

Inventario de referencia de ^{137}Cs para estudios de erosión de los suelos en la provincia de Cienfuegos, Cuba

Rita Y. Sibello Hernández¹, José Manuel Febles González², Alicia L. Toledo Sibello³, Roberto Suárez

Surí⁴

¹Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba

²Universidad de La Habana, Cuba

³Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas, Cuba

⁴Universidad de Cienfuegos, Cuba

rita@ceac.cu

Resumen

Para la aplicación exitosa de la técnica del ^{137}Cs en estudios de erosión del suelo es necesario establecer correctamente el inventario de referencia que representa la entrada total de este radionúclido a la superficie terrestre. En tal sentido, se selecciona un sitio que no haya sido perturbado ni por la erosión ni por el depósito, reconocido como sitio de referencia. En la práctica encontrar estos sitios suele ser difícil. El objetivo de esta investigación fue establecer el inventario de referencia de ^{137}Cs para localidades de la provincia de Cienfuegos. Quedó establecido que el intervalo de confianza del inventario de referencia de ^{137}Cs es 1082; 1266 Bq/m², con una confiabilidad del 90% y el coeficiente de variación del inventario de referencia en las localidades investigadas fue de 11%. Estos valores están en correspondencia con los reportados por otros autores para sitios similares. Asimismo, se determinó la dependencia lineal entre los inventarios de ^{137}Cs y los promedios históricos de las precipitaciones, con un coeficiente de correlación de 0.94. Esta función lineal se podrá utilizar en la estimación de los inventarios de referencia donde sea complejo encontrar sitios de referencia y por el contrario se disponga de suficiente información respecto a las precipitaciones.

Palabras clave: radiactividad, ecosistemas, suelo, erosión, cesio 137, inventarios

^{137}Cs reference inventory for the soils erosion studies in Cienfuegos, Cuba

Abstract

For the successful application of the ^{137}Cs technique in soil erosion studies, it is necessary to establish the reference inventory correctly as it represents the total entrance of this radionuclide into the earth's surface. In this sense, a site that has not been perturbed neither for the erosion nor for the deposit, is selected as reference site. In practice to find such sites is usually difficult. The objective of this research was to establish the reference inventory of ^{137}Cs for the studied localities of Cienfuegos province. It was established that the confidence interval at 90% of probability of the ^{137}Cs reference inventory is 1082; 1266 Bq/m², and the variation coefficient of the reference inventory in the researched localities was of 11%. These values are in correspondence with those reported by other authors for similar places. Also the lineal dependence between the inventories of ^{137}Cs and the historical averages of the precipitations was determined, with a correlation coefficient of 0.94. This lineal function will be able to be used to obtain or to confirm the reference inventories from rainfall data.

Key words: radioactivity, ecosystems, soils, erosion, cesium 137, inventories

Introducción

Todos los países y regiones del mundo han experimentado cambios en su desarrollo derivados del proceso de globalización. Estos cambios han estado acompañados por el incremento aparente de la variabilidad climática, el cambio de uso de la tierra, la deforestación y la degradación de los suelos [1].

Un elevado porcentaje del fondo de suelos de la República de Cuba se encuentra afectado por procesos de carácter natural o antrópico, con una marcada preponderancia de los segundos, que han conducido a que los procesos erosivos afecten más de 2.5 millones de hectáreas [2].

Las investigaciones de erosión de los suelos es una labor de importancia capital y es un ejercicio que, empleando las técnicas clásicas, suele ser complejo y consume gran cantidad de tiempo, amén de los problemas de comparación de los resultados obtenidos con unos y otros métodos [3-5]. En Cuba, el uso de nomenclaturas y técnicas de medición diferentes, han generado problemas de comparación y son frecuentes las estimaciones de pérdidas disímiles del estado de erosión de los suelos en el país [6-8].

La búsqueda de técnicas alternativas para estimar la erosión de los suelos, y complementar los métodos existentes ha dirigido la atención al uso de los radionúclidos, en particular la precipitación radiactiva del ¹³⁷Cs como trazador para obtener la estimación de la erosión de los suelos y la deposición en las tierras agrícolas [5]; [9-11]. Estudios previos, muy limitados y en general aislados, han utilizado la técnica del ¹³⁷Cs para estimar las pérdidas de suelo por erosión, demostrando su factibilidad y aplicabilidad en suelos cubanos [12-14].

