







Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales, implicaciones radiológicas sobre la población



Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales, implicaciones radiológicas sobre la población



MIGUEL ÁNGEL ARNEDO AYENSA Las Palmas de Gran Canaria Marzo 2014

2014

Miguel A. Arnedo

Ayensa

TESIS DOCTORAL







SALVADOR GALVÁN HERRERA, SECRETARIO DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

CERTIFICA,

Que el Consejo de Doctores del Departamento en su sesión de fecha 27 de marzo de 2014 tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis titulada "Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales, implicaciones radiológicas sobre la población", presentada por el doctorando D. Miguel Ángel Arnedo Ayensa y dirigida por el Doctor D. Jesús García Rubiano.

Y, para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Art. 73.2 del Reglamento de Estudios de Doctorado de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a 27 de marzo de dos mil catorce.

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA



DEPARTAMENTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE DOCTORADO

FÍSICA, MATEMÁTICAS, GEOLOGÍA Y CLIMA

Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales, implicaciones radiológicas sobre la población.

Tesis doctoral presentada por D. Miguel Ángel Arnedo Ayensa.

Dirigida por el Dr. D. Jesús García Rubiano

El director

El doctorando

Fdo.: Dr García Rubiano

Fdo.: Miguel Angel Arnedo Ayensa

A Nieves

A mis hijos Miguel-Raquel, Irene y Nacho

Al nieto o nieta que está por llegar

Agradecimientos

En este trabajo de Tesis Doctoral, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. D. Jesús García Rubiano, por su plena dedicación y entusiasmo, así como por los ánimos que en todo momento me ha dedicado, que no han sido pocos. Le quedo también muy agradecido al compañero de fatigas, y toma de muestras, Héctor Alonso, que sin su conocimiento de los caminos, barrancos y carreteras del archipiélago, hubiese sido imposible; también agradecerle la ayuda inestimable en la maquetación y formato de esta Tesis Doctoral, él sabe que me tendrá a su disposición en los momentos que me necesite.

Agradecer también al Dr. D. Pablo Martel Escobar coordinador del Grupo de Investigación de Interacción Radiación-Materia (GIRMA), por los medios materiales y físicos que no dudó en conseguir y por las discusiones científicas que sin duda han contribuido a mejorar este texto.

A D. José Martí Trujillo (Trujillo), como no, (todo lo que diga es poco). Todavía recuerdo como a base de fundir plomo y respirar vapores insalubres, construimos nuestro primer blindaje. A D. José Alemán (Alemán), que siempre me ha solucionado cualquier problema técnico y avería. en el laboratorio, exquisito y minucioso en la elaboración de soportes y mecanismos para la medida de muestras.

Al Dr. D. Antonio González, por su protocolo de toma de muestras, que no siempre pudimos llevar a cabo. También al compañero de estudios y departamento Dr. D. Juan Manuel Martín por su labor de "consultoría" estadística.

Al Dr. D. Salvador Galván, "Boro", que todos los días, desde las siete y media de la mañana, me regañaba por los retrasos en la realización de la Tesis Doctoral y al mismo tiempo me animaba. Debo un reconocimiento especial a los doctores Francisco Rubio Royo y Esther Pérez Martell, que siempre me han apoyado en este y en otros proyectos.

También agradecer a los doctores José Mangas y Francisco Torrado, las notas y puntualizaciones sobre la Geología de las Islas Canarias, sin las cuales no hubiese podido analizar los resultados. A la Dra. Dña. Ángeles Marrero, la cual siempre me ha solucionado todos los problemas relativos al formato y maquetación del documento.

No sería justo dejar pasar por alto el agradecimiento a los doctores D. Pedro Bolívar y D. Rafael Lozano del grupo de investigación FRYMA de la Universidad de Huelva, por su hospitalidad

durante la estancia en dicha Universidad, y por compartir sus experiencias y consejos sobre la calibración de detectores.

Agradezco también, a Bárbara Enríquez, que con su labor silenciosa y eficaz, consiguió librarme de papeleos y burocracias que tanto odio. Gheorghe Pop con su ayuda en las soluciones de todo tipo de problemas informáticos, ha contribuido a sortear muchas piedras en este largo camino. Sirva esta línea, como agradecimiento a su labor.

En especial doy las gracias a mis hijos, que me han aguantado "enfados y cabreos" durante estos últimos años de realización de esta Tesis Doctoral. Espero que la finalización de la misma, sea un motivo de orgullo que les recompense. A Nieves que con su amor cargado de paciencia, siempre me ha ayudado en todos los caminos emprendidos.

Finalmente agradezco el soporte económico proporcionado por el Consejo de Seguridad Nuclear, que ha financiado parte de estos trabajos mediante el convenio SRA/2228/08/227.6 de 2008, y por los proyectos de investigación concedidos en sus convocatorias de I+D de 2009 y 2012 a nuestro grupo de investigación. También agradecer a la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información del Gobierno de Canarias (ACIISI) que financió especialmente la parte inicial de los trabajos mediante la concesión del proyecto de investigación regional ·Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales: implicaciones radiológicas sobre la población"; en su convocatoria del año 2007 con financiación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Organismos que han financiado este trabajo





Desarrollo Regional



Índice

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. La Radiactividad Ambiental	1
1.1.1 Radiación Cósmica	2
1.1.1.1Radiación Cósmica Primaria	2
1.1.1.2 Contribución de la radiación cósmica a la dosis anual en la sur	perficie
terrestre	4
1.1.1.3 Radiación Cósmica Secundaria. Radionúclidos cosmogénicos	6
1.1.2 Radiación terrestre	8
1.1.3 ⁴⁰ K y ⁸⁷ Rb	9
1.1.4 El Uranio	10
1.1.4.1 Serie del ²³⁸ U	11
1.1.4.2 Serie del ²³⁵ U	12
1.1.5 El Torio	17
1.1.5.1 Serie del 2027h	18
1.1.6 El Radón	21
1.1.7 El ¹³ Cs	22
1.1.8 Exposición a las radiaciones naturales.	23
1.2. Descripción geológica del área de estudio. Las Islas Canarias Orientales	28
1.2.1 Isla de Gran Canaria	29
1.2.2 Isla de Fuerteventura	31
1.2.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa	32
1.3. Antecedentes y estado actual del tema	34
1.3.1 La Radiactividad Natural en España. El proyecto MARNA	34
1.3.2 Estudios sobre Radiactividad Natural en las Islas Canarias	30
	37
Capítulo 2	41
Material y Métodos	41
2.1. Introducción	41
2.2. Unidades de medida	41
2.3. Instrumentación radiométrica	42
2.3.1 Radiómetro Ludlum µR Model 12S	43

2.3.2	Sondas GENITRON GammaTRACER	. 44
2.3.3	Espectrómetro de centelleo Canberra INSPECTOR-1000 modelo N1KN-3	con
	sonda de INa 3x3 IPRON-3	. 45
2.3.4	Radiómetro ALNOR Gamma meter 2414	. 47
2.4. Esp	pectrometría gamma de alta resolución	. 48
2.4.1	Espectrometría gamma. Detectores de semiconductor	. 48
2.4.2	Bases Físicas de funcionamiento de los detectores de semiconductor	. 49
	2.4.2.1 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos	. 49
	2.4.2.2 La unión PN	. 54
2.4.3	Tipos de detectores de semiconductor	. 56
2.4.4	Instrumentación electrónica asociada a los sistemas de espectrometría	. 60
	2.4.4.1 Fuentes de alta tensión	. 61
	2.4.4.2 Preamplificadores y amplificadores de impulsos	. 61
	2.4.4.3 Discriminadores y conformadores de impulsos. Contadores e	
	integradores	. 63
	2.4.4.4 Medida del espectro de amplitudes. Analizadores multicanal	. 63
2.4.5	Respuesta de los detectores de semiconductor a la radiación gamma	. 66
	2.4.5.1 Efecto fotoeléctrico	. 67
	2.4.5.2 Efecto Compton	. 68
	2.4.5.3 Creación de pares	. 70
2.4.6	Componentes de un espectro de radiación gamma	. 71
2.4.7	Parámetros que caracterizan un detector	. 74
2.5. Des	scripción y puesta en marcha del espectrómetro Canberra XtRa modelo GX	3518
75	00SL utilizado	. 76
2.5.1	Descripción del equipo de espectrometría	. 76
2.5.2	Calibración del espectrómetro	. 79
	2.5.2.1 Patrones y fuentes utilizadas en la calibración	. 79
	2.5.2.2 Calibración en energía	. 82
	2.5.2.3 Resolución en Energía del detector	. 84
	2.5.2.4 Calibración de la eficiencia	. 90
	2.5.2.5 Razón Pico-Compton	104
2.5.3	Estudio de la radiación de fondo a la que está sometido el sistema de	
	espectrometría	107
	2.5.3.1 Contribución al fondo de los detectores de germanio	108
	2.5.3.2 Fondo del detector XtRa.	112
2.5.4	Procedimiento de cálculo de la actividad específica de muestras ambienta	les.
		121
	2.5.4.1 Límite de detección y mínima actividad detectable (MAD)	124
2.6. Inst	rumental de campaña y de laboratorio	127
2.6.1	Sistema de posicionamiento global Garmin GPS II plus	127

2.6.2	Balanza de precisión Cobos serie CB128	
2.6.3	Cedazos calibrados	
2.6.4	Estufa de secado129	
Canítulo 3	131	
Estudio	de la Radiación gamma natural a un metro del suelo. Mapas radiometricos131	
3.1. li	131	
3.2. F	l'anificacion y desarrollo de las campanas de medida	
3.2.1	Elección de los puntos de medida	
3.2.2	Procedimiento de medida de la tasa de exposición a un metro del suelo 134	
3.3. Ana	álisis geoestadístico. Determinación de los mapas de isolíneas de tasa de	
ex	posición. El método de interpolación de Kriging136	
3.4. Est	udio de la tasa de exposición a un metro del suelo. Mapas radiométricos 141	
3.4.1	Isla de Gran Canaria141	
3.4.2	Isla de Fuerteventura148	
3.4.3	Islas de Lanzarote y La Graciosa152	
3.4.4	Comparación con las Islas Canarias Occidentales157	
3.4.5	Comparación con los valores de MARNA159	
3.5. Est	udio de la tasa de dosis absorbida en aire165	
3.6. Est	udio sobre la variabilidad de la radiación de fondo en un punto fijo	
Capítulo 4 .		
Capítulo 4 .	ción de Radioisótonos en suelos de las Islas Canarias Orientales 179	
Capítulo 4 . Distribu	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	10
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	Ja
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2	ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribut 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribut 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribut 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5. Dis 4.5.1	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis ya 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2 4.5.3	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis ya 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2 4.5.3 4.5.4	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	a
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2 4.5.3 4.5.4 4.5.4	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis ya 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2 4.5.3 4.5.4 4.5.5 4.5.5	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da
Capítulo 4 . Distribu 4.1. Intr 4.2. Dis y a 4.2.1 4.2.2 4.3. Pro 4.4. Pre ga 4.5. Dis 4.5.1 4.5.2 4.5.3 4.5.4 4.5.5 4.5.6 4.6. Est	179 ción de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales	da

Capítulo 5	237
Análisis de las implicaciones dosimétricas sobre la población de las Islas Canar	ias
Orientales	237
5.1. Introducción	237
5.2. Determinación de la dosis equivalente anual de las Islas Canarias Orientale	s . 237
5.2.1 Isla de Gran Canaria	238
5.2.2 Isla de Fuerteventura	244
5.2.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa	247
5.2.4 Comparación con las Islas Canarias Occidentales	249
5.2.5 Comparación con los valores de MARNA	251
5.2.6 Comparación con estudios internacionales	254
5.3. Índices indicadores del riesgo radiológico	256
5.4. Estimación de las consecuencias dosimétricas sobre la población	260
Capitulo 6	265
Conclusiones y líneas futuras	265
6.1. Conclusiones	265
6.2. Líneas Futuras	268
Apéndice 1	271
Unidades radiológicas	271
1.1. Introducción	271
1.2. Exposición (El Roentgen)	271
1.3. Dosis absorbida (El Gray y El Rad)	272
1.4. Dosis equivalente (El Sievert y el Rem)27	
1.5. Múltiplos y submúltiplos2	
1.6. Tasa de dosis	274
Apéndice 2	275
Calibración y eficiencia del detector INa Inspector 1000	275
2.1. Introducción.	275
2.2. Calibración en energía	276
2.3. Resolución en energía	278
2.4. Eficiencia del detector	280
Apéndice 3	
Calibracion y caracteristicas de los equipos utilizados.	287
3.1. Características Ludlum	287
3.2. Hoja características del espectrómetro Inspector 1000	290

3.3. Hoja de características del espectrómetro XtRa
Apéndice 4
Códigos geológicos293
Apéndice 5
Características geológicas y geográficas de los puntos de toma de muestras 305
5.1. Gran Canaria
5.2. Fuerteventura
5.3. Lanzarote
Apéndice 6
Tablas de tasa exposición, dosis y dosis equivalente
6.1. Gran Canaria
6.2. Fuerteventura
6.3. Lanzarote
6.4. La Graciosa
6.5. Hoja de campo 331
Apéndice 7
Tablas de concentración de radionúclidos
7.1. Gran Canaria
7.2. Fuerteventura
7.3. Lanzarote
Apéndice 8
Tablas de concentración de radio equivalente, e índices de riesgo
8.1. Gran Canaria
8.2. Fuerteventura
8.3. Lanzarote
Bibliografía

Índice de figuras

Figura 1.1	Dependencia de la dosis de radiación cósmica con la altitud
Figura 1.2	Variación de la componente neutrónica con la latitud5
Figura 1.3	Cadena de desintegración del ²³⁸ U13
Figura 1.4	Cadena de desintegración del $_{92}^{235}{}_{U}$ 15
Figura 1.5	Cadena de desintegración del $_{_{90}^{232}Th}$ 19
Figura 1.6	Izquierda: Contribución de la radiación terrestre y radiación cósmica a la dosis equivalente efectiva anual. Derecha: Contribución de la radiación terrestre y radiación cósmica a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)
Figura 1.7	Contribución de las distintas fuentes a la dosis equivalente por irradiación externa efectiva anual (0,8 mSv/año) Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)
Figura 1.8	Contribución de las distintas fuentes de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)27
Figura 1.9	Radiación interna. Contribución de la serie del uranio 238 a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)27
Figura 1.10	Contribución de la serie del torio 232 como fuente de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000) 27
Figura 1.11	Mapa del Archipiélago Canario28
Figura 1.12	Mapa geológico de la isla de Gran Canaria. (Veiga et al., 2006)
Figura 1.13	Mapa geológico de Fuerteventura. Fuente: (Vera, 2004a)
Figura 1.14	Mapa geológico de Lanzarote. (Vera, 2004a)

Figura 1.15	Mapa de tasa de exposición en aire elaborado en el marco del Proyecto MARNA del CSN. (CSN, 2001)
Figura 2.1	Radiómetro portátil Ludlum Model 12S y detalles del panel de control43
Figura 2.2	Sistema basado en sonda GammaTracer de Genitron-Saphymo45
Figura 2.3	Espectrómetro portátil INSPECTOR-1000 de Canberra y detalles de sus posibilidades como radiómetro
Figura 2.4	. Radiómetro portátil ALNOR Gammameter 2414 47
Figura 2.5	Diagrama de bandas de energía para (a) aislantes, (b) semiconductores, (c) conductores
Figura 2.7	(a) Semiconductor tipo N de silicio dopado con impurezas pentavalentes de antimonio (Sb) (b) Diagrama de bandas de un semiconductor tipo N
Figura 2.8	(a) Semiconductor tipo P de silicio dopado con impurezas trivalentes de Indio(In). (b) Diagrama de bandas de un semiconductor tipo P
Figura 2.9	Unión PN en equilibrio54
Figura 2.10	(a) Polarización Directa de la unión PN. (b) Polarización Inversa55
Figura 2.11	Detector de semiconductor
Figura 2.12	Detector de unión compensado con litio. La compensación proporciona un volumen de interacción mayor
Figura 2.13	Detector HPGe Criostato y Dewar (adaptado de (Debertin and R.G., 1988b)59
Figura 2.14	Modelo 7500SL Criostato con varilla vertical (Camberra) 60
Figura 2.15	Esquema simplificado de la instrumentación asociada a los detectores de radiación
Figura 2.16	Diagrama funcional de bloques de un analizador multicanal (MCA)65
Figura 2.17	Secciones eficaces de interacción de fotones en Ge (Kovács et al., 2013)67
Figura 2.18	Representación del efecto fotoeléctrico
Figura 2.19	Representación del efecto Compton68
Figura 2.20	Interacción elástica entre un fotón y un electrón69

Figura 2.21	Representación del proceso de creación de pares70
Figura 2.22	Espectro teórico de una radiación gamma en un detector Ge71
Figura 2.23	Energía de los fotones dispersados en función del ángulo para diferentes energías de los fotones incidentes
Figura 2.24	Espectro correspondiente al ¹³⁷ Cs73
Figura 2.25	Espectro correspondiente al ⁴⁰ K en el rango de energías 100 keV- 500 keV 74
Figura 2.26	Espectro correspondiente al ⁴⁰ K en el rango de energías 500 keV- 1600 keV
Figura 2.27	Detector coaxial de germanio XtRa (izquierda) y curva típica de eficiencia comparando un XtRa con ventana de Berilio y un detector coaxial típico para una distancia fuente detector de 2,5 cm (Derecha). Adaptado de Camberra Extended Range Coaxial Ge Detectors (XtRa) Data Sheet
Figura 2.28	Detalles del panel frontal (izquierda) y trasero (derecha) del Analizador Multicanal Canberra DSA-100077
Figura 2.29	Blindaje del sistema de espectrometría gamma Modelo GX3518 7500 SL 78
Figura 2.30	Laboratorio de Radiactividad Ambiental del grupo GIRMA del Departamento de Física de la ULPGC
Figura 2.31	Espectro correspondiente al ⁴⁰ K
Figura 2.32	Espectro correspondiente al ²² Na y ¹⁵⁵ Eu
Figura 2.33	Recta de ajuste canal-energía84
Figura 2.34	FWHM para el fotopico de 1460,8 keV85
Figura 2.35	a) Dos picos perfectamente resueltos, b) Picos parcialmente solapados, c) Picos totalmente solapados
Figura 2.36	Recta de ajuste para el FWHM frente a E ^{1/2}
Figura 2.37	Curva de la R(%) frente a la energía88
Figura 2.38	Diagrama de flujo del procedimiento de calibración mediante el programa LABSOC para detectores caracterizados
Figura 2.39	Dimensiones y diseño del recipiente donde se ubica la muestra

Figure 2.40	Gráfica y polinomia do colibración gonorado por LARSOCS
Figura 2.40	Granca y polinomio de calibración generado por LABSOCS
Figura 2.41	Representación gráfica de la eficiencia para diferentes alturas
Figura 2.42	Representación gráfica del producto eficiencia por masa frente a la masa para diferentes energías
Figura 2.43	Representación gráfica de la variación relativa de la eficiencia
Figura 2.44	Gráfica del In(ef) frente a In(E)103
Figura 2.45	Representación gráfica de la eficiencia frente a la energía104
Figura 2.46	Espectro correspondiente al ⁶⁰ Co indicando los factores que intervienen en el cálculo de la Razón Pico-Compton
Figura 2.47	Izquierda: Espectro correspondiente al ⁶⁰ Co desde 1040 a 1096 keV. Derecha: Espectro correspondiente al ⁶⁰ Co en el fotopico de 1332 keV 105
Figura 2.48	Concentración de Rn del 6 al 18 de octubre en los años 2011/2012 111
Figura 2.49	Blindaje del detector112
Figura 2.50	Espectro fondo XtRa 0 -2800 keV obtenido con un tiempo de recuento de 2162872 s
Figura 2.51	Detalle del espectro fondo XtRa hasta 200 keV 115
Figura 2.52	Detalle del espectro fondo XtRa desde 200 keV hasta 400 keV 115
Figura 2.53	Detalle del espectro fondo XtRa desde 400 keV hasta 600 keV116
Figura 2.54	Detalle del espectro fondo XtRa desde 600 keV hasta 800 keV116
Figura 2.55	Detalle del espectro fondo XtRa desde 600 keV hasta 800 keV117
Figura 2.56	Detalle del espectro fondo XtRa desde 800 keV hasta 1000 keV 117
Figura 2.57	Detalle del espectro fondo XtRa desde 1000 keV hasta 1200 keV 118
Figura 2.58	Detalle del espectro fondo XtRa desde 1200 keV hasta 1400 keV 118
Figura 2.59	Detalle del espectro fondo XtRa desde 1400 keV hasta 1600 keV 119
Figura 2.60	Detalle del espectro fondo XtRa desde 1600 keV hasta 2000 keV 119

Figura 2.61	Detalle del espectro fondo XtRa desde 2000 keV hasta 2700 keV 120
Figura 2.62	Espectro fondo XtRa desde 200 keV a 620 keV con blindaje y con la puerta abierta del blindaje
Figura 2.63	Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la actividad mediante el programa GENIE-2000 (Gilmore and Hemingway, 1995)
Figura 2.64	Cálculo del área en un fotopico123
Figura 2.65	Distribución de Poisson
Figura 2.66	Límite crítico y límite de detección 126
Figura 2.67	Sistema GPS Garmin II plus
Figura 2.68	Balanza de precisión Cobos serie CB128
Figura 2.69	Cedazos calibrados para tamización de muestras128
Figura 2.70	Estufa de secado de muestras
Figura 3.1	Situación de los puntos de medida en la isla de Gran Canaria. Coordenadas UTM-huso 28
Figura 3.2	Situación de los puntos de medida en la isla de Fuerteventura. Coordenadas UTM-huso 28
Figura 3.3	Situación de los puntos de medida en la isla de Lanzarote y La Graciosa. Coordenadas UTM-huso 28
Figura 3.4	Disposición de equipos en un punto de medida135
Figura 3.5	Mapa de isolíneas de tasa de exposición en la Isla de Gran Canaria. en µR/h obtenido utilizando diversos métodos de interpolación
Figura 3.6	Diagrama de distribución de frecuencias de los datos de tasa de exposición de la Isla de Gran Canaria143
Figura 3.7	Isla de Gran Canaria. Diagrama de cajas y bigotes de los datos de tasa de exposición
Figura 3.8	Mapa radiométrico de la isla de Gran Canaria. Izquierda: Datos de las campañas de 1996-97. Derecha: Datos parciales de la campaña de 2008. 144

Figura 3.9	Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria corregido por fondo cósmico. Coordenadas UTM (huso 28)
Figura 3.10	Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria corregido por fondo cósmico y con condición de contorno 0 μR/h en el contorno de la isla146
Figura 3.11	Mapa geológico de la isla de Gran Canaria.(Carracedo, 1994)147
Figura 3.12	Diagrama de distribución de frecuencias de los datos de tasa de exposición de la Isla de Fuerteventura149
Figura 3.13	Isla de Fuerteventura. Diagrama de cajas y bigotes de los datos de tasa de exposición
Figura 3.14	Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Fuerteventura corregido por fondo cósmico. Coordenadas UTM (huso 28).150
Figura 3.15	Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Fuerteventura, corregido por fondo cósmico elaborado con todos los datos disponibles y con condición de contorno nula en la costa. Coordenadas UTM (huso 28)
Figura 3.16	Mapa geológico de Fuerteventura. (Vera, 2004b)
Figura 3.17	Diagrama de distribución de frecuencias de los datos de tasa de exposición de las Islas de Lanzarote y La Graciosa153
Figura 3.18	Isla de Lanzarote. Diagrama de cajas y bigotes de los datos de tasa de exposición
Figura 3.19	Mapa de tasa de dosis a un metro del suelo de la isla de Lanzarote. Coordenadas UTM (huso 28)155
Figura 3.20	Mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de Lanzarote con condición de contorno nulo. Coordenadas UTM (huso 28)
Figura 3.21	Mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de La Graciosa
Figura 3.22	Mapa geológico de la Isla de Lanzarote, (Vera, 2004b) 156
Figura 3.23	Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo de la Islas Canarias Occidentales

Figura 3.24	Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo correspondiente a la España peninsular Fuente: Proyecto MARNA. Mapa de radiación gamma natural. CSN colección informes Técnicos 5.2000
Figura 3.25	Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo de la Islas Canarias Orientales
Figura 3.26	Tasa exposición de las distintas provincias españolas
Figura 3.27	Mapas de tasa de exposición media por de las islas Canarias Orientales 164
Figura 3.28	Mapa de tasa de dosis absorbida en aire elaborado en el marco del Proyecto MARNA del CSN. (Quindós Poncela et al., 2004a)
Figura 3.29	Gran Canaria. Mapa de tasa dosis absorbida en aire. Coordenadas UTM 166
Figura 3.30	Fuerteventura. Mapa de tasa dosis absorbida en aire. Coordenadas UTM (huso 28)
Figura 3.31	Mapa de tasa de dosis absorbida en aire de las islas de Lanzarote y La Graciosa. Coordenadas UTM (huso 28)167
Figura 3.32	Mapa de tasa de dosis absorbida en aire de las islas Europa Occidental. (Green et al., 1992)
Figura 3.33	Mapa de tasa de dosis absorbida en aire, con la misma escala de colores que el mapa europeo de la figura 3.32 (La escala de La Graciosa no se corresponde con la escala de las otras islas)
Figura 3.34	Tasa dosis absorbida en las diferentes islas del Archipiélago 171
Figura 3.35	Tasa dosis absorbida en las diferentes islas del Archipiélago 173
Figura 3.36	Diferencia relativa porcentual respecto a la media mundial de la tasa de dosis absorbida en las islas del Archipiélago Canario
Figura 3.37	Localización de la sonda GammaTracer para la medida horaria de la tasa de exposición durante el año 2007174
Figura 3.38	Serie temporal de tasa de exposición medida por la sonda GammaTracer durante el año 2007 en Los Pechos
Figura 3.39	Frecuencias de la tasa exposición durante el periodo de un año175

Figura 3.40	Serie temporal de tasa de exposición normalizada 176
Figura 3.41	Potencia espectral de la serie temporal de tasa de exposición normalizada 176
Figura 3.42	Serie temporal normalizada sin la componente verano-invierno
Figura 3.43	Análisis espectral de la serie desestacionalizada y normalizada 177
Figura 3.44	Coeficientes de correlación de la serie desestacionalizada y normalizada 178
Figura 4.1	Mapa de tasa de exposición de las Islas Canarias Orientales
Figura 4.2	Localización de los puntos de toma de muestras de suelo sobre el mapa geológico de la Isla de Gran Canaria para la elaboración de los mapas de concentración de radioisótopos
Figura 4.3	Localización de los puntos de toma de muestras de suelo sobre el mapa geológico de la Isla de Fuerteventura para la elaboración de los mapas de concentración de radioisótopos
Figura 4.4	Localización de los puntos de toma de muestras de suelo sobre el mapa geológico de las Islas de Lanzarote y La Graciosa para la elaboración de los mapas de <i>concentración de</i>
Figura 4.5	Diagramas de frecuencias de las concentraciones de los distintos radioisótopos naturales (²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K) en la Isla de Gran Canaria 190
Figura 4.6	Izquierda: Clasificación petrológica de las rocas volcánicas. Derecha situación de las rocas de Canarias en el diagrama TAS
Figura 4.7	Mapa de concentración de ²²⁶ Ra (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria 193
Figura 4.8	Mapa de concentración de ²³² Th (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria193
Figura 4.9	Mapa de concentración de ⁴⁰ K (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria194
Figura 4.10	Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ⁴⁰ K de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.11	Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²²⁶ Ra de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona

Figura 4.12	Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²³² Th de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.13	Diagramas de frecuencias de las concentraciones de los distintos radioisótopos naturales (²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K) en la Isla de Fuerteventura 198
Figura 4.14	Mapa de concentración de ²²⁶ Ra (Bq/kg) de la Isla de Fuerteventura 199
Figura 4.15	Mapa de concentración de ²³² Th (Bq/kg) de la Isla de Fuerteventura 199
Figura 4.16	Mapa de concentración de ⁴⁰ K (Bq/kg) de la Isla de Fuerteventura
Figura 4.17	Fuerteventura. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²²⁶ Ra de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.18	Fuerteventura. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²³² Th de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.19	Fuerteventura. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ⁴⁰ K de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.20	Diagramas de frecuencias de las concentraciones de los distintos radioisótopos naturales (²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K) en la Isla de Lanzarote
Figura 4.21	Mapa de concentración de 226 Ra (Bq/kg) de la Isla de Lanzarote
Figura 4.22	Mapa de concentración de 232Th (Bq/kg) de la Isla de Lanzarote
Figura 4.23	Mapa de concentración de ⁴⁰ K (Bq/kg) de la Isla de Lanzarote
Figura 4.24	Lanzarote. Datos estadísticos correspondientes a la concentración de ²²⁶ Ra de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.25	Lanzarote. Datos estadísticos correspondientes a la concentración de ²³² Th de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona
Figura 4.26	Lanzarote. Datos estadísticos correspondiente a la concentración de ⁴⁰ K de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona

Figura 4.27-a	Comparación de las concentraciones medias de ²²⁶ Ra, ²³² Th y ⁴⁰ K del Archipiélago Canario. Izquierda: Media aritmética. Derecha: Media
	geométrica
Figura 4.27-b	Diferencia relativa porcentual respecto a la media regional de las concentraciones medias de ²²⁶ Ra, ²³² Th y ⁴⁰ K de las islas principales del Archipiélago Canario
Figura 4.28	Pruebas de ajuste a una distribución lognormal de las concentraciones de actividad de ²²⁶ Ra, ²³² Th y ⁴⁰ K de 18 autonomías de España
Figura 4.29	Valores medios de concentración de radioisótopos en las comunicadas autónomas de España. Las Líneas horizontales representan la concentración media de cada radioisótopo214
Figura 4.30	Pruebas de ajuste a una distribución lognormal de las concentraciones de actividad de ²²⁶ Ra, ²³² Th y ⁴⁰ K de 50 países
Figura 4.31	Concentración de radionúclidos en diferentes países e Islas de Europa. Comparación con las Islas Canarias Orientales
Figura 4.32	Concentración de radionúclidos en diferentes países de África y América. Comparación con las Islas Canarias Orientales
Figura 4.33	Concentración de radionúclidos en diferentes países de Asia y Oceanía. Comparación con las Islas Canarias Orientales
Figura 4.34	Deposición superficial de ¹³⁷ Cs debido, exclusivamente, a productos de fisión procedentes de pruebas de armamento nuclear en los hemisferios norte y sur (Fuente: (UNSCEAR, 2000 Anexo C)
Figura 4.35	Deposición superficial de ¹³⁷ Cs en Europa debido al accidente de Chernobyl. (extraido de (De Cort, 1998).)222
Figura 4.36	Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad de ¹³⁷ Cs de Gran Canaria y prueba de ajuste a una distribución lognormal 223
Figura 4.37	Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad de ¹³⁷ Cs de Fuerteventura y prueba de ajuste a una distribución lognormal 223
Figura 4.38	Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad de ¹³⁷ Cs de Lanzarote y prueba de ajuste a una distribución lognormal

Figura 4.39	Mapas de concentración de ¹³⁷ Cs de la Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y Tenerife
Figura 4.40	Mapas de precipitación media de las islas canarias orientales y Tenerife. Extraído del atlas climático de los archipiélagos de canarias, madeira y azores temperatura del aire y precipitación (1971-2000) elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología de España y el Instituto de Meteorología de Portugal
Figura 4.41	Inventario de ¹³⁷ Cs de la Isla de Gran Canaria suponiendo que en la capa superficial de 5 cm se retiene el 80% (a), el 60%, (b) y el 40% (c) Mapa de inventarios de la península redibujado a partir de (Legarda et al., 2011) 228
Figura 4.42	Inventario de ¹³⁷ Cs de la Isla de Fuerteventura u Lanzarote suponiendo que en la capa superficial de 5 cm se retiene el 80% (a), el 60%, (b) y el 40% (c)
Figura 4.43	Mapas de ²¹⁰ Pb en exceso y ¹³⁷ Cs de la Isla de Gran Canaria230
Figura 4.44	Distribución de frecuencias de error de la tasas de dosis absorbida teórica y experimental para distintos modelos
Figura 4.45	Mapa de tasa de exposición de la Isla de Gran Canaria obtenido a partir del modelo de Quindós et al. (izquierda) y obtenido a partir de medidas " <i>in situ</i> " (derecha)
Figura 5.1	Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Gran Canaria y prueba de ajuste a una distribución normal
Figura 5.2	Tasa dosis media mundial debida a fuentes naturales (UNSCEAR, 1988) . 239
Figura 5.3	Gran Canaria. Mapa de tasa dosis equivalente. Coordenadas UTM
Figura 5.4	Gran Canaria. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio
Figura 5.5	Zona de "Los Azulejos" en el municipio de Mogán242
Figura 5.6	Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Fuerteventura y prueba de ajuste a una distribución normal244
Figura 5.7	Gran Canaria. Mapa de tasa dosis equivalente anual de la isla de Fuerteventura. Coordenadas UTM (huso 28)

Figura 5.8	Fuerteventura. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio
Figura 5.9	Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Lanzarote y prueba de ajuste a una distribución normal
Figura 5.10	Mapa de tasa de dosis equivalente anual de las islas de Lanzarote y La Graciosa. Coordenadas UTM (huso 28)248
Figura 5.11	Lanzarote. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio
Figura 5.12	Niveles de tasa de dosis equivalente por irradiación externa de la Islas Canarias Occidentales
Figura 5.13	Promedios provinciales de dosis equivalente por irradiación externa de la España peninsular. Redibujada de MARNA:
Figura 5.14	Intervalos de dosis y valores medios de dosis equivalente anual por provincia. (Proyecto MARNA del CSN y valores medios de las Islas Canarias Orientales obtenidos en este trabajo)
Figura 5.15	Dosis anual en Europa en verano (izquierda) e invierno (derecha) del año 2006. Adaptada de (Szegvary et al., 2007b)
Figura 5.16	Niveles de tasa de dosis equivalente por irradiación externa de la Islas Canarias utilizando las misma escala que la figura 5.15
Figura 5.17	Mapas de concentración de radio equivalente (Bq/kg) de las tres Islas 259
Figura 5.18	Porcentaje de población de las Islas Canarias Orientales y dosis equivalente a la cual se ve sometida
Figura 5.19	Porcentaje de población de la España Peninsular y dosis equivalente a la cual se ve sometida
Figura 5.20	Índice de exceso riesgo de cáncer para una vida media de 70 años debido a la radiación natural gamma externa, para cada uno de los municipios de las Islas Canarias Orientales

Índice de tablas

Tabla 1.1.	Composición de la radiación cósmica primaria en capas altas de la atmósfera, y
	radiación cósmica secundaria al nivel del mar)6
Tabla 1.2.	Principales radionúclidos cosmogénicos7
Tabla 1.3.	Abundancia de potasio en los minerales10
Tabla 1.4.	Presencia de uranio en diversos tipos de rocas11
Tabla 1.5.	Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del 238 U y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la energía máxima
Tabla 1.6.	Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del 235 U y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la energía máxima
Tabla 1.7.	Rangos y concentraciones medias de ⁴⁰ K., ²³² Th y ²³⁸ U en suelos y rocas 17
Tabla 1.8.	Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del 232 Th y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la energía máxima
Tabla 2.1.	Relación de nucleídos incluidos en la fuente patrón para la calibración en energía 80
Tabla 2.2.	IAEA-RGK-1, Potassium Sulfate80
Tabla 2.3.	IAEA-RGU-1, Uranium Ore81
Tabla 2.4.	IAEA-RGTh-1, Thorium ore81
Tabla 2.5.	Relación energía-canal
Tabla 2.6.	Datos de energía-canal y resolución del espectrómetro para diversas líneas del espectro gamma
Tabla 2.7.	Resolución experimental y teórica del detector

Tabla 2.8.	Se muestra la energía, ancho de banda, resolución y factor de Fano
Tabla 2.9.	Bote de orina. Eficiencias obtenidas para las diferentes alturas95
Tabla 2.10.	Eficiencias por masa, obtenidas para las diferentes alturas
Tabla 2.11.	Ln(ef) para cada energía en función de la masa98
Tabla 2.12.	Valores de los parámetros para cada energía100
Tabla 2.13.	Valores de los términos que intervienen en el cálculo de la eficiencia y sus errores.
Tabla 2.14.	Logaritmo de los valores experimentales, de la curva eficiencia energía103
Tabla 2.15.	Relación de cuentas comprendidas entre 1040 keV y 1096 keV106
Tabla 2.16.	Energías y probabilidad de emisión de las principales emisiones gamma de las series naturales 238 U, 232 Th y el primigenio 40 K109
Tabla 2.17.	Datos de las líneas del espectro de fondo del detector XtRa113
Tabla 3.1.	Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria142
Tabla 3.2.	Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de Fuerteventura148
Tabla 3.3.	Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de las islas de Lanzarote y La Graciosa153
Tabla 3.4.	Comparativa de la tasa de exposición a un metro del suelo entre las islas Canarias Orientales y Occidentales
Tabla 3.5.	Datos provinciales de tasa de exposición a un metro del suelo en µRh ⁻¹ obtenidos del informe Marna del CSN. Los datos de Melilla han sido medidos por nuestro grupo de investigación
Tabla 3.6.	Media insulares de la dosis absorbida en aire en las Islas Canarias
Tabla 3.7.	Dosis absorbida en aire promedio en diversos países del mundo171
Tabla 4.1.	Gran Canaria. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad de las muestras para los radionúclidos determinados
Tabla 4.2.	Gran Canaria. Matriz de correlación de Pearson entre las concentraciones de actividad de los radionúclidos determinados

Tabla 4.3.	Fuerteventura. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad (Bq/kg) de las muestras para los radionúclidos determinados197
Tabla 4.4.	Fuerteventura. Matriz de correlación de Pearson entre las concentraciones de actividad de los radionúclidos determinados202
Tabla 4.5.	Lanzarote. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad (Bq/kg) de las muestras para los radionúclidos determinados203
Tabla 4.6.	Lanzarote. Matriz de correlación de Pearson entre las concentraciones de actividad de los radionúclidos determinados208
Tabla 4.7.	Medias aritméticas y rangos de variación de las concentraciones de actividad por isla y media ponderada del Archipiélago por superficie
Tabla 4.8.	Medias geométricas y rangos de variación de las concentraciones de actividad por isla y media ponderada del Archipiélago por superficie
Tabla 4.9.	Concentraciones madias de actividad en las diferentes autonomías españolas.
Tabla 4.10.	Concentración de actividad de radionúclidos en diferentes países del mundo
Tabla 4.11.	Tasa de exposición debida a rocas ígneas y sedimentarias231
Tabla 4.12.	Factores de conversión para dosis efectiva (nSv/h por Bq/kg)233
Tabla 4.13.	Factores de conversión para dosis efectiva (nGy/h por Bq/kg)233
Tabla 5.1	Medias insulares de la dosis equivalente en aire en las Islas Canarias251
Tabla 5.2	Medias provinciales y del archipiélago de la dosis equivalente en aire en las Islas Canarias
Tabla 5.3	Datos provinciales de dosis equivalente (mSva ⁻¹) obtenidos del informe MARNA del CSN Los datos de Melilla han sido medidos por nuestro grupo de investigación
Tabla 5.4	Gran Canaria. Indicadores estadísticos de la concentración de Radio equivalente (Bq/kg) e índice de Riesgo de los radionúclidos determinados

Capítulo 1

Introducción

1.1. La Radiactividad Ambiental

La principal aportación a las dosis de radiación ionizante recibidas por la humanidad procede de fuentes naturales que incluyen fuentes externas, como los rayos cósmicos y las sustancias radiactivas del suelo, y fuentes internas que pueden ser incorporadas al organismo humano por inhalación e ingestión. Las dosis procedentes de fuentes naturales de radiación dependen de varias condiciones entre las que pueden mencionarse el lugar geográfico, la altitud, el tipo de vivienda, etc. Estas condiciones hacen que los niveles de radiación natural puedan ser muy diferentes dependiendo de los suelos y las rocas de cada zona, la altitud sobre el nivel del mar, las condiciones meteorológicas, etc. En 1986 la Unión Europea (entonces CEE) a raíz del accidente de Chernobyl, alentó a los países miembros para que realizaran estudios sobre la radiactividad natural en sus territorios para poder evaluar los niveles de radiación y detectar así sus posibles incrementos por causas artificiales (IAEA, 1990).

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación a nivel celular, siendo un fenómeno complejo en el que es necesario estudiar los sucesos que se producen después de la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes, los esfuerzos del organismo para compensar los efectos de esa absorción y las lesiones y reparaciones que se pueden producir en el organismo. La aparición de estos efectos va a depender, entre otros factores, del tipo de tejido y de la capacidad de reparación del mismo. También van a influir la edad del individuo en el momento de la exposición, su estado de salud y su predisposición genética. Por tanto, no todas las personas expuestas a radiaciones ionizantes tienen la misma respuesta.

Los efectos biológicos asociados con la exposición a radiaciones ionizantes se pueden clasificar en dos categorías:

 Efectos deterministas: se producen cuando la exposición a radiaciones ionizantes originan la muerte de tal cantidad de células de un tejido u órgano que da lugar a un mal funcionamiento del mismo. La aparición de estos efectos se produce sólo cuando la dosis supera un cierto valor denominado "umbral de dosis". La gravedad del efecto va a depender de la dosis recibida. No todos los tejidos y órganos tienen la misma respuesta frente a las radiaciones ionizantes. Entre los más sensibles están los ovarios, testículos, cristalino y médula ósea, y entre los efectos deterministas se pueden destacar, las quemaduras y las cataratas.

• Efectos estocásticos: Si debido a la exposición a radiaciones ionizantes, se producen transformaciones celulares, éstas pueden dar lugar a la aparición de cáncer o enfermedades hereditarias en los descendientes de las personas expuestas. Para estos efectos no existe umbral de dosis, pero la probabilidad de que aparezcan sí depende de la dosis. En el Apéndice 1 se muestran las unidades de dosis que se utilizan para cuantificar las dosis de radiación y los límites establecidos en España.

En general se consideran tres posibles fuentes naturales, responsables de la emisión de radiación ionizante: a) La radiación cósmica, b) los radiación emitida por los radionúclidos presentes en la corteza terrestre y en el aire (radiación externa) y c) La radiación emitida por los radionúclidos incorporados al cuerpo humano por ingestión o inhalación (radiación interna).

La potencial peligrosidad de la exposición a las radiaciones ionizantes depende, en todo caso, de la dosis de radiación recibida y es una de las principales razones por las que se desarrollan programas para cuantificar la cantidad de radiación que reciben los ciudadanos por diversas causas. De forma general, este trabajo de tesis se dedica fundamentalmente al estudio de la radiación natural en las Islas Canarias Orientales¹. A continuación se analizarán las diversas fuentes que contribuyen a la dosis total recibida por los miembros del público en general, debido a la radiactividad ambiental.

1.1.1 Radiación Cósmica

Se entiende por radiación cósmica, aquella cuyo origen se debe directa o indirectamente a la radiación que proviene del espacio exterior y que incide en la atmósfera terrestre. La radiación que proviene directamente del espacio exterior se denomina *Radiación Cósmica Primaria*. Cuando la radiación cósmica primaria interacciona con los núcleos atómicos de la atmósfera, las partículas secundarias y la radiación electromagnética generada se denomina *Radiación Cósmica Secundaria*, y los radionúclidos producidos se denominan *Radionúclidos Cosmogénicos*.

1.1.1.1 Radiación Cósmica Primaria

La Radiación Cósmica Primaria (Draganić et al., 1993) debe su origen a la radiación ionizante que proviene de diversos cuerpos celestes de nuestra galaxia, incluyendo la que proviene del Sol. Tiene un elevado poder de penetración y una elevada energía cinética. Está constituida principalmente por:

¹ También se estudiará la distribución del radioisótopo de origen artificial ¹³⁷Cs que, desde mediados del siglo XX se encuentra de forma sistemática en nuestro entorno debido a la deposición (fallout) de los restos de los productos de fisión inyectados en la alta atmósfera debido a pruebas de armamento nuclear y accidentes en instalaciones nucleares (fundamentalmente Chernobyl y Fukushima).

- a) Protones de alta energía con una abundancia de aproximadamente un 89%. Su espectro energético se extiende entre 1 MeV y 10¹⁴ MeV, con un máximo que oscila alrededor de los 300 MeV.
- b) Iones de ⁴He. Su abundancia es del orden de un 9% respecto del total.
- c) Partículas pesadas, electrones, fotones, y neutrinos, en proporciones muy bajas.

Se estima que los rayos cósmicos de energía inferior a 10¹⁴ MeV se originan en nuestra galaxia, mientras que los de energía superior se formarían fuera de la misma. Debido a las heterogéneas características de la Radiación Cósmica Primaria (masa, carga y energía) los distintos componentes de la radiación cósmica se suelen clasificar en función de su poder de penetración, distinguiéndose una componente blanda, capaz de atravesar algunos centímetros de plomo y de una componente dura, que puede llegar a atravesar espesores de un metro de plomo. La atmósfera equivale, respecto a la radiación cósmica, a un blindaje de hormigón de algunos metros de espesor.

La densidad de flujo de los rayos cósmicos primarios varía con la distancia al Sol y ha variado muy poco (inferior a un factor 2) durante los últimos 10⁹ años. Para los rayos cósmicos de energía inferior a 10⁴ MeV se conocen dos factores responsables de la modificación de densidad de flujo: 1) el campo magnético terrestre, y 2) la existencia de ciclos solares. El campo magnético terrestre desvía hacia el espacio las partículas cargadas que inciden con energías por debajo de los 10 MeV. Este fenómeno depende de la latitud geomagnética, de forma que el flujo cósmico es mínimo en el ecuador geomagnético y aumenta con la latitud, siendo máximo en los polos. Las variaciones son del orden de un 10% en la baja atmósfera. La actividad solar sufre variaciones cíclicas con una periodicidad de 11 años, que afectan la densidad de flujo de los protones galácticos de baja energía E<10⁴ MeV en las capas superiores de la atmósfera terrestre. Los cambios en la intensidad de la radiación cósmica total pueden ser de un 10%. Las tormentas solares se presentan con mayor frecuencia durante los periodos de máxima actividad solar y como consecuencia de ellas se emiten grandes cantidades de energía en forma de radiaciones visibles ultravioleta, rayos X y un gran número de protones, partículas alfa (α) y otras partículas cargadas, produciéndose cambios significativos de la radiación cósmica (Measurements, 1976) Frecuentemente se observa un aumento de flujo durante los minutos iniciales de la tormenta cuando se emiten protones de energía superior a 100 MeV, para luego producirse una disminución del flujo. Solo las grandes erupciones pueden aumentar la dosis absorbida en las capas superiores de la atmósfera (UNSCEAR, 1977), debido a que este fenómeno tiene lugar en las capas altas de la atmósfera (h > 10 km), su efecto es mínimo en lo que respecta a la dosis a la altura de la superficie terrestre.
1.1.1.2 Contribución de la radiación cósmica a la dosis anual en la superficie terrestre

Como se ha venido comentando en párrafos anteriores, la exposición a los rayos cósmicos primarios está fuertemente relacionada con la altitud y una pequeña dependencia con la latitud. En los niveles inferiores de la atmósfera y al nivel del mar, la dependencia de los ciclos solares de 11 años es pequeña comparada con la incertidumbre en las estimaciones y en la actualidad no se tiene en cuenta. El método utilizado por el Comité para establecer la dosis, abarcando desde el fotón hasta los componentes directamente ionizantes de la radiación cósmica a nivel del mar, no ha cambiado sustancialmente en muchos años. En el informe UNSCEAR 1977 (Radiation, 2000) el valor que se establece para la tasa de dosis absorbida a nivel del mar es de 32 nGy h⁻¹. Suponiendo, que la fracción de tiempo promedio que se pasa en el interior es de 0,8 la dosis efectiva anual de la componente ionizante de los rayos cósmicos equivale a 240 µSv a⁻¹ a nivel del mar. Para obtener la dosis equivalente en puntos elevados sobre el nivel del mar se aplican las expresión publicadas por Bouville y Lowder (Bouville and Lowder, 1988)



$$\dot{H}_{l}(z) = \dot{H}_{l}(0)[0, 2051e^{-1.649 \cdot 10^{-3}z} + 0,795e^{4.528 \cdot 10^{-4}z}]$$
 [1.1]

Figura 1.1 Dependencia de la dosis de radiación cósmica con la altitud.

En donde $\dot{H}_{1}(0)$ es la tasa de dosis equivalente a nivel del mar, 240 µSv a⁻¹, y *z* es la altura en metros. La ecuación [1.1] tiene en cuenta la contribución a la radiación cósmica debida a las partículas cargadas. La contribución debida a la componente neutrónica viene expresada por la ecuación [1.2]:

$$\dot{H}_{N}(z) = 20e^{1.04z} \text{ si } z < 2km$$

$$\dot{H}_{N}(z) = 39, 6e^{0.698z} \text{ si } z > 2km$$
[1.2]

Tanto la tasa de dosis del fotón como las demás componentes ionizantes, dependen también de la latitud, pero en menor medida. Como se ha dicho, la tasa de dosis es de aproximadamente un 10% inferior en el ecuador geomagnético que en latitudes más extremas.

Para la componente neutrónica de la radiación cósmica la exposición a la radiación y la estimación de la dosis efectiva ha sido más incierta debido a la falta de medidas. En la actualidad se acepta que la tasa anual de dosis efectiva de neutrones a nivel del mar se estima en 80 μ Sv a⁻¹ que es sustancialmente mayor que el valor de 20 μ Sv a⁻¹, utilizados en el informe UNSCEAR 1988 y sigue siendo objeto de gran incertidumbre. Con la aplicación de un factor de blindaje de 0,8 y un factor de ocupación de 0,8, la dosis efectiva anual promedio a nivel del mar para latitudes comprendidas entre unos 40 y 50° se estima en 65 μ Sv a⁻¹.

El flujo de neutrones que surgen de las colisiones de protones de alta energía en la atmósfera superior está fuertemente influenciado por la latitud geomagnética. Esta variación, para alturas habitables no se ha verificado de manera satisfactoria, ya que medidas realizadas en diferentes latitudes no siempre han sido comparables. Medidas recientes a gran altura han mostrado una variación en un factor de cerca de 4 (Goldhagen, 2000) con los valores más bajos cerca del ecuador. Estos resultados se basan en los cálculos de Florek et al., (Florek et al., 1996) que simularon la fluencia de neutrones en función de la latitud. Sus resultados se expresan en términos de k_a coeficiente de latitud de la siguiente manera:



$$\dot{H}_{N}(lat) = \dot{H}_{N}(90)k_{\phi}(lat)$$
 [1.3]

Figura 1.2 Variación de la componente neutrónica con la latitud

En donde k_{ϕ} se le asignan los valores:

$$k_{\phi}(90) = 1; k_{\phi}(47) = 0, 8; k_{\phi}(42) = 0, 6; k_{\phi}(35) = 0, 4; k_{\phi}(0) = 0, 2$$

1.1.1.3 Radiación Cósmica Secundaria. Radionúclidos cosmogénicos.

La Radiación Cósmica Secundaria debe su origen a las reacciones de espalación entre las partículas más energéticas de la Radiación Cósmica Primaria y los núcleos de los átomos del aire. Los productos de estas reacciones consisten en protones, neutrones, y piones, junto con los denominados radionúclidos cosmogónicos, como por ejemplo ³H, ⁷Be, ¹⁰Be, ²²Na, y ²⁴Na. La Radiación Cósmica Secundaria, puede interaccionar con otros núcleos del aire y formar nuevas partículas secundarias en un proceso denominado de cascada. En general, los piones sufren procesos de desintegración, generando muones y fotones, que a su vez generan nuevas cascadas, que pueden llegar hasta las capas inferiores de la atmósfera.

Debido a que la sección eficaz de interacción de los muones con los núcleos atómicos es muy pequeña, y que se desplazan a velocidades relativistas, pueden penetrar hasta las capas inferiores de la atmósfera terrestre y atravesar los materiales de construcción. Por otro lado, también aparecen electrones por desintegración de muones, por ionización producida por partículas cargadas, y por cascada electromagnética (ver tabla 1.1).

Primaria		Secundaria		
Н	89,0%	Muones	70%	
He	9,0%	e⁺ y e⁻	29%	
Li, Be, B	0,5%	lones		
C,N,O	0,5%	pesados	1%	
Ne, Mg, Si	0,1%			
Fe	0,03%			

Tabla 1.1. Composición de la radiación cósmica primaria en capas altas de la atmósfera, y radiación cósmica secundaria al nivel del mar. (White, 1972)

Como se ha explicado anteriormente, los radionúclidos cosmogénicos son los productos de las reacciones de espalación entre la radiación cósmica primaria y los núcleos de los átomos de aire. Se forman principalmente en altas capas de la atmósfera (estratosfera), sufriendo, más tarde, procesos de difusión que los desplazan hasta capas inferiores de la atmósfera (troposfera) siendo arrastrados a la superficie terrestre por precipitación y deposición gravitatoria

En la tabla 1.2 se indican los principales radionúclidos cosmogénicos, junto con los modos de desintegración y energías de la radiación emitida. De todos ellos los únicos que tienen importancia, en lo que se refiere a efectos biológicos sobre el organismo, son el 3_1 H y el ${}^{14}_6$ C, y en menor grado el 7_4 Be y el ${}^{22}_{11}$ Na.

El ${}^{14}_{6}$ C se forma en la estratosfera principalmente mediante la reacción ${}^{14}_{7}$ N (n,p) ${}^{14}_{6}$ C. Es un radionúclido cosmogónico que tiene gran importancia en lo que se refiere a su relación con los organismos vivos. El ${}^{3}_{1}$ H se genera en la atmósfera de forma natural por acción de la radiación cósmica (y también de forma artificial en los reactores nucleares y en las explosiones nucleares), su concentración en el aire troposférico es del orden de 1 mBq/m³ (Eisenbud, 1987) Respecto al ${}^{3}_{1}$ H presente en la corteza terrestre, el 99% se halla en moléculas de agua (HTO), formando el agua tritiada. Debido a que tanto el ${}^{14}_{6}$ C como el ${}^{3}_{1}$ H son emisores de partículas beta (β) de baja energía (ver tabla 1.2), la fracción más importante de dosis depositada en los organismos vivos será de origen interno, siendo mínima su contribución a la dosis externa.

Radio- nucleído	Periodo	Principales modos de desintegración y energías expresadas en keV. Entre paréntesis, la fracción de ramificación, en %		
		γ	eta	
${}^{3}_{1}H$	12.33 años		18.6 (100) (eta^{-})	
⁷ ₄ B e	5329 días	478[10.4)		
${}^{10}_{4} \mathrm{B}\mathrm{e}$	1.6x10 ⁶ años		556(100) ($eta^{\scriptscriptstyle -}$)	
${}^{14}_{6}C$	5730 años		156[100) (eta^{-})	
$^{22}_{11}$ N $_{a}$	2.6 años	1274(99.94)	545[90.4) ($eta^{\scriptscriptstyle +}$)	
$^{24}_{11}$ N $_{a}$	14.66horas	1369(100);2754[99.9)	1393(99.9) (eta^-)	
$^{32}_{14}$ S i	172 años		224[100) (eta^{-})	
$^{32}_{15}P$	14.28 días		1710(100) (eta^{-})	
$^{33}_{15}P$	25.34 días		249[100) (eta^{-})	
$^{35}_{16}S$	87.51 días		167(100) (eta^{-})	
$^{36}_{17}{ m Cl}$	3.0x10 ⁵ años		709[98.1) (eta^{-})	
$^{38}_{16}$ S	2.84 horas	1942(10.4)	995[83) (eta^-)	
$^{38}_{17}{ m Cl}$	37.24 minutos	1640(31);2170[42)	4920(57.6); 1110(32) (β^-)	
$^{39}_{17}{ m Cl}$	55.6 minutos	250(47);1270[54.3); 1520(38.6)	1920[83) ($eta^{\scriptscriptstyle -}$)	
$^{39}_{19}{ m A}{ m r}$	269 años		565(100) (eta^{-})	

Tabla 1.2. Principales radionúclidos cosmogénicos. (Eisenbud, 1987)

El $\frac{7}{4}$ B e se detecta tanto en la atmósfera al nivel del suelo como en el agua de lluvia, en concentraciones que oscilan alrededor de los 10 mBq/m³ y 700mBq/m³ respectivamente (Eisenbud, 1987). El $\frac{22}{11}$ N a se detecta en concentraciones del orden de 1µ Bq/m³ en capas inferiores de la atmósfera y 0,1 Bq/m³ en el agua de lluvia, según (Eisenbud, 1987). Debido a su comportamiento metabólico en el ser humano y a que las radiaciones emitidas son más energéticas, su contribución a la tasa de dosis será superior a la de otros radionúclidos cosmogénicos como por ejemplo el $\frac{3}{1}$ H.

