permite estimativas de perdas de solo por erosão até 9 cm. Nessas estimativas, deve-se levar em conta o estoque encontrado em cada camada, pois a distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  em profundidade não é uniforme e as maiores concentrações estão nos 6 cm superficiais. A estimativa em camadas mais espessas, considerando a concentração como média em toda a profundidade, leva à superestimação da camada de solo perdida.

As análises mineralógicas (Figura 2) confirmaram a presença de illita e de mica no solo de Sertânia, bem como a ausência desses argilominerais nos solos de Goiana e Araripina, nos quais predominaram argilominerais 1:1, principalmente caulinita. A adsorção do  $^{137}\text{Cs}$  em minerais do solo altera significativamente a sua taxa de migração no solo



**Figura 1.** Perfil de distribuição da concentração de  $^{137}\text{Cs}$  nos horizontes, em função da profundidade, em três áreas de Pernambuco, em amostras coletadas em camadas consecutivas, até 30 cm de profundidade.

(Zygmunt et al., 1998). As diferenças nos argilominerais poderiam explicar a menor migração em profundidade no solo de Sertânia (9 cm) que nos de Goiana (15 cm) e de Araripina (18 cm). A menor precipitação pluvial em Sertânia (528 mm) também poderia ter contribuído para a menor migração. Entretanto, em Araripina (712 mm) chove menos que em Goiana (1.754 mm) e o  $^{137}\text{Cs}$  foi encontrado em maior profundidade (18 contra 15 cm). Sem dúvida, vários condicionantes ambientais influenciam a migração vertical. A camada orgânica em Goiana, com alta concentração de  $^{137}\text{Cs}$ , pode ter contribuído para uma menor migração nessa área.

Este horizonte orgânico, em Goiana, com sua atividade alta de  $^{137}\text{Cs}$ , tem de ser levado em conta se

os perfis analisados forem usados como referência. Se na área onde a erosão estiver sendo medida a camada orgânica tiver sido retirada ou destruída, o estoque será limitado às camadas dos horizontes inorgânicos. Se ela tiver sido incorporada ao solo (por aração e, ou, gradagem, por exemplo), o estoque da camada vai se somar ao dos horizontes inorgânicos, que, nesse caso, são misturados, perdendo a gradação de atividade com o aumento da profundidade do solo.

Os estoques de  $^{137}\text{Cs}$  no perfil do solo (Quadro 3) foram maiores em Sertânia ( $95,5 \pm 9,8 \text{ Bq m}^{-2}$ ) que em Araripina ( $64,0 \pm 13,8 \text{ Bq m}^{-2}$ ), ficando Goiana ( $71,6 \pm 6,3 \text{ Bq m}^{-2}$ ) em uma situação intermediária. Não considerando o horizonte orgânico, o estoque em Goiana seria o mais baixo ( $49,7 \text{ Bq m}^{-2}$ ). Os valores encontrados confirmam a tendência de decréscimo com a diminuição da latitude, referida por Schuch et al. (1994). Esses autores encontraram estoques de  $^{137}\text{Cs}$  de 329, 159, 150 e  $107 \text{ Bq m}^{-2}$  nas latitudes de 28, 26, 22 e  $13^\circ \text{S}$ , respectivamente. Fraga & Salcedo (2004), em estudo realizado no semiárido da Paraíba, na latitude de  $8^\circ \text{S}$ , encontraram estoque de  $118 \text{ Bq m}^{-2}$ , valor próximo ao encontrado na latitude de  $13^\circ \text{S}$  e maior que os estoques ( $64$  a  $96 \text{ Bq m}^{-2}$ ) encontrados nas áreas deste estudo, em Pernambuco, em latitudes variando de  $7^\circ 30''$  a  $8^\circ$ . Santos (2004), também na Paraíba, encontrou estoques médios de  $33 \text{ Bq m}^{-2}$  em vegetação nativa e de  $58 \text{ Bq m}^{-2}$  em área de pastagem. Os pontos na vegetação nativa foram coletados na meia encosta e poderiam ter sofrido perdas de solo. Os estoques encontrados na região Sudeste do Brasil são bem maiores que os do Nordeste. Em geral, esses resultados confirmam tendência de diminuição dos estoques quanto mais próximo do equador (Ritchie & Mchenry, 1990; Schuch et al., 1994), porém mostram que pode haver variação nos valores encontrados em uma mesma latitude.