Asimismo, para la aplicación exitosa de la técnica del ¹³⁷Cs es necesario conocer su ingreso total en el suelo. En muchos casos no se dispone de estos datos, por lo que algunos autores plantean la posibilidad de obtener este valor partiendo de los reportados en sitios ubicados en el mismo hemisferio del lugar de estudio mediante un escalado [15]. Otros investigadores refieren que este valor es posible determinarlo en los llamados sitios de referencia, los cuales deben cumplir importantes requisitos [16]. En la práctica, una importante limitación de la técnica es precisamente encontrar estos sitios.

En el trabajo se presentan los resultados del estudio del ¹³⁷Cs respecto a su valor medio y su variabilidad espacial en los sitios tomados como referencia en las localidades investigadas, con el objetivo de establecer con un 90% de confianza el valor del inventario de referencia en la provincia de Cienfuegos. El establecimiento de este valor es de gran importancia, ya que sustenta las bases estadísticas de una de las principales dificultades prácticas de esta técnica radiométrica, facilitando su uso en futuras aplicaciones en otras zonas de la provincia y el país. Estos resultados enriquecen la base de datos existente sobre los inventarios de referencia en el mapa mundial; principalmente para Cuba y para la región del Caribe. También, por regresión lineal simple, se determinó la relación entre los inventarios de referencias

y las precipitaciones medias históricas reportadas para cada sitio, con un coeficiente de correlación $r = 0.94$. Este tipo de correlación después de validada se puede utilizar para determinar o confirmar los inventarios de referencia, utilizando únicamente las series históricas de precipitaciones, lo cual es de gran utilidad. El modelo de dependencia entre los inventarios de referencia de ¹³⁷Cs y el promedio histórico de lluvia, constituye un aspecto novedoso para este tipo de estudio y se deberá enriquecer con futuras mediciones. Otro aspecto importante es el uso de los métodos estadísticos en el diseño de la investigación, lo cual pudiera servir de guía a otros investigadores. A pesar de la importancia del tema, un gran número de trabajos publicados carece de un riguroso tratamiento estadístico del inventario de referencia [17-18], aún cuando de su correcta determinación depende enormemente la aplicación de la técnica del ¹³⁷Cs en la estimación de la redistribución del sedimento en el paisaje.

Materiales y métodos

Selección de los sitios de referencia y análisis estadístico para el establecimiento del inventario de referencia en las localidades estudiadas de Cienfuegos

El inventario de ¹³⁷Cs medido en sitios identificados como de referencia constituyó la variable a analizar. Prácticamente fue imposible determinar la misma en todos los puntos del terreno de la población a caracterizar; en tal sentido se muestreó una proporción de la población y, fundamentados en las técnicas estadísticas, se caracterizó a esta como un todo [18]. Para evaluar el inventario de ¹³⁷Cs en los sitios de referencia, el número óptimo de muestras que se deben tomar es una interrogante importante, que tiene que ser correctamente respondida.

Se partió de la hipótesis de que no deben existir grandes variaciones en los valores de inventario de ¹³⁷Cs en los sitios seleccionados como referencia en la provincia de Cienfuegos, es decir, que la varianza de esta población no sea grande. Varios autores [19-25], han demostrado que los valores de los inventarios de ¹³⁷Cs poseen una correspondencia lineal con las lluvias caídas, principalmente en los períodos de mayor auge de las explosiones nucleares de gran potencia en la atmósfera.

Es significativo, que en los sitios investigados no existen grandes diferencias climáticas y los regímenes de lluvias reportados en cada uno de ellos están en general en el mismo orden de magnitud. Es decir, se asume que en el pasado, cuando tuvieron lugar las mayores deposiciones de ¹³⁷Cs en la provincia, tampoco existían grandes diferencias en sus regímenes pluviométricos [26,27]. En conclusión, los valores depositados de ¹³⁷Cs en los sitios estudiados están en el mismo orden de magnitud. Bajo esta presunción se aplicó el muestreo simple aleatorio (MSA) [28]. Aún cuando la varianza

sea grande, si el número de muestras también lo es, se puede aplicar el MSA; pero en este caso una limitante sería la poca disponibilidad en la práctica de sitios que se pudieran considerar como de referencia, además del costo implicado en los muestreos y la ejecución de las mediciones [16].