Los radionúclidos cosmogénicos contribuyen, de forma principal, a la radiación y dosis interna. En todo caso, su contribución a la dosis equivalente anual recibida por una persona en la

Tierra es muy pequeña en comparación con la debida a la radiación cósmica primaria y a la radiación terrestre.

1.1.2 Radiación terrestre

La radiactividad natural terrestre procede en su mayoría de los isótopos radiactivos, que de forma natural (radionúclidos primordiales), se encuentran en el medio ambiente (suelos, aguas superficiales y subterráneas, atmósfera) desde su formación. Entre los radionúclidos presentes en las rocas del suelo figuran los que pertenecen a las series radiactivas del uranio y el torio. En el origen de la Tierra se cree que existieron cuatro series radiactivas naturales, de las cuales sólo tres de ellas se encuentran presentes en la actualidad al estar encabezadas por un radionúclido con un periodo de semidesintegración del mismo orden de magnitud que la edad de la Tierra, que se denominan por el nombre del radioisótopo cabeza de la serie, estas son:

- Serie del uranio ²³⁸U.
- Serie del actinio ²³⁵U.
- Serie del Torio ²³²Th.

El último componente de las tres series radiactivas es un isótopo de plomo estable, o al menos con un periodo de semidesintegración superior a 10¹⁸ años. Las tres series naturales disponen de descendientes emisores de radiación alfa, beta y gamma, por ello, contribuirán tanto a los campos de radiación externa como interna. La energía de las partículas alfa emitidas por los radionúclidos de las series radioactivas oscila entre 4 MeV y 9 MeV. La energía máxima de la radiación gamma emitida es de 2614 keV. Existió una cuarta serie, denominada serie del neptunio, que tiene por radionúclido inicial al ²⁴¹Pu, elemento con un periodo de semidesintegración de 13.2 años. Esta serie natural debe su nombre al descendiente que posee el periodo de semidesintegración más largo (1,62x10⁵ años), el ²³⁷Np. Del conjunto de componentes de la cadena de desintegración sólo permanece en la Tierra, en cantidades significativas, el descendiente estable ²⁰⁹Bi, que es el último componente de la serie radiactiva.

En la corteza se encuentran también otros radionúclidos primordiales que no forman parte de series entre los que se encuentran ⁴⁰K, ⁸⁷Rb, ¹¹³Cd, ¹¹⁵In, ¹³⁸La, ⁵⁰V, etc. siendo en total unos 60 radionúclidos. No obstante, el más importante desde el punto de vista de la radiación es el ⁴⁰K, responsable de gran parte de la dosis natural y, en mucha menor medida le sigue el ⁸⁷Rb con un contribución prácticamente despreciable. Los radionúclidos en los suelos son fuentes internas y externas de exposición a la radiación para el hombre y el medio ambiente. El reparto de estos isótopos radiactivos tanto en cantidad como en tipo, depende mucho de la naturaleza de las rocas (origen geológico), así como de los parámetros climáticos, hidrológicos e historia agrícola, particularmente por el uso de fertilizantes. Además, como se ha indicado también se encuentran en el medio ambiente radionúclidos cosmogénicos transportados desde la alta atmósfera.

A continuación se describen de forma resumida las principales características correspondientes a los radionúclidos naturales más significativos que no presentan serie de

desintegración ⁴⁰K y ⁸⁷Rb, y los radionúclidos naturales que si las presentan ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th. Por su importancia en la contribución a la dosis recibida por causas naturales se detallan las características del gas radón procedente de las desintegraciones de las cadenas naturales. Finalmente se dedica un apartado a algunos radionúclidos artificiales que se pueden encontrar en la corteza terrestre, fundamentalmente el ¹³⁷Cs.

1.1.3 ⁴⁰K y ⁸⁷Rb

El potasio natural es el séptimo elemento en orden de abundancia en la corteza terrestre, supone el 2,1 % en peso. Es uno de los constituyentes fundamentales de los seres vivos. Asimismo es completamente necesario en la dieta humana. En el cuerpo humano se encuentra en una proporción de 2 g por kilogramo de masa. Presenta dos isótopos: el ³⁹K (no radiactivo) y una abundancia del 99,988% y el ⁴⁰K (radiactivo) con una abundancia del 0,0118% y un periodo de desintegración de 1,26×10⁹ años. El comportamiento radiactivo del potasio natural se debe a la presencia de este último isótopo.

El ⁴⁰K puede desintegrarse por dos vías; desintegración β , con la consiguiente emisión de partículas β^- , con una energía máxima de 1,33 MeV; y desintegración β^+ , seguido de la emisión de fotones con una energía de 1460 keV. Así pues el espectro gamma del potasio presenta un pico característico en 1460 keV, que se utiliza en espectrometría para determinar el contenido en potasio de suelo y rocas. Según el informe (UNSCEAR, 1988) su contribución al fondo de radiación, en zonas calificables de normal, se evalúa con 0,15 *mSva*⁻¹ a la radiación interna, y 0,18 *mSva*⁻¹ a la radiación externa.

Al presentarse el ⁴⁰K en una proporción del 0,0118% del potasio natural, su abundancia media en la corteza terrestre es de unas 2,5 ppm ($_{2,1}\cdot10^{-2}\times1,18\cdot10^{-4}\simeq2,5\cdot10^{-6}$) presentando por tanto, una actividad media en las rocas de unos 657 *Bq/Kg*. Teniendo en cuenta que en el hombre el potasio natural se encuentra en una proporción de 2 g por cada kilo de peso, la actividad en el cuerpo humano es 62 *Bq/kg*. Un 1% de potasio natural se corresponde (White, 1972) a una actividad de 310 *Bq/kg* y produce una tasa de exposición (Spier et al., 1981) de 1,505 μRh^{-1} y por tanto, una tasa de dosis absorbida en aire de:

1,505 $\mu R h^{-1} \times 8,69 \cdot 10^{-3} Gy / R = 13,1 n Gy h^{-1}$.

Los minerales en los que el potasio se presenta con mayor frecuencia, son los silicatos y cloruros. En la tabla 1.3 se muestra el contenido en potasio y la actividad específica asociada de distintos tipo de minerales.

El ⁸⁷Rb se desintegra por emisión β^- , con un periodo de 4,8x10¹⁰ años. La energía máxima de las partículas beta emitidas es de 0,274 MeV, sin la emisión de radiación gamma. Se encuentra distribuido en la corteza terrestre y en el cuerpo humano al igual que ocurre con el

potasio. La composición típica en las rocas oscila entre los 10 ppm y 200 ppm, lo que implica actividades específicas que pueden variar entre 0,007 Bq/g y 0,019 Bq/g, siendo ciertos tipos de granito los que contienen la mayor concentración.

Mineral	Potasio Contenido en %	Actividad específica (Bq/g)
Sienita	5,06	1,47
Granito A ¹	4,96	1,29
Esquistos	3,14	0,81
Granito B ²	2,97	0,77
Arcilla de sedimentos marinos	2,95	0,76
Arenisca	1,26	0,33
Basalto	0,98	0,25
Carbonatos de Sedimentos marinos	0,34	0,09
Carbonatos	0,32	0,08
Roca ígnea ultra-básica	0,0047	0,001

 Tabla 1.3.
 Abundancia de potasio en los minerales (Kathren, 1986)

La contribución a la tasa de dosis externa del resto de radionúclidos primordiales que no forman cadena de desintegración es insignificante debido a que su concentración en el terreno es muy baja, y además la radiación emitida consiste, mayoritariamente, en radiación alfa y beta de baja energía, caracterizada por su corto alcance en aire.

1.1.4 El Uranio

El uranio natural que se encuentra en la Tierra está compuesto fundamentalmente por tres isótopos de número másico: 234, 235 y 238. La abundancia isotópica del ²³⁸U en la corteza terrestre es del 99,28%, y generalmente se encuentra en equilibrio con el ²³⁴U ya que éste forma parte de la cadena de desintegración del uranio y tiene una abundancia del 0,0058%. La abundancia isotópica del ²³⁵U, isotopo padre de la denominada serie del actinio, es del 0.71%. El uranio se presenta en la naturaleza con las valencias +4 y +6. (Mahou and Amigot, 1996). En las condiciones oxidantes que existen en la superficie terrestre, forma compuestos de valencia +6 que son muy móviles y forman numerosas especies minerales cuando se alcanzan altas concentraciones de uranio (pechblenda, uraninita, óxidos negros). En condiciones ambientales reductoras, el uranio produce precipitados insolubles de valencia +4 (p.e. en las arcillas bituminosas, arcillas negras y las ampelíticas). Este comportamiento condiciona su transporte y distribución.

¹ Granito con baja concentración de calcio.

² Granito con alta concentración de calcio.

El uranio se encuentra presente en mayor o menor proporción en toda la corteza terrestre como elemento traza en los minerales más frecuentes, sirvan como ejemplo, el cuarzo, los feldespatos, las micas o las plagioclasas. En la tabla 1.4 se indican las concentraciones típicas de uranio en diversos tipos de roca. Se observa que las concentraciones más elevadas se encuentran en las rocas de fosfatos siendo la concentración de uranio del orden de 120 ppm. Es interesante destacar, por su relación con el área de estudio de este trabajo de Tesis Doctoral, las Islas Canarias, que las rocas ígneas ácidas presentan una concentración de uranio cien veces superior a las rocas ígneas básicas que además son, si se exceptúan los meteoritos, las rocas con menor concentración de uranio.

Tipo de roca	Concentración (ppm)
Roca de fosfatos	120
Esquistos bituminosos	50-80
Roca de fosfatos	20-30
Granito común	4
Ígnea ácida	3,0
Ígnea intermedia	1,5
Roca caliza	1,3
Otras rocas sedimentarias	12
Ígnea básica	0,6
Ígnea ultra básica	0,03
Meteoritos	0,003

Tabla 1.4. Presencia de uranio en diversos tipos de rocas. (Eisenbud,
1987)

En las aguas superficiales el contenido medio de uranio es de 0,3 ppb, oscilando entre 0,02 y 6,6 en los grandes ríos. El las aguas del mar, el contenido oscila entre 1 y 6 ppb. En las aguas subterráneas de zonas mineralizadas el uranio puede alcanzar las 500 ppb.

1.1.4.1 Serie del ²³⁸U

En la tabla 1.4 se presentan los componentes de la serie natural del ²³⁸U, junto con sus características principales como el periodo de semidesintegración, el modo de desintegración, la energía de la radiación generada y su intensidad relativa. Al igual que el uranio, algunos de sus descendientes también estarán presentes en todos los tipos de rocas y suelos en proporciones variables, así como también en el agua y aire atmosférico. El periodo de semidesintegración del ²³⁸U es de 4,468x10⁹ años. Se desintegra por emisión alfa generando una cadena de descendientes (ver figura 1.3) que se pueden agrupar en 5 subseries. También puede sufrir fisión espontánea, pero con una proporción muy pequeña. La primera subserie de la cadena de desintegración es la que va del ²³⁸U a ²³⁴U y como se ha dicho debido a la elevada vida media de

estos dos radionúclidos es usual encontrarlos en equilibrio en las rocas y suelos. En aguas, sin embargo, esto no ocurre debido a procesos geoquímicos ya que el ²³⁴U presenta en este caso mayor movilidad. En la tabla 1.7 se muestran los valores típicos de concentración de ²³⁸U en diversos tipos de roca.

Particular importancia tiene la subserie del radioisótopo ²²⁶Ra que es el más importante en cuanto a la dosis de radiación aportada al hombre por él mismo y sus descendientes (IAEA, 1990). Procede del ²³⁰Th (segunda subserie), que, a su vez, es un producto intermedio de la serie de desintegración. El ²²⁶Ra es un emisor α y y que decae, con una vida media de 1622 años, y en el ²²²Rn (cuarta subserie) gas radiactivo con una vida media de 3,8 días, responsable de la mayor dosis natural al ser humano, y que dada su importancia, se describirán más delante. La desintegración del ²²²Rn es seguida una cascada de desintegraciones a y ß de sus descendientes (progenie del radón) de corta vida media (entre 1,6×10⁻⁴ y 26,8 minutos) que conduce al ²¹⁰Pb (quinta subserie), tiene una vida media de 22 años y es uno de los radionúclidos utilizados como trazador ambiental, debido a su constante producción en aire. Este radionúclido decae a través del ²¹⁰Bi en ²¹⁰Po con vida media 138 días, finalmente mediante emisión α llega al ²⁰⁶Pb estable. El ²²⁶Ra está siempre presente en los minerales que contienen uranio y en suelos en cantidades variables. Las rocas ígneas tienden a contener una mayor concentración de radio que las areniscas o calizas. Algunos estudios (Rankama and Sahama, 1960) estiman una concentración media de 16 Bg/kg en las calizas frente a 48 Bg/kg de las rocas ígneas. El 226Ra está generalmente en equilibrio aproximado con el ²³⁸U y se puede utilizar este radionúclido para la cuantificación de la actividad del ²³⁸U.

1.1.4.2 Serie del ²³⁵U

El ²³⁵U es el elemento cabecera de la serie radiactiva de desintegración natural del uranioactinio y posee un periodo de semidesintegración de 7,037x10⁸ años. Sufre desintegración alfa y también puede sufrir fisión espontánea aunque en una proporción muy pequeña. En la figura 1.5 se detallan los descendientes de la serie radiactiva y sus modos de desintegración, y en la tabla 1.7 los tipos de partículas y energías producidas en la desintegración de los descendientes de la cadena. La serie termina en el ²⁰⁷Pb (estable) después de siete emisiones alfa y cuatro emisiones beta. Evidentemente estas emisiones van acompañadas de emisión de radiación gamma de distintas energías. El radionúclido de vida más larga de la cadena de del propio ²³⁵U es el ²³¹Pa con una vida media de 3,2x10⁴ años que, a través del ²²⁷Ac y del ²²⁷Th, da lugar al ²²³Ra. Al desintegrarse mediante una emisión alfa este elemento produce ²¹⁹Rn, también conocido como actinon que al igual que ocurre con la serie del ²³⁸U, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas y puede difundirse a la atmósfera. A pesar de ello, su importancia radiológica es insignificante, debido a que los periodos de semidesintegración del ²¹⁹Rn (4,0 s), y de sus descendientes (<1s) son varios órdenes de magnitud inferior a los procesos de transporte atmosféricos.



Figura 1.3 Cadena de desintegración del ²³⁸U.

Tabla 1.5. Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del ²³⁸U y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la energía máxima. (Firestone, 1996) (Browne and Firestone, 1986)

Radionúclido	Periodo	Principales modos de desintegración y energías expresadas en KeV. Entre paréntesis, la fracción de ramificación en %.			
		α	eta	γ	
²³⁸ ₉₂ U	4,463 x 10 ⁹ años	4147 (23) 4196 (77)		16,2 (4,1) 13 (3)	
²³⁴ ₉₀ T h	24,1 días		106,3 (7,6), 106,7 (19,2) 199,1 (70,3)	13,3 (3,9), 16,6 (4,4), 63,3 (3,8), 92,6 (5,41)	
²³⁴ ₉₁ Pa ^m	1,17 minutos		2197 (98,2)	94,7 (0,12), 98,4 (0,2),766,4(0,2),1001 (0,7)	
²³⁴ ₉₁ P a	6,70 horas		414,5 (8), 473,6 (33) 474,1 (12,4), 644,4 (19,4) 1173,3 (3,9), 1270,6 (4,8)	13,6 (43), 17,1(52), 20,3(11,8), 94,7(15,7), 98,4(23,3), 131,3 (20), 569,5(10,7), 883,2 (12)	
²³⁴ ₉₂ U	2,454 x 10 ⁵ años	4723 (27,5) 4776 (72,5)		53,2 (0,12)	
²³⁰ ₉₀ T h	7,54 x 10 ⁴ años	4621 (23,4) 4687 (76,3)		67,7 (0,4), 143,9 (0,05)	
²²⁶ ₈₈ R a	1600 años	4601,4 (5,55) 4687 (76,3)		83,8 (0,3), 186,1 (3,3)	
² ² ² ² ² ² ^R n	3,825 días	5489,7 (99,92) 46784 (94,45)		510 (0,07)	
² ¹⁸ ₈₄ P 0	3,11 minutos	6002,55(~100) 46784 (94,45)	264 (~0,019)		
²¹⁴ ₈₂ P b	26,8 minutos		727,8 (40,5) 987,1 (46) 1023 (9,3)	74,8 (6,5) 77,1 (11) 241,9 (7,5) 295,1 (19,2) 351,9 (37,1)	
²¹⁸ ₈₅ A t	1,6 s	6654 (6) 6695 (90) 6748 (4)	<2883 (0,01)		
²¹⁸ ₈₆ R n	35 ms	6534,9 (0,16) 7133,1 (99,8)		609,3 (0,12)	
²¹⁴ ₈₃ B i	19,9 minutos	5450 (0,011) 5513 (0,0023)	1507,5(16,9) 1992,4(17,5) 3272 (19,9)	609,3 (46,1) 768,4 (4,9) 934 (3,2) 1120,3 (15) 1238,1 (5,9) 1378,4 (4) 1764,5 (15,9) 2204,1 (5)	
² ¹ ⁴ ₈ ⁴ P o	163,69 µs	7686,9 (99,98)		797,9 (0,0104)	
²¹⁰ ₈₁ TI	1,3 minutos		4386,3 (20)	298,1 (79) 768,4 (4,9) 860 (6,9) 1068 (12) 1110 (5,9) 1208 (17) 1314 (21) 2008 (6,9) 2358 (8) 2428 (9)	
² 1 0 8 2 P b	22,3 años	3720 (2 x 10 ⁻⁶)	16,96 (84) 63,5 (16)	10,8 (9,2) 13,1 (10,4) 43,5 (4,1)	
²¹⁰ ₈₃ Bi	5,013 días	4648,3 (60) 4686,7 (40)	1162 (~100)	266,2 (4 x 10 ⁻⁵) 305,3 (6 x 10 ⁻⁶)	
²¹⁰ ₈₄ P o	138,38 días	5304,4 (100)		80,13 (0,0011)	
²⁰⁶ ₈₁ T I	4,20 minutos		1533,2 (99,9)		
²⁰⁶ ₈₂ P b	Estable				



Figura 1.4 Cadena de desintegración del $\frac{235}{92}$ U

Tabla 1.6. Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del ²³⁵U y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la energía máxima. . (Firestone, 1996) (Browne and Firestone, 1986)

Radionúclido	Periodo	Principales modos de desintegración y energías expresadas en keV. Entre paréntesis, la fracción de ramificación en %			
		α	eta	γ	
²³⁵ ₉₂ U	7,037 x 10 ⁸ años	4364 (11) 4395 (55) 578 (9,2)		12,95 (22) 16,12 (15) 19,2(2,6) 89,86 (3,4) 93,4 (5,5) 105,36 (1,98) 109,18 (1,5) 143,79 (10,5) 163,38 (4,7) 185,74 (53) 202,14 (1,0) 205,33 (4,7)	
²³¹ ₉₀ Th	1,0633 horas		142,2(2,7) 206 (12,8) 287,2(12) 288,1(37) 305,3(35)	11,37(~3) 13,27 (~49) 16,56(37) 19,81 (7,4) 25,64 (14,6) 84,2 86,6)	
²³¹ 91 91	3,276 x 10 ⁴ años	4950,5 (22,8) 5013,1 (25,4) 5029,2 (20) 5058,7 (11)		10,87 (1,2) 12,64 (22) 15,66 (25) 18,61 (5,9) 27,4 (9,3) 283,67 (1,6) 300,1 (2,4) 302,67 (1,7) 330,07 (1,3)	
²²⁷ ₈₉ A c	18,718 días	5709,7 (8,2) 5714,2 (4,9) 5757,1 (20,3) 5977,9 (23,4) 6038,2 (24,5)		12,33(17) 15,22(21) 17,99(4,8) 50,14(8,5) 79,72(2,1) 88,47(3,1) 235,97(11,2) 256,24(6,7) 299,97 (2,1) 329,84 (2,73)	
²²³ ₈₇ F r	21,8 minutos	5340 (0,006)	914,3 (10) 1069,4 (16) 1099 (67)	12,33(16) 15,21(19) 50,14 (33) 79,72(8,9) 85,4(2,4) 88,47(4) 234,8(3,7)	
²²³ ₈₈ R a	11,43 días	5606,9 (24,2) 5716,4 (52,5) 5747,2 (9,5)		$\begin{array}{c} 11,71(10,2) \ 14,3(9,8) \\ 16,9(1,9) \ 81,07(15,2) \\ 83,79(25,2) \ 94,68(8,9) \\ 97,9(2,8) \ 269,4(13,6) \\ 323,9(3,9) \ 338,3(2,8) \\ 444,9(1,3) \end{array}$	
²¹⁹ ₈₆ R n	3,96 segundos	6425 (7,5) 6553,1 (12,2) 6819,3 (80,9)		271,13(99) 401,7(6,64)	
²¹⁹ ₈₅ At	54 segundos	6275 (7,5)	1700 (3)		
²¹⁵ ₈₃ Bi	7,4 minutos		2250		
² ¹⁵ ₈₄ P 0	1,78 ms	7386,4 (~100)	721 (~0,00023)	4438,8 (~0,04)	
²¹¹ ₈₂ Pb	36,1 minutos		541 (6,3) 968,1 (1,5) 1373 (91,3)	404,9(3,8) 427(11,7) 831,9(3,8)	
²¹⁵ ₈₅ A t	100µs	8023 (99,95)		404,86(0,045)	
²¹¹ ₈₃ B i	2,14 minutos	6279 (15,96) 6623 (83,77)	579 (0,276)	72,87 (12,8)	
²¹¹ ₈₄ Po	516 ms	7450,6 (98,92)		569,15(0,53) 897,23(0,52)	
²⁰⁷ ₈₁ TI	4,77 minutos		1423 (99,73)	897,23(0,24)	
²⁰⁷ ₈₂ Pb	Estable				

El impacto en la dosis recibida por radiación natural de la serie del ²³⁵U es muy poco significativa, ya que, como se ha dicho, este elemento supone sólo un 0,72% en peso del uranio

natural y no se encuentra en concentraciones significativas en las rocas siendo la relación de actividades ²³⁵U/²³⁸U menor que 0,05. No obstante, desde el punto de vista de la radiación artificial el ²³⁵U es muy importante porque se utiliza para la fabricación de elementos combustibles de las centrales nucleares y, en menor medida para el armamento. Esto implica procesos industriales de concentración que si tienen impacto radiológico.

1.1.5 El Torio

El torio es un elemento más abundante en la naturaleza que el uranio, se encuentra también muy disperso en la corteza terrestre puesto que se localiza en los minerales como sustituciones isomorfas de otros elementos (Mahou and Amigot, 1996). El torio sólo se presenta en minerales con valencia +4, lo que hace que tenga un comportamiento similar al uranio tetravalente. De esta forma, acompaña al uranio cuando se trata de concentraciones de uranio 4 formando torianita (óxido de torio). Torita (silicato de uranio y torio) o torogumita (óxido de torio y uranio) que son minerales fundamentalmente de torio. Otras veces forma concentraciones que también pueden llevar uranio como sucede en la monazita, (fosfato de torio, cerio, lantano neodimio itrio, etc.). En la tabla 1.7 (Eisenbud, 1987) se muestran los valores típicos de concentración de ²³²Th en diversos tipos de roca.

En la naturaleza, el torio y el uranio se encuentran según una relación promedio Th/U de 3/1 (entre 2/1 y 4/1), que domina en las rocas graníticas, sedimentarias y metamórficas derivadas. La relación Th/U varía, en general, según las condiciones de movilización del uranio, pudiendo ser alta si hay pérdida de uranio como ocurre en algunas arcillas residuales. En ciertas rocas sedimentarias y de deposición química la relación es mínima (aproximadamente 1 en sales y carbonatos). Los valores más altos de la relación (superiores a 4) se encuentran en las rocas ígneas básicas y ultrabásicas debido a su bajo contenido en uranio (<1 ppm).

En las aguas superficiales y subterráneas el torio se disuelve como Th(OH)₄, pero la escasa solubilidad de este compuesto hace que apenas emigre del lugar donde se originó. En las aguas marinas y continentales los contenidos de torio presentan valores generalmente inferiores 0.05 ppb.

En la naturaleza se encuentran dos isótopos de vida larga del torio: ²³²Th y ²³⁰Th y cuatro de vida corta: ²³⁴Th, ²³¹Th, ²²⁸Th y ²²⁷Th. De ellos el más importante es el ²³²Th que tiene un periodo de semidesintegración de 1,405x10¹⁰ años (tres veces mayor que el del ²³⁸U) y es cabeza de una serie de desintegración. El ²³⁰Th, que tiene un periodo de semidesintegración de 75400 años, es como se ha dicho, un producto intermedio en la cadena de desintegración del ²³⁸U, por lo que está generalmente presente en los minerales que contienen uranio. A continuación se detallan las principales características de la cadena de desintegración de ²³²Th.

	⁴⁰ K		²³² Th		²³⁸ U	
Material	% K total	Bq kg⁻¹	ppm	Bq kg⁻¹	ppm	Bq kg⁻¹
		Roca	as ígneas			
Basaltos	0,8	300	3-4	10-15	0,5-1	7-10
Máficos	0,3-1,1	70-40	1,6; 2,7 ¹	7 ; 10 ¹	0,5 ; 0,9 ¹	7;10 ¹
Sálicos	4,5	1100-1500	16 ; 20 ¹	60 ; 80 ¹	3,9 ; 4,7 ¹	50 ; 860 ¹
Granito	>4	>1000	17	70	3	40
		Rocas s	edimentari	as		
Areniscas	2,7	800	12	50	3,7	40
Cuarzo puro	<1	<300	<2	<8	<1	<10
Cuarzo Impuro	2?	400?	3-6?	10-25?	2-3?	40?
Arena de playa	<1	<300	6	25	3	40
Carbonatadas	0,3	70	2	8	2	25
Resumen Rocas ² l	0,3-4,5	70-1500	1,6-20	7-80	0,5-4,7	7-60
Corteza continental	2,8	850	10,7	44	2,8	36
Suelos en promedio	1,5	400	9	37	1,8	22

Tabla 1.7. Rangos y concentraciones medias de 40 K., 232 Th y 238 U en suelos y rocas.

1.1.5.1 Serie del ²³²Th

El ²³²Th se desintegra por emisión alfa generando una cadena de descendientes que se pueden agrupar en 3 subseries (ver figura 1.5). La primera está compuesta sólo por el propio ²³²Th y tiene poca significación desde el punto de vista dosimétrico. En zonas de fondo calificable de normal sólo supone un 0,12% de la dosis total.

La segunda subserie tiene por elementos más significativos el ²²⁸Ra, antiguamente denominado mesotorio, de periodo relativamente largo (5,75 años). Es un emisor beta y gamma y está presente en los minerales que contienen torio, también se encuentra en mineralizaciones de uranio tetravalente. A partir de este elemento, y pasando por el ²²⁸Th se llega al ²²⁴Ra, uno de los isótopos del radio de corto periodo (3,66 días).

¹ Media y mediana respectivamente.