Sakai (1977), na Bahia, encontrou maiores estoques de  $^{137}\text{Cs}$  ( $95 \text{ Bq m}^{-2}$ ) em áreas com maiores precipitações (1.700 e 2.000 mm) e menores ( $57 \text{ Bq m}^{-2}$ ) em áreas com menores precipitações (700 a 1.000 mm).

**Quadro 3.** Estoque ( $\pm$  erro-padrão) de  $^{137}\text{Cs}$ , em amostras de solo coletadas em camadas consecutivas até 30 cm de profundidade, de três áreas em Pernambuco

Camada	Goiana	Araripina	Sertânia
cm	Bq m <sup>-2</sup>		
Horizonte orgânico	21,9 $\pm$ 13,4	-	-
0-3	19,0 $\pm$ 5,6	19,5 $\pm$ 7,1	56,6 $\pm$ 16,3
3-6	9,6 $\pm$ 4,1	16,7 $\pm$ 4,8	28,4 $\pm$ 11,7
6-9	9,5 $\pm$ 3,1	10,4 $\pm$ 2,1	10,5 $\pm$ 14,0
9-12	6,9 $\pm$ 4,8	10,9 $\pm$ 3,3	0
12-15	4,8 $\pm$ 4,5	3,7 $\pm$ 4,1	0
15-18	0	2,7 $\pm$ 4,7	0
18-21	0	0	0
Total	71,6 $\pm$ 6,3ab	64,0 $\pm$ 13,8b	95,5 $\pm$ 9,8a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

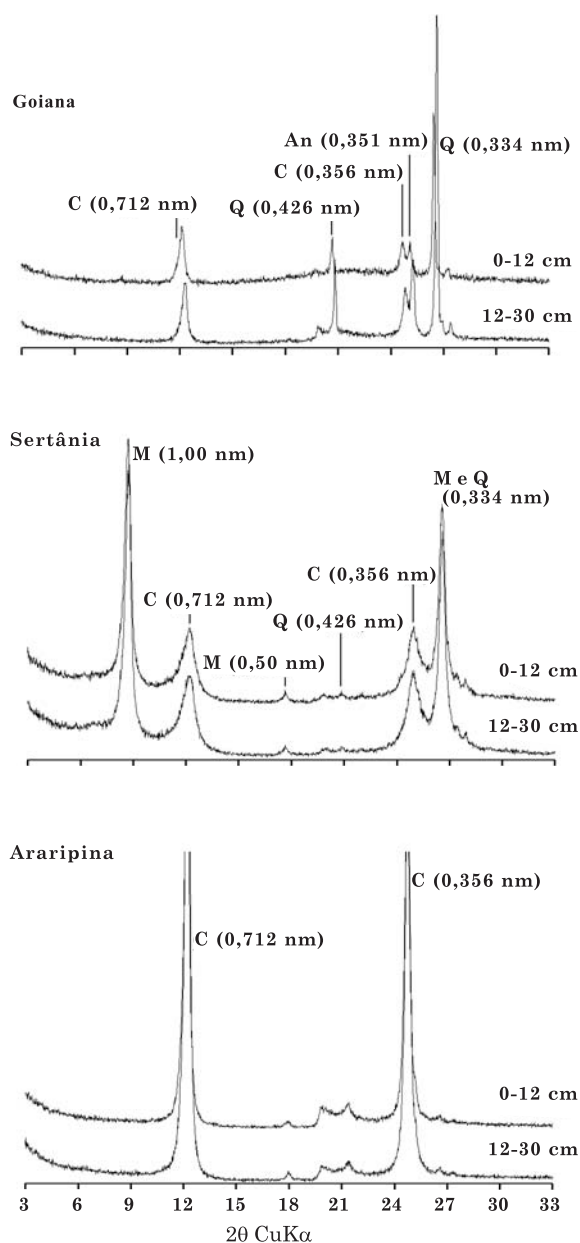


Figura 2. Difratoograma de raio X da fração argila saturada com K em temperatura ambiente. Q: quartzo, Na: anatásio, C: caulinita e M: mica.