Características de los sitios de referencia en las localidades de Cienfuegos

Para determinar el inventario de referencia y el estudio de la variabilidad espacial del ^{137}Cs se seleccionaron sitios que, con una simple inspección, reunían los requisitos recomendados para sitios de referencia (cercanos al lugar de estudio, ángulo de inclinación mínimo, nulo o casi nulo, cobertura vegetal durante todo el año, no afectados ni por la erosión ni por el depósito, principalmente) [16].

En cada sitio de estudio se seleccionaron, al menos, dos posibles sitios de referencia. Las muestras de suelo se tomaron con un cilindro de 8 cm de diámetro, con incrementos en la profundidad del suelo de 2.5 cm, lo cual permitió, después de medidas las muestras, conocer la distribución del radisótomo en todo el perfil, dilucidando si se correspondía ciertamente con un suelo de referencia o no. En cada sitio de referencia se colectaron además, dos perfiles completos de suelo. Los sitios de referencia se caracterizan por una distribución de ^{137}Cs en la profundidad del perfil en forma de exponencial decreciente [29]. Según esta característica, de los sitios seleccionados como posibles sitios de referencia en las localidades investigadas (Figura 1), solo siete constituyeron verdaderos sitios de referencia. Tabla 1.

Las muestras en el laboratorio fueron secadas al aire libre y se pasaron por un tamiz de 2 mm, y de la fracción fina se tomaron muestras para medirlas en un espectrómetro gamma de alta pureza de germanio, para determinar las concentraciones de ^{137}Cs .

Características del sistema espectrométrico utilizado para determinar la actividad de ^{137}Cs en las muestras de suelo

Las muestras se analizaron en un sistema espectrométrico gamma con detector de alta pureza de germanio HpGe, del tipo NGC 3019, con resolución (FWHM) de 1.9 keV y un 30% de eficiencia relativa para la energía de 1332 keV de cobalto - 60 (^{60}Co). Este fue previamente calibrado para determinar la actividad de ^{137}Cs en la energía de 661.8 keV de sus cuantos gamma. Como geometría de medición se utilizó un envase cilíndrico plástico hermético, de diámetro 75 mm y altura 30 mm, el cual se colocó encima del detector. Durante la colección de los espectros se emplearon tiempos de medición de 24 horas. El procesamiento de los espectros se realizó con el software WIN XP / WINNER 6.0, el cual incluye la identificación de picos y cálculo de áreas.

Cálculo del inventario

A partir de esta actividad se calculó el inventario de ^{137}Cs para cada perfil de suelo en los sitios seleccionados como sitios de referencia según la ecuación 1.

$$\text{IM} = (\text{AESM} \times \text{CPF}) / \text{ASH} \quad (1)$$

donde

IM = inventario de ^{137}Cs de la muestra (Bq/m^2).

AESM = actividad específica de la muestra entregada para el análisis espectrométrico (Bq/kg).

CPF = (Peso corregido de la fracción fina de la muestra (kg).

CPF = PT - PG; (PT = Peso total de la muestra seca (kg); PG = Peso de la fracción gruesa (kg)).

ASH = Área superficial horizontal de la muestra (m^2).

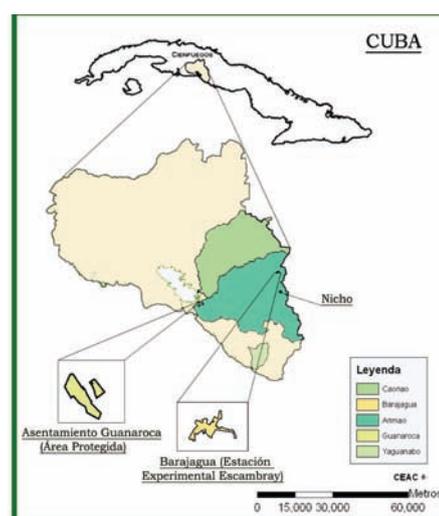


Figura 1. Localidades donde se ubican los sitios estudiados para el establecimiento del inventario de referencia de ^{137}Cs en la provincia de Cienfuegos

Ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico para el establecimiento del inventario de referencia de las localidades estudiadas

Para estimar la media μ y la varianza σ^2 de los inventarios de referencia de ^{137}Cs se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n} \quad (3)$$

donde \bar{X} es el valor promedio de los inventarios x_i de ^{137}Cs medidos.

n ... es el tamaño de la muestra, es decir el total de inventarios, que se corresponde con el total de sitios de referencia de la muestra piloto.

