

# Determinación de la Tasa de Dosis Debida a Gama Emisores Depositados en Suelo con Perfiles Exponenciales en la Profundidad . Simulación de Monte Carlo.

M. E. R. Rodríguez, H. R. Velasco

Departamento de Física. IMASL Universidad Nacional de San Luis. Conicet  
Ejercito de Los Andes 950 - (5700) - San Luis - Argentina  
e-mail: mrod@unsl.edu.ar

En este trabajo se desarrolla un método para el cálculo de la dependencia temporal de la tasa dosis externa debida a gamma emisores depositados en suelo; para esto se usa el modelo Rabes. El coeficiente DRF (dose rate factor) es determinado utilizando simulación de Monte Carlo. El producto de este factor por la concentración en suelo permite el cálculo directo de la intensidad de dosis sobre un receptor ubicado a 1 metro sobre el suelo. El método se desarrolla considerando capas de espesor finito con concentración uniforme, y para el caso en que el contaminante se encuentre distribuido exponencialmente con la profundidad. Los valores obtenidos son confrontados con resultados reportados por otros autores. Se efectúa el cálculo de la intensidad de dosis considerando datos reales de concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en suelo de Italia (consecuencia del accidente de Chernobyl).

A new method has been developed to determine the external dose rate at a height of 1 m above ground, due to photon emitters in soil. The dose rate factor (DRF) (external dose rates per unit source concentrations in soil) has been calculated using Monte Carlo Simulation. The method permits the calculations of external dose in air from a uniform radionuclide concentration in a finite thickness of soil and sources which are exponentially distributed with depth. The DRF values calculated in this paper has been confronted with previous values determined by other authors. Dose rate values has been confirmed considering  $^{137}\text{Cs}$  soil concentration data from Italy (consequence of Chernobyl accident).

## Introducción

Uno de los problemas radioecológicos de mayor actualidad, es el de generar métodos que permitan evaluar la tasa dosis externa sobre personas que se encuentran sobre suelos contaminados. La motivación del presente trabajo es determinar la evolución temporal de la tasa de dosis debida a fotones monoenergéticos emitidos en suelo usando el método de Monte Carlo.

Se supone que el contaminante está depositado en una superficie plana infinita, donde planos paralelos a la superficie del suelo son isoconcentrados y distribuidos en la profundidad exponencialmente, se supone además que esta distribución posee una dinámica establecida por el modelo migracional Rabes (Velasco ed al. 1997).

Un detector está localizado en aire, a 1 metro de altura del suelo. La razón para situar dicho detector en este lugar radica en que a esta altura se encuentran algunos de los principales centros radiosensibles. (Ver figura 1).

La transferencia de energía desde el suelo al detector, mediante los fotones transportados en aire, se estudia a través de un modelo que propone una relación lineal entre la tasa de dosis y la concentración de radionúclidos en suelo. La proporcionalidad está dada por el factor DRF.

$$D(t) = DRF \cdot C(t) \quad (1)$$

donde:  $C(t)$  ( $\text{Bq cm}^{-3}$ ) Concentración de contaminante al instante  $t$ ,

$D(t)$  ( $\text{Sv a}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{cm}^3$ ) Tasas de dosis al instante  $t$ .

Para solucionar el transporte de los fotones en la materia se utiliza el método de Monte Carlo. La siguiente hipótesis es fundamental para la simulación.

Se supone que todos los fotones, que son emitidos por los átomos del suelo, salen al medio exterior, aire, sin sufrir

interacciones con éste. Solo se considera que el suelo produce atenuación en la energía.

El no suponer interacciones entre los fotones, que logran salir del suelo, y el aire, se puede hacer una simplificación en el análisis. Se puede pensar que existe un área representativa, que con solo analizar ésta basta para obtener la tasa de dosis debida a todo el suelo.

## Materiales y Métodos

En lo que respecta al tamaño del área a analizar, se demuestra que basta con considerar un tamaño no mayor a  $1 \times 10^5 \text{ cm}^2$ , para áreas mayores el error cometido en la estimación de la tasa de dosis es menor que un 0.01%.

Se ha obtenido por el uso de la técnica del muestreo pesado. Por tal motivo se han debido definir las funciones de distribución de probabilidad, tanto en la selección de la profundidad de los fotones a muestrear como así también en la distribución angular de los mismos.

