

Determinación de la Tasa de Dosis Debida a Gamma Emisores Depositados en Suelo.

Simulación por 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 dosis externa debida a gamma emisores depositados en suelo. Un coeficiente DRF (dose rate factor) es determinado utilizando simulación por 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}Cs en suelos de Ucrania, Italia (consecuencia del accidente de Chernobyl) y suelos chilenos.

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}Cs soil concentration data from Ukraine, and Italy (consequence of Chernobyl accident) and from Chile (pre-Chernobyl component).

I. Introducción

En caso de escapes accidentales de radiactividad al ambiente, la exposición externa debida a gamma emisores que se encuentran en suelos es una de las vías más importantes de irradiación para la población. Si bien el problema ha sido intensamente estudiado, las soluciones encontradas (ver por ejemplo Kocher (1987)) no resultan adecuadas cuando se tiene en cuenta la variabilidad propia de las condiciones ambientales que afectan al problema. La puesta a punto de un programa de simulación (Chen (1991)), resulta altamente conveniente para superar los inconvenientes señalados. De este modo resulta posible recrear distintas situaciones, posibilitando identificar el papel que juegan los distintos parámetros en el cálculo de la dosis sobre la población.

La motivación del presente trabajo es determinar la tasa de dosis debida a fotones monoenergéticos emitidos desde suelo, sobre un receptor que se encuentra por sobre éste, utilizando el método de simulación por Monte Carlo.

El contaminante se supone que se halla sobre planos horizontales isoconcentrados infinitos, y que el perfil vertical de la concentración es uniforme hasta una profundidad T (conocida), o que presenta un perfil tipo exponencial decreciente con la profundidad. El detector se encuentra localizado en aire a un metro de altura del suelo, suposición usual para este tipo de problema. La transferencia de energía desde el suelo al detector se analiza asumiendo una relación lineal entre la tasa de dosis y la concentración de radionúclidos en el suelo. La proporcionalidad está dada por el factor DRF ($\text{Sv/a cm}^3/\text{Bq}$), que da cuenta de los mecanismos de atenuación que sufren los fotones en su vuelo, (Kocher (1985)):

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

donde $C(t)$ (Bq/cm^3): Concentración de contaminante.
 $D(t)$ (Sv/a): Tasas de dosis.

Se muestra, como una aplicación del modelo, los resultados para zonas de las que se tienen datos experimentales. Estas regiones están localizadas en Ucrania, Italia y Sur de Chile. Los resultados muestran una buena concordancia con los valores medidos en dichas regiones

II. Metodología

Se supone que todos los fotones, salen al medio exterior sin sufrir interacciones explícitas en su camino. La atenuación en la energía de los fotones se analiza en término de la existencia de dos factores de peso que tienen en cuenta la profundidad y el ángulo de emisión.

Para seleccionar la profundidad de emisión del fotón, se utiliza un esquema de selección con preferencia hacia aquellos átomos que se encuentran en las capas más superficiales de los estratos considerados.

La función de distribución de probabilidad, que considera la atenuación de la energía al atravesar el elemento material de espesor χ , está dada por la siguiente ecuación:

$$f(\chi) = Ae^{-\mu\chi} \quad (2)$$

donde:

A : constante cuyo valor se determina de las condiciones de contorno del problema.

μ (cm^{-1}): coeficiente de atenuación lineal de energía del medio.

χ (cm): espesor del material.

La condición de normalización impone que:

$$\int_0^T f(\chi) d\chi = 1 \Rightarrow A = \frac{\mu}{(1 - e^{-\mu T})} \quad (3)$$

donde:

T (cm): es la profundidad de la capa de suelo considerada.

A continuación se define una variable aleatoria, definida en el intervalo (0,1) a partir de (3):

$$\xi = \int_0^{\chi} f(\chi') d\chi' = \left(\frac{1}{1 - e^{-\mu T}} \right) \cdot (1 - e^{-\mu \chi}) \quad (4)$$

La variable χ , definida en el intervalo (0,T), se expresa en función de la variable aleatoria ξ del siguiente modo:

$$\chi = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln \left[(1 - \xi) + \xi \cdot e^{-\mu T} \right] \quad (5)$$

Para compensar, desde el punto de vista de la frecuencia de selección, se define el factor de peso de profundidad como:

$$W_{prof} = \frac{g(\chi)}{f(\chi)} = \frac{(1 - e^{-\mu T})}{\mu T} \cdot e^{-\mu \chi} \quad (6)$$

Aquí $g(\chi)$ es una función de distribución de probabilidad que no hace preferencia de ningún tipo, tomando el valor constante (1/T) para cada profundidad.

