

RADIOPROTECCION

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCION RADIOLOGICA



- ✓ **RADIOACTIVIDAD**
del agua superficial y los sedimentos en la CUENCA DEL EBRO
- ✓ **RESUSPENSIÓN EN SUELOS** contaminados por el accidente de **CHERNOBYL**
- ✓ Personalización del **CRITERIO DE ALTA** del paciente en **TRATAMIENTO** ablativo de **RESTOS TIROIDEOS** con **I-131**
- ✓ **RIESGO DE CÁNCER** inducido por la radiación a **BAJAS DOSIS** y **TASAS DE DOSIS** con fines de **PROTECCIÓN RADIOLÓGICA**
- ✓ **ENTREVISTA: ANNIE SUGIER**, presidenta saliente de la **SOCIEDAD FRANCESA** de **RADIOPROTECCIÓN**

Nº 15 • Vol. V • 1997

15 años al Servicio de la PROTECCION RADIOLOGICA



SISTEMA DE POSICIONAMIENTO Y MEDIDA (SPM)

- Diseño para ubicación en Unidades Móviles.
- Información de Posición Geográfica incorporada:
 - * Latitud y Longitud.
 - * Altitud.
 - * Velocidad.
- Visualización en tiempo real sobre mapas.
- Conexión de:
 - * Sondas Radiológicas.
 - * Sistemas de Medida.
 - * Sondas Medioambientales.
- Comunicaciones digitales a un Control Central.

OTRAS APLICACIONES:

- Control de Flotas de Vehículos.



RADIOPROTECCION

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
PROTECCION RADIOLOGICA
Nº 15. Vol. V • 1997

Director: Emilio Iranzo

Comité de Redacción

Coordinadora: María Teresa Macías
M^l Luisa España, Antonio López Romero, José
Pío Carmena y Alicia Martínez

Comité Científico

Coordinador: José Gutiérrez
Josep Baró, Pedro Carboneras, Miguel Carrasco,
Felipe Cortés, Antonio Delgado, Eugenio Gil,
Ignacio Hernando, Jerónimo Iniguez, Luis M Martín
Curto, Pedro Ortiz, Vicente Rius, Francisco J.
Ruiz Boada, Angeles Sánchez y Luis M Tobajas.

Edita

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
PROTECCION RADIOLOGICA
(S.E.P.R.)
C/ Apolonio Morales, 27 • 28036 Madrid

Junta Directiva de la S.E.P.R.

Presidente: Eduardo Sollet
Vicepresidente: Xavier Ortega
Vicepresidente (Congreso 1998):
Monserrat Ribas
Vicepresidente (Asuntos Especiales):
Leopoldo Arranz
Secretario: Manuel Fdez. Bordes
Tesorero: José Pío Carmena
Vocales:
Ignacio Amor
David Cancio
Antonio López
Cristina Nuñez
de Villavicencio

Realización y Publicidad

EDICOMPLET, S.A.
Apolonio Morales, 27 • 28036 Madrid
Tel: 91 - 350.49.17 • Fax: 91 - 350.76.52

Imprime

DGB

Distribuye

JARPA

Suscripción anual: 6.000 pts.
Número suelto: 2.000 pts.
Ejemplar gratuito para los miembros de la
Sociedad Española de Protección
Radiológica (SEPR)

La revista de la SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
PROTECCION RADIOLOGICA es una
publicación técnica y plural que puede coincidir
con las opiniones de los que en ella colaboran,
aunque no las comparte necesariamente.

Depósito Legal: 17158
ISSN: 1133-1747

SUMARIO

✓ Editorial	93
✓ Colaboraciones	95
• RADIATIVIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL	95
"Radiactividad del agua superficial y los sedimentos en la cuenca del Ebro. Utilización del tritio como radiotrazador en el tramo catalán"	
<i>L. Pujol Terés, J.A. Sánchez Cabeza</i>	
• RESUSPENSIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS	104
"Resuspensión en suelos contaminados por el accidente de Chernobyl"	
<i>J. Martínez Serrano, A. Espinosa Canal, A. Aragón del Valle</i>	
• ALTA DEL PACIENTE TRATADO CON I-131	116
"Personalización del criterio de alta del paciente ingresado para tratamiento ablativo de restos tiroideos con I-131"	
<i>J.F. Martí Vidal, M.^lC. Baños Capilla</i>	
✓ Contribución invitada	127
"El riesgo de cáncer inducido por la radiación a bajas dosis y tasas de dosis con fines de protección radiológica"	
<i>J.W. Stather</i>	
✓ Entrevista	147
"Annie Sugier. Presidenta Saliente de la Sociedad Francesa de Radioprotección"	
✓ Noticias S.E.P.R.	151
✓ Informaciones de interés	159
✓ Información del Grupo Iberoamericano	171
✓ Publicaciones	179
✓ Convocatorias	180

RESUSPENSION EN SUELOS CONTAMINADOS POR EL ACCIDENTE DE CHERNOBYL

El artículo que se presenta está basado en la aportación CIEMAT al proyecto multinacional CHECIR-ECP 1 "Contamination of surfaces by resuspended material", en el que participaron diez centros de investigación, seis de ellos pertenecientes a países comunitarios. Dicho proyecto es uno de los dieciseis realizados bajo el Acuerdo de Colaboración Internacional sobre las Consecuencias del Accidente de Chernobyl, firmado en Junio de 1992 entre la Comisión Europea y representantes de las tres repúblicas afectadas, Bielorrusia, Ucrania y Rusia. El trabajo se centra en la obtención de datos experimentales, en diferentes escenarios del entorno del reactor accidentado y bajo diferentes condiciones, naturales y con actividades humanas, que permitan realizar una estimación de la dosis debida a la inhalación por resuspensión de material contaminado. Asimismo se obtienen valores de factores útiles para la modelización del proceso de resuspensión. Los radionucleidos estudiados son el Cs-137 y el Pu-239+240. La principal conclusión obtenida es que, en la época en que se realizó el proyecto, las dosis por esta vía son pequeñas, incluso para potenciales grupos de riesgo, como los trabajadores agrícolas, en comparación con las producidas por otras vías de exposición.

