

TRANSPORTE DE ^{137}Cs EN SUELO Y SU TRANSFERENCIA A LA VEGETACIÓN

J. TOSO y H. VELASCO

IMASL - Dpto de Física - Universidad Nacional de San Luis
EJÉRCITO DE LOS ANDES 950- (5700) - SAN LUIS - ARGENTINA
e-mail: jtoso@unsl.edu.ar

El presente trabajo está centrado en el proceso de migración vertical de ^{137}Cs en suelos indisturbados, y su posterior transferencia a la vegetación. Los datos experimentales utilizados provienen del nordeste de Italia, y son referidos a ^{137}Cs originado en Chernobyl. Se muestra que un modelo de transporte en donde la difusión y fijación sean los procesos básicos, representa bien la evolución temporal del perfil de concentración del ^{137}Cs en el suelo. Luego se muestra una conexión entre este modelo y el modelo descriptivo RABES. Finalmente se hace un análisis simple del proceso de transferencia suelo-vegetación del ^{137}Cs .

The present paper is focused on the vertical transport process of ^{137}Cs in undisturbed soil, and the soil-to-plant transfer of this radionuclide. A diffusion-fixation model is applied to experimental data of ^{137}Cs deposited in the northeastern region of Italy, following the Cher-nobyl accident. We show that this diffusion model represent reasonably the temporal variation of the ^{137}Cs concentration in soil. A connection between the diffusion-fixation model and the RABES model has been studied. A simple analysis of the soil-to-plant transfer of ^{137}Cs has been performed, using the diffusion model.

I-INTRODUCCIÓN

Los ensayos nucleares realizados en atmósfera y los accidentes ocurridos en centrales han provocado, vía fallout radiactivo, la introducción en el suelo de prácticamente todo el planeta, de elementos radiactivos. Entre estos radioelementos se destacan por su larga vida media y sus efectos sanitarios, el ^{137}Cs y el ^{90}Sr . La acumulación y transferencia de estos radionúclidos en distintos compartimientos ambientales son motivo de especial atención por parte de la comunidad científica.

El proceso migratorio del ^{137}Cs en suelos indisturbados, ha sido representado por diversos modelos. Entre estos, se puede citar al modelo RABES, propuesto por Velasco [1]. Este modelo, de tipo descriptivo, representa satisfactoriamente los estados transitorios y de equilibrio para la migración del ^{137}Cs en el terreno. El modelo RABES puede asociarse con los modelos compartimentales, o sea que a partir de la calibración del mismo pueden derivarse los valores de los coeficientes intercompartimentales. Otro ejemplo es el modelo, de tipo difusivo, propuesto por Antonoupoulos-Domis [2]. Dicho autor muestra que su modelo representa satisfactoriamente el perfil de concentraciones del ^{137}Cs para el estado de equilibrio.

En este trabajo, se muestra que el modelo difusivo aquí referido puede utilizarse para representar con buena aproximación al proceso completo de migración del ^{137}Cs en el suelo (estados transitorios y estado estacionario). Además se muestra una conexión entre el modelo difusivo y el modelo RABES, lo que permite asociar a los parámetros de este último con magnitudes físicas simples. Finalmente, a partir del modelo difusivo se hace un análisis simple del proceso de transferencia suelo-vegetación del ^{137}Cs .

II- MODELIZACIÓN

a) Modelo Difusivo

El modelo difusivo aquí presentado [2] tiene en cuenta el conocido proceso de fijación del ^{137}Cs al suelo [3]. Se proponen dos estados posibles para el ^{137}Cs que ha penetrado en el suelo: a) un estado "libre", en el cual el ^{137}Cs puede migrar (fase móvil); b) un estado "fijo", en el cual el ^{137}Cs se encuentra fijado en forma irreversible al terreno (fase inmóvil).

Las ecuaciones que describen este modelo son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_L}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C_L}{\partial X^2} - k C_L - \lambda C_L \\ \frac{\partial C_F}{\partial t} &= k C_L - \lambda C_F\end{aligned}\quad (1)$$

$$C_T = C_L + C_F$$

donde

C_L (Bq cm^{-3}): ^{137}Cs libre

C_F (Bq cm^{-3}): ^{137}Cs fijo

C_T (Bq cm^{-3}): ^{137}Cs total

D ($\text{cm}^2 \text{ día}^{-1}$): coeficiente de difusión para C_L .

k (día^{-1}): ritmo de transferencia del estado "libre" al estado "fijo".