 ² Se especifica el rango basado en las filas anteriores. Según indica el autor se pueden encontrar ejemplos de materiales fuera de estos rangos pero en cantidades relativamente pequeñas.



Figura 1.5 Cadena de desintegración del $^{232}_{90}Th$

Tabla 1.8.	Modos de desintegración de los radionúclidos de la cadena de desintegración del
	^{232}Th y energía de la radiación generada. En el caso de partículas β se indica la
	energía máxima (Firestone, 1996) (Browne and Firestone, 1986)

Radionúclido	Principales modos de desintegración y energías expres keV. Entre paréntesis, la fracción de ramificación en %.			
		α	eta	γ
232 T b	1 405 × 10 ¹⁰ cõco	3952 (23)		
90	1,403 x 10 anos	4010 (77)		
²²⁸ 88 R a	5,75 años		14,9 (40) , 39,23 (60)	12,76 (19) 13,5(100) 15,5 (10) 15,8 (13)
²²⁸ / ₈₉ A c	6,13 horas	4270	481,0 (4,2) 595,5 (8,1) 958,6 (3,5) 973,5 (5,6) 1004,1 (5,8) 1104,5 (3,0)	12,95 (15) 16,15 (20)
			1730,1 (11,6) 2069,2 (10)	338,4 (12) 911,16 (29) 968,97 (17,4)
²²⁸ ₉₀ T h	1,913 años	5340 (26,7) 5432 (72,7)		12,33 (3,1) 15,23 (4,7) 94,26 (1,2) 215,75 (9,3)
²²⁴ ₈₈ R a	3,66 días	5449,1 (4,9) 5685,5 (95,1)		240,76 (3,9)
²²⁰ ₈₆ R n	55,6 segundos	6288,29 (99,93)		549,7 (0,07)
²¹⁶ ₈₄ P 0	0,150 segundos	6778,5 (99,998)		804,9 (0,0018)
²¹² ₈₂ P b	10,64 horas		158,4 (5,2) 335,1 (82,5) 573,7 (12,3)	10,83 (6,6) 13,1 (6,0) 74,8 (10,5) 77,2 (17,7) 87,2 (6,3) 238,58 (43,6) 300,03 (3,3)
²¹² ₈₃ Bi	60,55 minutos	6051 (25,23) 6090,1 (9,63)	1526,7 (4,4) 2254(55,5)	10,26 (3,0) 12,8 (3,5) 39,85 (1,1) 727,25 (6,7) 785,51(1,1) 1620,66 (1,5)
² ¹² ₈₄ P 0	298 ns	8784,4		
²⁰⁸ ₈₁ T I	3,053 minutos		1292,5 (24,5) 1525,8 (21,3) 1803,2 (48,7)	74,97 (3,6) 277,28 (6,8) 510,61 (21,6) 583,02 (86) 860,3 (12) 2614, 35 (99,79)
²⁰⁸ ₈₂ P b	Estable			

La tercera subserie comienza en el ²²⁰Rn, denominado también torón por proceder de la serie del torio. Este radioisótopo, descendiente del ²²⁴Ra, es el más abundante de los tres isótopos de radón. Su poder de emanación es unas 100 veces superior al ²²²Ra, pero desaparece rápidamente en la atmósfera debido a su corto periodo de semidesintegración de tan sólo 55,6 segundos. El ²²⁰Rn es emisor alfa y gamma y en su desintegración da lugar al ²¹⁶Po. Por debajo del ²²⁰Rn la serie del torio no tiene términos de vida larga. Dada la importante contribución del radón a la dosis anual en la radiactividad natural, se dedica más adelante un epígrafe a tratar su problemática. El equilibrio entre el ²²⁰Rn y su progenie se alcanza a un ritmo dominado por el tiempo requerido para el crecimiento del ²¹²Pb (vida media 10,6 h). Entre estos descendientes cabe destacar el ²⁰⁸TI que en su desintegración presenta un pico gamma característico de 2615 MeV que se puede utilizar en medidas ambientales para determinar el torio equivalente. La serie finaliza en el ²⁰⁸Pb estable procedente el anterior por emisión alfa.

1.1.6 El Radón

Según se ha descrito anteriormente, en las tres series radiactivas naturales, la serie del uranio, la del torio y la del actinio poseen entre sus elementos un isótopo radiactivo del radón, concretamente ²²²Rn, ²²⁰Rn y ²¹⁹Rn, respectivamente. El isótopo que pertenece a la cadena del ²³⁸U se denomina radón, con un periodo de semidesintegración de 3,8 días, el que pertenece a la cadena del torio se denomina torón, que posee un periodo de semidesintegración de 55 segundos, y el que pertenece a la cadena del actinio se denomina actinión, con un periodo de desintegración de 4,0 segundos. Dichos isótopos del radón se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura, y además su capacidad de reaccionar para formar compuestos moleculares es muy pequeña, al tratarse de un gas noble. Ello permite que una vez que se ha producido en el interior de la corteza terrestre, posea la capacidad de alcanzar la atmósfera por difusión molecular o por convección a través del terreno, de este modo será posible encontrar radón y torón mezclados con los gases atmosféricos y su distribución dependerá de los procesos atmosféricos y tipo del terreno. Debido a que los procesos de difusión y convección en el terreno, y los procesos atmosféricos tienen unos tiempos de evolución muy superiores al periodo de desintegración del torón, y en mayor grado del actinión, estos isótopos del radón no serán de gran interés radiológico en lo que respecta a su presencia en la atmósfera. Por tanto a la hora de evaluar la contribución a la dosis natural recibida por el público debido al radón solo se suele tener en cuenta el 222 Rn.

Los descendientes del ²²²Rn se pueden dividir en dos grupos (ver figura *1.3*) en función del periodo de desintegración: el grupo de *descendientes de vida corta* formado por los isótopos radiactivos ²¹⁸Po,²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po, y el grupo de los *descendientes de vida larga* constituido por ²¹⁰Pb, , ²¹⁰Bi y ²¹⁰Po. En último lugar de la cadena de desintegración del radón se encuentra el ²⁰⁶Pb que es estable. En la cadena de desintegración del torón sólo existen radionúclidos de vida corta siendo el de vida más larga el ²¹²Pb con un periodo de 10,6 horas. En último lugar se encuentra el ²⁰⁷Pb que es estable. La peligrosidad radiológica el radón está asociada

fundamentalmente en sus descendientes de vida corta: en concreto el ²¹⁸Po y ²¹⁴Po. Existe también una exposición externa causada por la radiación gamma directa, pero el verdadero riesgo está en la radiación alfa. Si bien, la radiación alfa es relativamente poco peligrosa por irradiación externa ya que la epidermis proporciona un blindaje efectivo, cuando se inhala el Rn, las partículas radioactivas se adhieren al tejido del tracto pulmonar, donde someten a una irradiación alfa a las células broncopulmonares. La absorción de esta radiación provoca ionizaciones y excitaciones de las estructuras celulares provocando efectos lesivos: puede dañar directa e indirectamente el DNA y provocar mutaciones en el tejido pulmonar que pueden derivar en cáncer. En USA está considerada la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón después del tabaco. Además, sus efectos son sinérgicos: fumar y vivir en una casa con alto contenido de radón aumenta el riesgo unas 46 veces más que de darse los 2 fenómenos por separado.

El principal foco de radón (en la inmensa mayoría de los casos) es el terreno, y la causa es su contenido natural en uranio y torio, de los cuales se generará el ²²⁶Ra que engendrará el radón en su proceso de desintegración. Así, mientras que las rocas basálticas poseen 1 ppm de uranio y 4 ppm de torio, las areniscas, al igual que las carbonatadas poseen 0,5 ppm de uranio y 1,7 ppm de torio, las arcillosas poseen 3,5 ppm y 11 ppm respectivamente, las graníticas poseen 5 ppm de uranio y 12 ppm en torio, poseyendo un mayor potencial emisor de radón. Es por esto que durante las últimas décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la concentración de radioisótopos naturales en prácticamente todos los continentes, lo que justifica la pertinencia del estudio que se ha llevado a cabo en este trabajo de Tesis Doctoral.

Dada la potencial peligrosidad de altas concentraciones de radón en las viviendas, la Comisión de las Comunidades Europeas, emitieron la Recomendación (Europeas, 1990) relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. En ella se recoge la recomendación de que se establezca un sistema adecuado para limitar toda exposición a las concentraciones de radón en el interior de edificios, prestando especial atención a la adecuada información al público. Así mismo, establece un nivel de actuación en edificios ya existentes de 400 Bq/m³, y para edificios de nueva construcción de 200 Bq/m³.

1.1.7 El ¹³⁷Cs

Como se indicó en la introducción, además de los radioisótopos primordiales y radiogénicos, en el ambiente se pueden encontrar radioisótopos artificiales, procedentes de la actividad industrial del ser humanos. Desde el inicio de la era nuclear a mediados del siglo XX, ha habido tres fuentes de contaminación radiactiva a gran escala: las pruebas atmosféricas de armamento nuclear y los accidentes de las centrales nucleares de Chernobyl (UNSCEAR, 1988), (UNSCEAR, 2000) y Fukushima. Estas fuentes han producido depósitos radiactivos en los suelos en diferente grado, dependiendo de su localización en la Tierra.

Las pruebas de armamento nuclear han sido, con diferencia, la fuente principal de introducción de radioisótopos en el medio ambiente. Entre todos los radionúclidos emitidos, el ¹³⁷Cs es el que contribuye principalmente la dosis a largo plazo entre la población (UNSCEAR, 1982), (NCRP, 2007) y por eso es importante conocer el contenido y el comportamiento de este radionúclido en aire, suelos y agua.

El ¹³⁷Cs es un isótopo radiactivo de cesio que se produce principalmente por fisión nuclear. Tiene un periodo de semidesintegración de 30,23 años, y decae emitiendo partículas β⁻ al isómero nuclear metaestable ^{137m}Ba. Este último radioisótopo tiene una vida media de 2,55 minutos y es el responsable de todas las emisiones de rayos gamma decayendo finalmente en el ¹³⁷Ba estable. Se genera como producto de fisión del ²³⁵U en las pruebas nucleares de armamento a un ritmo de 6,3 PBq por megatón. También se produce de forma regular en los reactores comerciales siendo un componente traza de sus efluentes líquidos de bajo nivel. El comportamiento biológico de ¹³⁷Cs es similar al del potasio. Después de entrar en el organismo, se distribuye uniformemente por todo el cuerpo, con mayor concentración en el tejido muscular y menor en los huesos. La vida biológica media del cesio es corta, aproximadamente de 50 días.

A partir del año 1954 el ¹³⁷Cs empieza a ser detectable a nivel global como consecuencia de los ensayos nucleares llevados a cabo, dichas pruebas se intensifican entre los años 1958-1959 produciendo una mayor concentración de este radionúclido, hasta que, posteriormente, en 1963 se produce un máximo que es el responsable de la mayor parte de la actividad de ¹³⁷Cs detectada. Se ha calculado que la actividad de ¹³⁷Cs incorporada al ambiente hasta 1980 fue de $9,6\times10^{17}$ Bq, de la cual el 76% fue depositado en el hemisferio norte y el 24% restante en el sur (UNSCEAR, 1982). En 1986 el accidente de Chernobyl se estima que supuso una emisión total a la atmósfera de entre 4 y 7×10^{16} Bq (UNSCEAR, 1988) originando una densidad de deposición de unos 555 kBq/m² de ¹³⁷Cs (Balonov, 2007),(Saenko et al., 2011), principalmente en Europa Central. El impacto de Fukushima se estima, en estos momentos, en un orden de magnitud inferior al de Chernobyl (UNSCEAR, 2013).

En las últimas décadas, se han llevado a cabo numerosos estudios a escala mundial para analizar la distribución de ¹³⁷Cs y su comportamiento en suelos agua y aire. (Arnalds et al., 1989), (Blagoeva and Zikovsky, 1995), (Bunzl and Kracke, 1988), (Isaksson et al., 2000), (Kiss et al., 1988). En España los estudios se han centrado fundamentalmente en el estudio de la distribución superficial en suelos de la Península Ibérica (Baeza et al., 1991), (Elejalde et al., 1996), (Navas et al., 2007), (Sanchez-Cabeza et al., 2007).

1.1.8 Exposición a las radiaciones naturales.

Los niveles de radiactividad ambiental resultarán, según lo explicado con anterioridad, ser motivo de estudio de los correspondientes niveles en suelo, aire y aguas, a lo que habría que añadir los debidos a la actuación del hombre: materiales de construcción, industria, etc. En diferentes países se han llevado y se llevan a cabo determinaciones tendentes a conocer los valores de concentraciones de los isótopos radiactivos presentes en el medio ambiente. También la exposición dentro de los edificios, depende básicamente del tipo de material de construcción que se utilice y de su procedencia. Los materiales de construcción actúan como fuentes radiactivas, al tiempo que atenúan la radiación procedente del exterior. En las casas de ladrillo, hormigón o piedra, la tasa de dosis absorbida en su interior depende en mayor medida de las concentraciones de actividad de los radionúclidos presentes en los materiales de construcción, los cuales, si son de procedencia local, tendrán concentraciones de radionúclidos iguales a las que se dan en el suelo o en el pavimento que rodean al edificio. A este respecto, hay que señalar, como se ha indicado anteriormente, la gran importancia que tiene la presencia de radón responsable de la mayor parte de la dosis recibida por la población por causas naturales; por ello, se suele separar el impacto radiológico debido al radón del resto de las fuentes de radiactividad ambiental. En condiciones normales, el ²²²Rn constituye la mayor fuente de exposición natural a las personas (50% del total de radiación natural) (Quindós, 1995).

En lo que se refiere a las aguas, como se ha comentado, éstas pueden llevar en disolución o suspensión radionúclidos en concentraciones variables y deben ser analizadas y tratadas para el consumo humano. En España, el Real Decreto 140/2003 (del Estado, 2003) sobre la calidad de las aguas destinadas al consumo humano incorpora la directiva 98/83/CE del Consejo de la Unión Europea, de 3 de noviembre (Europea, 1998), en la que se establece para la radiactividad en aguas potables unos valores de 100 Bq/l para el tritio y 0,10 mSv/año para la "Dosis indicativa total" (DIT). El Real decreto español mantiene como parámetros a controlar, la actividad α total, con un valor de 0,1 Bq/l, y la actividad β total, con un valor de 1Bq/l, manteniendo lo que ya recogía la reglamentación española anterior. En relación con la exposición de los individuos a los radionúclidos que se encuentran en las aguas, habría que considerar el consumo de pescados y otros animales acuáticos, así como la ingestión de vegetales cultivados en régimen de regadío.

La mayor parte de los radionúclidos naturales que se encuentran en la atmósfera son isótopos del radón y sus descendientes. El radón es emitido desde los suelos, las rocas, las aguas y los materiales de construcción, variando sus concentraciones considerablemente con el lugar y el momento de la medida, al igual que con el régimen de lluvias y vientos. Otra fuente de contaminación atmosférica puede provenir de los radionúclidos artificiales procedentes de la actividad humana (pruebas nucleares, accidentes, etc...) que son suspendidos y transportados por las corrientes de aire. La ruta seguida por los radionúclidos atmosféricos puede provocar una incorporación de radiactividad por las personas a través de los pulmones, el tracto gastrointestinal o la piel. Tanto la absorción como la subsiguiente distribución en el cuerpo humano dependerán del tamaño de la partícula y de las características físicas y químicas del radionúclido. Por otra parte, como ya se ha comentado, la interacción entre los rayos cósmicos procedentes del espacio exterior con la atmósfera terrestre produce neutrones, protones e iones, así como una gran variedad de productos de reacción como el tritio, ¹⁰Be, ²²Na, ²⁴N, etc.

En 1988 el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas en su informe periódico a la Asamblea, "Sources, effects and risks of ionizing radiation" (UNSCEAR, 1988) presentó datos de 23 países, resultando que la tasa de dosis en aire debida a radiación gamma de origen natural medida a 1 metro por encima de la superficie del suelo, se encuentra en el rango de 24 a 85 nGy/h. Este informe periódico ha sido revisado en 1993, 1994, 1996 y el más reciente es del año 2000. En este último, (UNSCEAR, 2000) el comité indica en su párrafo 193 que "dado que las exposiciones a fuentes naturales de radiación son mucho más significativas que las debidas a fuentes artificiales, el conocimiento del fondo natural garantiza una evaluación detallada (de la exposición). Por esto, se deberían continuar los esfuerzos para ampliar las bases de datos utilizadas para determinar tanto los valores normales como los extremos de exposición y mejorar los procedimientos dosimétricos". Añadiendo en el párrafo 194: "debido a las grandes variaciones de las radiación natural de fondo incluso en regiones relativamente pequeñas, se requiere más esfuerzos para determinar la distribución detallada de la población en intervalos de dosis para los distintos componentes de la exposición". En este mismo informe, en el párrafo 197 se indica que la dosis efectiva media para la población mundial debida a fuentes naturales de radiación es de 2,4 mSv/año. Se desprende de aquí, la importancia de los estudios de radiactividad natural.

Según datos del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la dosis que una persona recibe como promedio en España proveniente de fuentes naturales es de 2,41 mSv/año (similar a la dosis media mundial indicada por UNSCEAR), cantidad que en condiciones normales y como promedio se estima que se distribuye de la siguiente forma:

- Un 50% de la dosis procedente del radón.
- Un 20% de la dosis procedente de la radiación terrestre (materiales).
- Un 15% de la dosis procedente de la radiación cósmica.
- Un 15% de la dosis procedente del propio organismo.

Los datos recopilados en el informe final del proyecto MARNA del CSN, muestran que en promedio mundial y en zonas de fondo medio, la radiación cósmica contribuye a la dosis con un total de 0,355 mSv/año, mientras que la proveniente de la radiación terrestre es de un 2,045 mSv/año así, la radiación terrestre representa un 85% de la dosis. Esto se debe a que la radiación cósmica actúa básicamente como fuente externa, mientras que los radionúclidos naturales actúan tanto como fuentes externas de radiación como interna, ya que algunos de ellos pueden incorporarse al organismo por inhalación o a través de los alimentos, como ocurre con el radón o el ¹⁴C. Así se estima que un tercio de la dosis total recibida por el ser humano (aprox. 0,8 mSv/año) procede de fuentes externas mientras que dos tercios se deben a las fuentes internas (1,61 mSv/año).



Figura 1.6 Izquierda: Contribución de la radiación terrestre y radiación cósmica a la dosis equivalente efectiva anual. Derecha: Contribución de la radiación terrestre y radiación cósmica a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)

Respecto a la radiación externa, de los 0,8 mSv/año recibidos en zonas consideradas normales, 0.3 mSv/año corresponden a la componente ionizante de la radiación cósmica, 0.055 mSv/año a la componente neutrónica, 0,15 mSv/año al ⁴⁰K, 0,1 mSv/año a la serie del uranio y 0.16 mSv/año a la serie del torio. Estos datos se resumen en la figura 1.7.





En la figura 1.8 se muestra la contribución de las fuentes naturales internas a la dosis efectiva anual recibida por esta vía. De los 1,61 mSv/año recibidos en zonas de fondo normal, 0.015 mSv/año corresponden a radionúclidos cosmogénicos, 0,186 mSv/año al ⁴⁰K y ⁸⁷Rb, 1,24 mSv/año a la serie del uranio, y 0,18 mSv/año a la serie del torio.



Figura 1.8 Contribución de las distintas fuentes de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)

Finalmente, en las figuras 1.9 y 1.10 se desglosan las contribuciones de las diferentes subseries de las familias de uranio y del torio a la dosis interna anual. Como se puede comprobar la mayor contribución a la dosis procede, como se ha dicho del ²²²Rn y sus descendientes.



Figura 1.9 Radiación interna. Contribución de la serie del uranio 238 a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)



Figura 1.10 Contribución de la serie del torio 232 como fuente de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual. Adaptado de: (Suárez Mahou et al., 2000)

1.2. Descripción geológica del área de estudio. Las Islas Canarias Orientales.

Las Islas Canarias están situadas frente a la costa noroeste de África, entre las coordenadas 27° 37' y 29° 25' de latitud norte y 13° 20' y 18° 10' de longitud oeste. Tienen una extensión de 7447 km² y una población total de 2.103.992 habitantes (I.N.E., 2009) Administrativamente están divididas en dos provincias: Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas. La provincia Santa Cruz de Tenerife (1.020.490 habitantes) es la más occidental y está formada por las islas de El Hierro, La Gomera, La Palma y Tenerife. La provincia oriental es la de Las Palmas (1.083.502 habitantes) y engloba las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. También forman parte de la provincia de Las Palmas los islotes del Archipiélago Chinijo (La Graciosa, Alegranza, Montaña Clara, Roque del Este y Roque del Oeste) y la Isla de Lobos.



Figura 1.11 Mapa del Archipiélago Canario.

El territorio del Archipiélago Canario es muy complejo debido a su carácter insular y a su origen volcánico, presentando un vulcanismo activo, aunque de poca intensidad. El grueso de las islas surge en el Mioceno y sólo El Hierro y los islotes menores son del Cuaternario (Anguita and Hernán, 1999), (Canas et al., 1998), (Carracedo, 2011). Seis de sus siete islas principales, que forman una cadena de dirección ENE, han sido activas en el último millón de años. Presentan un gradiente de edades geológicas siendo las islas orientales (Lanzarote y Fuerteventura) las más antiguas (alrededor de 20 millones de años) y las occidentales son más recientes y, de hecho, el Hierro data de hace sólo 1,5 millones de años. Igualmente son recientes los islotes menores del Archipiélago Chinijo.

Los orígenes geológicos del archipiélago suscitan la controversia: un punto caliente del manto, una zona de deformación litosférica, una región de fallas en bloques o una fractura que se propaga hacia el oeste desde el vecino Atlas han sido citados por diferentes autores como el origen último del archipiélago. Sin embargo, una comparación del Archipiélago Canario con el prototípico grupo de islas relacionado con un punto caliente, el Archipiélago de Hawaii, revela que las diferencias entre ambos no son tan grandes como se había supuesto anteriormente en base a

datos más antiguos. Los edificios insulares se caracterizan por un crecimiento inicial rápido (las etapas de actividad en escudo ("shield stage"), seguidas por un período de reposo volcánico y profunda erosión ("gap" erosivo) que, a su vez, es seguido de una etapa de rejuvenecimiento volcánico o actividad "post-erosiva". Cada una de las siete islas ha pasado por algunas de estas tres fases, las islas de Fuerteventura y Lanzarote (las más antiguas) se encuentran en un estadio de rejuvenecimiento casi terminal, en el que predominan los agentes erosivos sobre la actividad volcánica que conlleva a un arrasamiento del paisaje;. Gran Canaria está inmersa en un estadio de rejuvenecimiento avanzado; mientras que Tenerife está en el comienzo de esta fase con la formación del complejo volcánico Teide-Pico Viejo, que supone el máximo desarrollo volcánico de la isla;. La Gomera está en el estadio de inactividad volcánica que dura ya casi 4 millones de años, mientras que La Palma y El Hierro (las islas más jóvenes) se encuentran en la primera fase de crecimiento juvenil rápido.

Lo más característico del paisaje de las Islas Canarias son los barrancos. Se trata del cauce esporádico por donde se dirigen las aguas corrientes presentes en las islas. Su recorrido es corto y generalmente tienen un perfil rectilíneo muy marcado. Su cauce está tapizado de derrubios arrastrados por las aguas. Las costas son las que más reciben el ímpetu de la erosión, debido a la actividad marina. Predominan los grandes acantilados en las islas y zonas volcánicamente más activas, mientras que las playas y los campos de dunas están sobre plataformas de abrasión abandonadas, testigos de antiguos niveles del mar, en las islas más viejas. A pesar del carácter montañoso de la mayor parte de las islas también se encuentran importantes llanuras. En Lanzarote y Fuerteventura predominan los terrenos naturales con una pendiente suave y uniforme (glacis), que destacan mucho, debido a que son éstas, las islas más áridas (así como las más antiguas). Esta singular historia geológica y por tanto su peculiar petrología hace prever que las islas tengan también unas características radiológicas diferenciadas respecto al territorio peninsular o de las islas mediterráneas. A continuación se analizan las características geológicas particulares de cada una de las islas que comprende el área de estudio.

1.2.1 Isla de Gran Canaria

Gran Canaria es la tercera isla en extensión (1.560 km²) y la segunda en población (814 758 habitantes, a 1 de enero de 2012) (I.N.E., 2013) del Archipiélago Canario. Se encuentra a 28 grados de latitud norte y 15 ° 35 'de longitud oeste. Tiene una forma circular con una montaña en el centro. Su punto más alto es el Pico de las Nieves, con 1.949 metros. Desde el punto de vista geológico (figura 1.12), se puede dividir en dos zonas: la primera, el noreste de formación más reciente, donde aparecen algunos terrenos sedimentarios y de formación submarina. En esta zona se pueden encontrar terrazas y algunos conos volcánicos como la Montaña de Arucas y el Pico y Caldera de Bandama, así como otras calderas de erosión como Tenteniguada, Las Temisas y Tirajana. Existen también llanuras como la que abarca desde Telde hasta Tirajana. En su extremo noreste se encuentra una pequeña península llamada La Isleta, unida al resto de la isla por un istmo arenoso, con las playas de Las Canteras y Las Alcaravaneras a sus márgenes. La segunda, el sur-suroeste, la parte más antigua de la isla, hecho que puede constatarse por la cantidad de barrancos que la surcan. A esta zona pertenece también el centro de la isla, donde se encuentran las altitudes máximas. La costa noroccidental es muy abrupta con grandes acantilados que caen al mar. En este lugar se ubican los barrancos de la Aldea, Agaete, Arguineguín y Fataga, entre otros. En el sur de la isla existen superficies arenosas como las Dunas de Maspalomas, referente mundial de la industria turística.



Figura 1.12 Mapa geológico de la isla de Gran Canaria. (Carracedo et al, 2002)

En Gran Canaria, se distinguen cuatro ciclos fundamentales (Carracedo et al, 2002): 1) basaltos tabulares (15-14 Ma), 2) complejo traquítico-sienítico (14-8,5 Ma), 3) ciclo Roque-Nublo (3,5 Ma) y 4) conos volcánicos y lavas recientes (desde hace 3 Ma). En esta isla, mientras que los afloramientos de basaltos tabulares y del complejo traquítico-sienítico de la caldera de Tejeda se extienden a lo largo de la mitad suroccidental, los volcanes recientes se extienden predominantemente a lo largo de la mitad nororiental y las brechas y lavas del ciclo Roque Nublo ocupan de forma preferente el sector central, con ramificaciones al NE y hacia el S. En la figura 1.12 se muestra el mapa geológico simplificado de Gran Canaria.

En la litología de Gran Canaria domina sobre todo el basalto, no obstante, debido a su extraordinaria complejidad geológica, además del material mencionado, aparecen distribuidos por su superficie una proporción muy significativa de las rocas de composición intermedia (traquibasaltos) y sálico (traquitas y fonolitas).

1.2.2 Isla de Fuerteventura

Fuerteventura, con una superficie de 1660 km² es la segunda isla por extensión de las Islas Canarias. Junto a Lanzarote y al Banco de La Concepción forma un gran edificio volcánico de orientación SSO-NNE que corre paralelo a la costa del continente africano, a una distancia de 97 km. Sus latitudes extremas en el hemisferio se alcanzan en Punta de la Tiñosa en Corralejo (28º 45' 04'') y en Punta del Matorral en Morrojable (28º 02' 16''). Sus longitudes extremas se alcanzan en Punta del Bajo (13º 49' 12'') y Punta de Jandía (14º 30' 24''). Es la cuarta isla en población del archipiélago (I.N.E., 2013) (106456 habitantes), aunque presenta muy baja densidad de población debido a su tamaño (57 habitantes/km²). Es junto a Lanzarote la isla más antigua del archipiélago (22 millones de años), habiendo experimentado numerosas erupciones volcánicas. La isla exhibe extensas planicies, fruto de un intenso proceso erosivo a lo largo de su historia. En la zona central se encuentra el macizo de Betancuria, con una cota máxima de 762 m en el Pico de la Atalaya. Al sur se hallan el istmo de la Pared y la península de Jandía, con el Pico de la Zarza a 812 m de altitud, el monte más elevado de la isla.