J. Martínez Serrano,
A. Espinosa Canal,
A. Aragón del Valle

CIEMAT.

Departamento de Impacto
Ambiental de la Energía.
Avda. Complutense 22,
28040 Madrid.

This paper presents a summary of the CIEMAT contribution to the multinational project CHECIR-ECP 1 "Contamination of surfaces by resuspended material". Ten researchs organisations participated in this study, six of them from european countries. The project is one of the sixteen projects carried out under an Agreement for International Collaboration on the Consequences of the Chernobyl Accident, signed in June 1992 by the EC and representatives of the three affected republics, Belarus, Ukraine and the Russian Federation. The work is addressed to the collection of experimental data in order to make dose estimations from the resuspension pathway. The experimental activities were carried out in several contaminated areas in the surrounding of the Chernobyl reactor site, under natural conditions (wind resuspension) and simulating human activities (agricultural and traffic). The main conclusion obtained was that, at the time of the project, the doses from resuspension are small, even for potential risk groups such as agricultural workers, in comparison with the doses from other exposure pathways.

INTRODUCCIÓN

El accidente de Chernobyl ha afectado a una gran cantidad de población a través de diversas vías de exposición. El análisis del comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente es, pues, una prioridad para poder predecir y evaluar la contribución de las diferentes vías al impacto radiológico global de la población. Con este objetivo, se ha tratado de avanzar en la significación de la resuspensión de radiactividad desde suelos contaminados, mediante la ejecución de un proyecto experimental que obtuviera información útil en la estimación de dosis por esta vía. En este contexto, determinados grupos de población, como los trabajadores agrícolas, entre otros, merecen especial atención, por lo que, en adición al estudio de la resuspensión natural, el análisis de la resuspensión durante la ejecución de trabajos agrícolas resulta ineludible. Por otra parte, la obtención de

factores que ayuden a la modelización del proceso de resuspensión es de gran utilidad para la predicción de consecuencias por esta vía, en el caso de un hipotético accidente, y en la evaluación de acciones de remedio aplicables en una potencial intervención.

ESCENARIOS Y CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

En el transcurso del proyecto ECP1 se han realizado cinco campañas experimentales en siete localizaciones diferentes. En cada emplazamiento se tomaron muestras de aire y suelo, antes y durante la realización de actividades agrícolas, reales o simuladas, excepto en "Beach-Pripyat" donde, debido a los altos niveles de actividad, sólo se efectuaron medidas de fondo. Una descripción detallada de las campañas se encuentra en (1) y un resumen de las mismas se realiza a continuación.

La primera campaña experimental tuvo lugar en Julio y Agosto de 1992, en dos áreas distintas. La primera parte de la campaña se realizó en una zona de campo abierto, cerca de la aldea abandonada de Zapolye, situada a 7 Km al oeste de la población de Chernobyl y 8 Km al sur del reactor 4 de la central nuclear de Chernobyl. En esta zona se efectuaron varios experimentos de medida de fondo y un experimento de simulación de prácticas agrícolas. La segunda parte de esta primera campaña experimental se desarrolló en un terreno de arena artificial, de vegetación escasa ("Beach-Pripyat"). Este lugar se encuentra situado a 2 Km al oeste de la central nuclear de Chernobyl.

La segunda campaña experimental tuvo lugar en Mayo de 1993, en el mismo emplazamiento de la primera campaña (Zapolye). En nueve experimentos se simulaban trabajos de agricultura por medio de tractores que arrastraban



aparejos agrícolas. En otros cinco experimentos se simularon condiciones de tráfico de vehículos (camiones) por caminos no asfaltados.

Kopachi fue el emplazamiento elegido para la tercera campaña experimental, que tuvo lugar del 30 de Julio al 14 de Agosto de 1993. Este enclave se encuentra situado a 3 Km al sur de la central. En esta campaña se realizaron dos experimentos de simulación de trabajos de agricultura.

La cuarta campaña experimental tuvo lugar en Mayo de 1994, en una zona rural dedicada al cultivo de patatas y cerca del pueblo de Demenka (Novozybkov, Rusia). El suelo de Novozybkov presentaba una diferencia fundamental respecto al de las zonas anteriores ya que había sido perturbado previamente como consecuencia de actividades agrícolas. Se llevaron a cabo diez experimentos relacionados con la preparación del suelo de labor y el cultivo de la patata.

Mikulichi y Kovali, poblaciones al sur de Bielorrusia, fueron los escenarios elegidos para la quinta y última campaña de medidas (Julio-Agosto, 1994). En Kovali se efectuó un experimento en el transcurso de la recolección de un campo cultivado con cebada, y en Mikulichi, en la recolección de un campo cultivado con centeno, en la recogida y embalaje de paja, así como en el arado y grada del suelo de labor.

Los equipos de muestreo de aerosoles utilizados, de muy variado diseño, se pueden englobar en dos grupos: los que separan la muestra en varias fracciones

de tamaño de partícula y los que recogen toda la muestra en suspensión. Por otra parte, se utilizaron bandejas para la medida de depósito seco así como colectores de depósito seco y húmedo a varios niveles sobre el suelo.

En cada una de las campañas se dispuso de una estación micrometeorológica para conocer la velocidad de viento, temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y precipitaciones durante los experimentos.

