

RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Medida de espectrometría : Técnicas

La potencia de la EGIS se basa en el hecho de que un detector de radiación situado sobre un terreno mide la radiación gamma de todas las fuentes presentes en un área circundante de varios cientos de metros cuadrados.

El diagrama muestra un detector de radiación gamma situado en el centro de un terreno. Se indican las distancias en metros (m) y los porcentajes de radiación gamma medida en diferentes áreas circundantes:

Distancia (m)	Porcentaje de radiación gamma
1	19%
2	23%
4	20%
>10	15%

Logo de Ciemat y Gobierno de España, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Medida de espectrometría : Técnicas

Un detector de centelleo o un detector de estado sólido no produce impulsos eléctricos proporcionales a una magnitud dosimétrica como el kerma en aire o el equivalente de dosis ambiental. Sin embargo, la carga total de los impulsos eléctricos, obtenida a partir de un analizador multicanal si es proporcional a magnitudes dosimétrica como el kerma aunque en este caso, para el material del detector (y no aire). Si admitimos en una buena aproximación, el equilibrio de electrones secundarios.

Para la determinación de la dosis con equipos espectrométricos existen tres enfoques básicos para el tratamiento de espectros con el objetivo de obtener las magnitudes dosimétricas deseadas:

1. Método A: Evaluación del fotopico.
2. Método B: Deconvolución del espectro completo.
3. Método C: Uso de coeficientes de conversión.

Logo de Ciemat y Gobierno de España, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

REERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

¿Qué información se obtiene de un espectro gamma in situ?

<p>Naturales</p> <p>⁴⁰K: 1460 keV</p> <p>²³⁸U(Serie):</p> <p> ²¹⁴Pb: 295 keV</p> <p> ²¹⁴Bi: 609 keV.</p> <p>²³²Th(Serie):</p> <p> ²²⁸Ac: 911 - 1120 keV</p> <p> ²⁰⁸Tl: 583 - 2615 keV.</p> <p>Ocasionalmente :</p> <p> ⁷Be: 478 keV</p>	<p>Artificiales</p> <p>¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹²⁵Sb</p> <p>⁶⁰Co y ²⁴¹Am</p>	<p>Cósmica</p> <p>Medible por encima de 2615 keV (Madrid = 43 nSv·h⁻¹)</p>
---	--	--

VFS=1024

Energy(keV)

REERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría

Método A: Evaluación del fotopico

Inventario de Actividad

<p>$E(\text{keV}) = c_0 + c_1C + c_2C^2 + c_3C^3$ →</p> <p>Librerías →</p> <p>Fuente extendida Método EML Calibración matemática (ISOCS) →</p> <p>Factores de Conversión a Dosis (FCD) ICRU 53 (1994) HASL258 (1972) Kocher (1985) →</p>	<p>ADQUISICIÓN o ENTRADA de DATOS</p> <p>↓</p> <p>MODELO de FORMA del PICO</p> <p>↓</p> <p>CALIBRACIÓN en ENERGÍA</p> <p>↓</p> <p>LOCALIZACIÓN de PICOS</p> <p>↓</p> <p>CÁLCULO DE ÁREAS NETAS</p> <p>↓</p> <p>IDENTIFICACIÓN DE RADIONUCLEIDOS</p> <p>↓</p> <p>CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA</p> <p>↓</p> <p>CÁLCULO DE ACTIVIDADES</p> <p>↓</p> <p>ESTIMACIÓN DE ERRORES Y AMD</p> <p>↓</p> <p>CÁLCULO DE DOSIS EXTERNAS</p>
---	--

REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría
Método A: Evaluación del fotopico

Calibración en eficiencias

Los principios básicos se definen en la norma ISO 18589, preparada por el comité técnico ISO/TC85, en concreto por el subcomité de energía Nuclear , SC2 Protección Radiológica.

La norma esta formada por varias partes bajo la denominación general de Medida de la radiactividad en el medioambiente -- suelo. (Measurement of radioactivity in the environment — Soil)

Part 1: General guidelines and definitions.
Part 2: Sampling strategy, sampling, and pre-treatment of samples
Part 3: Measurements of gamma emitting radionuclides
Part 4: Measurement of plutonium by alpha spectroscopy
Part 5: Measurements of strontium 90
Part 6: Measurements of gross alpha and gross beta activities
Part 7: In situ measurement of gamma-emitting radionuclides.



REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría
Método A: Evaluación del fotopico

Calibración:

- 1.- Utilizando una superficie muy grande (que se aproxime lo máximo posible a un plano semi-infinito) calibrada. No es un método operativo.
- 2.- Calcular la distribución del flujo que incide al detector para una geometría de fuente dada, y determinar la respuesta del detector mediante fuentes puntuales y después obtener la integración.

Las variables fundamentales utilizadas en EGIS son:

- El recuento correspondiente al pico de absorción total , N.
- La tasa de fluencia ϕ .
- La actividad de la fuente , A.



En la práctica, lo ideal es obtener un factor de conversión que me permita pasar el recuento del pico del espectro a la actividad en suelo o tasa de dosis en aire.



REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría
Método A: Evaluación del fotopico

Para obtener la distribución del flujo, es necesario asumir diferentes modelos de distribución de los radionucleidos en el suelo así como de las propiedades físicas específicas tanto del suelo como del aire.

Todos los casos se pueden presentar algunos de los siguientes modelos de distribución.

1. Distribución homogénea o uniforme de radionucleidos naturales en el suelo.
2. Depósito superficial sobre la capa superior del suelo fresco, depósito seco o "fallout".
3. Disminución exponencial de la concentración de actividad en el suelo a medida que aumenta la profundidad después de un depósito superficial en el suelo, seguido de una migración del contaminante a las capas más profundas del suelo.

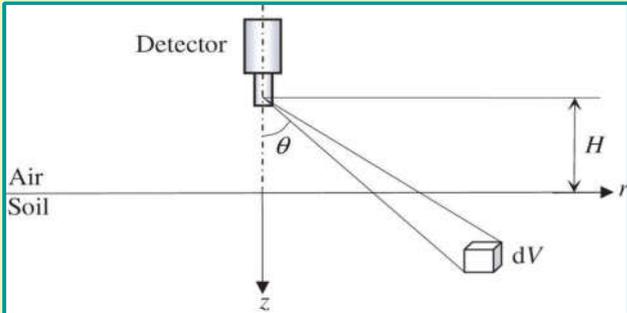


REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría
Método A: Evaluación del fotopico

El proceso de calibración combina las características del detector, los datos físicos que describan el suelo y el aire así como la forma de la contribución de los radionucleidos en el suelo.

El parámetro más importante es la determinación realista del modelo de distribución en suelo de los radionucleidos.




En la práctica, un espacio semi-infinito puede aproximarse por una gran superficie en campo abierto (radio de 10 a 70 m, dependiendo del perfil en profundidad de la fuente) donde haya pocos obstáculos naturales o fabricados por el hombre.