Esses resultados diferiram, comparando-se áreas de precipitação pluvial similar, dos encontrados neste trabalho, já que os estoques de  $^{137}\text{Cs}$  foram maiores em Sertânia ( $95,5 \text{ Bq m}^{-2}$ ), com precipitação pluvial média anual de apenas 524 mm, que nas áreas de Goiana e Araripina, com precipitações pluviais médias de 1.754 e 712 mm, respectivamente. Contudo, no trabalho realizado na Bahia, não foram tomadas todas as precauções na escolha dos pontos amostrados dentro da área de referência, pois, em alguns casos, realizaram-se coletas em locais onde ocorria acúmulo de água. As amostras foram coletadas apenas até 9 cm de profundidade e não obedeceram ao mesmo critério

nas áreas do estudo quanto ao grau de preservação da vegetação. Devem ser tomadas algumas precauções na escolha dos pontos a serem amostrados dentro da área de mata nativa, como não amostrar pontos próximos às bordas das matas, próximos a troncos de arvores caídas, próximos de buracos deixados por árvores mortas e com visível perturbação causada por animais (lagartos, tatus, besouros, cupins e formigas).

Houve correlações positivas ( $p < 0,05$ ) entre a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  e o pH em água ( $r = 0,82$ ) e o pH em KCl ( $r = 0,80$ ) e correlação negativa com o teor de  $\text{Al}^{3+}$  ( $r = -0,72$ ), usando os dados das três camadas superficiais de todos os solos (Figura 3, para Al e pH KCl; o gráfico para pH em água é muito semelhante a este último e não é apresentado). Como, nesses casos, os decréscimos em atividade nas camadas mais profundas podem confundir as relações, as correlações foram também determinadas para camadas de mesma profundidade. Nas camadas de 0 a 3 cm e de 3 a 6 cm (exemplificadas na Figura 3), as correlações mantiveram-se com os mesmos sentidos e com coeficientes ainda mais altos (0,80 a 0,85), mas, na camada de 6 a 9 cm, foram bem mais baixos e não significativos. Giannakopoulou et al. (2007) observaram que solos com pH entre 5 e 8 tinham maior capacidade de adsorção do  $^{137}\text{Cs}$  e que solos com pH menor que 5 apresentavam menor adsorção, propiciando o movimento do  $^{137}\text{Cs}$  dentro do perfil. Essas observações foram confirmadas neste estudo, pois nos solos de Goiana e Araripina, com pH menor que 4,3, o  $^{137}\text{Cs}$  desceu até 15 e 18 cm, enquanto em