Los equipos e instrumentación utilizados en las campañas por CIEMAT se detallan a continuación:

- Zapolye (Julio, 1992) y Beach-Pripyat (Julio-Agosto, 1992): Muestreador de alto volumen Andersen y cabezal PM10 con caudal de 1,13 m³/min. Impactador rectangular en cascada de seis etapas (10-7,2; 7,2-3,0; 3,0-1,5; 1,5-0,95; 0,95-0,49 y < 0,49 µm).
- Zapolye (Mayo, 1993) y Kopachi (Julio-Agosto, 1993): Dos muestreadores de alto volumen Andersen con cabezales PM10 a dos niveles de altura. Dos impactadores circulares en cascada de cinco etapas (10-4,9; 4,9-2,3; 2,3-1,4; 1,4-0,8 y < 0,8 µm). Mástil con bandejas a cuatro niveles sobre el suelo para recogida de depósito seco.
- Novozybkov (Mayo, 1994). Muestreador Andersen con cabezal PM10 e impactador circular en cascada.

- Mikulichi y Kovali (Julio-Agosto, 1994). Dos muestreadores Andersen con cabezales PM10 e impactadores circular en cascada a dos niveles de altura. Muestreador Andersen portátil para captación de muestra total. Mástil para recogida de depósito a cuatro niveles sobre el suelo.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Concentraciones de actividad en aire en condiciones de resuspensión natural

En todas las campañas experimentales se recogieron muestras de aerosoles en suspensión en ausencia de cualquier actividad que supusiera un movimiento de la capa superficial del suelo, salvo la producida por el viento y las personas que intervenían en los experimentos. En la tabla 1 se muestran las concentraciones de actividad (Cs-137 y Pu-239+240) de la fracción de partículas de diámetro menor de 10 µm, en cada emplazamiento experimental. Los valores indicados corresponden a la media aritmética de las diferentes medidas de fondo efectuadas en cada emplazamiento.

Las concentraciones de Cs-137 en la fracción inhalable oscilan entre 60 y 600 µBq/m³, según el emplazamiento. No existe, por otra parte, una relación clara entre los niveles de contaminación atmosféricos de Cs-137 y la distancia a la fuente contaminante (reactor 4 de Chernobyl). Así, por ejemplo, en Novozybkov, punto bastante alejado de la central nuclear (= 200 km), se han medido con-

TABLA 1. Concentraciones de actividad (Cs-137 y Pu-239+240) en aire en la fracción de 10 μm en cada uno de los escenarios experimentales. (El orden de aparición en la tabla corresponde al de distancias sucesivamente crecientes a la central nuclear de Chernobyl).

Localización	Cs-137 (Bq/m ³)	Pu-239+240 (Bq/m ³)
Beach-Pripyat	507 \pm 200	3,1 \pm 0,6
Kopachi	80 \pm 10	0,4 \pm 0,2
Zapolye (1992)	65 \pm 30	—
Zapolye (1993)	105 \pm 40	1,1 \pm 0,4
Kovali	120 \pm 13	0,15 \pm 0,07
Mikulichi	60 \pm 37	0,19 \pm 0,07
Novozybkov	600 \pm 400	< LID

centraciones de Cs-137 en aire comparables a las halladas en Beach-Pripyat, zona situada tan sólo a 2 ó 3 Km de la central. En cuanto a las concentraciones de Pu-239+240, se observa que en las zonas más alejadas del reactor (Novozybkov, Mikulichi y Kovali) las concentraciones en la fracción inhalable son menores que en las zonas más próximas al reactor.

Respecto a la distribución de actividad de Cs-137 en función del tamaño del aerosol en suspensión, la figura 1 muestra la concentración de actividad de Cs-137 en función del diámetro aerodinámico de partícula en cuatro experimentos distintos en el área experimental de Beach-Pripyat. En dos de los experimentos, realizados consecutivamente del 13 al 24 de Julio, la mayor concentración de Cs-137 se alcanza en la fracción de 3 a

7,2 μm , mientras que en los que tuvieron lugar del 24 de Julio al 1 de Agosto la fracción que contiene la máxima acti-

vidad de cesio es la de menor tamaño (< 0,5 μm). Una posible explicación se puede encontrar en las diferentes condiciones meteorológicas observadas en estos dos periodos de tiempo, si bien no se dispone de suficientes datos meteorológicos documentados, en estos periodos, para confirmarlo.

En la figura 2 se ha representado, en escala de probabilidad semilogarítmica, el porcentaje de actividad acumulada de Cs-137 en función del diámetro de partícula. Los datos obtenidos de la distribución de actividad siguen una distribución log-normal. Esto es aplicable a cada uno de los experimentos realizados en las diferentes campañas.

En cuanto a la distribución de actividad de Pu-239+240, en la figura 3 se ha representado la actividad de Pu-239+240

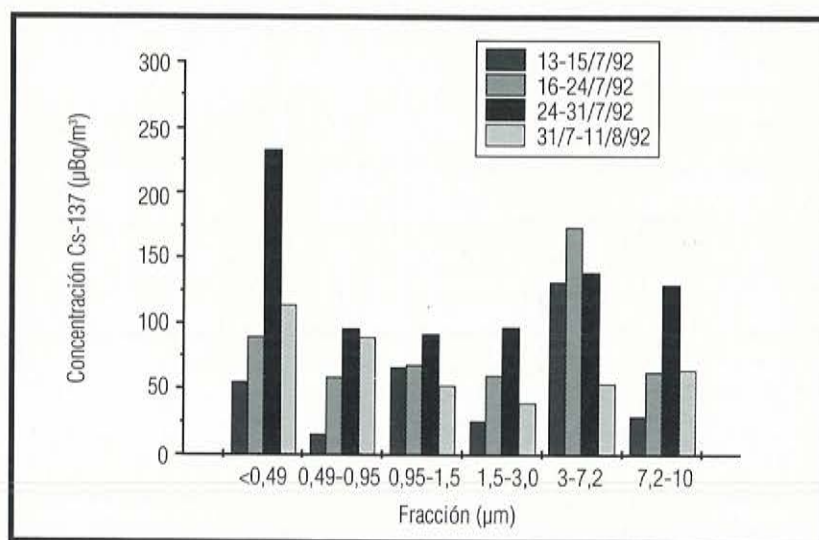


Figura 1. Concentración de Cs-137 en aire, en la fracción inhalable, en experimentos de resuspensión natural en Beach-Pripyat (Julio-Agosto 1992).