Figura 1.13 Mapa geológico de Fuerteventura. Fuente: (Vera, 2004a)

En la figura 1.13 se muestra el mapa geológico simplificado de Fuerteventura. Como se puede apreciar, se distinguen dos unidades geológicas (Fuster et al.): la unidad del Complejo Basal y la del Vulcanismo subaéreo. El Complejo Basal que está constituido por rocas plutónicas, volcánicas y sedimentarias de la litosfera oceánica y de la etapa submarina de la isla, con edades que van desde el Jurásico hasta el Mioceno y sus materiales afloran principalmente en los macizos de Betancuria y Esquinzo. Asociadas al complejo basal, se encuentran las rocas

plutónicas y volcánicas más diferenciadas (sienitas, ijolitas, traquitas, fonolitas y carbonatitas) que contienen una alto porcentaje en minerales con potasio (feldespatos potásicos, amfibol y biotita, entre otros) y elementos incompatibles (Th, U, K y tierras raras). La unidad de Vulcanismo subaéreo está constituida por materiales volcánicos mioceno-cuaternarios que se distribuyen por la superficie de toda la isla.

Los procesos geológicos externos (erosión, transporte y sedimentación) que han afectado y afectan a los materiales de la isla, han dado lugar a numerosos depósitos sedimentarios y a diferentes morfologías, destacando las formaciones sedimentarias de la península de Jandía en el Sur y las del Cotillo-Corralejo en el norte. Por lo tanto, el paisaje actual que se observa en la isla es el resultado tanto de los procesos constructivos magmáticos y de sedimentación como de los procesos erosivos destructivos desarrollados a lo largo del tiempo.

1.2.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa

Lanzarote es la más septentrional y oriental de las islas del Archipiélago Canario. Es la cuarta isla en extensión (846 km²) y la tercera en número de habitantes 142.132 habitantes según el padrón de 2012 (I.N.E., 2013) . La morfología de Lanzarote, está caracterizada por cinco formaciones geológicas (Carracedo and Rodríguez-Badiola, 1993) (Fúster, 1968) dos macizos montañosos de gran antigüedad, ubicados cada uno de ellos en el extremo norte y sur de la isla (Famara-Guatifay y Los Ajaches, respectivamente); dos áreas de vulcanismo más reciente, que conforman la zona de volcanes de Timanfaya, en el centro-sur, y el volcán y malpaís de La Corona, al norte; y finalmente, una lengua de arenas de origen marino que atraviesa el centro de la isla, en el área conocida como El Jable. La altura mayor de la isla se encuentra en la zona del risco de Famara denominada las peñas del Chache con una altura de 671 m.

En la figura 1.14 se muestra el mapa geológico simplificado de Lanzarote. Su historia geológica se divide en tres fases (Carracedo et al., 2002).: Una primera fase, hace 11 millones de años, durante el Mioceno, aparecen los restos más antiguos en la zona de Famara, al norte de la isla, y en los Ajaches, al sur. Actualmente, los procesos erosivos han desmantelado estas formaciones. Su morfología es la de edificios erosionados que han evolucionado barranqueras con una buena red de drenajes caracterizados por valles en forma de "U" hoy en día secos y áridos. La segunda fase abarca desde el Mioceno hasta el Pleistoceno y se caracterizó por los procesos erosivos de las dos formaciones, Famara y Los Ajaches. Posteriormente, han existido emisiones importantes de material magmático que han dado lugar a la unión de las dos formaciones antiguas. Se trata sobre todo del sector central de la isla que se caracteriza por la existencia de alineaciones de edificios formando los ejes estructurales de la isla, que coinciden con los ejes de formación de Fuerteventura con dirección NE-SO, algunos con avanzado estado de desmantelamiento. La tercera fase, es muy reciente y de poca importancia geológica. Son erupciones acaecidas en los siglos XVII y XVIII con emisiones alineadas paralelas a las de la anterior fase y edificios que no superan los 200 m. pero muy bien conservados, debido a la poca

pluviosidad que se da en la isla. Los materiales acumulados por los distintos ciclos volcánicos son fundamentalmente basálticos (rocas negras y pesadas). Los suelos sedimentarios, de muy poco espesor, son sobre todo arenas y arcillas. Las arenas voladoras están formadas por pequeños granos calizos y caparazones de moluscos marinos; el oleaje los arroja en el sector de Soo, Bahía de Penedo y en las playas de Órzola. Los vientos hacen que estas arenas, conocidas localmente como jables, crucen la isla hasta la costa oriental. Las arcillas de origen eólico son tierras rojas procedentes del Sáhara que el viento trae en forma de nubes de polvo. De esta forma se depositan hasta 2 Kg por m² al año, contribuyendo en la formación de suelos que se usan para el cultivo. Frente al risco de Famara se encuentra la isla de La Graciosa, que depende administrativamente del municipio de Teguise.



Figura 1.14 Mapa geológico de Lanzarote. (Vera, 2004a)

La Graciosa con 27 km² es la mayor de las islas e islotes que componen el Archipiélago Chinijo situado al norte de Lanzarote. Comenzó a formarse durante de pleistoceno, formando parte de la Serie III en la historia geológica de Lanzarote (Fúster et al., 1966), (De la Nuez et al., 1998). La geografía de La Graciosa está dominada por los edificios volcánicos de Montaña Amarilla (178 m), Montaña de Pedro Barba (64 m), Agujas Grandes (266 m), Agujas Chicas (257 m) y Montaña del Mojón (185 m), alineados en un eje noreste-suroeste, y la Montaña Bermeja (157 m), situada al noroeste de la isla. Al sur de la isla, predominan amplias playas de arenas rubias. También en el litoral sur se localizan sus dos asentamientos urbanos: Caleta de Sebo y Pedro Barba; el primero constituye el núcleo de población originario, mientras que el segundo es una pequeña urbanización turística. Su población es de 640 habitantes (I.N.E., 2009), llegando a triplicarse debido al turismo

1.3. Antecedentes y estado actual del tema

Como se indicó en la introducción, desde la década de los ochenta del siglo XX, se han incrementado notablemente los estudios sobre la radiactividad ambiental en Europa y en el Mundo. Dada la amplitud del tema, esta sección se centra en primer lugar en los estudios sobre radiactividad natural llevados a cabo en España, con especial énfasis en el proyecto MARNA del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). A continuación se realiza una revisión detallada de los estudios radiológicos previos en la región de estudio de esta Tesis Doctoral, las Islas Canarias Orientales.

1.3.1 La Radiactividad Natural en España. El proyecto MARNA

Como se ha indicado, en España a finales de los años 80, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) inició una serie de actividades encaminadas a determinar la exposición a las fuentes naturales de radiación; así, en 1989 el CSN puso en marcha el proyecto RADON para medir, en línea con la Recomendación 90/143/Euratom, las concentraciones de este isótopo en viviendas españolas, habiéndose realizado hasta 2002 medidas en unas 5.000 viviendas. En 1991 se inició el proyecto MARNA, desarrollando un MApa de la Radiación (gamma) NAtural en España (Mahou and Amigot, 1996), cuya última fase peninsular concluyó en 2004 y en la actualidad se está finalizando en las regiones no peninsulares de España. El principal objetivo de MARNA es la determinación de los niveles de radiación a los que está expuesta la población española debido la radiación natural. Estos niveles se reflejan en un mapa (figura 1.15) que constituye un documento de carácter permanente que puede ayudar a valorar variaciones de la radiación de fondo debidas a causas naturales y no naturales.

Para la elaboración del mapa de radiación natural en MARNA inicialmente se utilizó la información radiológica de la antigua Junta de Energía Nuclear y de la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA). Estos organismos durante el periodo 1968-1982 realizaron sucesivas campañas de prospección aérea de minerales radiactivos, en las que se obtuvieron medidas de calidad tanto de la radiación gamma total como de espectrometría gamma para la identificación de radioisótopos. Los datos aéreos cubrían el 60% de la superficie peninsular, pero además se contaba también con abundantes medidas terrestres sobre buena parte de España. No obstante, fue necesario realizar nuevas medidas durante la ejecución del proyecto con el fin de establecer correlaciones entre las medidas de radiometría terrestre obtenidas anteriormente y entre medidas aéreas y terrestres. También se buscó obtener correlación entre la geología y la radiometría y cubrir aquellas zonas en las que no existía una red suficiente de datos y, como consecuencia de sucesivas fases del proyecto se ha ido cubriendo todo el territorio peninsular. Como resultado se ha generado una gran base con datos radiológicos y se ha elaborado un mapa base de tasa de exposición gamma natural a un metro del suelo a escala 1/1.000.000 de la España peninsular además de mapas más detallados (escalas 1/200.000) para todas las provincias de la península. Además se elaboraron mapas a escala y 1/50.000 para algunas regiones entre las que se

encuentran Extremadura, Castilla y León y Galicia (que son en las que se mide una mayor tasa de exposición). A partir de los datos de MARNA se han obtenido los valores de las medias provinciales de tasa de exposición y se han elaborado mapas de dosis absorbida en aire. En el proyecto MARNA colaboraron, además grupos de investigación de varias universidades entre las que cabe destacar la Universidad de Extremadura, Universidad de Salamanca, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de Vigo, Universidad de Cantabria y la Universidad Politécnica de Cataluña.



Figura 1.15 Mapa de tasa de exposición en aire elaborado en el marco del Proyecto MARNA del CSN. (CSN, 2001)

Los resultados principales del proyecto se recogen en el informe del CSN 5.2000 "Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural" de la colección del de Informes técnicos del Consejo de Seguridad Nuclear y en un gran número de publicaciones en revistas especializadas. (Baeza et al., 1992) (Baeza et al., 1997) (Suarez Mahou and Fernandez Amigot, 1993) (Quindos et al., 1993) (Quindos et al., 1992).

Como un producto añadido, a partir de los datos de MARNA se están desarrollando metodologías para el cálculo del riesgo de exposición al radón *indoor* y *outdoor* y se han elaborado los mapas correspondientes (Quindós Poncela et al., 2004b), (Quindós Poncela et al., 2004a), (García-Talavera et al., 2013), (CSN, 2013).

Además de los trabajos realizados para MARNA, las universidades y centros de investigación llevan a cabo numerosos estudios sobre radiactividad natural en España, con fines

fundamentalmente dosimétricos (Rosell et al., 1991), (Bolívar et al., 1998), (Quindós et al., 2003), (López et al., 2004), (González-Chornet and González-Labajo, 2004), (Baeza et al., 2004), (Ródenas et al., 2008) o medioambientales (Martinez-Aguirre and García-León, 1994), (Blanco et al., 2005, Gonzalez-Labajo et al., 2001), (Pujol and Sanchez-Cabeza, 2000) (Bolivar et al., 2000), (Gascó et al., 2002),(Vallés et al., 2009, Elejalde et al., 1996), (Blanco et al., 2005).

1.3.2 Estudios sobre Radiactividad Natural en las Islas Canarias

Como se muestra en el mapa de la figura 1.15, las Islas Canarias no se incluyeron en las fases previas del proyecto MARNA. No obstante sí existen algunos estudios radiométricos realizados, fundamentalmente, por equipos de las Universidades de La Laguna y de Las Palmas de Gran Canaria. Así, el Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (FIMERALL), asociado al Consejo de Seguridad Nuclear ha realizado estudios sobre la radiación natural en aire y suelos fundamentalmente en las Islas Canarias Occidentales (Fernández de Aldecoa et al., 1992) (Fernández de Aldecoa, 2000) (Hernandez et al., 2004) y sobre la distribución de radón en la Islas (Duque and Elvira, 1998) (Pinza et al., 1997, Pinza-Molina et al., 1999). Otro aspecto interesante tratado por este grupo es el trasporte de ¹³⁷Cs y ⁴⁰K por el polvo sahariano (calima) en la isla de Tenerife, (Hernández et al., 2005), (Karlsson et al., 2008) (López-Pérez et al., 2013). Tenerife es, quizás, la Isla más estudiada y se pueden destacar los trabajos llevados a cabo por el grupo de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna sobre la concentración de radón en cuevas y galerías con fines de radio protección, pero también focalizando su interés en su aplicación como indicador de actividad volcánica (Martin, 1999), (Martin-Luis et al., 2002), (Viñas et al., 2004), (Viñas et al., 2007). En este último aspecto también son de destacar los trabajos realizados el Instituto Tinerfeño de Energías Renovables (ITER) y el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) (Pérez et al., 2007), (Padilla et al., 2012). La reciente erupción volcánica de la isla de El Hierro ha hecho que se realicen algunos trabajos sobre las implicaciones radiológicas de dicha erupción (Padilla et al., 2013).

Al comenzar este trabajo de Tesis Doctoral, las Islas Canarias Orientales (Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote) estaban bastante menos estudiadas, desde un punto de vista radiológico, que la provincia occidental. Esta circunstancia es particularmente comprometedora teniendo en cuenta la vulnerabilidad de la zona bajo estudio a la entrada de masas de agua y, particularmente, de aire, procedentes de la costa occidental africana, así como la baja intensidad de los controles específicos en esta materia.

Entre los pocos estudios se pueden destacar los que el laboratorio FIMERALL de la ULL llevó a cabo, durante la década de los noventa, sobre las concentraciones de radón en viviendas (Pinza-Molina, 1999) (Pinza et al., 1997). Por otra parte, desde un punto de vista geológico, se han realizado algunos trabajos sobre elementos radiactivos presentes en las carbonatitas del complejo basal de Fuerteventura (Mangas et al., 1996).

Nuestro grupo de investigación¹ durante el periodo 1992-2008 realizó, en el marco de algunos convenios con Cabildos Insulares y ayuntamientos, estudios previos sobre radiactividad gamma ambiental en Gran Canaria (Doreste et al., 1998), Fuerteventura (Rubiano et al., 2006a) y Lanzarote (Rubiano et al., 2006b). A partir de 2008 y con financiación concedida por el Consejo de Seguridad Nuclear y el Gobierno de Canarias nuestro grupo de investigación ha desarrollado un estudio completo de la radiactividad ambiental en las Islas Canarias Orientales, parte de cuyos resultados constituyen el núcleo fundamental de este trabajo de Tesis Doctoral. Estos trabajos forman parte de la última fase de MARNA en la que completará el mapa radiométrico de todo el territorio nacional, para lo que ha sido necesario elaborar los mapas radiométricos de las Islas Baleares, las Islas Canarias y las Ciudades Autónomas de Ceuta y Melilla². Además se está llevando a cabo un extenso estudio de la distribución de radón en suelos y viviendas de las Islas Canarias Orientales. Los resultados parciales de estos trabajos se han presentado a la comunidad científica en diversos informes (Rubiano, 2012, Rubiano, 2013, Rubiano, 2008), congresos (Alonso et al., 2011b), (Arnedo et al., 2011a), (Arnedo et al., 2011b), (Alonso et al., 2011a) y publicaciones (Alonso et al., 2010b),(Alonso et al., 2010a), (Alonso et al., 2012) (Arnedo et al., 2012, Arnedo et al., 2013).

1.4. Objetivos y estructura del trabajo de Tesis Doctoral

Como se ha visto en el apartado anterior, la información disponible sobre la zona oriental del Archipiélago Canario en el momento de comenzar esta Tesis Doctoral, resultaba insuficiente para poder aclarar aspectos clave sobre su situación desde el punto de vista radiológico³. Por eso este trabajo se ha planteado con el fin de corregir dichas lagunas de conocimiento realizando un estudio detallado de la radiactividad ambiental en las Islas Canarias Orientales completando, además, el mapa de MARNA. Esta actividad permitirá, también, establecer el nivel de referencia a través del cual identificar cualquier evento debido a contaminación procedente de zonas adyacentes o del transporte a larga distancia. Entre las razones que justifican la necesidad realizar este estudio se pueden destacar las siguientes:

1.-Permitirá conocer los valores normales de radiación en cada isla, lo que posibilitará la detección de anomalías radiológicas que puedan presentarse, ya que sin una referencia de lo que es normal no se pueden detectar desviaciones. Esta posibilidad es muy importante en una región archipielágica y fronteriza. Se debe tener en cuenta que las Islas Orientales son las más cercanas al continente africano en el que varios países (y entre ellos el más cercano, Marruecos) tienen la intención de desarrollar la Energía Nuclear para la producción de electricidad y desalación de

¹ Grupo de Investigación en Interacción Radiación Materia, (GIRMA) del Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

² El mapa radiométrico de Melilla se ha llevado a cabo también por nuestro grupo de Investigación.

³ En especial en el caso de las islas las menos pobladas (Fuerteventura, Lanzarote, La Graciosa)

aguas. Este hecho en sí mismo no tiene por qué ser alarmante, pero resulta conveniente conocer lo que es normal desde el punto de vista radiológico en el archipiélago¹.

2.- Se podrá evaluar la probabilidad de que se produzcan consecuencias nocivas para la salud de la población debido a la exposición de las radiaciones naturales.

3.- El establecimiento de las condiciones de fondo de la región permitirá generar una amplia base de datos, con vistas a su posible utilización en futuros estudios de trazado y caracterización de procesos ambientales, en los que las metodologías de caracterización isotópica se utilizan cada vez con mayor frecuencia.

Con el fin de cumplir con los objetivos generales que se han formulado, los objetivos concretos planteados para esta Tesis Doctoral son los siguientes:

- a. Medidas "in situ" de las dosis externas por radiación gamma del suelo en un mallado fino para la elaboración mapas radiométricos detallados para las islas. El interés de este objetivo radica en la obtención de los mapas radiométricos de las islas de Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La graciosa con el fin de establecer niveles de referencia y tener un marco de comparación con el resto de España y del mundo.
- b. Puesta en marcha de un sistema de espectrometría gamma de alta resolución para el análisis de muestras ambientales.
- c. Determinación de las concentraciones de radionúclidos naturales (al menos ²³⁸U, ²³²Th y ⁴⁰K,) y de ¹³⁷Cs de cada tipología de suelo (según las características litológicas de la roca madre). Éste es uno de los principales objetivos, ya que permitirá establecer las concentraciones normales de radionúclidos en las Islas Canarias Orientales y su dinámica, así como la posible presencia de radioisótopos no naturales procedentes de la contaminación externa o interna.
- d. Comparación de los datos obtenidos con modelos empíricos de las dosis externas por radiación gamma del suelo. El interés de este objetivo es encuentra en la validación de modelos teóricos con los datos experimentales y en la adaptación de los modelos existentes a la tipología de suelos de las Islas Canarias Orientales.
- e. Realización de un estudio de la dosis recibida por la población de las Islas Canarias Orientales debido a la Radiación Natural.

Los resultados de la investigación llevada a cabo para cumplir estos objetivos se recogen en esta memoria de Tesis Doctoral.

¹ Además, desde un punto de vista económico, es un hecho demostrado que el conocimiento de los parámetros ambientales de una región es un valor cada vez más apreciado por la ciudadanía de los países desarrollados. Por esto, Canarias cuya primera industria es el turismo, no puede descuidar su control ambiental en este aspecto.

En el capítulo 2 se describe la instrumentación utilizada y los procedimientos de medida. Dada su importancia, se dedica gran parte del capítulo a la descripción, calibración y puesta en marcha del Equipo de Espectrometría gamma de alta resolución Canberra XtRa modelo GX3518 7500SL con el que se han realizado gran parte de las medidas de esta Tesis.

El capítulo 3 está dedicado al proceso de elaboración de los mapas de Radiación Gamma Natural a un metro del suelo de las Islas Canarias Orientales. Se describen las campañas de medida "in situ" de tasa de exposición, los procedimientos de interpolación utilizados para elaborar los mapas y se discuten los resultados obtenidos comparándolos con estudios similares llevados a cabo a escala regional, nacional e internacional.

En el capítulo 4 se recogen los resultados la extensa campaña de medida de la concentración de radioisótopos ambientales (²³⁸U, ²³²Th y ⁴⁰K, y ¹³⁷Cs) llevada a cabo. Se detallan los procedimientos de toma de muestras y de análisis y se discuten los mapas de distribución de radioisótopos de las islas. En este caso, también se comparan los valores obtenidos en las Islas Canarias con los de estudios similares nacionales e internacionales publicados en la literatura.

El capítulo 5 se dedica al estudio de las consecuencias dosimétricas sobre la población a partir de los datos expuestos en los dos capítulos anteriores. Se determinan las Tasas de dosis equivalente y dosis equivalente anual a la que está sometida la población de las Islas Canarias Orientales y se levantan los correspondientes mapas. Se calculan los distintos índices de riesgo del territorio y se discuten las consecuencias radiológicas comparando con el territorio peninsular y europeo en general. Finalmente se comparan los resultados obtenidos en las Islas Canarias con las medias mundiales.

En el capítulo 6 se detallan las conclusiones más relevantes derivadas de este trabajo de Tesis Doctoral, en los apéndices se recogen las hojas características de los distintos equipos, los datos experimentales de todas las campañas, algunos procedimientos de calibración, los códigos geológicos de la región bajo estudio y los datos calculados de los diversos índices de riesgo. Finalmente, se recopila toda la bibliografía utilizada en el trabajo.
Capítulo 2

Material y Métodos

2.1. Introducción

En este capítulo se indican, en primer lugar, las magnitudes a medir y las unidades utilizadas en este trabajo de Tesis Doctoral. A continuación se detallan las principales características de los equipos utilizados en las diversas fases del trabajo. El grueso del capítulo se dedica a describir el procedimiento de puesta en marcha y de calibración del sistema de espectroscopia gamma de alta resolución utilizado para el análisis radioisotópico de las muestras ambientales. Se analizan en detalle su principio de funcionamiento, sus parámetros característicos (blindaje, fondo, eficiencia, etc...) y se realiza un estudio sobre el procedimiento de medida y los límites de detección e incertidumbres asociados a ésta. Dado que el equipo emplea una calibración novedosa basada en el Método de Montecarlo, este procedimiento se explica con más detalle.

2.2. Unidades de medida

Debido a la multitud de magnitudes y unidades que aparecen en el estudio de las radiaciones ionizantes, este capítulo comienza fijando qué magnitudes y unidades concretas serán utilizadas en el trabajo. En el Apéndice 1 se recopilan las principales magnitudes radiológicas y sus unidades.

Para la evaluación del **nivel de radiación gamma ambiental** la magnitud representativa seleccionada para este trabajo, es la **tasa de exposición** que mide la ionización (carga) producida en una masa de aire por un haz de radiación gamma (o rayos X) (Apéndice 1). La unidad de exposición es el Renguenio (R) que no pertenece al Sistema Internacional de Unidades, sino al sistema tradicional del campo de la radiología. La tasa de exposición se suele expresar en µR/h. La magnitud exposición presenta una serie de dificultades ya que se define únicamente para un campo de fotones en un medio en particular que es el aire y además, la magnitud de relevancia biológica es la energía absorbida y no la ionización del aire, no obstante, se ha seleccionado esta magnitud, en lugar de la tasa de kerma en aire (que es la que se suele recomendar en los libros de texto), por ser utilizada con el mismo fin el proyecto MARNA (Suárez Mahou et al., 2000) del CSN para la España peninsular explicado con detalle en el capítulo 1 y en la mayor parte de los trabajos disponibles en la literatura.

Otra de las magnitudes empleadas en este trabajo es **la tasa de dosis absorbida** que mide la energía depositada por la radiación ionizante en un determinado medio por unidad de masa y tiempo (Apéndice 1). Como unidad de dosis absorbida, en este caso, se utiliza la definida por el SI, denominada Gray (Gy), en lugar de la unidad tradicional el rad. Para obtener las dosis absorbida a partir de la tasa de exposición, se utiliza, el factor de conversión 1 μ R/h = 8,7 nGy/h establecido en el NUREG 1501 (Huffert et al., 1994) de la USNRC (1994) que se aplica a medidas de radiación ambiental.

En las estimaciones dosimétricas sobre la población, se utiliza **tasa de dosis equivalente**. De nuevo en este caso se emplea la unidad del SI el Sievert (Sv) en lugar de la tradicional el rem. La conversión de tasa de dosis absorbida en aire en tasa de dosis equivalente efectiva al cuerpo humano y a dosis equivalente efectiva anual, es difícil de estimar ya que, en rigor, sería necesario conocer los hábitos de vida de la población, además de otros factores (Apéndice 1). En este trabajo se sigue la metodología ya empleada en MARNA, que utiliza el factor de conversión considerado en el NUREG 1501 de la USNRC de 1 Gy = 0.7 Sv. Siguiendo también el criterio utilizado en MARNA; para calcular la dosis equivalente efectiva partir de la dosis absorbida, se ha estimado la dosis a cuerpo entero debida a la radiación gamma natural en una determinada zona suponiendo una exposición al aire libre durante todo el año, sin ningún tipo de protección.

Por último, para cuantificar la concentración de actividad de los distintos radioisótopos en muestras de suelos y en los mapas derivados de los análisis se utiliza la actividad específica (desintegraciones por unidad de masa) expresada en el Sistema Internacional en Bq/kg. Ver Apéndice 1. De nuevo, se ha preferido utilizar la unidad del Sistema Internacional denominada Bequerelio (Bq) a la unidad tradicional, el Curio (Ci), que está ligada al radio como patrón de referencia.

2.3. Instrumentación radiométrica

Se comienza detallando el equipamiento utilizado en las campañas de medida de la radiación gamma ambiental a un metro del suelo, para la elaboración de los mapas radiométricos de las Islas Canaria Orientales. En estos trabajos se utilizaron diversos equipos de medida portátiles con dos tecnologías diferentes: detectores de centelleo y detectores Geiger.

Los equipos seleccionados para hacer el trabajo proporcionan directamente la tasa de exposición en µR/h aunque algunos de ellos pueden trabajar con diferentes unidades. Para cada medida de campo se utilizan al menos dos detectores distintos con el fin de contar con dos medidas independientes de la tasa de exposición a modo de validación interna. Las especificaciones de los diferentes radiómetros utilizados en esta tesis se detallan a continuación:

2.3.1 Radiómetro Ludlum µR Model 12S

El equipo base de campo es el radiómetro Ludlum μR 12S¹ del que se disponen dos unidades, el mismo, se ha seleccionado porque es un detector de radiación ambiental de bajo fondo, portátil, con muy buena estabilidad en la medida y en la calibración. Está especialmente indicado por el fabricante para la medida de radiación gamma de muy bajo nivel (del orden de los μR).

La sonda es de ioduro de sodio con impurezas de talio, Nal (TI), con un volumen sensible de detección cilíndrico de 1×1 pulgadas. Debido a que es un radiómetro portátil, el tubo de centelleo y la electrónica están integrados en una única carcasa. Para la lectura se dispone un display analógico (figura 2.1) de 0 - 3 μ R/h, y un selector que permite escoger entre cuatro escalas lineales (×1, ×10, ×100, ×1000) de forma que el rango total de medida es de 0 – 3000 μ R/h. Tiene una sensibilidad de 175 cpm/ μ R/h (para el ¹³⁷Cs) y una linealidad entorno al 10% del valor real medido. Este detector se ha utilizado también como patrón de referencia para el resto de los equipos empleados. Los certificados de calibración de los equipos durante las campañas de medida se muestran en el Apéndice 3. Estos detectores se verifican periódicamente por el Servicio de Protección Radiológica de la ULPGC.



Figura 2.1 Radiómetro portátil Ludlum Model 12S y detalles del panel de control.

Según las especificaciones del fabricante, el radiómetro Ludlum 12S dispone de un circuito de compensación de temperatura a termistores en la placa base, lo que lo hace muy estable ante cambios de temperatura con un rango de operación de -20 a +50 °C. Nuestra experiencia de campo corrobora esta afirmación teniendo en cuenta, además, que en las Islas Canarias las

¹ <u>http://www.ludlums.com/product/m12s.htm</u>.

variaciones de temperatura son mucho menos extremas. El equipo dispone de dos modos de respuesta uno denominado FAST en el que el tiempo de recuento (en el que se alcanza el 90% de la medida final) es de 4 s y otro denominado SLOW en el que el tiempo de recuento es de 22 s (siendo, por tanto, la media más estable). En el procedimiento seguido para las medidas ambientales, se utiliza el modo SLOW tomando cuatro medidas en veinte minutos, habiendo dejado transcurrir cinco minutos, tras los cuales el detector se ha estabilizado. Como valor final se toma la media de las lecturas y como error instrumental se ha estimado media división del display de forma que en la escala ×10, que es la más utilizada en el rango de medidas ambientales en las Islas Canarias, se estima en $\pm 1 \mu R/h$.