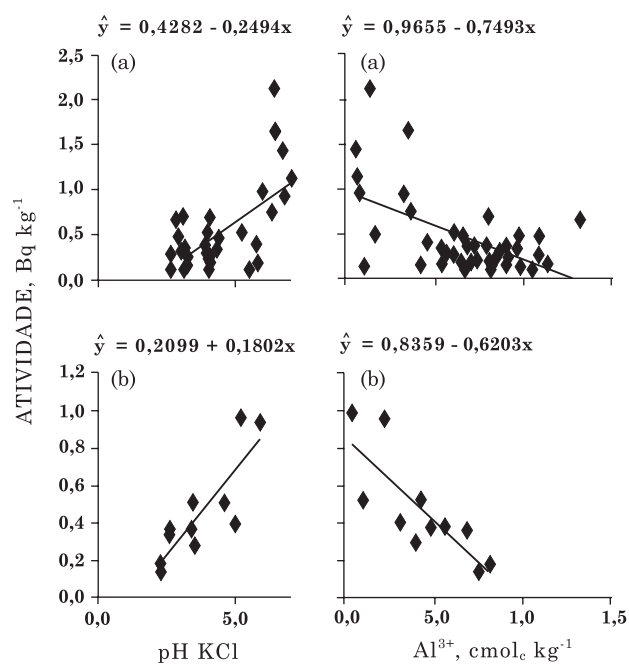


Figura 3. Correlações da atividade de  $^{137}\text{Cs}$  com pH em KCl e com Al, nas três camadas superficiais (0 a 9 cm de profundidade) de três solos representativos de Pernambuco (a) e na camada de 3 a 6 cm de profundidade (b).

Sertânia, que tinha pH acima de 5,5, desceu apenas a 9 cm (Quadro 3; Figura 2). Uma das prováveis causas da adsorção do  $^{137}\text{Cs}$  nas camadas superficiais em Sertânia foi a presença das cargas negativas geradas pela substituição isomórfica, que são cargas permanentes independentes da mudança de pH (Inda Junior et al., 2006). Não houve correlação significativa entre a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  e o teor de C orgânico do solo, embora ambos tenham diminuído com a profundidade. Malbit & Bernard (1998) encontraram correlação entre o teor de  $^{137}\text{Cs}$  e o teor de matéria orgânica nas camadas que apresentavam maior teor do radionuclídeo. Os teores de cátions trocáveis e os de argila não tiveram correlações significativas com a atividade de  $^{137}\text{Cs}$ , no geral ou considerando camadas de mesma profundidade.

## CONCLUSÕES

1. Foram encontrados valores de referência de 72, 64 e 96 Bq m<sup>-2</sup> em Goiana, Araripina e Sertânia, respectivamente, com o  $^{137}\text{Cs}$  atingindo profundidades de 15, 18 e 9 cm. A pequena profundidade em Sertânia limita as medidas de erosão nessa área.

2. Parte do estoque de  $^{137}\text{Cs}$  (30%), em Goiana, estava em um horizonte orgânico superposto aos inorgânicos. Para ser usado como referência, em medidas de erosão em outras áreas, é preciso considerar o destino deste horizonte nas áreas.

3. As concentrações foram maiores nas duas camadas superficiais (6 cm), correspondendo a 38, 57 e 89 % dos estoques totais em Goiana, Araripina e Sertânia, respectivamente, e apresentaram decréscimo linear com a profundidade. Em Goiana, o horizonte orgânico tinha alta atividade de  $^{137}\text{Cs}$  (2,06 Bq kg<sup>-1</sup>).

4. As atividades foram significativa e positivamente correlacionadas com o pH (em água ou KCl) e negativamente com o teor de Al<sup>3+</sup> do solo.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa e pelo financiamento deste trabalho, respectivamente.