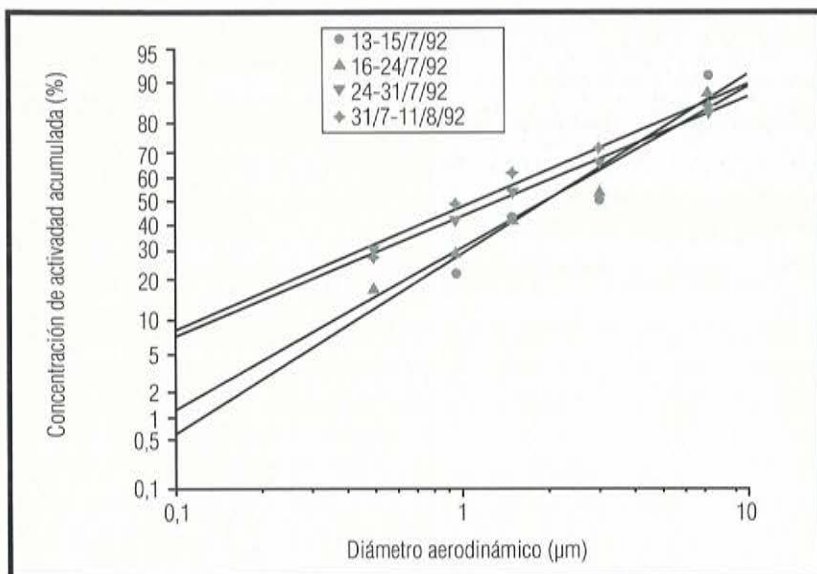


Figura 2. Concentración acumulada de Cs-137 en aire en función del diámetro aerodinámico en experimentos de resuspensión natural en Beach-Pripyat (Julio-Agosto, 1992).

de la fracción inhalable ($<10 \mu\text{m}$), en función del tamaño de partícula, en dos de los experimentos de medida de fondo (fondo 2 y fondo 4) en "Beach-Pripyat". Las distribuciones en los otros dos experimentos no se han podido representar porque la actividad en algunas fracciones se encuentran por debajo del límite de detección.

Como se puede ver en la figura 3, la máxima concentración en ambos casos se encuentra en la fracción de 3 a $7,2 \mu\text{m}$. De igual forma que en el caso de Cs-137, la distribución de actividad se ajusta de forma bastante aproximada a una distribución log-normal.

En la tabla 2 se muestran los parámetros de las distribuciones log-normal (diámetro aerodinámico medio y desvia-

ción geométrica estándar) en los experimentos de medida de fondo. En todos los

experimentos en los que se dispone de datos de plutonio se puede observar que los diámetros aerodinámicos medios asociados a las distribuciones de Pu-239+240 son mayores que los de las distribuciones de Cs-137, lo que indica que el plutonio está asociado a partículas de mayor tamaño que el cesio.

Concentraciones de actividad en aire en condiciones de resuspensión por actividades humanas

Las medidas de concentración de actividad en aire en los distintos escenarios experimentales, descritas en el apartado anterior, nos muestran que puede haber una variación considerable en las concentraciones de radionucleidos en una escala espacial de varias decenas de kilómetros. Por otro lado, las actividades

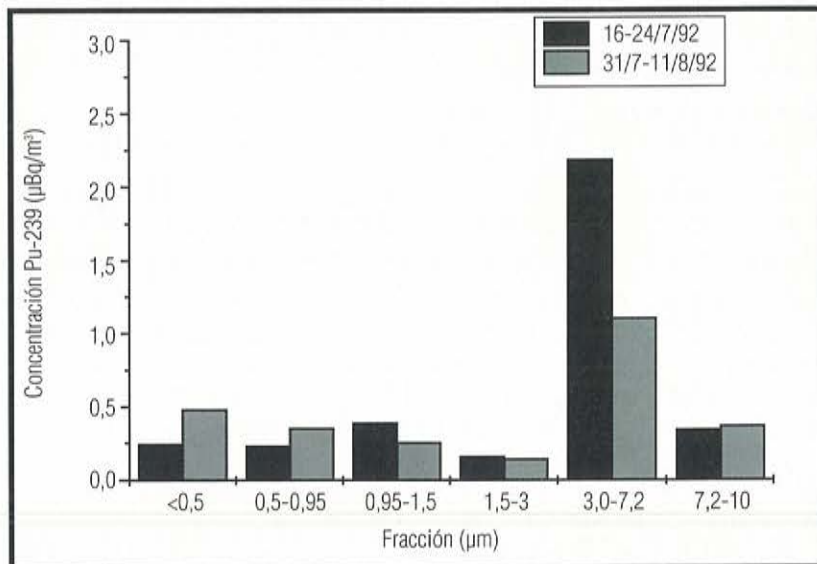


Figura 3. Concentración de Pu-239+240/240 en función del tamaño de partículas en el rango inhalable en dos experimentos de resuspensión natural en Beach-Pripyat.