Normalmente los modelos matemáticos describen una disminución exponencial de la actividad en suelo con un incremento de la profundidad.



La curva de eficiencia se puede calcular a partir de tres términos separados de la siguiente forma:

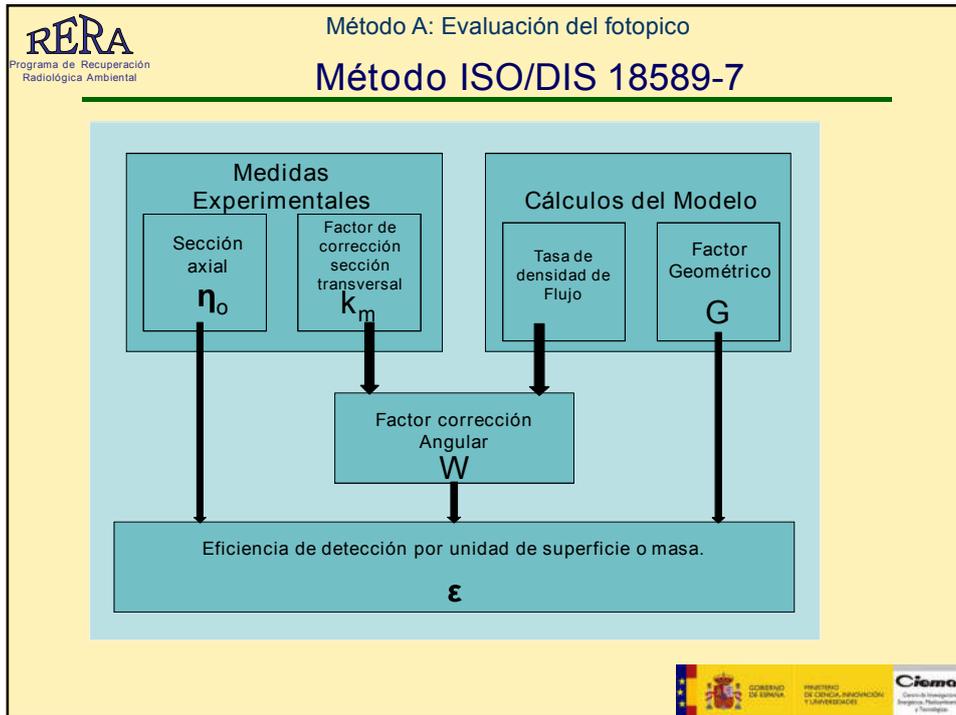
$$\epsilon = \eta_0 \cdot G \cdot W$$

E : Factor de calibración: Tasa de recuento en un fotopico del espectro que corresponde a una determinada transición gamma de un radionucleido presente en el terreno con un inventario de actividad A (Bq·kg⁻¹ ó Bq·m⁻²).

η₀ : Tasa de recuento en incidencia normal obtenida en el fotopico de interés por unidad de flujo total (sin colimar) de la radiación gamma considerada (γ·m⁻²·s⁻¹) que incide sobre el detector en una dirección paralela al eje de simetría del mismo (Incidencia normal).

W : Factor de corrección angular del detector para la energía gamma considerada y para una determinada distribución del término fuente en el terreno.

G : Factor geométrico, Flujo incidente por unidad de inventario de actividad: Flujo total (sin colimar) de la radiación gamma considerada (γ·m⁻²·s⁻¹) que alcanza el detector por unidad de inventario de actividad A en el terreno (Bq·kg⁻¹ ó Bq·m⁻²).



REERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

Calibración matemática ISOCS

- Modelos MonteCarlo del detector y la fuente
- Validado con simulaciones y fuentes reales
- Eficiencia másica para fuentes extensas
- Autoconsistencia

Incertidumbre	Condiciones de medida
7-10%	Fuentes pequeñas o grandes, 50-100 keV
6-8%	Fuentes pequeñas o grandes, 100-400 keV
<5%	Fuentes pequeñas o grandes, 400 keV- 7 MeV
5-10%	Fuentes muy pequeñas
Factor 1.5	Atenuación fuerte (transmisión 1%)
Factor 2	Atenuación muy fuerte (transmisión 0.01%)

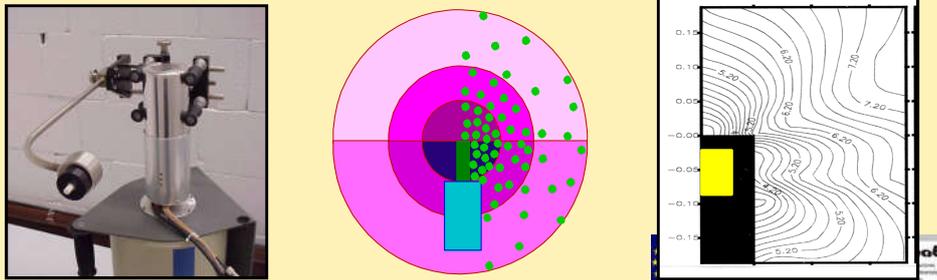
GOBIERNO DE ESPAÑA | MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y TURISMO | **Ciemat** Centro de Investigaciones Energéticas, Materiales y Nucleares

RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico
Calibración matemática de detectores ISOCS & LABSOCS

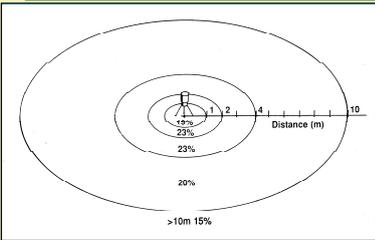
La respuesta del detector en una amplia variedad de condiciones se caracteriza según el siguiente proceso:

- 1) Modelo Monte Carlo del detector.
- 2) Validación experimental con fuentes puntuales.
- 3) Cálculo de la función respuesta del detector que sea válida:
 - Para cualquier punto desde el detector hasta 500 m,
 - Para cualquier energía en el rango 45 - 7000 keV,
 - Para cualquier ángulo de incidencia (4π).
- 4) Reducción de datos: Funciones polinómicas de eficiencia.

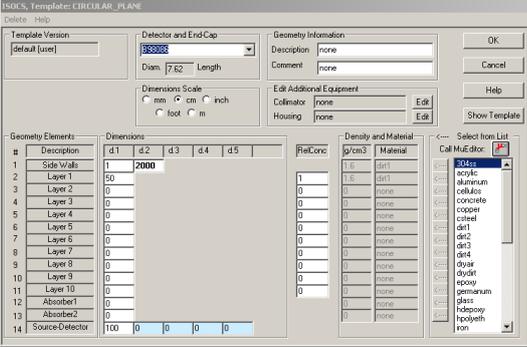


RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico
Calibración matemática de detectores ISOCS & LABSOCS




La figura presenta la plantilla correspondiente a la geometría circular plana, donde se pueden introducir las dimensiones de hasta 10 capas con actividad relativa, composición y densidad diferentes. El programa dispone de una lista de detectores genéricos o personalizados y además proporciona un editor de materiales que permiten al usuario definir y emplear en las simulaciones sus propios materiales. Por último, se puede definir cualquier orientación entre el detector y el término fuente, así como estudiar previamente el ángulo detectado en el caso de emplear colimadores.