El fondo del instrumento se ha determinado comparando su respuesta a la radiación ambiental en el interior de un blindaje de hierro de 15 cm de espesor con la respuesta en el exterior, obteniéndose una cota máxima de 0,8 μ R/h., de esta forma, se estima que la incertidumbre en las medidas de tasa de exposición con estos equipos es, (en la escala de ×10,) de ± 2 μ R/h.

2.3.2 Sondas GENITRON GammaTRACER

Las sondas GammaTRACER de Genitron¹ permiten la medida en continuo de la radiación gamma. Están compuestas por dos detectores Geiger-Muller tipo E encastrados en un soporte integrado cilíndrico resistente al agua y herméticamente sellado. Se dispone de tres unidades. Sus características técnicas son las siguientes:

- Sensibilidad: 2 x 150 impulsos en 10 minutos a 100 nSv/h
- Rango de medidas: 10 nSv/h 10 mSv/h
- Rango de energías: de 45 keV a 3 MeV
- Error (σ):±3 % (a 100 nSv/h para un ciclo de medidas de 60 min)
- Error de calibración \pm 6 % calibradas con ¹³⁷Cs
- Magnitudes medidas: Tasa de Kerma en aire (nGy/h), Tasa de exposición (mR/h), Tasa de dosis equivalente (nSv/h).
- Temperaturas de operación: 40 °C a + 60°C

Las sondas tienen la posibilidad de ajustar por software los ciclos de medida (1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 y 120 min) y una capacidad de almacenaje de 12.800 valores. También incorporan un sensor de temperatura integrado. La lectura se puede realizar "*in situ*" a través del módulo DataGate a través de infrarrojos siendo la autonomía de la batería de 3 años. El equipo dispone de

¹ <u>http://www.genitron.de/products/products.html</u>

un software de control DataEXPERT, para almacenamiento y adquisición de los datos que va asociado a los equipos y permite realizar análisis estadísticos de las series de datos.



Figura 2.2 Sistema basado en sonda GammaTracer de Genitron-Saphymo.

Se han utilizado estas sondas con el propósito de comparar la medida instantánea de los radiómetros portátiles con una medida en continuo. En el protocolo de medida utilizado, se mide de forma simultánea la tasa de exposición en el punto elegido durante un periodo de veinte minutos. Dado que la medida de la sonda gammatracer es continua se anota la hora de inicio y de fin en sincronía con el reloj interno de la sonda. Las sondas operan con ciclos de medida de un minuto de forma que se toman veinte medidas de las que se obtiene la media aritmética para comparar con las medidas instantáneas de los radiómetros Ludlum. Las sondas se calibran periódicamente por el fabricante.

2.3.3 Espectrómetro de centelleo Canberra INSPECTOR-1000 modelo N1KN-3 con sonda de INa 3x3 IPRON-3

Para corroborar algunas medidas se utiliza este detector, aunque por ser mucho más complejo, se dedica fundamentalmente a medidas en laboratorio. El INSPECTOR 1000¹, es un equipo analizador multicanal (4096 canales) con sonda de INa(TI) que permite realizar espectrometría gamma "in situ". Se le pueden acoplar distintos tipos de sonda y en este trabajo se ha utilizado la sonda IPRON-3 de INa de 3x3 que por su gran volumen es muy eficiente para la detección de la radiación ambiental. Debido a su deriva térmica, este detector debe ser calibrado en energía antes de cada medida para lo que se utilizan fuentes encapsuladas de ¹³⁷Cs o ⁶⁰Co exentas, siendo, sus características, las siguientes:

• Sensibilidad: 32000 cps/mrem/h \pm 3,5%

¹ <u>http://www.canberra.com/products/1157.asp</u>

- Rango de energía: 50 keV 3 MeV.
- Tasas de dosis mínima y máxima: 10nSv/h/10 mSv/h

El INSPECTOR 1000 incorpora además un tubo Geiger-Muller de Canberra interno para la medida en rangos superiores a los que proporciona la sonda externa. La electrónica portátil es totalmente digital y dispone de funciones de graficado y análisis de espectros. Incorpora una versión reducida del software GENIE-2000 de Canberra para el análisis de espectros e identificación de radionúclidos. Los resultados se pueden exportar a cualquier plataforma informática para un análisis posterior más detallado. Admite calibración en eficiencia mediante LabSOCS.



Figura 2.3 Espectrómetro portátil INSPECTOR-1000 de Canberra y detalles de sus posibilidades como radiómetro.

El software permite seleccionar el "modo dosis" de forma que el inspector-1000 actúa como radiómetro, y dispone de varios modos para presentar los datos tal y como se muestra en la figura 2.3. En procedimiento de medida, cuando se utiliza como radiómetro, es similar al seguido con los radiómetros Ludlum. Se realizan verificaciones de calibración por el Servicio de protección Radiológica de la ULPGC y se han contrastado sus medidas en un Ejercicio Internacional de Intercomparación sobre Medidas de Radón Natural en Condiciones de Campo organizado por el Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria, LaRUC, y la empresa estatal Enusa Industrias Avanzadas, en sus instalaciones de Saelices el Chico.

El INSPECTOR-1000 tiene su modo de funcionamiento principal como espectrómetro. En el planteamiento inicial del trabajo de Tesis Doctoral, antes de disponer del sistema de espectrometría gamma de alta resolución, estaba programado realizar el análisis de muestras de suelos utilizando este espectrómetro como equipo de laboratorio fijo. En esta configuración la sonda IPRON-3 se sitúa en un blindaje cilíndrico de plomo de 10 cm de espesor y se controla mediante su propia unidad INSPECTOR1000 conectada a un ordenador fijo. Puesto que la espectrometría con detector de centelleo presenta una resolución en energía muy pobre, en relación a un detector de Germanio, es necesario utilizar líneas que presenten poca interferencia para determinar la actividad específica de los radioisótopos que se desean estudiar. Para los radioisótopos naturales y suponiendo equilibrio secular se utiliza la línea de 2,62 MeV del ²⁰⁸TI para estimar la concentración de actividad del ²³²Th, la línea de 1,76 MeV del ²¹⁴Bi para el ²³⁸U además de la línea de 1,46 MeV del ⁴⁰K. Las muestras se analizan en geometría Marinelli o bote de orina. Este tipo de detectores se ha utilizado favorablemente en el estudio de la radiactividad natural en islas volcánicas (Chiozzi et al., 1998, Chiozzi et al., 2000a, Chiozzi et al., 2001, Chiozzi et al., 2002b). Para la calibración se utiliza un procedimiento empírico (Pérez-Moreno et al., 2002a) que se detalla en el Apéndice 2. Como con posterioridad al inicio del proyecto de Tesis Doctoral, se contó con financiación para adquirir un espectrómetro gamma de alta resolución, las medidas espectrométricas se realizaron con el nuevo detector, no obstante los procedimientos de análisis de espectros y calibración empleados con el INSPECTOR, fueron de gran utilidad para la puesta en marcha y calibración del nuevo espectrómetro, razón por la que se ha incluido el Apéndice 2.

2.3.4 Radiómetro ALNOR Gamma meter 2414

En algunas medidas de campañas anteriores a este trabajo e incluidas en esta tesis, se utilizó también este detector. El radiómetro ALNOR 2414 es un detector de centelleo portátil adecuado para la medida de bajos niveles de radiación. No es un equipo compacto y consta de una sonda de centelleo plástico (polivinitolueno) con un volumen de detección cilíndrico de tres pulgadas y de un equipo electrónico en el que se muestra la medida en un display analógico. Está diseñado para proporcionar directamente la tasa de dosis equivalente. Tiene dos escalas semilogarítmicas de 10 nSv/h a 10^4 nSv/h, y de 10 µSv/h a 10^4 µSv/h lo que permite un amplio rango de medidas. La respuesta en energía es de 50 KeV a 4 MeV



Figura 2.4 . Radiómetro portátil ALNOR Gammameter 2414

2.4. Espectrometría gamma de alta resolución

2.4.1 Espectrometría gamma. Detectores de semiconductor

La espectrometría de rayos gamma es un método analítico que permite la identificación y cuantificación de la emisión gamma de isótopos radiactivos en una variedad de situaciones. En una sola medida y con una simple preparación de la muestra, permite detectar varias emisiones gamma de los radionúclidos que se encuentran en la muestra. La medida da un espectro de líneas; la altura de las mismas es proporcional a la actividad del radionúclido y su posición en el eje horizontal da una idea sobre su energía. Entre sus aplicaciones se pueden citar: la vigilancia de instalaciones nucleares, la salud ambiental, la medicina nuclear, la investigación de materiales, las ciencias ambientales o los usos industriales de radioisótopos. Una estimación conservadora (Reguigui, 2006) permite afirmar que más de 200.000 espectrómetros de rayos gamma están en uso en laboratorios académicos e industriales en todo el mundo. Hasta los años setenta los espectrómetros más utilizados eran de centelleo, pero a partir de los años ochenta se generalizó el uso de sistemas de espectrometría basado en semiconductores (normalmente de germanio ultra puro o HPGe) por su alta resolución energía (Gilmore and Hemingway, 1995). Un sistema típico de espectroscopia gamma consiste el propio detector de semiconductor, una fuente de alimentación de alto voltaje, un preamplificador (que generalmente forma parte del detector), un amplificador, un convertidor analógico digital (ADC) y un analizador multicanal (MCA). La función del sistema electrónico consiste en procesar los pulsos producidos por los electrones y ordenarlos por altura y energía. Frente a los detectores gaseosos este tipo de detectores presenta las siguientes ventajas:

- Presentan una mejor resolución en energía respecto a los detectores de centelleo o de ionización gaseosa, debido a que la ionización primaria producida en un semiconductor es mucho mayor que en un medio gaseoso.
- Se pueden construir con un volumen activo de detección mucho menor que los detectores gaseosos o de centelleo debido a que el poder de frenado de un sólido es mucho mayor que el de un gas. Esto permite efectuar medidas en intervalos de tiempo muy reducidos, con resolución de nanosegundos. Así, para la radiación gamma se dispone de mejor eficiencia en la detección con detectores de semiconductor que con detectores gaseosos.

No obstante, este tipo de detectores presenta también algunos inconvenientes que se resumen a continuación:

- Se degradan con relativa facilidad debido al impacto de la radiación (daño en la estructura cristalina debido a la irradiación del material).
- Al aumentar la temperatura la conductividad de los semiconductores aumenta, lo que provoca que a temperatura ambiente aparezcan en el cristal corrientes parásitas que enmascaran la señal debida a la ionización en el volumen sensible, que involucra, incluso en este tipo de

detectores, pequeñas cantidades de carga. Esto provoca que este tipo de detectores deba ir acompañado de un importante sistema de refrigeración.

A continuación se explican las bases físicas de funcionamiento y las características principales de este tipo de detectores.

2.4.2 Bases Físicas de funcionamiento de los detectores de semiconductor

2.4.2.1 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

Para comprender el funcionamiento de los detectores de semiconductor es preciso analizar la estructura de la materia y su comportamiento ante la conducción de la corriente eléctrica. Los niveles de energía de los electrones en los átomos que forman parte de un cristal no coinciden con los niveles de energía de los electrones para átomos aislados. A diferencia de un gas, en el que se pueden despreciar las influencias de unos átomos con otros, y los niveles de energía no se ven modificados, en un sólido cristalino, los electrones se ven sometidos no sólo al campo eléctrico creado por su propio ion, sino también a los campos eléctricos creados por todos los átomos de su alrededor. De esta forma, los niveles de energía de los electrones interiores no se ven apenas modificados mientras que los niveles de los electrones exteriores cambian extraordinariamente, ya que estos electrones están solicitados por más de un átomo del cristal. El acoplamiento entre las capas exteriores de electrones de los átomos da como resultado una banda de estados de energía muy próximos entre sí, en lugar de los niveles de energía discretos muy separados del átomo aislado. Por tanto, un solo nivel energético atómico en el caso de un átomo aislado se divide en una banda de un gran número de niveles energéticos que están muy próximos en su valor de la energía. Debido a que el número de niveles en la banda es tan grande, se encuentran espaciados de un modo casi continuo dentro de la misma. Existe una banda separada de niveles para cada nivel energético particular del átomo aislado. Las bandas de energía correspondientes a estos niveles individuales, en el caso de un número grande de átomos en un sólido, pueden estar ampliamente separadas en energía, pueden ser cercanas o incluso pueden solaparse dependiendo del tipo de átomo y del tipo de enlace en el cristal.

La resolución de la ecuación de Schrödinger para potenciales periódicos de una red cristalina predice que entre bandas adyacentes de energía hay regiones o **bandas prohibidas** donde no se tienen niveles permitidos de energía. La naturaleza de las bandas de energía determina si el material es un conductor, un semiconductor o un aislante. En los aislantes y semiconductores en el cero absoluto de temperatura los electrones más externos (llamados electrones de valencia) llenan completamente la banda ocupada más alta, llamada por esto **banda de valencia**. La siguiente banda más alta, llamada **banda de conducción**, está completamente vacía a esta temperatura. La figura 2.5 muestra tres tipos posibles de estructura de bandas para un sólido.

Las diferencias de comportamiento en los sólidos frente a la conducción eléctrica pueden explicarse a partir de su diagrama de bandas de energía. En los aislantes, la distancia energética (o Gap) entre la banda de valencia (que se pueden considerar como estado energéticos que implican la ligadura del electrón a su ion) y la banda de conducción (donde hay una gran cantidad de estados energéticos libres) es muy grande. Hay que hacer notar que cuando se dice que la distancia entre bandas es grande, significa, que se debe aportar una gran cantidad de energía a los electrones para que cambien de estado. Esta situación se muestra en la figura 2.5 a. En contraposición, la figura 2.5c corresponde a un material conductor. Como se observa, en este tipo de materiales, las dos bandas están superpuestas y el fenómeno de la conducción se da siempre, no siendo necesario ningún aporte adicional de energía para que exista la conducción.



Figura 2.5 Diagrama de bandas de energía para (a) aislantes, (b) semiconductores, (c) conductores.

Si la distancia entre las dos bandas energéticas es pequeña significa que aportando al material una pequeña cantidad de energía, habrá electrones que puedan pasar de la banda de valencia a la de conducción, o lo que es lo mismo, que dejen de estar ligados a sus respectivos átomos y pueden contribuir a la conducción. Esta situación, reflejada en la figura 2.5b, es la que presentan los semiconductores. La anchura de la banda prohibida (o energía del Gap) es en estos casos del orden del 1 eV frente a la de 10 eV o más típica de los aislantes. Así, por ejemplo, el germanio, que es un semiconductor muy utilizado para construir detectores de radiación, tiene un gap de 0.7 y el silicio, posiblemente el semiconductor más utilizado, lo tiene de 1.1 eV. El aporte de energía adicional puede conseguirse aumentando su temperatura, irradiando el material o aplicando un campo eléctrico. En esta situación, no sólo los electrones que han pasado a la banda de conducción contribuyen a la conducción, ya que éstos dejan un hueco en la banda de valencia que puede ser ocupado por otro electrón de la banda de valencia.

Los elementos semiconductores más utilizados son el silicio y el germanio aunque existen otros elementos como el estaño, y compuestos, como el arseniuro de galio que se comportan como tales. El germanio y el silicio pertenecen al grupo IVA de la tabla periódica por lo que poseen cuatro electrones de valencia, Esto hace que los átomos de estas sustancia se asocien mediante enlace covalente para formar el sólido cristalino. En este tipo de enlace cada átomo de silicio se encuentra rodeado de cuatro vecinos próximos con los que comparte sus cuatro electrones de valencia completando así, en cierto sentido, su última capa. La figura 2.6a se representa un modelo bidimensional de la red cristalina del silicio (la del germanio sería análoga).



Figura 2.6 (a) Modelo bidimensional de los enlaces en un cristal puro de silicio a temperaturas muy próximas al cero absoluto. (b) Mecanismo de formación de un par electrón – hueco. (c) Diagrama energético del mecanismo de formación de pares electrón hueco. Un electrón absorbiendo energía (térmica, radiación) pasa a la banda de conducción dejando un hueco en la banda de valencia.

A temperaturas próximas al cero absoluto, todos los electrones hacen el papel de enlace y tienen energías correspondientes a la banda de valencia, que está completa, se comporta como un aislante perfecto. A temperaturas superiores al cero absoluto, algunos electrones de la banda de valencia pueden adquirir suficiente energía térmica, y al superar la banda prohibida, pasar a la banda de conducción, lo cual quiere decir que estos electrones han dejado los enlaces y se han convertido en electrones libres en el sentido de que pueden moverse por el cristal bajo la influencia de cualquier campo exterior aplicado. Cuanto más elevada sea la temperatura, mayor será el número de electrones que alcanzan la banda de conducción, a temperatura ambiente ese número es suficiente como para poder decir que el semiconductor conduce la corriente eléctrica.

Como se muestra en la figura 2.6b, un electrón de valencia que se ha convertido en electrón de conducción, deja una vacante, de forma que, si se aplica un campo eléctrico al semiconductor, ésta puede ser ocupada por otro electrón de valencia que deja, a su vez, una nueva vacante en la región donde se encontraba. El efecto es el de una carga positiva con la misma carga que el electrón moviéndose en la dirección del campo eléctrico, ésta vacante que se desplaza por la red se denomina *hueco* y se considera como un portador de carga que contribuye a la conducción. El concepto de hueco como partícula cargada es un artificio que permite describir

de forma sencilla el proceso complejo de movimiento de los electrones de valencia en una capa incompleta.

Paralelamente al proceso de generación térmica de pares electrón hueco se produce el de recombinación; algunos electrones de la banda de conducción pueden perder energía (emitiéndola en forma de radiación luminosa, por ejemplo) y pasar a la banda de valencia ocupando un nivel energético que estaba libre, es decir, recombinándose con un hueco. Si la temperatura se mantiene constante, los procesos de generación y recombinación están equilibrados de forma que existirá el mismo número de huecos en la banda de conducción que en la banda de valencia. A un semiconductor puro, como el descrito se le denomina *semiconductor intrínseco*.

La conductividad de un semiconductor intrínseco como el germanio o el silicio, se puede mejorar si añade un pequeño porcentaje de átomos trivalentes o pentavalentes. A un semiconductor de este tipo, se le denomina *semiconductor extrínseco* y el proceso de adicción de estas impurezas se suele denominar dopado del semiconductor. Los semiconductores dopados con impurezas pentavalentes se denominan semiconductores tipo N, mientras que los que incorporan impurezas trivalentes se denominan de tipo P.

En un semiconductor del tipo N los átomos de la impureza desplazarán algunos átomos de silicio (o germanio) del cristal. Cuatro de los cinco electrones de valencia ocuparán enlaces covalentes, y el quinto quedará inicialmente sin enlace (figura 2.7a). Este electrón sobrante del átomo pentavalente no ejerce ninguna función sobre el enlace covalente, es decir, no contribuye a mantener unido el cristal y estará débilmente unido al átomo de forma que la energía requerida para liberarlo es mucho menor que la necesaria para romper un enlace covalente. Este hecho se traduce, desde el punto de vista energético, en la aparición de niveles energéticos permitidos a muy poca distancia de la banda de conducción como se muestra en la figura 2.7b.



Figura 2.7 (a) Semiconductor tipo N de silicio dopado con impurezas pentavalentes de antimonio (Sb) (b) Diagrama de bandas de un semiconductor tipo N.

A bajas temperaturas el electrón estará ligado a su átomo, pero al aumentar la temperatura pasará fácilmente a la banda de conducción, posibilitando así, la conducción eléctrica,

sin que se hayan formado pares electrón hueco, ya que no se ha roto ningún enlace. Estas impurezas que ceden electrones se denominan impurezas donadoras y los niveles energéticos que introducen, niveles donadores. Si se aumenta lo suficiente la temperatura comenzarán a romperse los enlaces y a formarse, por tanto, pares electrón-hueco de forma que la conducción se llevará a cabo por ambos tipos de portadores, no obstante, la concentración de electrones de conducción será mucho mayor que la de huecos en la banda de valencia de forma que los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos minoritarios. Dado que las impurezas están presentes en cantidades siempre muy pequeñas, a temperaturas elevadas el número de pares de portadores formados puede llegar a ser mucho mayor que el número de átomos de impurezas y el semiconductor se comportará como intrínseco. Las impurezas pentavalentes que se suelen emplear son antimonio, fósforo y arsénico.



Figura 2.8 (a) Semiconductor tipo P de silicio dopado con impurezas trivalentes de Indio (In). (b) Diagrama de bandas de un semiconductor tipo P.

En los semiconductores tipo P las impurezas son átomos con tres electrones de valencia que al intercalarse en la red cristalina dejan un enlace por átomo sin completar (figura 2.8a). Esto da como resultado la aparición de niveles energéticos próximos a la banda de valencia (figura 2.8b), que se denominan niveles aceptores. A temperaturas próximas al cero absoluto, estos niveles están vacíos, al aumentar la temperatura algunos electrones de la banda de valencia se promocionarán hasta estos niveles provocando la aparición de un hueco. Los electrones situados en los niveles aceptores no contribuyen a la conducción ya que forman parte de un enlace. Sin embargo, los huecos que han dejado en la banda de valencia sí contribuyen, de forma que aunque la temperatura sea suficientemente alta para que se produzcan pares electrón–hueco, la conducción en los semiconductores tipo P se debe fundamentalmente a huecos. De la misma forma que en el caso de los semiconductores tipo N, a temperaturas elevadas la concentración intrínseca llega a enmascarar a la extrínseca y el semiconductor se comporta como si fuese puro.

2.4.2.2 La unión PN

La unión PN es una estructura formada por un cristal semiconductor intrínseco en el que una parte se ha dopado con impurezas donadoras dando lugar a un semiconductor extrínseco tipo N, y la otra parte se ha dopado con impurezas aceptoras dando lugar a una parte tipo P. Una unión de este tipo se puede construir, por ejemplo, difundiendo impurezas aceptoras sobre substrato tipo N para convertir ciertas zonas de interés en tipo P.

Los métodos para realizar esta difusión son muy diversos y se pueden consultar en cualquier manual de electrónica integrada como por ejemplo en (Delfiner, 2009). En circuito abierto, a una temperatura determinada, en la zona N existirá una cierta concentración de electrones procedentes de la ionización de las impurezas y, en menor proporción, de la generación térmica de pares electrón – hueco, asimismo existirá una pequeña concentración de huecos procedentes de la generación térmica exclusivamente. Se dice, por tanto, que en la zona N los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los minoritarios. En la zona P, por el contrario, serán mayoritarios los huecos y minoritarios los electrones.



Figura 2.9 Unión PN en equilibrio

Esta diferencia de concentración de los portadores de carga, provoca la difusión de electrones de la Zona N a la P y de huecos de la zona P a la N. Como consecuencia de esta difusión los electrones que pasan a la zona P se recombinan con los huecos existentes en ella produciendo iones negativos mientras que dejan iones positivos en la zona N cercana a la unión. Este proceso no alcanza la totalidad de ambas regiones debido a que, conforme los electrones se difunde de la zona N a la P, aparece un campo eléctrico debido a iones fijos de la red que se opone a la difusión y merced a la cual se alcanza el equilibrio, es decir, una vez que un número suficiente de electrones se ha desplazado de la zona N a la P los siguientes se verán repelidos por la carga negativa de los que llegaron con anterioridad y atraídos por los iones positivos de la zona N que quedaron vacantes.

Por lo tanto a ambos lados de la unión aparece una zona en la que sólo existen iones fijos de la red y no hay apenas portadores de carga libre, esta zona se denomina Zona de Carga Espacial o también Zona de Transición. La anchura de esta región es del orden de la longitud de

onda de la luz visible (0.5 micras). Como se ha dicho, en el interior de esta estrecha franja de carga espacial no existen portadores móviles. Una vez alcanzado el equilibrio, a ambos lados de la zona de transición se recupera la neutralidad eléctrica. En la figura 2.9 se muestra una unión PN en equilibrio identificando las distintas zonas.



Figura 2.10 (a) Polarización Directa de la unión PN. (b) Polarización Inversa.

Una unión PN se polariza aplicando una diferencia de potencial externa a sus terminales. Se dice que se ha sometido la unión a una polarización directa cuando se conecta el polo positivo de la batería al semiconductor P y el negativo al semiconductor N (figura 2.10a). En estas condiciones existe un campo eléctrico a lo largo de todo el dispositivo que favorece la difusión de portadores mayoritarios. Como consecuencia disminuye la zona de transición y se obtiene una corriente de portadores mayoritarios en ambos sentidos que crece rápidamente para incrementos pequeños de la tensión externa. La polarización es inversa si el lado P está a potencial negativo respecto al N (figura 2.10b). En este caso el campo externo se opone a la difusión de portadores mayoritarios que son alejados de la unión con lo que la anchura de la zona de transición aumenta. Incrementando la tensión externa desde cero, es suficiente un valor muy pequeño para que el campo resultante en el semiconductor anule completamente la difusión de portadores mayoritarios (corriente inversa de saturación) mantenida por la producción de pares electrón - hueco en todo el cristal, que es prácticamente independiente de la tensión inversa. Los valores típicos de la corriente inversa están, a temperatura ambiente, en el orden de los microamperios.



Figura 2.11 Detector de semiconductor

Una vez explicadas las propiedades de la unión PN se está en condiciones de explicar su uso para construir detectores de radiación. El mecanismo básico es el siguiente: si se polariza inversamente la unión, se consigue una zona de carga espacial relativamente ancha en la que no existen portadores de carga libres, la incidencia de radiación en esta zona provoca que algunos electrones de la banda de valencia adquieran suficiente energía para pasar a la de conducción (por mecanismos de interacción radiación-materia que se detallan más adelante) originando pares electrón hueco en la zona de transición. Estos portadores son acelerados por el campo existente en la unión (dirigido de la zona N a la P) y captados rápidamente por los electrodos de polarización, así, la zona de transición actuaría de forma análoga al volumen sensible de una cámara de ionización.

En la figura 2.11 se muestra el proceso de formación de un par electrón – hueco en un detector como el descrito. Al llegar la carga generada a los electrodos de polarización se detecta un pulso de corriente en el amperímetro.

2.4.3 Tipos de detectores de semiconductor

Como se acaba de comentar, se pueden construir detectores de radiación con una unión PN inversamente polarizada. Estos detectores son denominados *detectores de unión*. Bajo esta denominación común se agrupan tres tipos de detectores llamados, *de unión difusa, de barrera de superficie, compensados con litio,* y variantes de éstos. Se describirán, en lo que sigue, las configuraciones básicas de los distintos tipos de detectores de unión. La discusión que sigue está extraída de (Aramburu and Bisbal, 1996)

a) Detectores de unión difusa

La fabricación de este tipo de detector se inicia a partir de un cristal homogéneo de material de tipo P. A continuación, una de sus superficies se expone a un vapor de una impureza donadora, generalmente fósforo, convirtiendo una cierta región del cristal próxima a dicha superficie de tipo P a tipo N. Se forma por tanto una unión P-N a una distancia de la superficie donde las impurezas N y P invierten sus concentraciones relativas.

Para penetrar en la zona sensible de un detector de semiconductor (zona de carga espacial o zona de vaciamiento), una partícula nuclear debe, por lo general, atravesar una zona previa (denominada capa muerta o ventana del detector) insensible a la detección, es decir, la energía perdida por las partículas en esta zona no contribuye a la formación del impulso eléctrico resultante de la detección.