Tabla 1. Características de los sitios de referencia seleccionados en las localidades investigadas de Cienfuegos

Sitios de referencia Localización	Tipo de suelo	Características principales del suelo
No.1 y No. 2 Barajagua	Pardo Grisáceo Típico	Sustentado sobre granodiorita. Composición textural: 61.7% de arena gruesa; 19.3% de arena fina; 9.25% de limo y 9.67% de arcilla. Posee 1.3% de materia orgánica y densidad aparente de 1.02 Mg/m ³
No. 3 El Nicho	Ferralítico Rojo	Sustentado sobre rocas calcáreas y esquistos. Composición textural arcilloso. Posee de 2% a 4% de materia orgánica
No. 4; No. 6 y No. 7 Yaguanabo	Pardo sin Carbonato Típico	Sustentado sobre roca ígnea intermedia, saturado > 75%. Composición textural: franco-arcilloso; mediana graviliosidad (16-50%), moderadamente pedregoso (0.01 – 0.1%). La densidad aparente es de 1.35 Mg/m ³ .
No. 5 Guanaroca	Pardo con Carbonato Típico	Sustentado sobre eluvios carbonatados. Composición textural arcilloso de tipo 1:1 (caolininita), que dada su baja capacidad de retención, propicia fertilidad natural baja o media. La capacidad de cambio catiónico oscila entre 25-55 Cmol (+).Kg ⁻¹ de suelo

Para determinar el número óptimo de sitios de referencias “n”, necesarios para poder estimar con una confiabilidad del 90% la media y la varianza del inventario de referencia, se utiliza la siguiente expresión:

$$n = \frac{\sigma^2 Z_{\alpha/2}^2}{d^2} \quad (4)$$

donde

$\alpha = 0,1$

$Z_{\alpha/2} = 1.65...$ Considerando una distribución normal.

$d...$ es el error permitido que fue prefijado para el estimado del inventario de referencia en un 10% de la media de la muestra.

El tamaño de la muestra, que garantiza la exactitud y confiabilidad preestablecidas, se determina por un proceso iterativo que consta de los pasos siguientes:

Paso 1: se parte de una muestra piloto de tamaño n' tomada a conveniencia y se calcula S y el error máximo de la estimación realizada d' que produce la muestra según:

$$d' = \frac{t_{\alpha/2}^{n-1} S}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

si se cumple que $d' \leq d$ se concluye el proceso y el tamaño de muestra utilizado es el correcto; si $d' > d$ se va al paso 2.

Paso 2: se sustituye en la fórmula (4) a sigma por S con la cual se calcula el tamaño de muestra n.

Paso 3: se completa la muestra de tamaño n y se calcula nuevamente S y el error máximo de la estimación realizada $d' = \frac{t_{\alpha/2}^{n-1} S}{\sqrt{n}}$ (5), que produce tal muestra, si se cumple que $d' \leq d$ se concluye el proceso y el tamaño de muestra calculado es el correcto; si se cumple que $d' > d$, se repite el proceso comenzando en el paso 2.

Para aplicar el procedimiento anterior es necesario corroborar la condición de normalidad de la variable en estudio. Para verificar esta hipótesis se utiliza la prueba

de bondad de ajuste de Kolgomorov-Smirnov (K-S).

Para determinar el intervalo de confianza del inventario de referencia, con una confiabilidad del 90%, se utiliza la expresión (6); [28]:

$$\left[\bar{X} - \frac{t_{\alpha/2}^{n-1} S}{\sqrt{n}}; \bar{X} + \frac{t_{\alpha/2}^{n-1} S}{\sqrt{n}} \right] \quad (6)$$

Otro indicador importante de la variación, según Sutherland [18], es el Coeficiente de Variación (CV) (Desviación Standard (S) /Valor Medio (X) x 100%):

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (7)$$

Este CV se utiliza como indicador de la variabilidad espacial de ¹³⁷Cs. La dependencia entre los inventarios de referencia de ¹³⁷Cs y los promedios históricos de lluvia se establece con el uso de una regresión lineal simple.

Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se reportan los valores de la actividad de ¹³⁷Cs (A) medidos en muestras de suelo, los inventarios de ¹³⁷Cs (I) para los sitios tomados como referencia calculados para el año 2002, el valor promedio X, y la varianza obtenidos respectivamente.

La muestra piloto utilizada quedó constituida por los siete valores de inventario de ¹³⁷Cs correspondiente a cada uno de los sitios de referencia.

La hipótesis de normalidad de la variable inventario de ¹³⁷Cs en la población en estudio se verificó a partir de la muestra piloto con el uso de la prueba K-S, con una significación estadística de 0.97.

De acuerdo con el paso 1 del algoritmo para determinar el tamaño de muestra óptimo de sitios de referencias, para estimaciones con una confiabilidad del 90% y un error máximo permisible de un 10% del valor promedio calculado para la muestra piloto, 117 Bq/m², resultó un error $d' = 91.87 < 117 = d$, por lo que se concluye el proceso, y que la muestra piloto es representativa de la población.

Tabla 2. Valores de inventarios de referencia de ^{137}Cs en localidades de la provincia de Cienfuegos

Sitios de referencia	Profundidad (cm)	A \pm μ (Bq/kg)	I (Bq/m ²)	I Total (Bq/m ²)
No. 1	2.5	4.24 \pm 0.99	105 \pm 25	1222 \pm 92
	5.0	5.13 \pm 0.79	182 \pm 30	
	7.5	7.48 \pm 0.94	277 \pm 39	
	10.0	5.9 \pm 1.2	147 \pm 30	
	12.5	4.2 \pm 1.0	210 \pm 54	
	15.0	3.42 \pm 0.69	130 \pm 27	
	17.5	3.10 \pm 0.74	98 \pm 24	
	20.0	2.45 \pm 0.61	75 \pm 19	
	22.5	< 0.66		
No. 2	2.5	6.34 \pm 0.92	257 \pm 41	1075 \pm 88
	5.0	5.0 \pm 1.2	177 \pm 44	
	7.5	6.7 \pm 1.0	157 \pm 26	
	10.0	7.4 \pm 1.0	339 \pm 51	
	12.5	4.21 \pm 0.81	143 \pm 29	
	15.0	< 0.42		
	17.5	1.62 \pm 0.50	1.62 \pm 0.50	
	20.0	0.84 \pm 0.28	0.84 \pm 0.28	
	22.5	< 0.01	257 \pm 41	
No. 3	2.5	8.6 \pm 1.2	305 \pm 43	1400 \pm 90
	5.0	6.3 \pm 1.0	195 \pm 32	
	7.5	7.2 \pm 1.3	176 \pm 31	
	10.0	6.8 \pm 1.4	236 \pm 49	
	12.5	5.7 \pm 1.1	237 \pm 47	
	15.0	4.0 \pm 1.0	166 \pm 42	
	17.5	< 0.55		
	20.0	1.41 \pm 0.44	59 \pm 18	
	22.5	< 0.16		
No. 4	2.5	4.79 \pm 0.83	148 \pm 27	1161 \pm 25
	5.0	5.62 \pm 0.97	149 \pm 27	
	7.5	5.32 \pm 0.94	216 \pm 40	
	10.0	5.35 \pm 0.86	168 \pm 29	
	12.5	4.94 \pm 0.66	214 \pm 32	
	15.0	1.34 \pm 0.47	48 \pm 16	
	17.5	1.43 \pm 0.32	79 \pm 23	
	20.0	1.38 \pm 0.40	67 \pm 34	
	22.5	1.35 \pm 0.45	49 \pm 25	
25.0		25 \pm 13		
No. 5	2.5	6.67 \pm 0.97	162 \pm 26	1088 \pm 19
	5.0	4.54 \pm 0.53	116 \pm 15	
	7.5	7.06 \pm 0.95	73 \pm 11	
	10.0	7.73 \pm 0.71	177 \pm 19	
	12.5	6.72 \pm 0.69	286 \pm 34	
	15.0	5.45 \pm 0.67	120 \pm 17	
	17.5	2.73 \pm 0.42	58.9 \pm 9.8	
	20.0	2.21 \pm 0.57	33.5 \pm 8.9	
	22.5	1.83 \pm 0.99	37 \pm 20	
25.0	1.23 \pm 0.63	25 \pm 13		
No. 6	25.0	3.240 \pm 0.070		1052 \pm 23 Recalculado (año 2002) 1237
No. 7	25.0	2.87 \pm 0.14		880 \pm 43 Recalculado (año 2002)
\bar{X}				1035
s ²				1174
d				15652.51
				117