Geometry Elements		Dimensions					RelConc	Density and Material
#	Description	d1	d2	d3	d4	d5		Material
1	Side Walls	1	2000				1.0	air1
2	Layer 1	50					1.5	air1
3	Layer 2	0					0	none
4	Layer 3	0					0	none
5	Layer 4	0					0	none
6	Layer 5	0					0	none
7	Layer 6	0					0	none
8	Layer 7	0					0	none
9	Layer 8	0					0	none
10	Layer 9	0					0	none
11	Layer 10	0					0	none
12	Absorb1	0					0	none
13	Absorb2	0					0	none
14	Source-Detector	100	0	0	0	0	0	none

RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico
Calibración matemática ISOCS

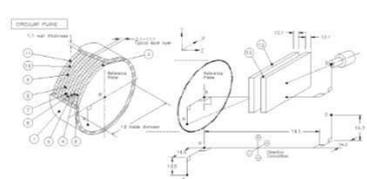
Geometry Composer Report

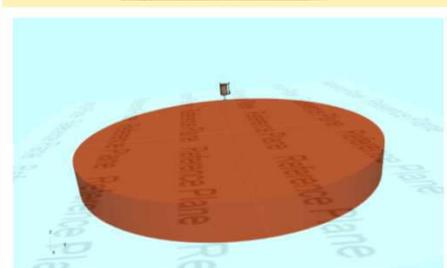
Date: Monday, June 04, 2018 - 16:19:30
Description: dnt3 100 100cm
Comment: 100cm m dnt3
File Name: H:\CARPETAS PERSONALES\Erique Conesa\Servicios_Técnicos\Saelices_20...Idnt3_100cm_10cm.geo
Software: ISOCS
Template: CIRCULAR_PLANE, Version: default
Detector: 817163
Environment: Temperature = 22 °C, Pressure = 760 mm Hg, Relative Humidity = 30%,
Integration: Convergence = 1.00%, MDRSN = 2" (16), CRPN = 2" (16)

No.	Description	Dimensions (cm)						Material	Density	Rad. Conc.
		d1	d2	d3	d4	d5	d6			
1	Side Walls	0	100					none		
2	Layer 1	100						STC	1.5	1.00
3	Layer 2	0						none		
4	Layer 3	0						none		
5	Layer 4	0						none		
6	Layer 5	0						none		
7	Layer 6	0						none		
8	Layer 7	0						none		
9	Layer 8	0						none		
10	Layer 9	0						none		
11	Layer 10	0						none		
12	Aluminum							none		
13	Aluminum							none		
14	Source-Detector	100	0	0	0	0	0	none		

List of energies for efficiency curve generation

13.9	17.8	26.3	45.1	59.5	121.8	244.7	344.3
411.1	484.0	778.9	964.1	1085.9	1122.1	1408.0	2000.0
2500.0	3000.0						



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y TURISMO

RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico




Áreas de referencia para la calibración de sistemas de EGIS para medidas de estériles y residuos de la minería de Uranio (Wismuth GMBH, Gera, Alemania) (izquierda), (ENUSA, LRN, Saelices el Chico, España)

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y TURISMO

REERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico
Proyecto de restauración de Wismuth



Calibraciones en campo realistas de estériles de U



Calibraciones con fuentes puntuales (resp. Angular)



Búsqueda de fuentes determinando los radionucleidos, su actividad y la Profundidad en el terreno.



Estudio radiométrico en una zona ya restaurada

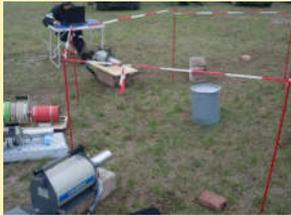


REERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico



Determinación de fuentes huérfanas



Escenarios accidentales realistas



Geometrías singulares



Búsqueda de fuentes



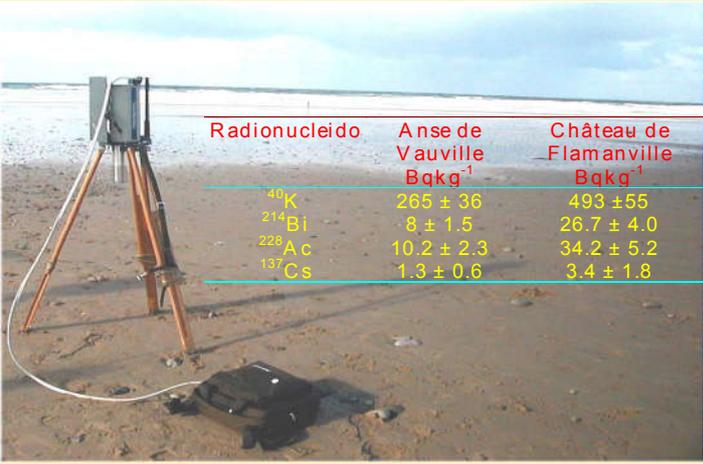
Medidas en zona afectada por Chernobyl



RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

Caracterización medioambiental (Nord Cotentin, Francia, 2000)



Radionucleido	Anse de Vauville Bqkg ⁻¹	Château de Flamanville Bqkg ⁻¹
⁴⁰ K	265 ± 36	493 ± 55
²¹⁴ Bi	8 ± 1.5	26.7 ± 4.0
²²⁸ Ac	10.2 ± 2.3	34.2 ± 5.2
¹³⁷ Cs	1.3 ± 0.6	3.4 ± 1.8

CIEMAT
Centro de Investigaciones Científicas, Ministerio de Educación, Política Científica e Innovación

RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

Caracterización medioambiental



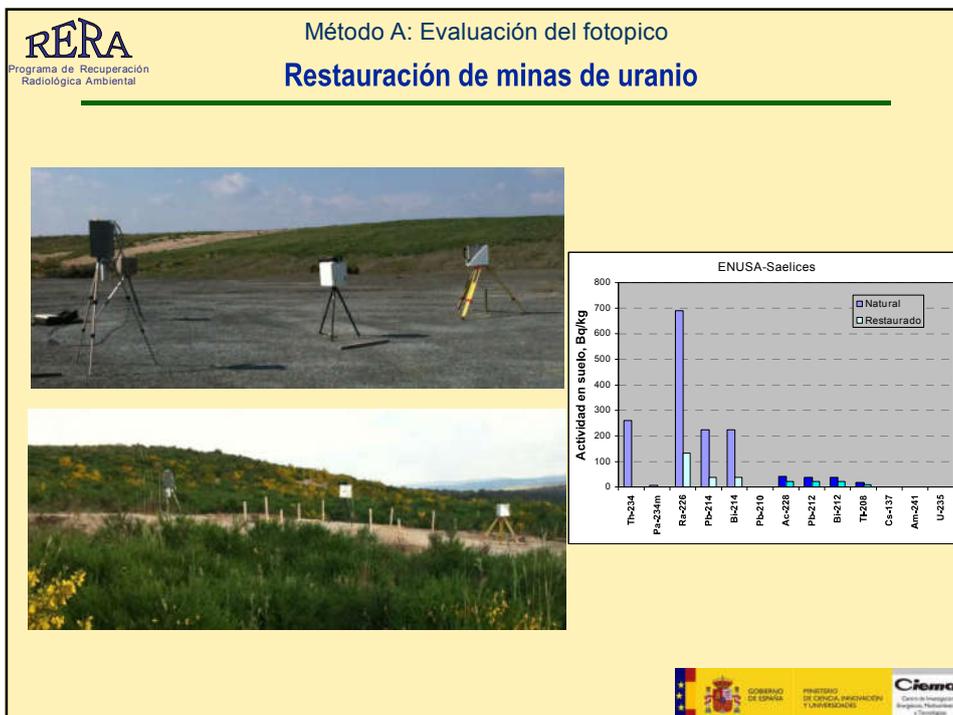
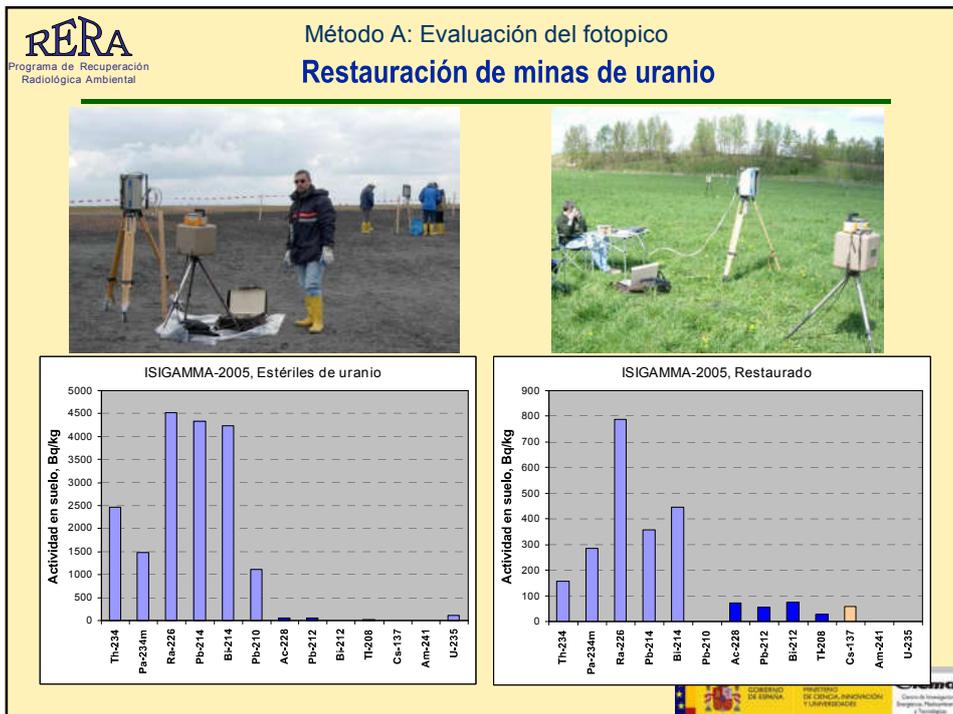

CIEMAT (Madrid)

Radionucleido	Actividad en suelo, Bq/kg
Th-234	0
Pa-234m	0
Ra-226	130
Pb-214	45
Bi-214	45
Pb-210	0
Ac-228	55
Pb-212	50
Bi-212	80
Tl-208	25
Cs-137	5
Am-241	0
U-235	0

Hohe Wand (Austria, 2007)

Radionucleido	Actividad en suelo, Bq/kg
Th-234	0
Pa-234m	0
Ra-226	25
Pb-214	25
Bi-214	25
Pb-210	0
Ac-228	35
Pb-212	35
Bi-212	30
Tl-208	15
Cs-137	110
Am-241	0
U-235	0

CIEMAT
Centro de Investigaciones Científicas, Ministerio de Educación, Política Científica e Innovación



RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

Factores de Conversión a Dosis (FCD)

- Los métodos de calibración en eficiencia expresan los resultados por unidad de inventario de actividad (Bq/g ó Bq/m²).
- Los Factores de Conversión a Dosis (FCD) se han calculado mediante diversos métodos (operador puntual, aproximaciones numéricas, simulaciones MonteCarlo).
- En los cálculos hay que considerar las características del escenario (geometría de medida, composición del terreno, distribución de la actividad).
- Los distintos cálculos presentan resultados muy parecidos para energías superiores a 200 keV.
- Es recomendable emplear los FCD de mas reciente publicación.



RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico

ISO/DIS 18589-7

Radionucleido	Línea principal (keV)	Tasa de kerma en aire por unidad de actividad por unidad de masa	
		(nGy/h)/(Bq/kg)	Fración de la serie
Serie del Uranio			
U-238	13	4.33E-05	0.01%
U-234	53	5.14E-05	0.01%
Th-234	63	9.47E-04	0.21%
Pa-234m	1001	3.00E-03	0.65%
Pa-234	98	4.49E-04	0.10%
Th-230	68	6.90E-05	0.01%
Ra-226	186	1.25E-03	0.27%
Rn-222	512	8.78E-05	0.02%
Pb-214	352	5.46E-02	11.82%
Bi-214	609	4.01E-01	86.83%
Tl-210	800	1.15E-04	0.02%
Pb-210	11	2.07E-04	0.04%
Total		4.62E-01	
Serie del Torio			
Th-232	64	4.78E-05	0.01%
Ra-228	7	5.45E-05	0.01%
Ac-228	911	2.21E-01	36.55%
Th-228	84	3.44E-04	0.06%
Ra-224	241	2.14E-03	0.35%
Rn-220	24	1.73E-04	0.03%
Pb-212	238	2.77E-02	4.58%
Bi-212	727	2.72E-02	4.50%
Tl-208	583-2614	3.26E-01	53.91%
Total		6.05E-01	
K-40	1462	4.17E-02	

Kerma en aire producido a 1 m de altura sobre el suelo por los radionucleidos naturales distribuidos uniformemente en el suelo con una concentración unidad de actividad másica.

También se muestra la energía de la línea de emisión gamma que aparece con más claridad así como la contribución de cada radionucleido a la tasa de kerma debido a las series naturales de Uranio y Torio (suponiendo equilibrio radiactivo en las mismas).

La Tabla se basa en la Tabla 5.2 de ICRU-53 (pág. 44)



REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Método A: Evaluación del fotopico.
Factores de Conversión a Dosis

La transformación de inventario de actividad a kerma en aire se ha realizado utilizando los factores de conversión a dosis incluidos en la tabla G.1 de la Norma UNE EN ISO 18589-7.