## LITERATURA CITADA

- AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D. & PRUSKY, F.F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas In: PRUSKY, F.F. Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.173-108.
- ANDRELLLO, A.C.; APPOLONI, C.R. & NASCIMENTO FILHO, V.F. Distribuição vertical de Cs-137 em solos de mata virgem da Região de Londrina (Paraná). R. Bras. Pesq. Desenvol., 4:1546-1549, 2002.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARD, K.; SPAROVEK, G. & RANIERI, S.B.L. Soil erosion evaluation in a small watershed in Brazil through  $^{137}\text{Cs}$  fallout redistribution analysis and conventional models. Acta Geol. Hispan., 35:251-259, 2000.
- BAJRACHARYA, R.M.; LAL, R. & KIMBLE, J.M. Use of radioactive fallout cesium-137 to estimate soil erosion on three farms in west central Ohio. Soil Sci., 163:133-141, 1998.
- CHIBOWSKI, S. & ZYGMUNT, J. The influence of the sorptive properties of organic soils on the migration rate of  $^{137}\text{Cs}$ . J. Environ. Radioact., 61:213-223, 2002.
- CORRECHEL, V. Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do  $^{137}\text{Cs}$ . Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003. 199p. (Tese de Doutorado)
- CORRECHEL, V.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. & MARIA, I.C. Random and systematic spatial variability of  $^{137}\text{Cs}$  inventories at reference sites in south-central Brazil. Sci. Agric., 62:173-178, 2005.
- CREMERS, A.; ELSSEN, A.; DEPRETER, P. & MAES, A. Quantitative analyses of radiocaesium retention in soils. Nature, 335:247-249, 1988.
- DUMAT, C. & STAUNTON, S. Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances. J. Environ. Radioact., 46:187-200, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FRAGA, V.D. & SALCEDO, I.H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:215-224, 2004.
- GIANNAKOPOULOU, F.; HAIDOUTI, C.; CHRONOPOULOU, A. & GASPARATOS, D. Sorption behavior of cesium on various soils under different pH levels. J. Hazard. Mater., 149:553-556, 2007.
- GUIMARÃES, M.F.  $^{137}\text{Cs}$  da precipitação radioativa ("fallout") no estudo da erosão e sedimentação de solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1988. p.136. (Tese de Doutorado)
- INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA – IRD. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Gama em água. Rio de Janeiro, 2007.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: Advanced course. 29.ed. Madison, 1975. 895p.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; BURGOS, N.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, 1972. (Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPE-SUDENE/DRN)
- KACHANOSKI, R.G. & JONG, E. Predicting the temporal relationship between soil cesium-137 and erosion rate. J. Environ. Qual., 13:301-304, 1984.



- LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA DE PERNAMBUCO – LAMEPE. Disponível em: <<http://www.itep.br/LAMEPE.asp>> Acesso em 01 set. 2008.
- LAURIA, D.C.; MARTINS, N.S.F. & ZENARO, R. Monitoramento radiológico ambiental. Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 2007. 166p.
- MALBIT, L. & BERNORD, C. Relationship between soil  $^{137}\text{Cs}$  inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. *Comptes Rendus l'Académie Sci. – Series IIA – Earth Planet. Sci.*, 327:527-532, 1998.
- PORÉBA, G.J. Caesium-137 as a soil erosion tracer: A review. *J. Meth. Applic. Absol. Chronol.*, 25:37-46, 2006.
- RITCHIE, J.C. & MCHENRY, J.R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *J. Environ. Qual.*, 19:215-233, 1990.
- SAKAI, T. Distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  nos solos do Estado da Bahia. Salvador, Universidade Federal da Bahia, 1977. 70p. (Tese de Mestrado)
- SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, M.S.B. & SAMPAIO, Y.S.B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. *R. Geogr.*, 22:93-117, 2005.
- SANTOS, A.C. Redistribuição de  $^{137}\text{Cs}$  em distintas profundidades e posições topográficas em solo sob pastagem e vegetação nativa. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2004. 68p. (Tese de Doutorado)
- SCHUCH, L.A.; NORDENMANM, D.J.R.; BARRETO, W.O.; CARDOSO, A. & ZAGO, A. Natural and artificial radionuclides in soils from Paraná, Brasil. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 1:39-40, 1994.
- SILVA, J.R.C. Erosão e produtividade do solo no semi-árido. In: OLIVEIRA, T.S.; ASSIS JR., R.N.; ROMERO, R.E. & SILVA, J.R.C., eds. *Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido*. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.168-213.
- STATSOFT. Statistica for Windows, version 5.0. Copyright Statsoft, 1995.
- WALLBRINK, J.P.; MURRAY, A.S. & OLLY, J.M. Relating suspended sediment to its original soil depth using fallout radionuclides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:369-378, 1999.
- WALLING, D.E. & QUINE, T.A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion. *Land Degrad. Rehab.*, 2:161-175, 1990.
- ZYGMUNT, J.; CHIBOWSKI, S. & KLIMOWICZ, Z. The effect of sorption properties of soil minerals on the vertical migration rate of cesium in soil. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 231:57-62, 1998.