TABLA 2. Diámetros aerodinámicos medios y desviaciones geométricas estándar de las distribuciones log-normales de actividad de Cs-137 y Pu-239+240 según el tamaño de partícula (los huecos en la tabla de Pu se deben a la falta de datos –concentraciones por debajo del límite de detección– necesarios para determinar las distribuciones de actividad).

Emplazamiento	Experimento	Fecha	Cs-137		Pu-239+240	
			AMAD (μm)	σg	AMAD (μm)	σg
Zapolye	Fondo	4-9/7/92	2,3	6,7	–	–
Beach-Pripyat	Fondo 1	13-15/7/92	2,0	6,4	–	–
	Fondo 2	16-24/7/92	1,9	4,8	2,8	4,3
	Fondo 3	24-31/7/92	1,3	5,5	–	–
	Fondo 4	31/7-11/8/92	1,1	5,2	2,0	5,4
Zapolye	Fondo 1	8-11/5/93	2,0	2,9	–	–
	Fondo 2	14-20/5/93	1,8	10,9	5,4	6,6
Kopachi	Fondo	30/7-3/8/93	1,8	2,4	3	4,7
Novozybkov	Fondo 1	18-19/5/94	1,4	9,8	–	–
Mikulichi	Fondo 1	7-22/7/94	1,7	3,5	–	–
	Fondo 2	2-26/7/94	1,9	3,3	–	–
	Fondo 3	6-30/7/94	3,7	3,1	–	–
Kovali	Fondo	4-6/8/94	1,5	2,7	2	3,6

antropogénicas sobre una superficie contaminada constituyen una fuente de aerosoles en la capa superficial de la atmósfera y pueden tener una influencia considerable en la resuspensión de material contaminado a escala local. En el proyecto ECP1 se ha estudiado la influencia que tienen en la resuspensión local actividades como el paso de vehículos por caminos sin asfaltar o trabajos de agricultura (arado, cultivo del suelo o recolección de cosechas).

En Mayo de 1993, en Zapolye, se simulaban actividades de agricultura y

tráfico de vehículos con varios tipos de tractores y un camión de gran peso. Las concentraciones de actividad en aire en ocho de los experimentos fueron medidas con muestreadores de alto volumen Andersen. La tabla 3 muestra las concentraciones de actividad de Cs-137 en la fracción inhalable.

En trabajos de agricultura, con uso de tractor, las concentraciones de Cs-137 en aire alcanzan valores de hasta 14 mBq/m³, lo que supone un incremento de unos dos órdenes de magnitud respecto a los valores hallados en los expe-

rimentos de resuspensión natural por viento. La concentración media de Cs-137 en aire durante trabajos de enterramiento de semilla de patatas en Novozykov es de 5 mBq/m³, casi 10 veces el valor de fondo en esta zona. En Mikulichi, en los trabajos de recolección de centeno, se alcanzan concentraciones que van de 1 a 7,6 mBq/m³, es decir de hasta unas 130 veces el valor de fondo. En experimentos de simulación de tráfico de vehículos por caminos de tierra se alcanzan concentraciones que van de 11 a 64 mBq/m³, lo que supone un incremento de hasta 600 veces los valores de fondo en la zona.

Como se hizo en los experimentos de resuspensión natural por viento, se analizaron las distribuciones de actividad de Cs-137 por tamaño de partícula. Las distribuciones obtenidas son log-normales; los diámetros aerodinámicos medios, para cada experimento, de las distribuciones se muestran en la tabla 3 y son, generalmente, mayores que los encontrados en medidas de resuspensión natural. Ello se debe a que el movimiento del suelo por actividades humanas incrementa considerablemente la concentración de partículas de mayor tamaño en aire y aumenta, por tanto, la contribución de estas partículas a la concentración de actividad.

De lo expuesto se concluye que las actividades humanas que impliquen un movimiento de la superficie del suelo dan lugar a un aumento significativo de la concentración de actividad en aire y, como consecuencia, a un aumento de la



TABLA 3. Concentraciones de Cs-137 asociada a la fracción menor de 10 μm en aire y diámetros aerodinámicos medios de la distribución log-normal de actividad en diversos experimentos.

Emplazamiento	Descripción del experimento	Fecha	Cs-137 (mBq/m ³)	AMAD (μm)
Zapolye	Tractor pequeño arrastrando arado	11/5/93	<1,2	–
	Tractor pequeño arrastrando arado	12/5/93	<1,7	–
	Tractor grande arrastrando arado	13/5/93 a.m.	13,4 \pm 4,6	3,5
	Tractor grande arrastrando arado	13/5/93 p.m.	13,6 \pm 3,0	2,7
	Movimiento de camión	22/5/93	11,1 \pm 2,1	2,2
	Tractor pequeño arrastrando arado	23/5/93	3,4 \pm 1,6	2,5
	Movimiento de dos camiones	24/5/93	63,9 \pm 4,5	2,6
	Movimiento de tractor y camión	25/5/93	13,8 \pm 2,0	2,7
Kopachi	Tractor grande arrastrando arado	3/8/93	8,1 \pm 1,6	3,0
	Tractor grande arrastrando arado	4/8/93	7,7 \pm 1,8	3,0
Novozybkov	Plantación de patatas	19/5/94	5,0 \pm 0,6	1,9
	Plantación de patatas	20/5/94	4,9 \pm 0,4	1,7
	Enterramiento de semilla de patata	20/5/94	5,4 \pm 0,5	2,6
Mikulichi	Recolección de centeno	30/7/94	1,0 \pm 0,1	1,9
	Embalaje de paja	31/7/94	2,0 \pm 0,2	1,7
	Grada del suelo de labor	1/8/94	7,6 \pm 0,9	2,0
	Arado del suelo de labor	2/8/94	5,3 \pm 0,6	2,9
Kovali	Recolección de cebada	6/8/94	1,5 \pm 0,2	1,8

dosis interna, que es preciso evaluar, de las personas que participan en estos trabajos debido, fundamentalmente, a su incorporación interna vía inhalación.