	FCD nGy h ⁻¹ por Bq kg ⁻¹
TH-234	0.0009
Pa-234m	0.0030
RA-226	0.0013
PB-214	0.0546
BI-214	0.4010
Pb-210	0.0002
U-235	0.0291
TH-227	0.0199
RA-223	0.0254
AC-228	0.2210
PB-212	0.0277
BI-212	0.0272
TL-208	0.3260
K-40	0.0417
CS-137	0.1450

Para aquellos radionucleidos incluidos en el inventario y que no se encuentran listados en la tabla G.1 de la Norma, se han obtenido los factores de conversión utilizando la librería incluida en la ICRP 107 y los factores de conversión para fotones monoenergéticos incluidos en la Tabla 2 de la publicación: "CONVERTING SPECIFIC ACTIVITY INTO AMBIENT DOSE EQUIVALENT: UPDATED COEFFICIENTS FOR IN SITU GAMMA SPECTROMETRY F. O. Bochud, J.-P. Laedermann, S. Baechler and C. Bailat* Institute of Radiation Physics (IRA), Lausanne University Hospital (CHUV), Switzerland. Radiation Protection Dosimetry (2017), Vol. 174, No. 2, pp. 167–174 Advance Access publication 20 June 2016"



REERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría
Método B: Deconvolución del espectro completo

La tasa de dosis se obtiene mediante la evaluación de la fluencia de fotones que llega al detector directamente. Para ello, el espectro se debe "deconvolucionar" en un primer paso para eliminar el fondo Compton de los fotones dispersados en el detector. Con esto se corrige la absorción incompleta de la energía de los fotones detectados.

Cuando la radiación gamma interacciona con un detector de centelleo puede, o bien depositar toda su energía o sufrir una absorción parcial (Compton). Por tanto la respuesta de un detector de centelleo no solamente incluye la energía correspondiente a los picos de absorción total emitidos por la fuente, sino que además incluye los efectos de diferentes absorciones parciales.

La relación entre el espectro medido O y la fluencia del espectro de fotones incidentes ϕ puede expresarse con la siguiente ecuación matricial.

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,m} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \dots & R_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n,1} & R_{n,2} & \dots & R_{n,m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix}$$

La matriz de respuesta, \widehat{R} (n,m) está compuesta por el conjunto de "m" espectros de pérdida de energía específicos del conjunto de "n" canales cada uno, que se obtienen mediante simulación del detector por métodos de Monte Carlo.

De la expresión matricial anterior se puede obtener el flujo mediante la siguiente expresión:

$$\vec{\phi} = \widehat{R}^{-1} \cdot \vec{O}$$





Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría

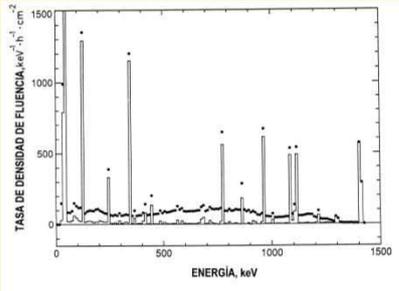
Método B: Deconvolución del espectro completo

La resolución de esta matriz se puede realizar mediante diferentes algoritmos matemáticos, siendo el método de stripping el más utilizado. Este método consiste en ir eliminando del espectro original la contribución a baja energía de las absorciones parciales producidas por la iteración de un fotón de absorción total en el detector.

El proceso es iterativo y se comienza en la energía más elevada del espectro y se va disminuyendo hasta la energía mínima del espectro (como por tiras "stripped"). El espectro final resultante es un espectro deconvolucionado donde se ha eliminado la contribución del detector y queda únicamente la fluencia de fotones incidentes.

Una vez se ha obtenido el espectro de fluencia incidente, la dosis equivalente ambiental se puede obtener mediante la expresión:

$$\frac{dH(10)}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d\phi_i}{dt} \cdot E_i \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{air,i} \cdot h_k^*(10, E_i)$$



TASA DE DENSIDAD DE FLUENCIA, $\text{keV}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

ENERGÍA, keV







Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

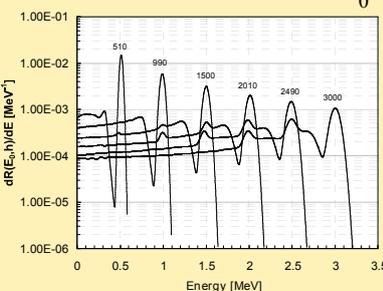
Equipos de medida: Espectrometría

Método B: Deconvolución del espectro completo

Distribución espectral de dosis

- Medida directa de la energía depositada en el detector
- No se precisa conocimiento previo del término fuente
- Cálculo directo de magnitudes dosimétricas
- Modelo de la respuesta del detector

$$O_V = \int_0^{+\infty} R_V(E) \Phi_E dE$$



$dR(E_{ph})/dE$ [MeV⁻¹]

Energy [MeV]

Ejemplo de la función de respuesta del detector de LaBr₃(Ce) de 1.5"x1.5"obtenido con Monte Carlo, para incidencia normal de los fotones sobre el detector. Los ficheros de respuesta tienen una resolución de 300 canales y el rango energético se extiende hasta 3 MeV. Por tanto se puede obtener la fluencia de fotones incidentes en el rango normal de las energías consideradas en medidas ambientales.







Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Equipos de medida: Espectrometría

Método C: Uso de coeficientes de conversión

El cálculo de la tasa de dosis se obtiene a partir de una medida espectrométrica (fluencia de fotones) pero sin la necesidad de realizar la deconvolución del espectro. Es un método directo.

La conversión del espectro obtenido con el equipo de medida a la magnitud dosimétrica se realiza aplicando unos coeficientes de conversión que dependen de la energía. Este método combina las ventajas del Método A y del B.

Un espectro experimental compuesto de i canales contiene i valores n_i que se corresponden con el recuento obtenido en cada uno de los canales. Esta tabla de números se puede expresar como un vector \vec{N} . El espectro de fluencia de fotones gamma que llegan al detector se puede dividir en el mismo número de bandas de energía i y que podemos definir como \vec{G} .