La existencia de una ventana o capa muerta en el detector contribuye de forma sustancial al deterioro de la resolución del sistema de detección. La resolución será tanto mejor cuanto menor sea el espesor de la ventana o capa muerta del detector. La principal desventaja de estos detectores es la existencia de una *capa muerta* entre la superficie y la zona de carga espacial, que debe ser atravesada por la radiación, con el consiguiente deterioro del espectro obtenido.

b) Detectores de barrera de superficie

En éstos se parte generalmente de un disco de silicio de tipo N y, por la acción de un medio ácido sobre su superficie, se consigue una alta densidad de trampas de electrones que hacen el papel de material de tipo P. El proceso culmina con la evaporación de una capa extremadamente fina de oro para realizar el contacto eléctrico. Estos detectores tienen un mayor poder de resolución que los anteriores pero son menos robustos e introducen más ruido que los primeros.

c) Detectores de implantación iónica

En los detectores de implantación iónica se emplea la técnica de la implantación de iones (bombardeo con iones acelerados del material a tratar), para formar capas N o P mediante la aceleración de iones de fósforo o de boro, por ejemplo. Con ello se consiguen ventanas muy delgadas, comparables a las obtenidas con los detectores de barrera de superficie, siendo, sin embargo, mucho más estables y más resistentes a condiciones ambientales desfavorables.

d) Detectores compensados con litio (PIN)

La detección de la radiación se debe producir en un detector de unión en la Zona de Carga Espacial ya que los portadores producidos en las zonas N o P deberían moverse exclusivamente por difusión, que es un proceso muy lento una vez alcanzado el equilibrio en la unión. En la zona de carga espacial existe un campo eléctrico generado por los iones fijos de la red que en equilibrio neutraliza el campo externo aplicado. Este campo eléctrico estará dirigido por tanto desde la zona N a la P y provoca que electrones generados en la Zona de Carga espacial se dirijan a la zona N y los huecos a la Zona P, apareciendo así una corriente inversa en el circuito.

Por ello es importante que la zona de carga espacial sea los más ancha posible, además, al ser tanto el germanio como el silicio elementos de bajo número atómico (32 y 14 respectivamente), la probabilidad de interacción con radiación gamma de más de 500 keV es bastante baja, con lo que una zona de interacción mayor aumentará la probabilidad de interacción. Si bien se puede ensanchar la zona de carga especial aumentando la tensión inversa de polarización, ésta no es una solución práctica porque no conviene trabajar a grandes tensiones y además el aumento de anchura es muy pequeño. Por todo lo expuesto, ha sido necesario desarrollar métodos de fabricación de semiconductores que aumenten la zona de carga espacial en las uniones. El proceso más utilizado es el llamado de compensación.

Se dice que un semiconductor extrínseco está compensado cuando se le han añadido una concentración de impurezas que hace que se comporte como intrínseco. Es decir, si a un semiconductor tipo P se le añaden impurezas donadoras que proporcionen electrones de exceso para compensar los huecos de las impurezas aceptoras, el material resultante se comportará como un semiconductor intrínseco. Una pregunta que podría hacerse es ¿por qué compensar un semiconductor extrínseco en lugar de utilizar un semiconductor intrínseco? La respuesta es

bastante sencilla, mientras que obtener un semiconductor ultrapuro sin ningún tipo de impurezas requiere un proceso muy complejo, compensar un semiconductor extrínseco de forma casi perfecta es relativamente sencillo desde el punto de vista tecnológico. En los detectores compensados, mediante la compensación de la zona intermedia entre el semiconductor tipo N y el tipo P se obtendrá una zona de carga espacial que puede alcanzar una anchura del orden de centímetros.

Tanto en el silicio como en el germanio el material más asequible suele ser del tipo P, debido a que en los mejores procesos de purificación del producto base, las impurezas remanentes, (especialmente boro) son aceptoras. Se requiere, por tanto, la incorporación de impurezas donadoras para alcanzar la compensación. El elemento más utilizado para este proceso es el litio ya que se ioniza con facilidad y es de pequeño tamaño con lo que es relativamente sencillo introducirlo en la red cristalina. El proceso utilizado para introducir este elemento el substrato tipo P se conoce con el nombre de difusión de iones.

Por consiguiente un detector de unión compensado, está compuesto (figura 2.12) por un cristal tipo P base en el que por adición de impurezas se han establecido tres zonas: una zona estrecha fuertemente dopada con litio que se ha convertido en semiconductor extrínseco tipo N, (estas zonas fuertemente N se suelen denominar N+), una zona cuya anchura puede alcanzar los 2 cm, de semiconductor compensado (que se denomina zona I), y finalmente una zona del material P original. Este tipo de estructura semiconductora se suelen denominar como un dispositivo PIN. Los detectores así construidos se suelen denominar como Ge(Li) para los de germanio y Si(Li) para los de silicio.



Figura 2.12 Detector de unión compensado con litio. La compensación proporciona un volumen de interacción mayor.

Para recolectar las cargas rápidamente es necesario aplicar tensiones elevadas, del orden de 0,5 a 5 kV, a través de la región compensada. En general, todos los detectores de semiconductor deben operar a bajas temperaturas, ya que así se minimiza la generación térmica de pares electrón-hueco en la zona de transición que crea una corriente inversa de fuga que

puede enmascarar a la señal de corriente procedente de la generación de pares por la interacción de la radiación en el volumen sensible. En los detectores compensados con litio, la operación a bajas temperaturas es necesaria además porque la concentración de litio requerida para la compensación es muy elevada y a temperatura ambiente la alta movilidad del litio hace que tienda a emigrar de la zona compensada degradándose el detector. Por estas razones los detectores de este tipo deben trabajar a temperaturas muy bajas y llevan un circuito de refrigeración, de nitrógeno líquido por lo general, que mantiene la temperatura del orden de 77 K. Esta degradación de los detectores compensados a temperatura ambiente constituye una de sus principales desventajas.

e) Detectores de germanio ultrapuro (HPGe)

La degradación que sufren los detectores compensados a temperatura ambiente constituye una de sus principales desventajas y ha conducido al desarrollo de los detectores de germanio de alta pureza. Este desarrollo ha sido posible gracias a los últimos avances de la tecnología de los semiconductores, viniendo a desplazar totalmente el empleo de los detectores de Ge(Li).

En la actualidad es posible obtener con relativa facilidad germanio de una excepcional pureza con el que se pueden alcanzar con sólo 1000 V de polarización, anchuras de la zona de carga espacial del orden de 10 mm. Permitiendo conseguir detectores cuyos volúmenes activos son comparables a los de Ge(Li) sin necesidad de compensación. Estos detectores se suelen denominar como detectores de germanio ultrapuro o de germanio intrínseco (HPGe).



Figura 2.13 Detector HPGe Criostato y Dewar (adaptado de (Debertin and R.G., 1988b)

La principal ventaja de estos detectores es que pueden permanecer a temperatura ambiente sin sufrir deterioro alguno. No obstante, a fin de conseguir niveles bajos de ruido debido a la alta corriente de fuga que presentan, es aconsejable mantenerlos a la temperatura del nitrógeno líquido durante su operación. De los detectores basados en semiconductores, el HPGe (Germanio de alta pureza) es el más utilizado para los sistemas de espectrometría gamma y es el utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral.



Figura 2.14 Modelo 7500SL Criostato con varilla vertical (Camberra)

2.4.4 Instrumentación electrónica asociada a los sistemas de espectrometría

Cuando un detector de radiación es excitado por una partícula nuclear o fotón, a través de los distintos procesos para los distintos tipos de detectores tiene lugar, en general la liberación de una cierta cantidad de carga eléctrica. Esta carga fluye hacia el llamado electrodo colector del detector en cuyo circuito exterior aparece un impulso eléctrico, tales impulsos han de ser recibidos por dispositivos electrónicos diseñados para proporcionar información, bien sea simplemente sobre la intensidad de la radiación que excita al detector, o porque sobre alguna de sus características particulares como: naturaleza, energía, coincidencia temporal con otra radiación, etc. En esta sección se analizan brevemente la electrónica que trata los impulsos de salida de los detectores. La discusión que sigue está extraída de (Aramburu and Bisbal, 1996), (Tanarro, 1973)

En la figura 2.15 se representa un esquema simplificado de la instrumentación asociada a un detector de radiación genérico. Como se indica en la figura a continuación del detector se encuentran el circuito de salida, el conjunto preamplificador-amplificador y finalmente el sistema de tratamiento de las señales, estando el detector polarizado por una fuente de alta tensión.



Figura 2.15 Esquema simplificado de la instrumentación asociada a los detectores de radiación

2.4.4.1 Fuentes de alta tensión

Son equipos destinados a polarizar adecuadamente los diversos tipos de detectores de radiaciones nucleares. Suministran una gama de tensión muy amplia (de 100 V a 2500 V) que debe estar muy bien estabilizada pues la amplitud de los impulsos que proporcionan detectores como los contadores proporcionales o las sondas de centelleo es extremadamente sensible a las variaciones de la tensión de polarización.

2.4.4.2 Preamplificadores y amplificadores de impulsos

La mayoría de los detectores de radiaciones nucleares proporcionan impulsos de amplitud muy reducida para poder ser directamente contados y analizados y en consecuencia las señales de detección han de ser sometidas a un proceso de amplificación. Esto se consigue acoplando al circuito de salida del detector un sistema amplificador que en general estará compuesto de varias etapas.

La etapa de salida realmente representa la capacidad asociada a los electrodos y la resistencia de salida del detector formando el conjunto un circuito RC. Como la amplitud de los impulsos de detección es directamente proporcional a la cantidad de carga que llega a los electrodos e inversamente proporcional a la capacidad asociada al electrodo colector del detector, conviene mantener dicha capacidad lo más pequeña posible a fin de no degradar la amplitud de los impulsos y evitar el riesgo de que sean enmascarados por el ruido eléctrico presente de manera inevitable en todo circuito.

Por otra parte, el tiempo que tarda el condensador en tomar la carga y en descargarse depende del producto RC llamado constante de tiempo τc del circuito. Si esta constante de tiempo es muy pequeña, el condensador constituido por los electrodos se descargará rápidamente de forma que la carga, a medida que arriba a los electrodos, se transfiere a la resistencia. Esto es

indeseable ya que lo ideal es que toda la carga producida en un evento ionizante quede almacenada en el condensador y que posteriormente se entregue a la resistencia produciendo un pulso de amplitud $\Delta V=Q/C$, lo cual se consigue, si la constante de tiempo del circuito es mucho mayor que el tiempo de deposición de la carga en los electrodos de forma el proceso de descarga sea tan lento que dé tiempo a que se deposite toda la carga producida en el evento ionizante. Por ello la resistencia R debe tener un valor alto y se dice, entonces, que el circuito de salida es de alta impedancia.

El impulso de tensión que se produce en un proceso de detección se debe transmitir en muchas ocasiones a bastante distancia del detector para ser tratado. En estos casos se hace necesario proporcionar un medio de transmisión a los impulsos del detector. Este es un problema no trivial debido a la débil señal que hay que transmitir, ya que si se utiliza un cable ordinario no apantallado, sobre éste se introducen toda suerte de señales espúreas procedentes del fondo electromagnético habitual en la sociedad moderna (teléfonos móviles, señales de TV, etc..). Pudiéndose evitar utilizando un cable apantallado (o blindado) como el coaxial. El problema es que, por su configuración, este tipo de cables presenta grandes efectos capacitivos de forma que es como si aumentaran la capacidad de salida del detector, lo que implica una disminución de la amplitud de los impulsos.

Desde el punto de vista de la teoría de circuitos, las causas de la atenuación de la señal en el cable coaxial son claras: el detector tiene un circuito de salida de alta impedancia, pero por otra el cable coaxial presenta una baja impedancia de entrada. Este tipo de situaciones es frecuente en la electrónica y se soluciona utilizando un circuito adaptador de impedancias que en la literatura sobre instrumentación para la medida de radiación se denomina preamplificador (porque está previo al amplificador, no porque amplifique la señal). Este dispositivo presenta una elevada impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, de forma que permite el paso del impulso evitando la atenuación debida al cable coaxial.

Tras el preamplificador, se sitúa el amplificador, módulo electrónico que recibe los impulsos del preamplificador, magnificándolos hasta llevarlos a una amplitud comprendida entre 0 y 10 voltios, lo que resulta idóneo para los analizadores que procesan la señal de salida.

El amplificador sí puede estar unido al preamplificador por un cable apantallado de una cierta longitud pues, como ya se ha indicado, la baja impedancia de salida de este último impide la degradación de los impulsos. Los amplificadores llevan siempre mandos para ajustar su ganancia (factor de amplificación) y en ocasiones también mandos para ajustar filtros internos (las llamadas constantes de tiempo) que permiten realzar la señal frente al ruido electrónico o conformar el aspecto temporal de las señales a fin de adecuarlas al tratamiento subsiguiente. Algunos también van provistos de llaves de conmutación que permiten invertir la polaridad de los impulsos, a fin de adaptar ésta a la requerida por el resto de los equipos.

2.4.4.3 Discriminadores y conformadores de impulsos. Contadores e integradores

Los impulsos que proceden del preamplificador no sólo necesitan ser amplificados, sino que también tienen una forma y duración poco adecuados para su procesamiento directo ya que se trata de pulsos de subida rápida y bajada muy lenta.

Para que los impulsos procedentes del contador puedan ser contados de forma fiable, es necesario tratar la señal de forma que presente una amplitud adecuada y una duración bien definida. El dispositivo encargado de esta tarea es el conformador de impulsos.

Por otra parte, como el ruido electrónico está constituido por un gran número de impulsos de pequeña amplitud, éstos podrían ser interpretados en las etapas posteriores como debidos a radiaciones de baja energía. Para evitar la presencia de estos impulsos parásitos los conformadores de impulsos, además de su función conformadora, suelen tener la posibilidad de descartar todos los impulsos procedentes del detector que estén por debajo de un determinado umbral. En este caso se dice que se trata de un discriminador-conformador de impulsos. Típicamente estos dispositivos entregan a su salida un impulso lógico (básicamente un pulso cuadrado de 5 V de amplitud y 50 µs de duración) cada vez que se recibe a la entrada un impulso de amplitud superior a un umbral ajustable. El nivel de discriminación variable permite obtener las condiciones óptimas de eliminación de impulsos parásitos sin pérdida apreciables de impulsos genuinos. Los impulsos debidamente conformados se envían a distintos tipos de dispositivos para ser analizados. El más elemental es el contador de impulsos (o escala de recuento) que son dispositivos que permiten totalizar los impulsos de detección conformados a lo largo de un intervalo de tiempo determinado. Mediante este dispositivo se obtiene una indicación digital del número de impulsos que arriban al detector. No obstante, en ocasiones se prefiere una indicación analógica de la tasa de recuento de impulsos en lugar de la indicación digital que proporcionan los contadores. Esto se consigue mediante dispositivos que, de forma no del todo correcta, reciben el nombre de integradores de impulsos. En realidad son convertidores frecuencia - tensión que proporcionan a la salida una tensión continua proporcional a la frecuencia de los impulsos aplicados a la entrada. En algunos equipos la relación de proporcionalidad tiene lugar entre la tensión de salida y el logaritmo de la tensión de entrada, por lo que cabe distinguir entre integradores lineales e integradores logarítmicos de impulsos. Los integradores de impulsos resultan especialmente útiles para obtener registros gráficos de la tasa de recuentos.

2.4.4.4 Medida del espectro de amplitudes. Analizadores multicanal

Los impulsos que proceden de un detector de radiación nuclear pueden presentar una gran diversidad de amplitudes. En ocasiones la razón principal de este hecho es que la fuente radiactiva que se está observando emite partículas con un espectro continuo de energías, como es el caso de los emisores (β , o con varias energías discretas como es el caso de muchos emisores α

y γ). Sin embargo, aun en el caso de que el emisor sea rigurosamente monoenergético, los mecanismos de detección introducen efectos secundarios que contribuyen a esa variedad de amplitudes que se ha mencionado.

Un análisis preciso de las características de la radiación requiere, en estos casos, que la cadena de detección pueda funcionar selectivamente totalizando únicamente los impulsos cuyas amplitudes estén comprendidas entre límites bien definidos que puedan ser fijados por el operador. El selector de amplitudes más sencillo que se utiliza en la instrumentación nuclear es el llamado analizador monocanal. Estos dispositivos emplean simultáneamente dos discriminadores fijados a distinto nivel de discriminación para obtener por diferencia entre los resultados de ambos en un mismo intervalo de tiempo, el número de impulsos de amplitud comprendida entre los dos niveles. Al intervalo energético definido por los dos niveles de discriminación se le denomina canal. La anchura del canal (ventana) suele ser variable de forma que se puedan obtener espectros más finos o más groseros, además para poder medir en todo el espectro de amplitudes debe ser posible poder variar la situación (centro) del canal. Mediante un analizador de este tipo variando la posición del canal se obtiene la curva diferencial de distribución de amplitudes. La mayor o menor resolución del espectro dependerá de la anchura del canal que se seleccione. Evidentemente cuanto menor sea la anchura del canal mayor será la resolución un mayor el número de medidas que será necesario realizar.

Las salidas de los discriminadores que definen el canal suelen enviarse a un dispositivo de anticoincidencia de forma que a la salida del mismo, y mediante una escala de recuento, se obtiene directamente el número de impulsos de amplitud comprendida dentro de un canal. Existen analizadores de un canal automáticos, en los que la situación de la ventana recorre muy despacio y a velocidad constante la zona a explorar.

El inconveniente que presenta este tipo de analizador de amplitudes es que al trazar con ellos un espectro completo de energías y mientras se cuentan los impulsos de amplitud correspondientes a una determinada posición del canal, se ignoran todos los demás impulsos que está suministrando el detector. En muchos casos, esta considerable pérdida de información es inadmisible. Así, cuando la muestra a analizar es de actividad muy débil el tiempo de recuento en cada posición del canal debe ser muy grande para poder conseguir una precisión estadística aceptable. De forma que la medida de todo el espectro precisará muchas horas sobre todo si la resolución requerida exige una pequeña anchura del canal. Otro ejemplo, aún más evidente, se tiene cuando la actividad de la muestra no puede considerarse constante durante la duración de la medida, sino que decae con un período relativamente corto. Se deberá entonces medir simultánea y continuamente, con otro detector, la actividad relativa de la muestra y normalizar respecto de dicha actividad las medias obtenidas en cada posición del canal. De lo expuesto se deduce que, en múltiples ocasiones, será necesario registrar al mismo tiempo los impulsos correspondientes a todos los canales en los que se desea dividir el espectro total a analizar, aprovechando así al máximo la información proporcionada por el detector. Esta posibilidad la ofrecen los llamados analizadores multicanal de amplitud de impulsos.

Los primeros analizadores multicanal estaban constituidos por una agrupación conveniente de analizadores monocanal ya que de la misma forma que dos discriminadores definen un canal, n+1 discriminadores polarizados de forma oportuna, definirán n canales. En la práctica, este tipo de analizadores adolece de algunos defectos importantes, entre los que destaca la dificultad de mantener constantes los umbrales preajustados de un gran número de discriminadores durante largos intervalos de tiempo. Este efecto, inevitable en la práctica, conduce a distorsiones importantes en los espectros medidos. Estas desventajas, unidas a las ventajas el tratamiento informático para el procesado y almacenamiento de información, han dado lugar al desarrollo de un nuevo tipo de analizador multicanal basado en la conversión analógico – digital de los impulsos analógicos recibido por el detector en trenes de impulsos lógicos cuya longitud es proporcional a la amplitud del impulso de detección y su posterior recuento por un sistema informatizado. Este es el tipo de equipo utilizado en la actualidad por la mayoría de los sistemas y en este trabajo de Tesis Doctoral.

Los analizadores multicanal actuales (MCA por su siglas en inglés) son dispositivos multifuncionales. Recolectan y ordenan los pulsos procedentes del amplificador (mediante una tarjeta de conversión analógico-digital o ADC por su sigla en inglés), almacenan y ordenan datos, los muestran e incluso pueden realizar análisis de los datos y preparar los resultados para distintos tipos de salida. El diagrama de bloques de un MCA típico se muestra en la figura 2.16.



Figura 2.16 Diagrama funcional de bloques de un analizador multicanal (MCA).

Entre las características principales que definen a un MCA se pueden destacar las siguientes:

 a) <u>Linealidad</u>. En un MCA ideal debería haber una relación lineal entre la altura del pulso de entrada y el número del canal al que se asigna el contaje correspondiente al pulso. La relación de linealidad normalmente presenta un pequeño "offset" en cero (hay una cierta amplitud mínima a la que no se asigna ningún canal) que es ajustable en el ADC de forma que se asegure que los pulsos pequeños de ruido no se procesan. En los MCA reales se producen desviaciones del comportamiento ideal causadas por fluctuaciones en la ganancia del amplificador debido a variaciones en la temperatura o de la tensión de alimentación de los equipos (entre otras causas) que puede provocar un desplazamiento de los picos del espectro en varios canales.

En las especificaciones de los sistemas de espectrometría el fabricante proporciona su grado de linealidad indicando bien la *no-linealidad integral* o la *no-linealidad diferencial*. La *no-linealidad integral* mide la desviación respecto a la respuesta ideal del sistema que por lo general se especifica en porcentaje sobre el rango de medida (por ejemplo <±0,05% sobre el 99% del rango). Las desviaciones suelen ser mayores en los extremos del rango. Un valor aceptable puede ser <±0,05% (que correspondería a 2 canales en un espectro de 4000 canales). Por otra parte, la *no-linealidad diferencial* mide la constancia de la anchura de los canales, al ser una medida más sensible que la lineal un valor de <±1% es bastante aceptable.

b) Número de canales. Los sistemas actuales se fabrican con un gran número de canales (típicamente entre 2000 y 16000), pero un buen sistema de espectrometría debe trabajar con un número óptimo de canales, no siendo necesario utilizar todos los disponibles. Si se utiliza un gran número de canales, es evidente que las cuentas por canal disminuirán, perdiéndose los detalles del espectro debido a una excesiva "rugosidad" del continuo que aumenta la incertidumbre de las medidas. El número óptimo de canales dependerá de la resolución del detector y del rango de energías que se desea estudiar. Un criterio frecuente es realizar la asignación FWHM¹=4 canales. Relacionado con el número de canales hay varios términos que suelen utilizarse: el *rango de conversión* es el rango de altura de pulsos que el MCA puede aceptar (típicamente de 0 a ±10V), la *resolución del sistema ADC* es el número total de canales disponibles (típicamente 16384, 8192 o 4096) y por último, la *ganancia de conversión ADC* que es el número real de canales que se utilizan en una aplicación concreta.

2.4.5 Respuesta de los detectores de semiconductor a la radiación gamma

Una vez descrito de forma general un sistema de espectrometría, se analiza cómo se forma un espectro. Para comprender la respuesta de los detectores a la radiación y obtener resultados, es fundamental conocer los procesos básicos de interacción de los fotones con la materia que forma el volumen activo del detector.

¹ *FWHM ("Full widht at half máximum")*. Es el ancho de un fotopico a la mitad de su altura máxima, y se explica en la sección 2.4.7.



Figura 2.17 Secciones eficaces de interacción de fotones en Ge (Kovács et al., 2013)

En el rango de energía de interés (10 keV a 3000 keV) son tres los procesos básicos mediante los cuales los fotones interactúan con los materiales, pudiendo entregar toda su energía o parte de la misma en eventos discretos. Estos procesos son: el efecto fotoeléctrico, dispersión inelástica y la producción de pares. Aunque pudiese existir otro cuarto suceso, la dispersión coherente (Rayleigh) éste no contribuye a la entrega de energía a los electrones del medio, y por otro lado, el efecto de la dispersión coherente de los fotones incidentes tiende a cancelarse. (Debertin and R.G., 1988a). Cada uno de ellos predomina en un determinado rango de energías del fotón incidente. Como muestra la figura 2.17, para bajas energías el proceso más probable es el fotoeléctrico, mientras que a energías intermedias predomina la dispersión inelástica (efecto Compton) y a altas energías, la producción de pares.

2.4.5.1 Efecto fotoeléctrico

En este proceso el fotón es totalmente absorbido (cede toda su energía) por el átomo con el cual interacciona y se transfiere toda su energía al electrón atómico. Este electrón escapa del átomo con una energía cinética que será la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía de enlace del electrón:

$$E_{c} = hv - E_{enl}$$
 [2.2]

Si la energía del fotón incidente es superior a la energía de la capa K del átomo (11,1 keV para Ge), la interacción ocurrirá muy a menudo en esa capa. Dado que el átomo queda con un defecto de electrones en la capa donde ocurrió el efecto fotoeléctrico, se producirá una emisión característica de rayos X o de electrones Auger al completarse la capa con otros electrones de capas superiores. Como esto ocurre en un tiempo muy inferior al tiempo de respuesta del detector, por lo que si los rayos X característicos son absorbidos junto con otros efectos fotoeléctricos, la

energía del fotón incidente se absorbe por completo, produciendo, por tanto, una señal única, que será proporcional a dicha energía.



Figura 2.18 Representación del efecto fotoeléctrico

La probabilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico está en relación directa con la sección eficaz microscópica σ_{f} , la cual viene dada por:

$$\sigma_f = k \frac{Z^n}{\left(h\nu\right)^3}$$
[2.3]

En donde, k es una constante de proporcionalidad; Zes el número atómico del átomo en el cual ocurre el efecto fotoeléctrico; n es un parámetro que dependiendo de la energía del fotón, varía entre 3 y 5 hv es la energía del fotón incidente en MeV. A la vista de la expresión anterior, queda claro que la probabilidad del efecto fotoeléctrico será importante para fotones de pequeña energía interaccionando con átomos pesados. (Vidal-Cuadras and Ortega, 1986)

2.4.5.2 Efecto Compton

Este proceso es el proceso más importante y es el que predomina en el rango de energía de la mayoría de las fuentes radiactivas (Compton, 1923). En la figura 2.19, puede observarse que es el suceso de mayor probabilidad en el Ge para energías de los fotones comprendidas entre 200 keV y las unidades de MeV. El proceso se esquematiza en la figura 2.19



Figura 2.19 Representación del efecto Compton

Para el estudio cinemático del proceso, se supone que el electrón está libre y en reposo, aplicando la conservación de la energía y del momento se obtiene la ecuación que nos permite

obtener la energía del fotón dispersado (Compton, 1923) en función del ángulo con el cual sale el fotón dispersado:



Figura 2.20 Interacción elástica entre un fotón y un electrón

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)}$$
[2,4]

en donde $h\nu$ y $h\nu'$ son las energías del fotón incidente y dispersado respectivamente, θ es el ángulo con el cual se dispersa el fotón y m_0c^2 es la energía en reposo del electrón.

La energía cinética del electrón emitido, se calcula como la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía del fotón dispersado:

$$E_c = h\nu - \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)}$$
[2.5]

Y según se deduce de la ecuación [2.5], su valor está comprendido entre 0 ($\theta = 0^{\circ}$) y

$$h\nu - \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0 c^2}} = \frac{2(h\nu)^2}{m_0 c^2 + 2h\nu}, \text{ para } (\theta = 180^\circ)$$
 [2.6]

A modo de resumen, puede decirse que como resultado del efecto Compton queda un átomo residual ionizado que, a diferencia del efecto fotoeléctrico, crea un vacío electrónico en una de las capas externas (con menor energía de enlace) y por consiguiente provoca una emisión de radiación gamma más baja que en el efecto fotoeléctrico.

La probabilidad de interacción del efecto Compton, se expresa mediante la *fórmula de Klein-Nishina* la cual depende del ángulo de dispersión, de la energía del fotón incidente y de la naturaleza del átomo dispersor:

$$\sigma_{c} = k \frac{Z}{h\nu}$$
[2.7]

en donde: *k* es una constante de proporcionalidad; $h\nu$ es la energía del fotón incidente; Z el número atómico del átomo con el cual interaccionan los fotones. Al igual que ocurría con el efecto fotoeléctrico, la probabilidad aumenta con el número atómico del átomo con el cual interaccionan los fotones y disminuye con la energía de los fotones incidentes, pero en este caso esta disminución es menos acentuada.

2.4.5.3 Creación de pares

El proceso de creación de pares tiene lugar cuando la energía de un fotón se transforma en par partícula-antipartícula, en este caso un electrón y un positrón.