Parámetros de resuspensión

Factor de transferencia suelo-aire

Se define el factor de transferencia suelo-aire (T_{sa}) de un radionucleido como el cociente entre la actividad específica en aire y la actividad específica en la capa superficial del suelo (2, 3).

En la tabla 4 se muestran los valores de T_{sa} en cada escenario experimental para Cs-137 asociado a la fracción menor de 10 μm , donde el orden de aparición en la tabla es el de distancias crecientes al reactor 4 de Chernobyl. Merece la pena resaltar el hecho de que T_{sa} manifiesta una fuerte dependencia con la distancia del área experimental al reactor, origen de la contaminación radiactiva. En las zonas más cercanas a la central (Beach-Pripyat y Kopachi), dentro del área de exclusión de 10 Km, el cociente de las actividades específicas en aire y en

suelo toman valores menores que 1. En la zona de 30 Km (Zapolye), este cociente aumenta pero sigue siendo inferior a 1. Es en las regiones más alejadas del reactor donde este cociente sobrepasa la unidad, tomando el valor máximo en el punto más lejano (Novozybkov).

Con respecto al plutonio, en la tabla 5 se muestran las actividades específicas en aire y en suelo de la fracción de partículas de diámetro inferior a 10 μm en aquellos lugares donde se dispone a la vez de datos de plutonio en suelo y en aire. La

TABLA 4. Actividades específicas de Cs-137 en aire y en suelo (capa superficial de suelo, de 0 a 5 cm) de la fracción de partículas de diámetro inferior a 10 µm y factor de transferencia suelo-aire.

Localización	Actividad específica, A_A Cs-137 en aire (Bq/g)	Actividad específica, A_S Cs-137 en suelo (Bq/g)	$T_{SA}=A_A/A_S$
Beach-Pripyat	4,9	150,7	0,032
Kopachi	5,9	275,0	0,021
Zapolye (1992)	7,5	47,3	0,16
Zapolye (1993)	4,7	47,3	0,10
Kovali	5,0	2,7	1,8
Mikulichi	4,8	3,5	1,4
Novozybkov	42,5	13,3	3,2

densidades de contaminación superficiales de Cs-137 son muy distintas en cada área experimental, siendo mayores en las zonas más próximas al reactor de Chernobyl. Como consecuencia de esto se encuentran factores de resuspensión de valores crecientes con la distancia al reactor. Este resultado es coherente con lo visto en el apartado anterior para el factor de transferencia suelo-aire. Es lógico encontrar un comportamiento parecido en los dos factores ya que, tanto el factor de resuspensión como el factor de transferencia suelo-aire, son parámetros que dan cuenta de la transferencia local de actividad de la superficie del suelo al aire.

variación de T_{SA} con la distancia es cualitativamente similar al encontrado para el Cs-137. En los lugares más cercanos a Chernobyl (Kovali, Zapolye) se obtienen valores menores que uno mientras que en lugares bastante más alejados se alcanzan valores superiores a la unidad.

Como se dijo anteriormente, en los lugares más próximos a Chernobyl las concentraciones de Cs-137 en aire no difieren mucho de las medidas en lugares bastante más alejados (Mikulichi, Kovali y Novozybkov). En cambio las

Medidas efectuadas en Zapolye (Mayo, 1993) durante resuspensión natural revelaron la existencia de una correlación lineal del factor de resuspensión con el tamaño de partícula. En la figura 4 se ha representado el factor de resuspensión en función del diámetro de partícula (las

Factor de resuspensión

El factor de resuspensión (4) se define como el cociente entre la concentración de actividad a una cierta altura de referencia y la densidad de contaminación en la capa más superficial del suelo (1-2 cm del suelo). Los factores de resuspensión obtenidos con los valores medios de concentración de Cs-137 en aire y con los valores medios de densidades de contaminación en suelo se muestran en la tabla 6, tomando valores que van de $6,9 \times 10^{-11}$ a $3,0 \times 10^{-9}$ m⁻¹.

TABLA 5. Actividades específicas de Pu-239+240/240 en aire y en suelo (capa superficial de suelo, de 0 a 5 cm) de la fracción de partículas de diámetro inferior a 10 µm y factor de transferencia suelo-aire.

Localización	Actividad específica, A_A Pu-239+240/240 en aire (Bq/g)	Actividad específica, A_S Pu-239+240/240 en suelo (Bq/g)	$T_{SA}=A_A/A_S$
Kopachi	0,032	2,4	0,013
Zapolye (1993)	0,079	0,16	0,49
Kovali	0,013	0,003	4,1



TABLA 6. Concentración de actividad (Cs-137) de la fracción total resuspendible en aire, densidad de contaminación de la capa superficial al suelo (0-2cm) y factor de resuspensión en las zonas experimentales.

Area Experimental	Concentración actividad Cs-137 (mBq/m ³)	Densidad de contaminación Cs-137 (Bq/m ²)	Factor de resuspensión (m ⁻¹)
Beach-Pripyat	0,86	1,8x10 ⁶	4,9x10 ⁻¹⁰
Kopachi	0,18	2,6x10 ⁶	6,9x10 ⁻¹¹
Zapolye (1992)	0,08	4,6x10 ⁵	1,7x10 ⁻¹⁰
Zapolye (1993)	0,17	5,3x10 ⁵	3,2x10 ⁻¹⁰
Mikulichi	0,076	7,4x10 ⁴	1,0x10 ⁻⁹
Kovali	0,14	1,4x10 ⁵	1,0x10 ⁻⁹
Novozybkov	0,75	2,5x10 ⁵	3,0x10 ⁻⁹

medidas de concentración de actividad en aire proceden de muestras tomadas mediante el impactador PK de la Ukrainian Agricultural Academy of Sciences).