La función de distribución de probabilidad, para la elección de la profundidad se obtiene a partir de (Radiation Shielding; J. K. Shultis), (Radiation Detection and Measurement; G. F. Knoll) :

$$f(x) = A e^{-\mu x} \quad (2)$$

donde:  $A$  es una constante cuyo valor se determina de las condiciones de contorno del problema.

$\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) Coeficiente de atenuación lineal del medio por donde se transportan los fotones.

$x$  (cm) Espesor de material que atraviesa el fotón.

Se define la función continua en el intervalo  $(0, 1)$ , la cual permite la elección de la profundidad de emisión.

$$\xi = \int_0^x f(x'') dx'' = \left( \frac{1}{1 - e^{-\mu T}} \right) \cdot (1 - e^{-\mu x}) \quad (3)$$

Resolviendo para la variable  $x$ , se obtiene una función que determina la profundidad, a partir de una variable aleatoria uniforme en el intervalo (0,1).

$$x = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln \left[ (1 - \xi) + \xi \cdot e^{-\mu T} \right] \quad (4)$$

Para compensar, desde el punto de vista de la frecuencia de selección, se define el factor de peso a la profundidad. Este factor de peso es una relación entre la función de distribución de probabilidad para un esquema sin preferencia de ninguna especie, y la función de distribución modificada.

$$W_{prof} = \frac{g(x)}{f(x)} = \frac{(1 - e^{-\mu T})}{\mu T} \cdot e^{-\mu x} \quad (5)$$

donde:  $g(x)$  es la función de distribución de probabilidad sin preferencia de ningún tipo, elegida arbitrariamente de la forma  $1/T$ .

Para seleccionar los ángulos de emisión se define una función de distribución de probabilidad de la siguiente forma:

$$p(\eta) = \begin{cases} 0.1 \rightarrow -1 \leq \eta \leq 0 \\ 0.1 + 1.6 \cdot \eta \rightarrow 0 < \eta \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

donde:  $\eta$  es el coseno del ángulo que forma el fotón emitido con el eje  $z$ .

Para dar el peso correspondiente a cada fotón emitido en una dada dirección, se define el peso angular de la siguiente manera:

$$W_{ang} = \begin{cases} 0.5 \rightarrow -1 \leq \eta \leq 0 \\ 0.1 + 1.6 \cdot \eta \rightarrow 0 < \eta \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Si por cada  $cm^3$  de suelo, la cantidad de material radiactivo es de  $K$  Bq, entonces si se multiplica por el volumen de la muestra de suelo considerada, se tendrá la cantidad total de Bq en esta muestra.

$$N = K(t) \cdot A \cdot (x_2 - x_1) \quad (8)$$

donde:  $N$  es el número de fotones que contiene el estrato de espesor  $(x_2 - x_1)$  y área  $A$

$K(t) (Bq/cm^3)$  es la concentración volumétrica promedio al tiempo  $t$ .

Para determinar  $N$  a partir de (8) es necesario conocer la expresión  $C(x, t)$  de la concentración. La concentración volumétrica promedio se calcula de la siguiente manera:

$$K(t) = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot \int_{x_1}^{x_2} C(x, t) dx \quad (9)$$

donde:  $C(x, t)$  es la función que describe como es el perfil de distribución del radionúclido, en el instante  $t$ .

En el caso de perfiles exponenciales la forma que posee la función  $C(x, t)$  es la siguiente:

$$C(x, t) = A \cdot e^{-a(t) \cdot x} \quad (10)$$

donde:  $a(t) (cm^{-1})$  es la inversa de la longitud de relajación al tiempo  $t$ .

Según el modelo Rabes la forma que posee la inversa de la longitud de relajación es la siguiente (Velasco et al 1997):

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-a_1 t} + a_2 \quad (11)$$

Al instante inicial, la deposición esta determinada por:  $\alpha_0 + \alpha_2$ . Mientras que para tiempos infinitos la distribución esta regida por el valor que toma el factor  $\alpha_2$ . El factor  $\alpha_1$  es el que contiene información del tipo de proceso migratorio que se esta llevando a cabo.