Por otra parte, se determinó que el intervalo de confianza del inventario de referencia de ¹³⁷Cs es [1082; 1266] Bq/m², con una confiabilidad del 90%. El establecimiento del inventario de referencia sustentado en el análisis estadístico posibilita la aplicación exitosa de la técnica en futuras investigaciones.

Asimismo, el CV relacionado con la variabilidad espacial del ¹³⁷Cs en los sitios seleccionados como referencia fue de 11%, y está en el orden de los valores reportados por Sutherland (1991) (5.1-41%) para sitios enclavados en praderas o pastizales y menor que los valores reportados para el sitio de referencia de la Cuenca del Río Máximo en Cuba por Brígido [12]. El CV para sitios de referencia con bosques puede ser más alto, según Sutherland (de 19-47%) [18].

En la Tabla 3 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con los reportados por otros investigadores.

El inventario de referencia determinado en el estudio corrobora los valores reportados por Sibello (2005) y están en igual orden de magnitud que los valores reportados por Gil (2004).

Asimismo, los valores algo inferiores reportados por Brígido [12], pudieran estar relacionados con un régimen de lluvia también ligeramente inferior a los sitios reportados por Gil [13] y Sibello [14].

Por otra parte, basados en los valores reportados de los inventarios de referencia por diferentes investigadores en Cuba (Tabla 4) y los promedios anuales de lluvias para cada sitio, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal $r = 0.94$ para un nivel de confianza del 95%, lo que sugiere una dependencia lineal del inventario de referencia de ¹³⁷Cs con las precipitaciones (Figura 2).

Se obtuvo por regresión lineal simple la función $y = 1.9879x - 1065.9$ ($r = 0.94$; $n = 5$; $P = 0.02$; $r^2 = 0.85$)

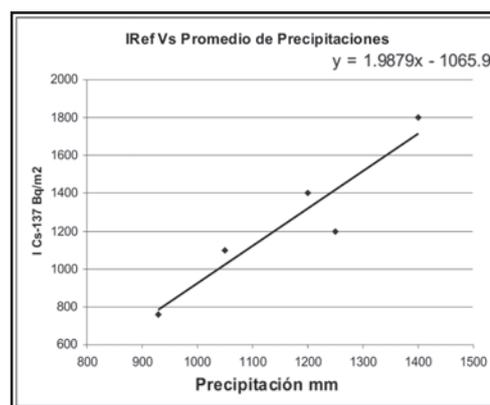


Figura 2. Dependencia lineal entre los inventarios de referencia reportados en Cuba y las precipitaciones medias históricas correspondientes a estos sitios

que sugiere una fuerte relación lineal entre las precipitaciones medias anuales “x” y los valores de ¹³⁷Cs en los sitios de referencia “y”.

El uso de esta ecuación posibilita estimar el inventario de referencia del ¹³⁷Cs (y) en (Bq/m²) en lugares donde sea engorroso encontrar sitios de referencia o en situaciones donde existan limitaciones económicas y se conozcan los valores históricos promedios de lluvia (x) (mm), toda vez que se haya validado la ecuación con una muestra de mayor tamaño. Además, es una forma de verificar los valores de referencia que se hayan determinado empíricamente.

Funciones lineales de este tipo se han obtenido y se han utilizado en algunos países donde la determinación de los inventarios de referencia ha sido muy compleja para aplicar la técnica del ¹³⁷Cs [24]. Los valores de los inventarios de referencia de ¹³⁷Cs se deben comparar con los datos disponibles al respecto.