λ (día^{-1}): constante de decaimiento para el ^{137}Cs

Tanto D como k dependerán de las características físico-químicas del terreno.

Si se considera que al tiempo inicial ($t=0$) todo el ^{137}Cs se halla en estado "libre", y confinado a una capa infinitesimal en la superficie del terreno ($x=0$), la solución para las Ecs. (1) es:

$$C_L(x,t) = \frac{M}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left[-\frac{x^2}{4Dt}\right] \exp[-(k+\lambda)t] \quad (2)$$

$$C_F(x,t) = k \int_0^t C_L(x,t') dt' \exp(-\lambda t)$$

donde $M(\text{Bq cm}^{-2})$ es la deposición inicial ($t=0$). Al evaluar la Ec.(2) se observa que la forma de la curva C_T vs x es aproximadamente gaussiana para los tiempos iniciales, y paulatinamente evoluciona a una exponencial, que caracteriza al estado final de equilibrio. La figura 1 representa dicha evolución.

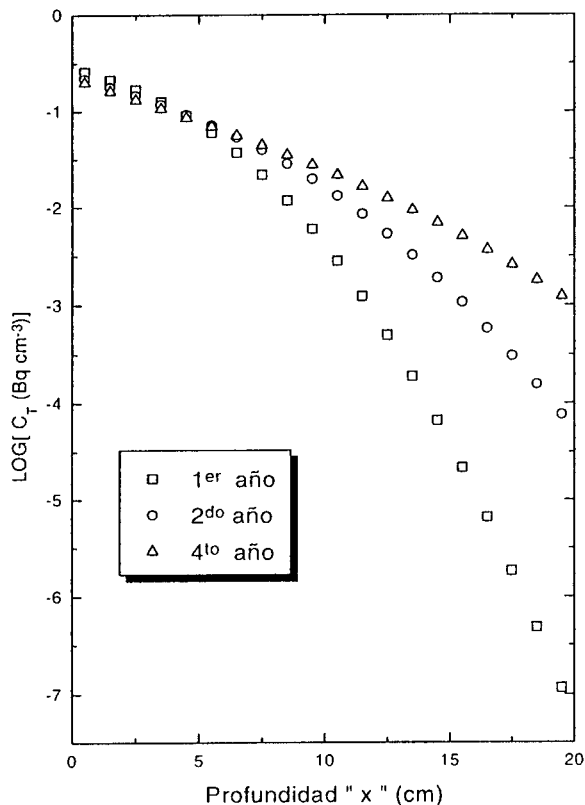


Figura 1. Estados transitorios para el Modelo Difusivo

Dos características son importantes en este modelo:
a) El perfil final es de la forma $C_T = \exp(-\alpha x)$, donde $\alpha = 1/L$, con $L = \sqrt{D/k}$. El parámetro L se denomina *longitud de relajación*, y es una medida de la penetración del contaminante en el suelo. b) Si dos procesos A y B poseen el mismo L , (y por lo tanto el mismo estado final) pero $D^A > D^B$, el proceso A se aproxima más rápidamente al estado final de equilibrio.

b) Modelo RABES

El modelo RABES [1], es un modelo de tipo descriptivo, en el cual se propone para el perfil de concentración del ^{137}Cs , la siguiente expresión:

$$C(x,t) = M \alpha(t) \exp[-\alpha(t)x] \exp(-\lambda t) \quad (3)$$

donde
 $C(\text{Bq cm}^{-3})$: $^{137}\text{Cs total}$

$M(\text{Bq cm}^{-2})$: deposición inicial
 $\alpha(\text{cm}^{-1})$: factor alfa (caracteriza al modelo)

El *factor alfa*, que contiene la evolución temporal del perfil de concentraciones, se asume de la forma:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \exp(-\alpha_1 t) + \alpha_2 \quad (4)$$

donde $\alpha_2(\text{cm}^{-1})$ es el *factor alfa* para $t \rightarrow \infty$ y caracteriza el estado estacionario final del perfil de concentraciones; $\alpha_0(\text{cm}^{-1})$, que puede expresarse como $\alpha(t=0) - \alpha_2$ está dado por la condición inicial $C(x,0)$; y $\alpha_1(\text{d}^{-1})$ es el factor que caracteriza el ritmo de cambio del perfil de concentraciones desde su estado inicial, hasta su estado de equilibrio.