En el caso límite  $\alpha(t)=0$ , la expresión corresponde a una distribución con concentración uniforme de valor  $A$  Bq/cm<sup>3</sup>.

El valor de la constante  $A$  se obtiene normalizando (10). Si se integra entre 0 e  $\infty$ , el valor que se obtiene es la concentración superficial  $Q$  (Bq cm<sup>2</sup>); esta magnitud es la cantidad total de actividad depositada en suelo, en la unidad de área, con lo cual reemplazando en (9) se obtiene la cantidad buscada:

$$K(t) = \frac{Q \cdot (e^{-a \cdot x_1} - e^{-a \cdot x_2})}{(x_2 - x_1)} \quad (12)$$

donde:  $K(t) (Bq/cm^3)$  es la concentración volumétrica de radionúclidos en el estrato de espesor  $(x_2 - x_1)$  y área  $A$ .

$Q (Bq/cm^2)$  es la concentración superficial de radionúclidos en suelo.

$x_1$  (cm) es la profundidad de la capa superior del estrato.

$x_2$  (cm) es la profundidad de la capa inferior del estrato.

### Resultados

La tasa de dosis absorbida por un detector colocado sobre una superficie contaminada con material radiactivo se puede calcular suponiendo relación lineal con la concentración de material radiactivo en suelo, el factor de proporcionalidad recibe el nombre de: DRF (Dose-Rate Factor).

$$DRF = \int K \left( \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_{aire} E \Phi(\rho, T, E) R(E) dE \quad (13)$$

donde:  $\left( \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right) (cm^2 g^{-1})$  coeficiente de absorción

lineal, masico, de energía,

$E$  (MeV) energía del fotón incidente,

$\Phi(\rho, T, E) (cm^{-2} MeV^{-1} s^{-1})$  fluencia de fotones en

el receptor,

$R(E) (Sv Gy^{-1})$  coeficiente que convierte la dosis

absorbida en aire en dosis efectiva equivalente, para irradiación ROT,

$K (Gy g MeV^{-1} s^{-1} cm^3 Bq^{-1})$  constante de conversión de unidades.

Se han estudiado perfiles uniformemente contaminados y con un perfil exponencial. En ambos casos los resultados son buenos y concordantes con los obtenidos experimentalmente. (Ver figura 4 y 5)

**Conclusiones:**

Se ha evaluado el modelo aquí propuesto, utilizando los valores que calibran el modelo Rabes. Dichos valores corresponden a estaciones experimentales situadas al norte de Italia (Velasco ed al. 1997). Se ha obtenido la tasa de dosis en función del tiempo, observándose una buena concordancia con los valores medidos en dicha estación para el instante de muestreo. Este modelo permite conocer como será la evolución temporal de la tasa de dosis absorbida en aire, a una altura de 1 metro sobre el suelo. Se puede observar una tendencia hacia un valor constante, esto es debido a la fijación que posee en <sup>137</sup>Cs en el suelo, quedando este estabilizado dentro de una profundidad no mayor a los 20 cm. Se puede hacer esta afirmación pues no se ha considerado el decaimiento radiactivo sufrido por el Cesio, esta gruesa hipótesis fue hecha solo con fines ilustrativos sobre el proceso de fijación del Cesio en suelo.

**Referencias**

“Dose-Rate Conversion Factors For External Exposure To Photon Emitters In Soil”. D. C. Kocher, A. L. Sjoeren; Health Physics Vol. 48, N<sup>o</sup> 2 pp 193-205.  
 “Calculation Of Effective Dose-Equivalent Responses For External Exposure From Residual Photon Emitters In Soil”. S. Y. Chen; Health Physics Vol. 60 N<sup>o</sup> pp 411-426.  
 “Radiation Shielding”; J. Kenneth Shultis, Richard E. Faw. Prentice Hall; PTR. 1996.  
 “Radiation Detection and Measurement”; Glenn F. Knoll. John Wiley & Sons; PTR. 1979.  
 “Radiocesium in the Northeastern Part of Italy After the Chernobyl Accident: Vertical Soil Transport and Soil-to-Plant Transfer”. Velasco R. H, Toso J. P, Belli M. J. Environ. Radioactivity, Vol. 37 N<sup>o</sup> 1 pp 73-83.1997.