La respuesta del detector la representaremos como la matriz M . La matriz de respuesta del detector convierte el espectro de fluencia incidente \vec{G} en un espectro de medida de altura de impulso \vec{N} :

$$\vec{N} = M \cdot \vec{G} \quad (\text{Método B})$$

Para obtener el valor de la tasa de dosis ambiental a partir del espectro de fluencia incidente \vec{G} este espectro se debe multiplicar por un vector \vec{C}_H , que convertirá el espectro de fluencia gamma a la magnitud dosis equivalente ambiental. Utilizando la ecuación anterior se puede transformar en:

$$H^*(10) = \vec{C}_H \cdot \vec{G} = \vec{C}_H \cdot (M^{-1} \cdot \vec{N}) = (\vec{C}_H \cdot M^{-1}) \cdot \vec{N} = \vec{V} \cdot \vec{N}.$$





Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

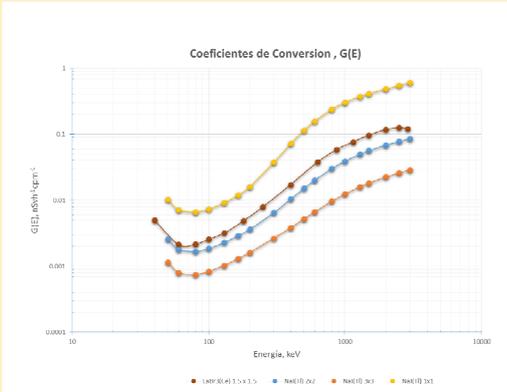
Equipos de medida: Espectrometría

Método C: Uso de coeficientes de conversión

No es necesario obtener la matriz respuesta del detector, es suficiente con obtener el vector \vec{V} , que es el producto de $\vec{C}_H \cdot M^{-1}$ mediante métodos de simulación por Monte Carlo.

Los componentes del vector \vec{V} están formados por el producto de $w_i \cdot E_i$, y por tanto el equivalente de dosis ambiental obtenido a partir del espectro se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$H^*(10) = w_1 \cdot E_1 \cdot n_1 + w_2 \cdot E_2 \cdot n_2 + \dots + w_z \cdot E_z \cdot n_z$$



Coeficientes de conversión para detectores de NaI(Tl) de 1"x1", 2"x2" y 3"x3" y para LaBr(Ce) de 1.5"x1.5"

Donde w_i es el coeficiente de conversión para la región de energía i , E_i es la energía media de la región i y n_i es el recuento del espectro correspondiente a la energía i .

Los coeficientes w_i , se pueden obtener experimentalmente a partir de la medida de fuentes radiactivas o bien simulando mediante métodos de Monte Carlo la interacción de fotones monoenergéticos sobre el detector



RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

Descripción de los Green.

El Grupo Radón forma parte del Grupo de Investigación de la Universidad de Cantabria denominado "Radiaciones Ionizantes Radiobiología y Protección Radiológica Ambiental y Hospitalaria". Desde hace más de 30 años viene desarrollando una labor relacionada con la medida y evaluación de riesgos para las personas y el medio ambiente como consecuencia de exposición a fuentes naturales y artificiales de radiación.

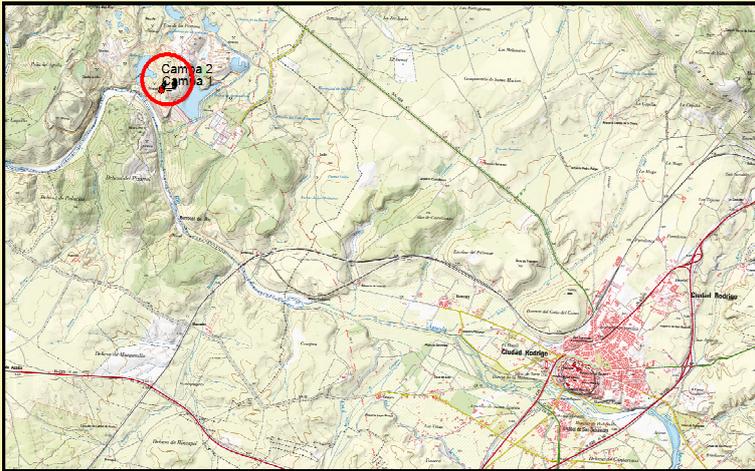
Dicho grupo actualmente gestiona el Laboratorio de Referencia en la Medida de Radiación Natural en las Instalaciones mineras de ENUSA en Saelices el Chico (Salamanca). Durante el año 2013 se formalizó un acuerdo de colaboración entre el Programa de Recuperación Radiológica Ambiental del Departamento de Medioambiente del CIEMAT (en adelante RERA) y la Universidad de Cantabria para el proyecto conjunto de colaboración en el Desarrollo del Laboratorio de referencia de la medida de la radiación natural en las instalaciones mineras de ENUSA en Saelices el Chico (Salamanca).

El objetivo principal del proyecto es la colaboración y mutua asesoría entre CIEMAT y UCAN, con el objeto de optimizar y adecuar los diferentes espacios del Laboratorio de Radiación Natural (en adelante LRN), proponiendo además programas de medidas con equipos fijos y portátiles destinados a la medida de la radiación natural.



RERA
Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

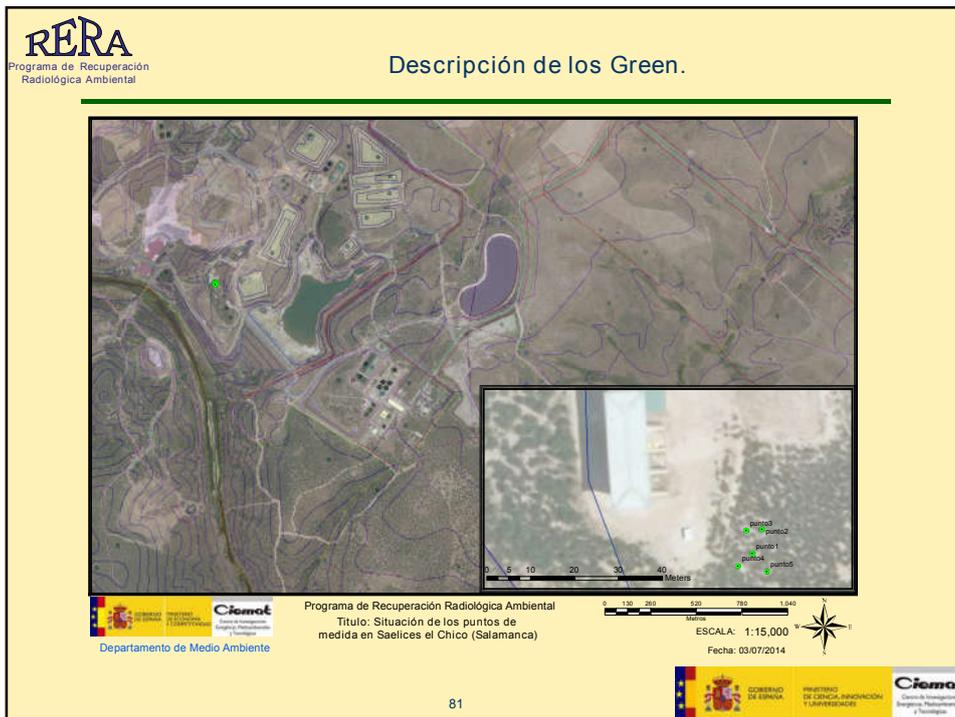
Descripción de los Green.



Programa de Recuperación Radiológica Ambiental
Título: Situación puntos de medida


 ESCALA: 1:41272
Fecha: 05/02/10







RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Descripción de los Green.