c) Conexión entre ambos modelos

El Modelo Difusivo (MD) y el Modelo Rabes (MR) pueden conectarse de la siguiente manera:

1) El parámetro α_2 (ec3 y ec4 - MR) se relaciona con el parámetro L (ec1 y ec2 - MD): $\alpha_2 = L^{-1} = \sqrt{k/D}$

2) El parámetro α_1 (MR) se relaciona con los valores individuales de D y k (MD). Por ejemplo para dos procesos A y B que posean el mismo estado inicial y final, o sea que $(\alpha_0, \alpha_2)^A = (\alpha_0, \alpha_2)^B$, pero con ritmo de transición al estado final más rápido para "A" ($\alpha_1^A > \alpha_1^B$), se tendrá para el modelo difusivo que $L^A = L^B$, pero $D^A > D^B$.

Estas conexiones permiten relacionar a los parámetros del MR con parámetros que poseen un significado físico inmediato. Luego, el estudio de la dependencia de D y k (MD) con las propiedades físicas y químicas del suelo puede trasladarse a los parámetros α_1 y α_2 (MR).

Conviene aclarar lo siguiente: mientras que en el MD la curva x vs C_T es exponencial solamente para el estado de equilibrio, para el MR dicha curva es exponencial para todo tiempo. Esto hace que la conexión entre ambos modelos no sea completa. De todas maneras para los estados intermedios de interés, el perfil para C_T dado por el MD se aproxima bastante a una curva exponencial.

III- APLICACIONES

Ambos modelos fueron calibrados con mediciones experimentales realizadas en el norte de Italia, y referidas al ^{137}Cs proveniente de Chernobyl [4]. Las mediciones fueron hechas con frecuencia estacional entre julio de 1987 y diciembre de 1990. La calibración se realizó mediante un ajuste de mínimos cuadrados para los parámetros correspondientes a cada modelo.

Los valores obtenidos fueron:

Modelo Difusivo:

$$D(\text{cm}^2 \text{ dia}^{-1}) = 1,8E-2 \quad k(\text{dia}^{-1}) = 8,3E-4$$

Modelo RABES:

$$\alpha_0(\text{cm}^{-1}) = 6,1E-1 \quad \alpha_1(\text{dia}^{-1}) = 2,5E-3 \quad \alpha_2(\text{cm}^{-1}) = 2,0E-1$$

Es interesante notar que ambos modelos predicen el mismo perfil de equilibrio: $L^{-1} = \sqrt{k/D} = 0,2$ coincide con el valor de α_2 .

En la figura 2 se muestra el ajuste para el Modelo Difusivo. Se grafican tres perfiles de concentración para tres tiempos distintos, tomando como tiempo inicial a mayo de 1986 (Chernobyl).

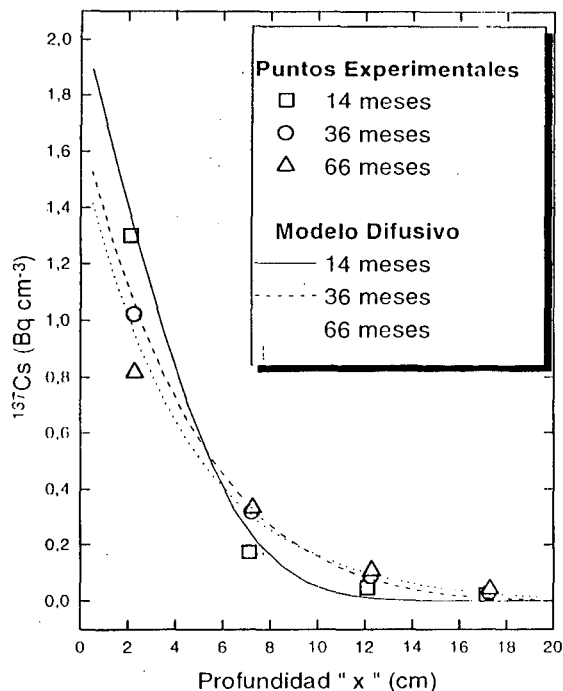


Figura 2. Contraste teórico-experimental para el Modelo Difusivo

IV- TRANSFERENCIA A LA VEGETACION

a) El factor de transferencia TF

El factor $TF(\text{cm}^2 \text{kg}^{-1})$, utilizado para medir la transferencia suelo-vegetación de un radionúclido, puede definirse como [5]:

$$TF(t) \equiv \frac{C_v(t)}{M^*(t)}$$

donde

$C_v(t)(\text{Bq kg}^{-1})$: ^{137}Cs en vegetación seca.

$M^*(t)(\text{Bq cm}^{-2})$: deposición inicial $M(\text{Bq cm}^{-2})$ multiplicada por el factor de decaimiento $\exp(-\lambda t)$

Es un hecho conocido [5] que para el ^{137}Cs , TF es una función decreciente con el tiempo, y que además [4] puede ponerse como:

$$TF(t) = TF_0 \exp(-\gamma t) \quad (5)$$

donde TF_0 y $\gamma(\text{d}^{-1})$ son constantes.

b) El Modelo Difusivo y su relación con TF

Integrando la ec2 para C_L se obtiene:

$$M_L \equiv \int_0^{\infty} C_L(x,t) dx = M^* \exp(-kt) \quad (6)$$

lo que expresa que la masa $M_L(\text{Bq cm}^{-2})$ de ^{137}Cs en estado libre, decrece con un ritmo dado por la constante $k(\text{d}^{-1})$ (además del decaimiento radiactivo).

La ec7, junto con la hipótesis [6] de que C_v puede escribirse como $C_v = K_v M_L$ (K_v constante), permite expresar al factor de transferencia TF de la siguiente manera:

$$TF \equiv \frac{C_v}{M^*} = \frac{K_v M_L}{M^*} = \frac{K_v M^* \exp(-kt)}{M^*} \quad (7)$$

Esta ecuación muestra que, de acuerdo a las hipótesis consideradas, el factor de transferencia TF decaería con la constante k (MD). Como se mostró en III, el valor obtenido para el parámetro k es próximo a $1\text{E-}3 \text{ día}^{-1}$. Justamente el valor que la literatura [4-6] asigna para γ (de la ec5) es del orden de $1\text{E-}3 \text{ día}^{-1}$. Esto refuerza la hipótesis hecha por algunos autores [5,6], de que el decrecimiento temporal del factor de transferencia TF estaría relacionado con el proceso de fijación que el ^{137}Cs sufre en el suelo.

V-CONCLUSIONES

1) Se muestra que el modelo difusivo propuesto por Antonopoulos-Domis [2] describe con buena aproximación los estados transitorios del transporte de ^{137}Cs en suelos.

2) Se muestra una conexión aproximada entre el modelo difusivo y el modelo RABES [1], lo que permite relacionar a los parámetros de este último modelo con parámetros "físicos" simples.

3) Se refuerza la hipótesis, sugerida por varios autores [5,6], de que el decrecimiento temporal observado en el proceso de transferencia suelo-vegetación para el ^{137}Cs sería una consecuencia del proceso de fijación de este radionúclido al suelo.

REFERENCIAS:

- 1- Velasco, R.H., Belli, M., Sansone, U. and Menegon, S., Health Phys. **64**(1):37-44 (1993).
- 2- Antonopoulos-Domis, M., Clouvas, A., Xanthos, S. and Alifrangis, D.A., Health Phys. **72**(2):243-255 (1997).
- 3- Cremers, A., Elsen, A., De Preter, P. and Maes, A., Nature, **335**: 247-249 (1988).
- 4- Velasco, R.H., Toso, J.P., Belli, M., and Sansone, U., J. Environ. Radioactivity (En prensa).
- 5- Noordijk, N., van Bergeijk, K.E., Lembrechts, J., and Frissel, M.J., J. Environ. Radioactivity **15**, 277-286 (1992).
- 6- Kruglov, S.V., Filipas, A.S., Alexakhin, R.M. and Arkhipov, N.P., J. Environ. Radioactivity **34**, 267-286 (1997).