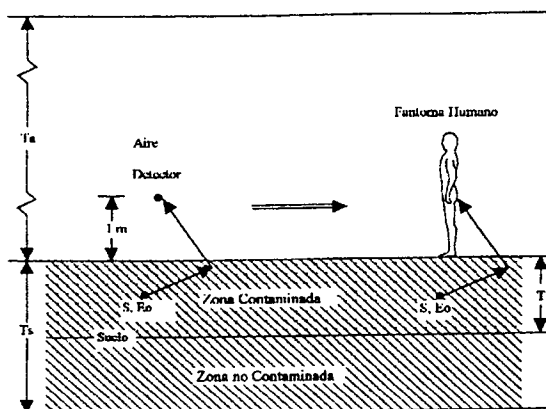


Figura 1: Configuración suelo-detector a ser analizada.

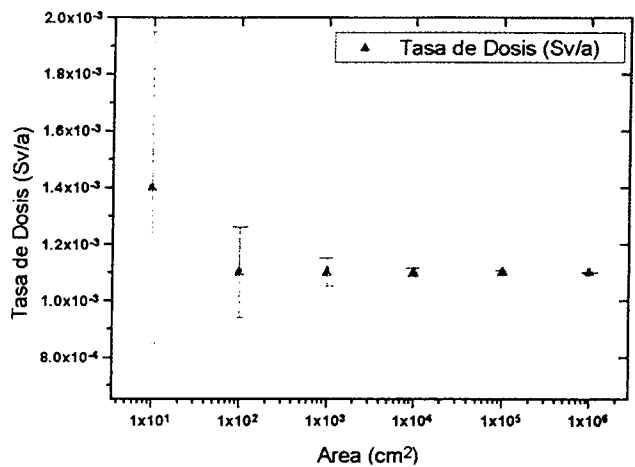


Figura 2: Dependencia de la Tasa de Dosis en función del tamaño del área de muestreo.

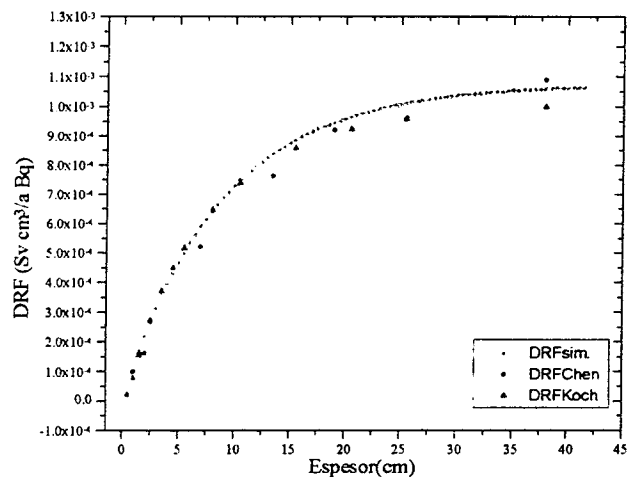


Figura 3: DRF para una distribución uniforme de radionuclidos en suelo. Comparación con los resultados de otros autores.

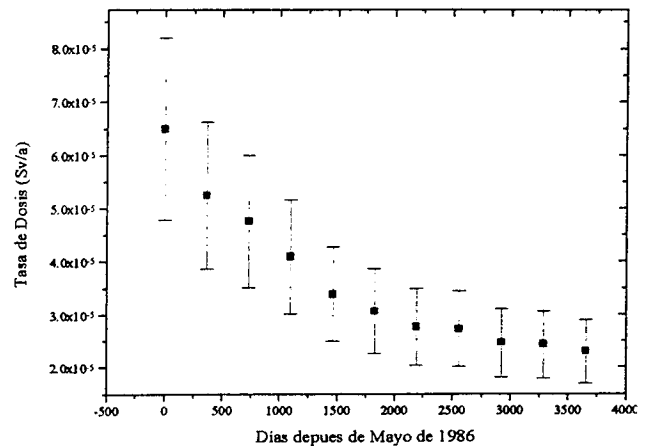


Figura 4: Tasa de dosis en función del tiempo utilizando el modelo Rabes. Los parámetros del modelo se calibraron en una estación experimental del Norte de Italia.