De la figura 4, se deduce que la variación del factor de resuspensión con el diámetro de partícula es aproximadamente lineal en el rango de 0 a 20 μm , con un factor de regresión del 90 %.

DOSIS POR INHALACIÓN DE ACTIVIDAD RESUSPENDIDA

Las partículas en suspensión y los radionucleidos asociados a estas partículas pueden ser inhalados y depositados en el tracto respiratorio, lo que conlleva un aporte de dosis por incorporación interna. El depósito de estas partículas en las distintas regiones del tracto respiratorio depende exclusivamente de su tamaño

y de las características fisiológicas del individuo. Así, las más pequeñas se depositan en la parte más baja del pulmón mientras que las mayores se deposi-

tan en las vías altas del sistema respiratorio. Por tanto, para una exacta evaluación de la dosis por inhalación, es necesario conocer la distribución de actividad en función del diámetro de partícula.

En el cálculo de los factores de dosis (función, principalmente, del diámetro aerodinámico de las partículas y de la clase de solubilidad) se hizo uso del código LUDEP 1,0, que implementa el nuevo modelo pulmonar de la ICRP. En el cálculo de dosis se utilizaron valores estándar para un varón adulto, con una tasa de ventilación pulmonar de 1,2 m³/h y se supuso una densidad del aerosol de 3,0 g/cm³. Debido al desconocimiento de las muestras de aerosoles, en cuanto a solubilidad biológica, se supuso clase S para todos los isótopos de Pu y clase F para el Cs-137.

La tabla 7 muestra la dosis equivalente comprometida al pulmón y la dosis efectiva

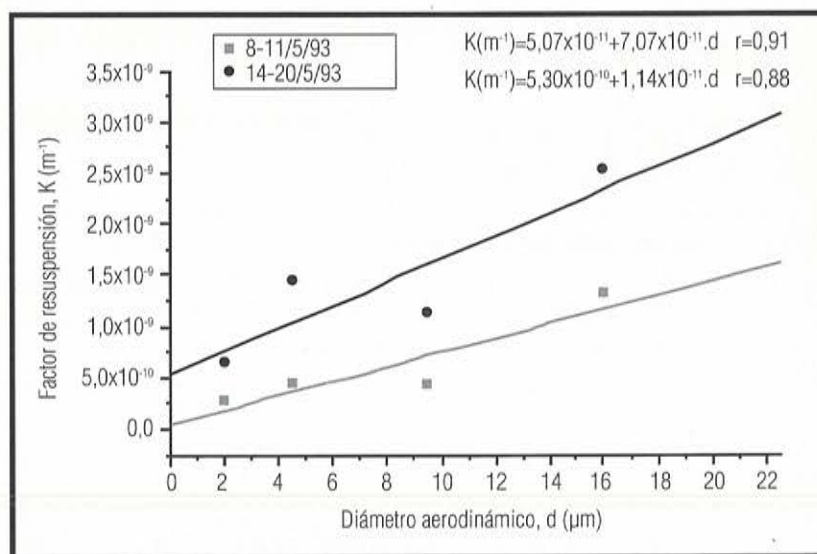


Figura 4. Factor de resuspensión en función del diámetro aerodinámico del aerosol en experimentos efectuados en Zapolye (Mayo 1993).

TABLA 7. Dosis equivalente comprometida al pulmón (HT) y dosis efectiva comprometida (E) debida a inhalación de Cs-137 y Pu-239+240 suponiendo una exposición de 800 horas al año en condiciones idénticas a las existentes en cada experimento. Los cálculos proceden de medidas realizadas en muestras recogidas por muestreadores de alto volumen Andersen PM10 (CIEMAT).

Emplazamiento	Descripción del experimento	Fecha	Cs-137		Pu-239+240	
			H _r (Sv)	E (Sv)	H _r (Sv)	E (Sv)
Zapolye	Tractor grande arrastrando arado	13/5/93	0,078	0,086	45,0	8,5
Kopachi	Tractor grande arrastrando arado	4/8/93	0,044	0,05	3,1	0,5
Novozybkov	Plantación de patatas	19/5/94	0,026	0,029	1,2	0,2
Mikulichi	Recolección de centeno	30/7/94	0,005	0,006	0,16	0,03
Mikulichi	Arado del suelo de labor	2/8/94	0,031	0,035	1,2	0,23

comprometida que recibiría una persona, trabajando en condiciones idénticas a las experimentales durante un año (suponiendo un tiempo de exposición de 800 horas), por inhalación de Cs-137 y Pu-239+240.

El aporte a la dosis efectiva comprometida debido a inhalación de Pu-239+240 es dos órdenes de magnitud superior que la debida a inhalación de Cs-137. La dosis equivalente comprometida al pulmón es del orden de microsievets en condiciones de trabajos reales de agricultura, llegando hasta 45 μ Sv en condiciones extremas de generación de polvo. La dosis efectiva comprometida es del orden de décimas de microsievvert durante prácticas reales de agricultura. En Zapolye, en simulación de prácticas de arado de un terreno cultivable se han encontrado valores de dosis efectiva comprometida del orden de 8,5 μ Sv. Para evaluar las dosis por inhalación que recibirían los conductores de tractores u otros tipos de maquinaria

agrícola se tomaron muestras de aire del interior de cabinas, por medio de muestreadores portátiles IBP del Ukrainian

Institute of Agricultural Radiology, en el transcurso de prácticas reales de agricultura en Novozybkov, Mikulichi y

TABLA 8. Estimación de dosis equivalente comprometida al pulmón y dosis efectiva comprometida para conductores de maquinaria agrícola durante trabajos de agricultura reales en Novozybkov (Rusia) y Mikulichi (Bielorrusia), suponiendo una dedicación de 800 horas de trabajo en un año.