El peso asociado con el ángulo de emisión se define de la siguiente forma:

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

donde:

η : coseno del ángulo que forma el fotón emitido con el eje z, perpendicular a la superficie de suelo.

Sea ζ una función continua en el intervalo (0,1) definida:

$$\zeta = \int_{-1}^{\eta} p(\eta) d\eta \quad (8)$$

Despejando η :

$$\eta = \begin{cases} 10 \cdot \zeta - 1 \rightarrow 0 < \zeta \leq 0.1 \\ \frac{1}{1.6} \cdot \left[-0.1 + (3.2 \cdot \zeta - 0.31)^{1/2} \right] \rightarrow 0.1 < \zeta \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

Esta función da la frecuencia de selección de los ángulos de emisión.

Al igual que con la ecuación 6, se define el peso angular, considerando que la función de distribución sin

perturbar es de la forma: $g(\eta) = \frac{1}{2}$, se supone que la fuente es isotrópica.

$$W_{ang} = \begin{cases} 5 \rightarrow -1 \leq \eta \leq 0 \\ \frac{0.5}{0.1 + 1.6 \cdot \eta} \rightarrow 0 < \eta \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

La ecuación (9) dice que se da preferencia a aquellos fotones que son emitidos hacia la superficie del suelo. La ecuación (10) es la responsable de asignar un peso a cada fotón, según el ángulo de emisión, correspondiéndole un peso pequeño a los que tienen componente z positiva y un peso grande a aquellos con componente z negativa. No hay contradicción al hacer esta asignación de pesos, pues el número de fotones emitidos hacia la superficie son un 90% más numerosos que los que lo hacen en sentido contrario.

III. Resultados:

Para calcular la tasa de dosis absorbida se debe encontrar el DRF (Sv cm³/Bq a) (D. C. Kocher 1985). Se define el DRF de la siguiente manera:

$$DRF = \int K \left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_{aire} E \Phi(\rho, T, E) R(E) dE \quad (11)$$

donde:

$\left(\frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)$ (cm²g⁻¹): coeficiente de absorción lineal,

másico, de energía.

E (MeV): energía del fotón incidente.

$\Phi(\rho, T, E)$ (cm⁻²MeV⁻¹s⁻¹): fluencia de fotones en el receptor.

$R(E)$ (Sv Gy⁻¹): coeficiente que convierte la dosis absorbida en aire en dosis efectiva equivalente, se considera irradiación ROT.

K (Gy g MeV⁻¹ s a⁻¹ cm⁻³ Bq⁻¹): constante de conversión de unidades.

El principal inconveniente al resolver (11) es calcular la fluencia; ya que para ello se debería resolver la ecuación de transporte de radiación para un medio difusor, con el aditamento de una interfase entre dos medios distintos. Este inconveniente se ve solucionado con el método de Monte Carlo.

Se han resuelto, por simulación, los problemas para perfiles uniformes y exponenciales, suponiendo irradiación ROT; encontrando resultados muy aceptables en ambos casos.

Para el caso de radionúclidos distribuidos uniformemente se han obtenido resultados muy satisfactorios, en comparación con los propuestos por los autores antes mencionados. Se muestra, en la figura (1) el DRF vs. la profundidad para una concentración unitaria (1Bq/cm³).

Para radionúclidos distribuidos exponencialmente, la concentración está dada por:

$$C_s(\chi) = C_0 \cdot e^{-\alpha\chi} \quad (12)$$

$C_s(\chi)$: concentración a la profundidad χ .

C_0 : concentración en superficie.

α (cm^{-1}): parámetro que caracteriza el tipo de distribución.

En la figuras (2), (3), (4) y en la tabla 1, se muestran los resultados de la aplicación del modelo a estaciones experimentales cercanas a la zona del accidente de Chernobyl y a regiones del sur de Chile, con el objeto de obtener la Tasa de Dosis.

IV. Conclusiones

Se ha verificado que el modelo es bueno dentro de un margen aceptable de error, inferior al 15% para todos los casos. Se comprueba que con las estaciones experimentales de Ucrania, Norte de Italia, y Sur de Chile, el valor obtenido por la simulación es muy cercano al valor predicho por un trabajo previo donde hemos calculado la tasa de dosis usando el modelo de Kocher.

Se espera que el modelo mejore al introducir una corrección más pulida del efecto fotoeléctrico, ya que en este momento este efecto no está siendo considerado en forma explícita, sino que está implícito en el factor de peso debido a la profundidad.