- “Green Ballesteros”. La estación 1 se ubica en una ladera de estériles de Uranio ya recuperada situada a unos 30 m del edificio del LRN en la que se practicó un vaciado de aproximadamente 1,5 m de profundidad en una superficie aproximada de 5x5 m².

Dicho volumen se rellenó con tierras ajenas al emplazamiento a estudiar, cuyo contenido en radionucleidos naturales es del orden del promedio para tierras similares de España y por tanto, mucho menores que el contenido en las tierras propias del emplazamiento.

Como resultado, se dispone de una estación de medida con una pequeña elevación sobre el entorno circundante y una cierta pendiente siguiendo la ladera.
- “Green Cosma”. La estación 2 se ubica a 35 m de la estación 1 en la misma ladera y a 27 m de la puerta de entrada sur del edificio del LNR. En este caso se practicó un vaciado de aproximadamente 4 m de profundidad y en una superficie aproximada de 5 x 5 m². El relleno en este caso se ha realizado de materiales de estériles de minería de un dique alejado de la zona, en restauración ambiental.





83



RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Descripción de los Green.



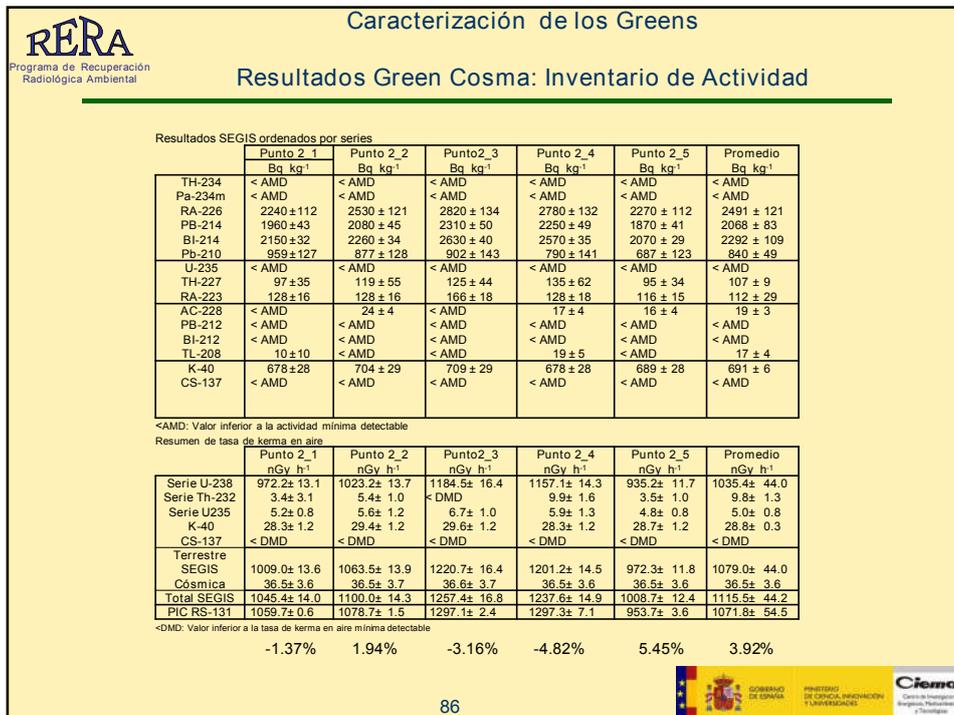
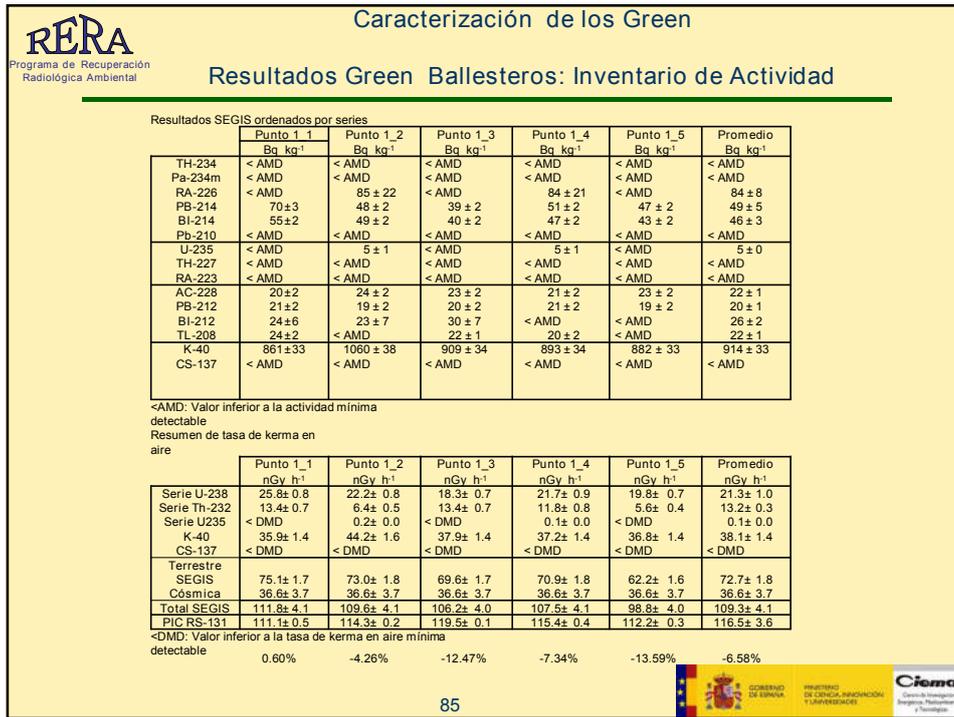