Emplazamiento	Descripción del experimento	Cs-137		Pu-238+239+240	
		H _r (Sv)	E (Sv)	H _r (Sv)	E (Sv)
Novozybkov	Arado del suelo de labor	2,8	3,1	37,9	8,1
	Enterramiento de semilla de patata	4,4	4,9	73,5	17,7
	Aplicación de fertilizante	2,1	2,3	—	—
	Plantación de patatas	1,8	1,9	76,7	16,3
	Plantación de patatas (ventana abierta)	23,3	26,1	—	—
Mikulichi	Recolección de centeno	0,2	0,2	10,2	3,0
	Embalaje de paja	0,1	0,1	6,8	1,5
	Grada del suelo de labor	1,4	1,5	5,1	1,3
	Arado del suelo de labor	0,6	0,6	35,9	11,1



Kovali. Los resultados del cálculo de dosis equivalente comprometida al pulmón y dosis efectiva comprometida, suponiendo una exposición anual de 800 horas, se muestran en la tabla 8. Se han encontrado valores máximos de dosis por inhalación en el interior de tractores durante trabajos de enterramiento de semilla de patatas en Novozybkov, con valores del orden de 23 μSv en la dosis efectiva comprometida y 78 μSv en la dosis equivalente comprometida al pulmón. Es importante señalar el aumento de la dosis en el interior de las cabinas, con las ventanas abiertas, en más de un orden de magnitud, al incrementarse considerablemente la concentración de aerosoles en la cabina (de 20-50 mg/m^3 a 300 mg/m^3).

Los valores de la dosis efectiva comprometida por inhalación de Pu-239+240 en condiciones de resuspensión natural se calcularon en cada uno de los emplazamientos experimentales. Los valores estimados por año de exposición se hallan entre 0,06 y 0,6 μSv .

CONCLUSIONES

- Las concentraciones de Cs-137 en aire, en muestras recogidas durante experimentos realizados durante resuspensión natural (viento), en zonas contaminadas por el accidente de Chernobyl oscilan entre 60 y 600 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Las concentraciones de Pu-239+240 medidas se encuentran entre 0,19 a 3,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Las distribuciones de Cs-137 y Pu-239+240 en función del diámetro del aerosol son log-normales. Los valores superiores de los diámetros aerodinámicos medios de las distribuciones de plutonio respecto a los cesio indican que el Pu se encuentra asociado a partículas de mayor tamaño.
- Las concentraciones de Cs-137 durante trabajos reales y simulados de agricultura aumenta en dos órdenes de magnitud, mientras que en experimentos de tránsito de vehículos por caminos no asfaltados se alcanzan valores de hasta 600 veces el fondo. Los diámetros aerodinámicos medios de las distribuciones de actividad son mayores que los encontrados en ausencia de actividades antropogénicas, debido al incremento notable de partículas de gran tamaño en aire por los movimientos en la superficie del suelo.
- El factor de transferencia suelo-aire para la fracción inhalable (fracción menor de 10 μm) manifiesta una dependencia con la distancia al reactor 4 de Chernobyl para los dos radionucleidos analizados (Cs-137 y Pu-239+240). Este factor alcanza valores mínimos en las zonas más cercanas al reactor ($\approx 10^{-2}$), y aumenta en las zonas más alejadas, donde se alcanzan valores superiores a uno (entre 1,4 y 4,1).
- Los factores de resuspensión en las zonas experimentales a partir de medidas efectuadas durante resuspensión natural se encuentran en el rango de $6,9 \times 10^{-11}$ a $3,0 \times 10^{-9}$ m^{-1} . Los valores más altos del factor de resuspensión se alcanzan en los lugares más alejados del foco origen de la contaminación (Novozybkov, Mikulich y Kovali). Los valores más pequeños se hallan en las zonas cercanas al reactor accidentado. Por otra parte, experimentos efectuados en Zapolye, en Mayo de 1993, han mostrado la existencia de una dependencia lineal del factor de resuspensión respecto al diámetro aerodinámico de aerosol en suspensión.
- Las dosis equivalente comprometida al pulmón más alta de las calculadas, por año de trabajo, en condiciones de máxima generación de polvo no sobrepasan los 50 μSv y la dosis efectiva comprometida no supera los 10 μSv (Zapolye). En el interior de cabinas de tractores estas dosis se pueden ver incrementadas hasta valores cercanos a 80 μSv y 26 μSv respectivamente (Novozybkov). La dosis externa anual existente, en las fechas de los experimentos, en estas zonas varía entre 2 y 8 mSv . Por consiguiente, la dosis por inhalación de Cs-137 y Pu-239+240, calculada a partir de las medidas experimentales de concentración de actividad en aire, en zonas contaminadas por el accidente de Chernobyl, en el marco del proyecto ECP1, es muy pequeña frente a otras contribuciones debidas al depósito radiactivo resultante del accidente de Chernobyl.

REFERENCIAS

- (1) ECP1 Contamination of Surfaces by Resuspended Material. Final Report. EUR 16527 EN. 1996.
- (2) J.H. Shinn. Enhancement Factors for Resuspension Aerosol Radioactivity: Effects of Top Soil Disturbance. Proc. Fifth International Conference on Precipitation Scavenging and Atmospheric-Surface Exchange Processes. Vol.3, p1183-1193 (1992).
- (3) ECP1 Contamination of Surfaces by Resuspended Material. Technical Report 1992/93, Fh-ITA contribution. February 1994.
- (4) K.W. Nicholson. A Review of Particle Resuspension. Atmospheric Environment. Vol.22, N12, pp2639-2651.