Tabla 3. Comparación de los resultados con otros investigadores del país

Fuentes	IRef Cs-137	Promedio histórico Anual de lluvias	Coefficiente variación
Gil (2004)	954.93 Bq/m ² (medido) 1847.00 Bq/m ² (calculado por software)	1400 mm	---
Brígido (2006)	674.4 ± 90.9 Bq/m ²	930 mm	27.5%
Sibello (2005)	1300 ± 90 Bq/m ²	1200-1300 mm	---
Sibello (estudio actual)	1082 – 1266 Bq/m ²		11%

Tabla 4. Correlación entre los valores de inventarios de referencia de ¹³⁷Cs y el promedio anual de lluvias

Reporte	Localidad	Promedio histórico Anual de lluvias	IRefCs-137(Bq/m ²)
Gil Castillo, 2004	Provincia de Pinar del Río, municipio San Juan y Martínez	1400 mm	954.93 (medido) 1847.00 (calculado)
Brígido Flores, 2006	“La Victoria”, Cuenca del río Máximo en Camagüey	930 mm	674.4 ± 90.9
Sibello Hernández, 2005	Barajagua, Cienfuegos Nicho, Cienfuegos	1200 mm 1200-1300 mm	1200 ± 90 1400 ± 90
Sibello Hernández (no publicado)	Yaguanabo	1400 mm	1200
R. Sibello Hernández (no publicado)	Guanaroca	1000-1100	1100

Conclusiones

El análisis de la variabilidad espacial del ^{137}Cs en los sitios seleccionados como referencia en la provincia de Cienfuegos con $\text{CV} = 11\%$ está en el rango establecido en condiciones similares, es decir, bajo condiciones de pradera o pastos.

Dada la pequeña varianza entre los valores de inventario de ^{137}Cs en los sitios investigados como referencia, la muestra piloto conformada por siete valores resultó ser representativa.

Se establece que el intervalo de confianza del inventario de referencia de ^{137}Cs es (1082; 1266 Bq/m^2 con una confiabilidad del 90%, el cual está en el orden de los valores reportados para Cuba.

Se infiere una tendencia a un comportamiento lineal para la relación existente entre los valores de inventarios de referencia de ^{137}Cs reportados para Cuba y el promedio histórico de las precipitaciones de los sitios de referencia correspondientes, con un nivel de confianza del 95% y un coeficiente de correlación lineal de 0.94. Este tipo de modelo es de gran utilidad, porque se puede utilizar para estimar el inventario de ^{137}Cs de un determinado lugar, conociendo el promedio histórico de precipitaciones.

Recomendaciones

La determinación de la dependencia lineal entre los inventarios de referencia y los valores de las precipitaciones obtenidas en este trabajo se deberá enriquecer con estudios similares en otras regiones. Es de significar que, mientras más puntos se obtengan mejor establecida quedará la función lineal y el inventario de referencia determinado estará más próximo al valor real.