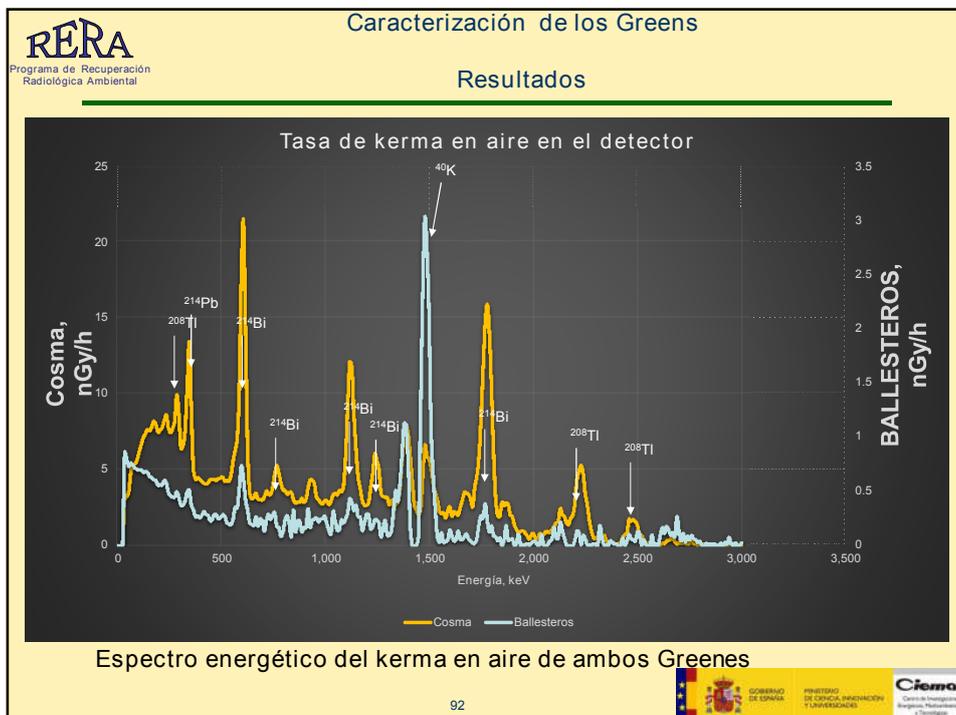
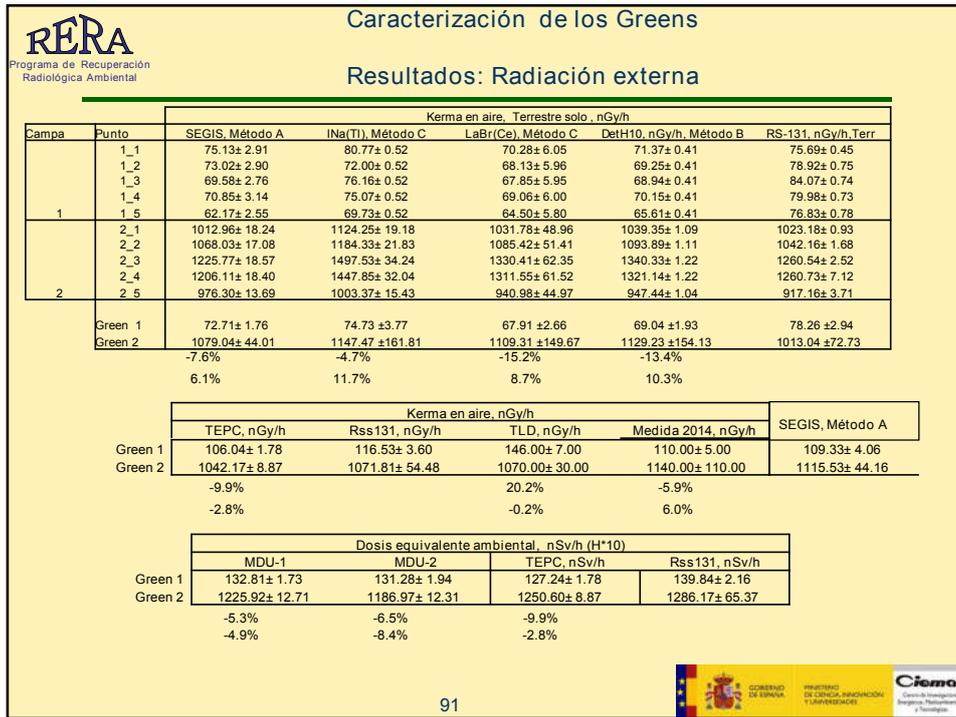




84







RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Caracterización de los Greens

Conclusiones

1. Las medidas de tasa de dosis de la cámara de ionización presurizadas en varios puntos presentan un gran acuerdo entre sí y su calidad ha permitido estudiar la aceptable homogeneidad del campo de radiación en ambas estaciones.
2. Las medidas de espectrometría gamma "in situ" han revelado la presencia de radionucleidos naturales de un emplazamiento sin alterar en la estación 1 y ha descartado la presencia de radionucleidos de origen artificial. Las tasas de dosis calculadas a partir de estos espectros presentan un acuerdo razonable con los obtenidos con las CIP. Estos valores son totalmente compatibles con los obtenidos en el mismo emplazamiento en el 2011.
3. Las medidas de espectrometría gamma "in situ" han revelado la presencia de estériles de minería en la estación 2 y ha descartado la presencia de radionucleidos de origen artificial. Las magnitudes dosimétricas calculadas a partir de estos espectros presentan un acuerdo razonable con los obtenidos con las CIP, lo que indica que el inventario de actividad evaluado es correcto. Estos valores son totalmente compatibles con los obtenidos en el mismo emplazamiento en el 2014.
4. De las medidas en las estaciones 1 y 2 se concluye que ambas son válidas para la inter-comparación de equipos de medida de tasa de dosis externas, presentando una gran homogeneidad en el área delimitada para ello y gran estabilidad temporal. Los valores de referencia para las mismas son, en términos de tasa de kerma en aire:

Valores de referencia:

- Estación 1: $0,117 \pm 0,004 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (k=2)
- Estación 2: $1,071 \pm 0,055 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (k=2)

93



RERA
Programa de Recuperación
Radiológica Ambiental

Caracterización de los Greens

Conclusiones

Valores de referencia:

- Estación 1: $0,117 \pm 0,004 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (k=2)
- Estación 2: $1,071 \pm 0,055 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ (k=2)

Radiation Protection Dosimetry (2013), Vol. 155, No. 4, pp. 459–466
Advance Access publication 14 February 2013 doi:10.1093/rpd/ncd016

INTERCOMPARISON EXERCISE ON EXTERNAL GAMMA DOSE RATE UNDER FIELD CONDITIONS AT THE LABORATORY OF NATURAL RADIATION (SAELICES EL CHICO, SPAIN)

J. L. Gutierrez-Villanueva^{1,*}, C. Sainz-Fernández¹, I. Fuente-Merino¹, J. C. Sáez-Vergara², E. Cornea-Garcés² and L. S. Quindós-Poncelet¹

¹RADON Group, Faculty of Medicine, University of Cantabria, Avda Cardenal Herrera Oria s/n, Santander 39011, Spain

²Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, Environmental Radiological Restoration Programme, Av. Complutense 22, Madrid 28040, Spain

*Corresponding author: gutierrezjl@unican.es

Received May 14 2012; revised November 10 2012; accepted January 23 2013

The last nuclear accident in Fukushima nuclear power plant has increased the necessity for measuring radiation in the environment. Therefore, radiation monitors providing results traceable throughout the country become essential and it is very important to test them under the same environmental conditions. The first intercomparison of natural radioactivity under field conditions was held in Saelices el Chico (Salamanca, Spain) in May 2011, including an exercise on environmental dose rate. This article presents the results achieved by 19 instruments belonging to 12 institutions from 7 different countries. The tested detectors are proportional counters, ionisation chambers, Geiger-Müller and scintillators measuring dose rate in three stations with reference values from 110 to 1800 nGy h⁻¹. All the results were given in terms of air kerma (nGy h⁻¹), and the measurements show agreement within 25 % in all the sites. Evaluation criteria based on accuracy and statistical uncertainty were also carried out and 25 % of participants passed the test in all sites.

Para cuando ?....

94