V. Referencias

"Dose-Rate Conversion Factors For External Exposure To Photon Emitters In Soil". D. C. Kocher, A. L. Sjoeren; Health Physics Vol. 48, N^o 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^o 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.

"Concentración Superficial y Distribución Vertical de ^{137}Cs en Suelos de la Isla de Pascua, Chile", Tesis de Profesorado en Biología y Ciencia Naturales A. P. Castillo 1997.

| Estación | α cm^{-1} | Bq cm^{-2} | Tasa de dosis equivalente Kocher (Sv/a) | Tasa de dosis equivalente Simulada (Sv/a) |
|--------------|---------------------------|---------------------|---|---|
| Italia. | .152 | 3.19 | 2.64×10^{-4} | 2.66×10^{-4} |
| Ucrania. | .451 | 47 | 5.45×10^{-3} | 5.66×10^{-3} |
| Sur de Chile | .45 | 0.092 | 1.3×10^{-5} | 1.10×10^{-5} |

Tabla 1: Resultados de la simulación, en función de la concentración superficial y de la inversa de la longitud de relajación.

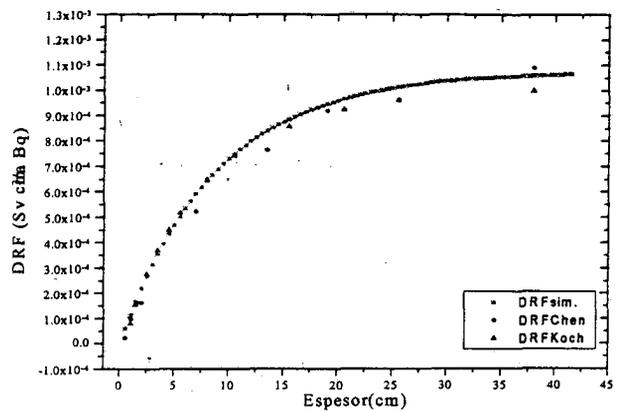


Figura 1: DRF para concentración uniforme.

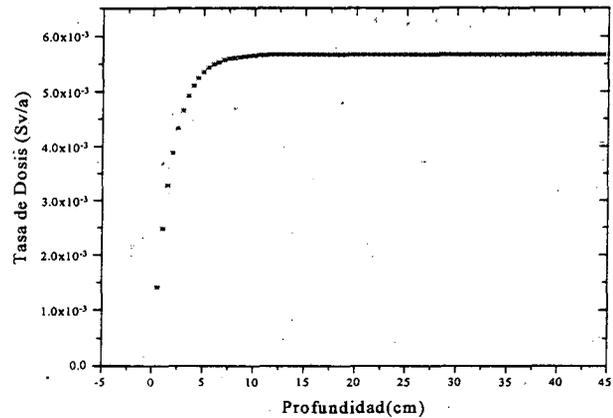


Figura 2: Tasa de Dosis en Ucrania

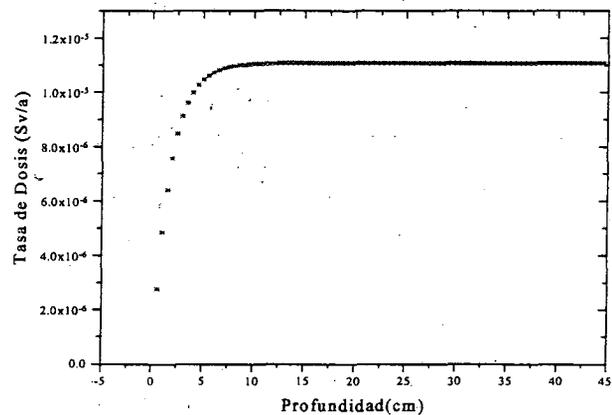


Figura 3: Tasa de Dosis en Isla de Pascua

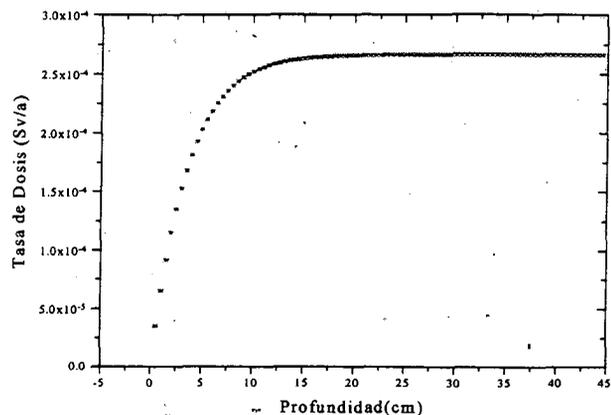


Figura 4: Tasa de Dosis en Italia