Referencias bibliográficas

- [1] MERTZ O, WADLEY L, CHRISTENSEN AE. Local land use strategies in a globalizing world: Subsistence farming, cash crop and income diversification. *Agricultural Systems*. 2005; 85(3): 209-215.
- [2] Ministerio de la Agricultura. Instituto de Suelos. Programa Nacional de mejoramiento y conservación de suelos. Agrinfor, 2001. 38 p.
- [3] LOUGHRAN RJ, CAMPBELL BL, ELLIOT GL, et. al. A cesium-137 sediment hillslope model with test from south-eastern Australia. *Z.Geomorph.N.F*. 1989; 33: 235-250.
- [4] MUTCHLER CK, MURPHREE CE, MCGREGOR KC. Laboratory and field plots for erosion research. In: *Soil erosion research methods*. Ankeny: SWCS Publ, 1994. p. 11-38.
- [5] POREBA GJ. Caesium-137 as soil erosion tracer: a review. *Geochronometria*. 2006; 25: 37-46.
- [6] FEBLES JM, et. al. Limitaciones objetivas del "perfil patrón" como índice diagnóstico para evaluar la intensidad de la erosión en Cuba. En: *Memorias 3ra Jornada Científica del Instituto de Suelo*. La Habana: Academia de Ciencias de Cuba, 1985. p. 227-232.
- [7] VEGA MB, FEBLES JM. Evaluación de la erosividad de la lluvia en regiones agropecuarias en la porción central de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 2006; 40(2): 215-220.
- [8] FEBLES JM, VEGA MB, FEBLES G. Integrating system of qualitative and quantitative methods to assess the erosion of the soils in the karstic regions of cattle rearing use in Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 2008; 42(3): 315-319.
- [9] RITCHIE JC, MCHENRY JR. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J.Environ.Qual*. 1990; 19: 215-233.
- [10] WALLING DE, QUINE TA. The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations. *Symposium on Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation*. STI/PUB/947. Vienna: IAEA, 1995. p. 597-619.
- [11] SAC MM, UGUR A, YENER G, ÖZDEN B. Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer model. *Environ Monit Assess*. 2008; 136(1-3): 461-467.
- [12] BRÍGIDO FLORES O, MENDOZA L, MONTALVÁN A, RODRÍGUEZ D. Cuantificación de procesos erosivos en suelos agrícolas empleando las precipitaciones radiactivas globales del Cesio-137. VI Congreso Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, 2006. ISBN 959-7023-35-0.
- [13] GIL CASTILLO R, PERALTA VITAL JL, CARRAZANA GONZÁLEZ J, et. al. Aplicación de las determinaciones de ^{137}Cs para evaluar niveles de erosión en suelos agrícolas del Occidente de Cuba. *Nucleus*. 2004; (36): 23-27.
- [14] SIBELLO HERNÁNDEZ RY, CARTAS AGUILA HA, MARTÍN PÉREZ J. Uso del Cesio-137 como radiotrazador en la cuantificación de la erosión en suelos tropicales. *Nucleus*. 2005; (38): 19-24.
- [15] WALLING DE, HE Q, BLAKE W. Use of Be-7 and Cesio-137 measurements to document short-and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resour. Res*. 2000; 35(12): 3865-3874.
- [16] PENNOCK DJ, APPLEBY PG. Site selection and sampling design. In: *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*. Chapter 2. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [17] PENNOCK DJ, APPLEBY PG. Sample Processing. In: *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*. Chapter 4. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [18] SUTHERLAND RA. Caesium - 137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a literature survey. *Hidrological Processes*. 1996; 10(1): 43-53.
- [19] LOW K, EDVARSON K. Content of caesium-137 and (zirconium + niobium) - 95 in Swedish soils. *Nature*. 1960; 187: 736-738.
- [20] DAVIS JJ. Cesium and its relationship to potassium in ecology. In: *Radioecology*. New York: Reinhold Publ. Comp., 1963. p. 539-556.
- [21] LANCE JC, MCINTYRE SC, NANEY JW, ROUSSEVA V. Measuring sediment movement at low erosion rates using cesium-137. *Soil Science Society of America Journal*. 1986; 50(5): 1303-1309.
- [22] ARNALDS O, CUTSHALL NH, NIELSEN GA. Cesium-137 in Montana soils. *Health Physics*. 1989; 57(6): 955-958.
- [23] BASHER LR, MATTHEWS KM. Relationship between ^{137}Cs in some undisturbed New Zealand soils and rainfall. *Australian Journal of Soil Research*. 1993; 31(5): 655-663.
- [24] BASHER LR. Surface erosion assessment using ^{137}Cs : examples from New Zealand. *Acta Geológica Hispánica*. 2000; 35(3-4): 219-228.
- [25] SCHULLER P, VOIGT G, HANDL J, et. al. Global weapons fallout ^{137}Cs in soils and transfer to vegetation in south-central Chile. *J. Environ. Radioactivity*. 2002; 62(2): 181-193.
- [26] LECHA L. Estudio bioclimático de la provincia de Cienfuegos. La Habana: Editorial Academia, 1993. p. 148.
- [27] RIVEROL M, et. al. Informe final del Proyecto "Uso y manejo de los suelos afectados por la erosión en los agrosistemas de las provincias occidentales y centrales del país". Programa Nacional Científico-Técnico: Los cambios globales y la evolución del medio ambiente. 1999.
- [28] SÁNCHEZ ÁLVAREZ R, TORRES DELGADO JA. Estadística elemental. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1986.
- [29] ZHANG X, ZHANG Y, WEN A, FENG M. Assessment of soil losses on cultivated land by using the ^{137}Cs technique in the Upper Yangtze River Basin of China. *Soil & Tillage Research*. 2003; 69(1-2): 99-106.

Recibido: 2 de agosto de 2013

Aceptado: 24 de octubre de 2013