Figura 2.21 Representación del proceso de creación de pares

Al aplicar las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento, se demuestra que este proceso sólo es posible si el fotón está en las cercanías de una masa M, y al menos posee una energía mínima:

$$(hv)_{min} = 2m_0 c^2 \left(1 + \frac{m_0}{M}\right)$$
 [2.8]

si $m_0 \ll M$, entonces $(hV)_{min} \approx 2m_0c^2$.

Si se materializa un par electrón-positrón, como mínimo, la energía del fotón incidente debe de ser:

$$(hv)_{min} \approx 2 \times 511 \ keV = 1022 \ keV$$
 [2.9]

La sección eficaz del proceso y por consiguiente la probabilidad de que ocurra, se puede expresar de forma aproximada, mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{pp} = kZ^2 (hv - 1,022)$$
 [2.10]

en donde, k es una constante proporcionalidad; Zes el número atómico del elemento con el cual interacciona el fotón y hv es la energía del fotón expresada en MeV.

2.4.6 Componentes de un espectro de radiación gamma

El espectro gamma emitido por una fuente está constituido por líneas discretas muy estrechas y prácticamente juntas, sin embargo, el espectro mostrado y medido en un espectrómetro aparece una distribución continua en la cual se superponen componentes discretos (picos) con forma que, como podrá verse, se pueden aproximar mediante gaussianas. En realidad, esto no constituye un espectro de fotones, sino más bien, está constituido por el espectro de la energía cinética comunicada por los fotones emitidos por la fuente a los electrones del detector.

En la figura 2.22 se mostraban las componentes típicas del espectro en un detector de Ge en el cual incide una radiación gamma con una energía de 1460,8 keV (emisión emitida por el radionúclido ⁴⁰K), en dicha figuras se pueden observar los tres tipos fundamentales, de interacción que ocurren en el detector, los cuales han sido comentados en los apartados anteriores: dispersión inelástica, efecto fotoeléctrico y formación de pares

Cuando toda la energía de los fotones que inciden en el detector es absorbida por el volumen activo del mismo, se crea un pico que en la figura 2.22 se indica como A, en el caso del ⁴⁰K corresponde a una energía E_1 =1460,8 keV esta absorción total ocurre cuando los fotones interaccionan mediante efecto fotoeléctrico. El pico que resulta de esta absorción total de energía se denomina fotopico y constituye la característica del espectro. El canal donde se encuentra, posición en el eje x y su intensidad (número de cuentas en cierto tiempo t) son las magnitudes que se utilizan para determinar la energía e intensidad de la radiación gamma. Debido al escape de rayos X se crean pequeños picos a la izquierda del fotopico; zona D de la figura 2.22.



Figura 2.22 Espectro teórico de una radiación gamma en un detector Ge.

Debido a la interacción de los fotones, mediante dispersión inelástica (efecto Compton), con el volumen activo del detector, se produce una absorción parcial de la radiación incidente E_1 , con lo cual se forma el continuo, que en la figura se denota por B. En este caso, teniendo en cuenta la ecuación [2.4] se deduce que la energía depositada en el detector mediante este proceso, estará comprendida entre 0 (correspondiente a $\theta = 0^{\circ}$) y, $E_1 / \left(1 + \frac{m_0 c^2}{2E_1}\right)$ (aplicando la ecuación [2.4] con $\theta = 180^{\circ}$). Para la radiación gamma del ⁴⁰K, en donde $E_1 = 1460.8$ keV se obtiene $E_{CMáx} = 1243.3$ keV. Este número determina el extremo del continuo, y se denomina *borde Compton*, que se ha denotado con la letra C. La zona D de la figura 2.22, se conoce como zona de dispersión múltiple, y se debe, fundamentalmente, al proceso de dispersión inelástica.

El punto E del espectro de la figura 2.22 se produce cuando fotones incidentes interactúan mediante el proceso de creación de pares electrón-positrón y escapan algunos fotones de aniquilación, se conoce como pico de escape simple, el cual se encuentra desplazado unos 511 keV a la izquierda del fotopico, en este caso $E_1 = 950$ keV. El pico marcado con la letra F se forma cuando los dos fotones de aniquilación se escapan, se denomina pico de escape doble, el cual se encuentra desplazado 511 keV a la izquierda del E, o lo que es lo mismo 1022 keV a la izquierda del fotopico , esto es $E_4 = 339$ keV. Es característico de los picos de escape el no poseer barrera Compton a su izquierda.

Debido al hecho de que el sistema de detección se rodea de con un blindaje adecuado, (15 cm de hierro en el caso del detector utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral). Este contribuye con una fuente relativamente importante de radiación dispersada, la cual incide en el detector. Esta dispersión también ocurre en los materiales que soportan el detector, los materiales que rodean al mismo así como los materiales que contienen la muestra. Contribuyen a formar el pico de retrodispersión, punto H de la figura. Este "pico" se encuentra en regiones que vienen determinadas por la ecuación de dispersión Compton (Compton, 1923). El pico surge por el hecho de que la energía de los fotones que aparecen debido a la dispersión prácticamente es la misma a partir de un ángulo de dispersión cercano a 120°, según se muestra en la figura 2.23.



Figura 2.23 Energía de los fotones dispersados en función del ángulo para diferentes energías de los fotones incidentes.

También se puede observar en dicha figura 2.23 que esta energía no depende de la energía de los fotones incidentes. Entonces, la forma y la intensidad del área del pico de retrodispersión dependerán de las energías de los fotones, de los materiales del blindaje, de los materiales del detector y su geometría.

El pequeño pico G que se muestra en la figura 2.22, es debido a los materiales que rodean el detector y surge cuando fotones emitidos por la fuente, con energías superiores a 1022 keV interaccionan con estos materiales mediante el proceso de formación de pares. Cuando esto ocurre alguno de los fotones de aniquilación puede ser absorbido por la zona activa del detector. Aparece un pico, más bien pequeño, de una energía de 511 keV.

Cuando los fotones emitidos por la fuente son absorbidos por las paredes del blindaje del detector, el material de estas paredes emite radiación X característica, la cual es absorbida por el detector, si el blindaje es de Pb (que no es nuestro caso) la radiación X está en torno a 72 keV y por consiguiente al pico H le correspondería una energía $E_7 \approx 72 \ keV$.

A modo de ejemplo, en las figuras 2.24 a 2.26 se muestran los casos prácticos de espectros reales obtenidos por el espectrómetro HPGe utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral (Canberra Xtra modelo GX3518 7500SL) para una fuente puntual de ¹³⁷Cs y para una muestra patrón en polvo de ⁴⁰K.



Figura 2.24 Espectro correspondiente al ¹³⁷Cs

En la figura 2.24 puede observarse, que además del fotopico a 662 keV, del borde Compton y el pico de retrodispersión aparecen dos picos de energía 32 keV y 37 keV respectivamente, que se corresponden con los rayos X emitidos por el ¹³⁷Ba, isótopo metaestable, Cuentas (10⁻³ s) Cuentas (10⁻³ s)

que se forma en la desintegración del ¹³⁷Cs. Además en las figuras 2.25 y 2.26 que se corresponden con el espectro del ⁴⁰K se muestran todos los picos comentados en el apartado 2.5.

Figura 2.25 Espectro correspondiente al ⁴⁰K en el rango de energías 100 keV- 500 keV



Figura 2.26 Espectro correspondiente al ⁴⁰K en el rango de energías 500 keV- 1600 keV

2.4.7 Parámetros que caracterizan un detector

En la espectrometría práctica, existe una multitud de parámetros que pueden determinar las características de un detector. Se toma como base el documento de referencia (Szegvary et al., 2007b) que especifica las características de los detectores mediante los siguientes parámetros: FWHM, eficiencia, resolución, y relación Pico-Compton que se definen a continuación

- *FWHM ("Full widht at half máximum")*. Es el ancho de un fotopico a la mitad de su altura máxima, viene expresado en canales o bien en energía.
- Eficiencia absoluta de fotopico (absolute full energy peak efficiency). Es la razón del número de cuentas producidas en el detector y el número de emisiones gamma emitidas por la fuente. De manera práctica permite relacionar el área de un pico determinado con la actividad de la fuente emisora. Depende fuertemente de los factores geométricos fuente/detector.
- Eficiencia intrínseca (full energy peak), es la razón del número de cuentas producidas en el detector y el número de emisiones gamma que llegan al mismo. Esta eficiencia es un parámetro básico del detector y es independiente de la geometría fuente/detector.
- Eficiencia relativa, se define como la razón de la eficiencia entre un detector frente a otro, comúnmente es la de un detector de Ge relativa a uno de Nal de 3x3 pulgadas, a 25 cm de distancia para el fotopico de 1332,5 keV de una fuente puntual de ⁶⁰Co.
- Eficiencia de fotopico, es la que se obtiene tomando en cuenta solo los pulsos que originan un fotopico. Este valor es función de la energía de la radiación gamma, y es la que en general se emplea y usa como simplemente eficiencia.
- Resolución relativa en energía del detector, es la capacidad de un sistema para separar fotopicos cercanos de diferentes energías. Se define como el FWHM entre el número de canal o energía de su centroide multiplicado por 100

$$R(E) = \frac{FWHM}{E}$$
[2.11]

Razón Pico-Compton, es el indicador clave de la capacidad de un detector para distinguir picos de baja energía, en presencia de fuentes de alta energía. La relación de pico-Compton es uno de los parámetros más importantes de medida de rendimiento del detector, aunque a menudo es pasada por alto. Para un detector del tipo semiconductor, es el cociente entre el número de cuentas netas en el fotopico de 1332,5 keV de ⁶⁰Co entre el número de cuentas promedio de los canales comprendidos entre 1040 keV y 1096 keV, que es la parte del intervalo del continuo Compton asociada a la energía de 1332,5 keV.

Estas especificaciones estándar son la guía que el usuario utiliza para la elección y adquisición del detector adecuado a sus intenciones de medida. En el siguiente apartado se obtienen y corroboran los valores de los diferentes parámetros, dados por el fabricante para el detector utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral.
2.5. Descripción y puesta en marcha del espectrómetro Canberra XtRa modelo GX3518 7500SL utilizado

2.5.1 Descripción del equipo de espectrometría

El equipo de espectrometría gamma utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral consta de un detector coaxial de Germanio hiperpuro de rango extendido (XtRa) en configuración vertical Modelo GX3518 7500 SL de la marca Canberra y su electrónica asociada. El detector tiene un volumen activo de 153 cm³ y un 38% de eficiencia relativa respecto a un detector de Nal(TI) de 3x3 pulgadas. Según las especificaciones del fabricante, la FWHM es de 0.875 keV a 122 keV y de 1.8 keV a 1.33 MeV. La principal característica de los detectores de rango extendido es que permiten el estudio de las líneas de baja energía (por debajo de 150 keV) fundamentales para analizar algunos radioisótopos de interés ambiental como el ²¹⁰Pb (46.5 keV). Esto se debe a que dispone de una ventana delgada de berilio o carbono en la superficie frontal que se extiende a lo útil rango de energía hasta 3 keV. En comparación, los detectores coaxiales convencionales tienen una ventana de contacto de difusión de litio de, normalmente entre 0,5 y 1,5 mm de espesor, y esta capa muerta previa a la zona activa del cristal detiene la mayoría de los fotones por debajo de 40 keV limitando su capacidad de medir a bajas energías. Así, los detectores del tipo Xtra debido a su fina ventana de entrada de un "composite" de berilio/carbono ofrecen todas las ventajas de detectores coaxiales estándar convencionales, tales como alta eficiencia, buena resolución, con un coste moderado pero con una mayor capacidad de medida en la zona de baja energía del espectro gamma. En la figura 2.25 se muestra la configuración del detector y una curva de eficiencia tipo, en la que se aprecia la extensión en el rango de baja energía que proporciona el detector XtRa respecto a un detector convencional de germanio.



Figura 2.27 Detector coaxial de germanio XtRa (izquierda) y curva típica de eficiencia comparando un XtRa con ventana de Berilio y un detector coaxial típico para una distancia fuente detector de 2,5 cm (Derecha). Adaptado de Camberra Extended Range Coaxial Ge Detectors (XtRa) Data Sheet.

La electrónica asociada consiste en un analizador multicanal DSA-1000¹ de Canberra, un completo analizador multicanal de 16000 canales basado en una tecnología avanzada de Canberra de procesamiento de señales digitales (DSP). Este equipo incluye el amplificador tomando la señal directamente del preamplificador del detector y dispone de un circuito estabilizador de la ganancia. El software de análisis y control es el programa GENIE2000² de Canberra, el cual, permite realizar una adquisición de datos de alta calidad y todo tipo de análisis espectrometría gamma muy completos, de forma sencilla y es común a otros equipos del laboratorio. El DSA-1000 ofrece una gran estabilidad de ganancia de pico (linealidad) en algunos casos un factor de dos a tres veces mejor que los productos analógicos de última generación, mientras que la deriva de cero (offset) es apenas mensurable en todo el rango de temperatura de funcionamiento del instrumento.

El DSA-1000 proporciona también la alimentación de alta tensión al detector en un rango (dependiendo de la polaridad elegida) que va de ±10 a ±1300 V dc. El panel frontal muestra la tensión aplicada al detector y también envía señal al software de control.





El núcleo fundamental del DSA-1000 es el subsistema de procesamiento digital de señales (DSP por su acrónimo en inglés) que, a diferencia de los sistemas convencionales, digitaliza la señal al inicio de la cadena de procesamiento, lo que minimiza la necesidad de circuitería analógica previa (de conformado y discriminación de los pulsos) aumentando, así la estabilidad, precisión y reproducibilidad. La *no-linealidad integral* es $\leq \pm 0.025\%$ de la escala total sobre el

http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/DSA-1000-SS-C27268.pdf

²http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/Gamma-Analysis-SS-C37593.pdf

máximo del 99% del rango seleccionado y la *no-linealidad diferencial* es ≤±1% sobre el máximo del 99% del rango seleccionado, incluyendo, los efectos de no-linealidad integral. Presenta un deslizamiento de ganancia en canales de menos de 35 ppm/°C y de deslizamiento de cero de menos de 3ppm/°C tras 15 minutos de operación, lo que significa menos de un canal en todo el rango de temperatura (para 8000 canales).

El detector se ha adquirido caracterizado por CANBERRA para permitir su calibración en eficiencia para distintas geometrías mediante el software LabSOCS¹ basado en el método de Montecarlo (Trevisi et al., 2013). La caracterización es un procedimiento para obtener la respuesta del detector para fuentes situadas dentro de una esfera de radio 500 m, centrado en el detector, y sobre un rango de energía de los fotones de 45 keV-7 MeV. Aunque este procedimiento requiere semanas y encarece el detector, tiene la ventaja de que en principio, una vez caracterizado el detector puede ser utilizado cualquier configuración geométrica fuente-detector. Además, LabSOCS junto con el software de análisis de espectros GENIE-2000, forman un sistema integrado de calibración y análisis que funciona sobre un ordenador personal con sistema operativo Windows, lo que los hace particularmente sencillo de utilizar.

El equipo dispone de un blindaje de hierro de bajo fondo de 15 cm de espesor para apantallarlo de la radiación cósmica y ambiental y de un sistema de refrigeración por nitrógeno líquido. Como parte del equipamiento de laboratorio se ha montado un sistema de trasiego y recarga del nitrógeno líquido.





Figura 2.29 Blindaje del sistema de espectrometría gamma Modelo GX3518 7500 SL.

El equipo de espectrometría gamma se encuentra en el Laboratorio de Detectores del Departamento de Física en el sótano II del edificio de Informática y Matemáticas. La ubicación se ha seleccionado para que el recinto estuviese situado directamente sobre el terreno, sin ningún

¹ <u>http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/LabSOCS-SS-C38687.pdf</u>

otro local por debajo, debido al elevado peso de los blindajes de los detectores (1700 kg). Además, el edificio apantalla parcialmente la radiación cósmica. La superficie construida es de 52 m² y se han instalado medidas de ventilación forzada para la evacuación de radón.





Figura 2.30 Laboratorio de Radiactividad Ambiental del grupo GIRMA del Departamento de Física de la ULPGC.

2.5.2 Calibración del espectrómetro

Para determinar la actividad de una muestra, mediante cualquier detector, debe conocerse previamente la eficiencia de detección de los rayos gamma en el rango energético de interés. Así mismo, se ha de calibrar en energías el detector para cada espectro medido, de forma que se pueda identificar el origen de los fotopicos que en él aparecen. La calibración y puesta en marcha del espectrómetro ha sido uno de las principales tareas llevadas a cabo en este trabajo de Tesis Doctoral. En este apartado se describen los métodos empleados para calibración en energía y en eficiencia del espectrómetro y se verifican dos de sus parámetros característicos: la Resolución en Energía del detector y su Razón Pico-Compton.

2.5.2.1 Patrones y fuentes utilizadas en la calibración

Para la determinación experimental de la eficiencia y para la calibración en energía del detector, es necesario disponer de patrones de radiación gamma cuya actividad se conozca con gran precisión y cuyas líneas de emisión estén distribuidas, de la forma más homogénea posible, a lo largo de la zona de interés en el espectro (300 – 2700 keV en nuestro caso). Estos patrones, además tienen que estar certificados por instituciones de referencia (NIST, IAEA, NRPB, Ciemat). A partir de dicho patrón, pueden prepararse fuentes secundarias de actividad conocida, con las mismas geometrías y sustratos que se utilizan para la medida de muestras ambientales.

En este trabajo de Tesis Doctoral, para la calibración en energía se ha utilizado una fuente de calibración encapsulada suministrada por CANBERRA (MODEL ISOX SRCE Nº de serie 7F06-

9/10138) conteniendo ¹⁵⁵Eu y ²²Na con una actividad de 1µCi $(23/04/2009)^1$. Las características de esta fuente se resumen en la tabla 2.1.

Núclido	Energía keV	Intensidad %
¹⁵⁵ Eu	43	6,7
¹⁵⁵ Eu	86,55	30,7
¹⁵⁵ Eu	105,31	21,1
²² Na	511	180,76
²² Na	1274,54	99,44
⁴⁰ K	1460,82	10,66

Tabla 2.1. Relación de nucleídos incluidos en la fuente patrón para la calibración en energía. El ⁴⁰K corresponde al patrón IAEA.

La calibración en eficiencia del detector se ha llevado a cabo mediante dos procedimientos distintos, uno numérico basado en el método de Montecarlo y otro experimental para confirmar los resultados numéricos. Para la calibración experimental, se han utilizado tres muestras patrón suministradas por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA), Las características de dichas muestras patrón están resumidas en las tablas 2.2 a 2.4.

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C.I.
⁴⁰ K	14000	Bq/kg	13600-14400
к	448000	mg/kg	445000-451000
Th	6744		
U	7390		

Tabla 2.2. IAEA-RGK-1, Potassium Sulfate

El patrón para el potasio OIEA-RGK-1 se produce a partir de material de alta pureza (99,8%), sulfato de potasio (H₂SO₄) suministrado por la empresa Merck. El contenido de potasio, así como la actividad y sus incertidumbres se obtuvieron mediante un gran número de medidas realizadas en los laboratorios de la Agencia de Seibersdorf y los resultados confirmaron el valor

¹ Esta actividad para una fuente encapsulada permite clasificarla como exenta según la normativa vigente. Esto es extensivo, también a los patrones preparados por la IAEA:

certificado por la empresa Merck. Los contenidos de uranio y torio fueron estimados por Agency's Laboratories Seibersdorf utilizando fluorimetría y análisis por activación.

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C.I.
²³² Th	<4	Bq/kg	
²³⁵ U	228	Bq/kg	226-230
²³⁸ U	4940	Bq/kg	4910-4970
⁴⁰ K	<0,63	Bq/kg	
к	<20	mg/kg	
Th	<1	mg/kg	
U	400	mg/kg	398-402

Tabla 2.3. IAEA-RGU-1, Uranium Ore

Tabla 2.4. IAEA-RGTh-1, Thorium ore

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C.I.
²³² Th	3250	Bq/kg	3160-3340
²³⁵ U	3	Bq/kg	3,3-3,9
²³⁸ U	78	Bq/kg	72-84
⁴⁰ K	63	Bq/kg	3,1-9,5
к	200	mg/kg	100-300
Th	800	mg/kg	784-816
U	6,3	mg/kg	5,9-6,7

Los materiales de referencia IAEA-RGU-1 y IAEA-1-RGTh se prepararon para la Agencia Internacional de la Energía Atómica por el Centro Canadiense de Tecnología Mineral y Energética por dilución de mineral de uranio BL-5 (7,09% U) y un mineral de torio OKA-2 (2,89% Th, 219 µg U/g) respectivamente. El BL-5 se certificó para el uranio, confirmando que el ²²⁶Ra y ²¹⁰Pb están en equilibrio secular radiactivo. El acuerdo entre las mediciones radiométricas y químicas de torio y uranio en OKA-2 demostró que las dos series están en equilibrio radiactivo.

2.5.2.2 Calibración en energía

El objeto de la calibración en energía es obtener una relación entre la posición de los picos del espectro y la energía de emisión gamma correspondiente. Para realizarla se obtiene el espectro de una fuente conocida con gran precisión y se compara la posición de los picos obtenida con las energías que deben tener. En general, es necesario que la medida del espectro sea lo suficientemente larga para obtener una buena precisión estadística para los picos utilizados para la calibración.

De forma práctica, la calibración consiste en marcar una serie de picos en el espectro patrón y asignarles las energías reales que les corresponden. En el sistema de espectrometría que se utiliza, el proceso de asignación se realiza de forma automática mediante la utilidad de calibración en energía del programa Genie-2000 que busca el pico seleccionado, detecta su posición con un error de una fracción de canal y deduce la relación energía/canal. Esta asignación se lleva a cabo mediante un ajuste lineal de varios puntos de valores energía-canal.





En este trabajo de Tesis Doctoral para la calibración en energía se utilizaron los espectros de la fuente encapsulada de calibración de Canberra ¹⁵⁵Eu y ²²Na y de la muestra patrón de sulfato de potasio *IAEA-RGK-1*, que se muestran en las figuras 2.31 y 2.32. Los picos seleccionados para la calibración cubren un amplio rango de energía entre la línea de 43 keV de ¹⁵⁵Eu y la línea de 1460,82 keV del ⁴⁰K tal y como se indicaba en la tabla 2.1.



Figura 2.32 Espectro correspondiente al $^{\rm 22}Na$ y $^{\rm 155}Eu$

A partir del análisis de los dos espectros mostrados, se elabora la tabla 5 en la que se recogen los puntos energía-canal que corresponden a los picos seleccionados.

Tabla 2.5.	Relación energía-canal
Canal	Energía (keV)
37	43
115	86,55
140	105,31
678	511
1691	1274,54
1938	1460,82

Realizando un ajuste por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente relación lineal entre el número de canal y la energía:

$$E(keV) = 0,7507 \times Canal + 4,76$$
 [2.12]

En figura 2.33 se representan los puntos experimentales y la recta de ajuste, junto con sus indicadores estadísticos. El coeficiente de correlación del ajuste es prácticamente 1 lo que nos indica, además de la extraordinaria bondad del ajuste, que el detector presenta una gran linealidad.



Figura 2.33 Recta de ajuste canal-energía.

Esto se puede comprobar si se utiliza la no-linealidad integral del detector que, según las especificaciones, es menos de 0.025% en todo el rango utilizado (en nuestro caso aproximadamente 0-2600 kev si se quiere utilizar la línea 2614 keV del ²⁰⁸TI para estudios ambientales). Con estos valores el máximo error en energía en el espectro será de 0.65 keV que se producirá, en todo caso, en los extremos del intervalo, siendo en todo el rango de energías mucho menor.

2.5.2.3 Resolución en Energía del detector

Una de las características más importantes de los equipos de espectrometría es la resolución en energía, que puede definirse como la capacidad que tiene el detector para distinguir entre dos energías muy próximas. La correcta determinación de este parámetro es crucial para el cálculo de las áreas de los picos de un espectro gamma. Teóricamente podría medirse enviando un haz monoenergético de radiación al detector y observar el espectro que se obtiene. Idealmente, debería observarse un pico muy definido semejante a una función delta de Dirac, pero en realidad, lo que se obtiene es un pico con cierta anchura, en forma de distribución estadística picuda que, en espectroscopía gamma, se aproxima por una función gaussiana¹, tal y como se muestra en la figura 2.34.

¹ Reamente, y sin contar otros efectos. los fotones gamma emitidos por un radionucleido, ya tienen una cierta anchura debido a las anchuras de los dos niveles cuánticos involucrados en la transición de la que provienen (ensanchamiento natural). Este ensanchamiento energético intrínseco tiene un perfil Lorentziano. No obstante el pulso provocado en el detector de germanio es en la práctica gaussiano con una anchura que excede la anchura intrínseca del fotón gamma. Aunque rigurosamente la combinación de los dos perfiles debería ser descrita por una función de perfil de Voigt el comportamiento gaussiano es tan dominante que se puede despreciar la componente Lorentziana. Esto no ocurre, con los rayos X. A modo de ejemplo, para el pico de 661,7 keV del ¹³⁷Cs la anchura intrínseca (Lorentziana) es de



Figura 2.34 FWHM para el fotopico de 1460,8 keV

La anchura de la distribución se debe a fluctuaciones en el número ionizaciones, excitaciones y desexcitaciones que se producen al pasar la radiación por la materia, así mismo, contribuyen a la anchura del pico el ruido electrónico introducido por perturbaciones en el detector, cables, amplificadores, multicanal, etc. Para cuantificar la resolución, se utiliza la anchura a la semialtura del pico (FWHM) *Full Width at Half Maximum*, que se muestra en la figura 2.34. A su vez la expresión de la FWHM se relaciona con la desviación estándar (σ) de la distribución gaussiana mediante la ecuación FWHM= 2,355 σ .

Para que dos picos, próximos en energía, puedan resolverse separadamente sus centroides deben estar separados una distancia típica de 3× FWHM ya que, a igual área de los picos, se produce un solape despreciable. Si la distancia es de tan sólo 1×FWHM en el espectro aparecerán como un multiplete y utilizando técnicas de deconvolución se pueden resolver con buena precisión. Este efecto se muestra en la figura 2.35 y nos indica que cuando más pequeño sea el FWHM mejor resolución en energía tendrá el detector ya que podrá resolver picos más próximos energéticamente.

La resolución del detector no es constante en todo el intervalo energético ya que el FWHM no lo es. De hecho el software de control GENIE-2000 utiliza una función lineal para determinar la dependencia entre la anchura de los picos y la energía. Las especificaciones del detector que se estudia, indican que el valor de la FWHM es de 0,875 keV a 122 keV y de 1,8 keV a 1,33 MeV lo que permite obtener una recta de calibración de anchura energética de los picos.

aproximadamente 3×10⁻¹⁸ eV mientras que la anchura debida a la interacción con el detector (gaussiana) es de el orden del KeV.



Figura 2.35 a) Dos picos perfectamente resueltos, b) Picos parcialmente solapados, c) Picos totalmente solapados.

La resolución en energía está condicionada por las incertidumbres en los procesos que ocurren tanto en el detector como en el sistema de procesado electrónico. Estas incertidumbres se agrupan normalmente en tres factores que pueden considerarse no correlacionados entre sí: la incertidumbre estadística del número de portadores de carga que se produce por unidad de energía depositada en el detector (p), la variación en la eficiencia de recolección de carga (c), y la contribución del ruido electrónico (e) (Knoll, 2010),(Debertin and R.G., 1988b), (Gilmore and Hemingway, 1995). Estas incertidumbres pueden describirse individualmente mediante distribuciones de Gauss o Poisson de forma que se puede expresar la FWHM total mediante la siguiente expresión

$$(FWHM)^{2} = (FWHM)_{p}^{2} + (FWHM)_{c}^{2} + (FWHM)_{e}^{2}$$
 [2.13]

El primer término corresponde a la fluctuación estadística en el número de portadores de carga creados en el detector y viene dada por la expresión (Gilmore and Hemingway, 1995):

$$(FWHM)_p = 2.355 \times (F \times E \times \varepsilon)^{\frac{1}{2}}$$
 [2.14]

donde F es el factor de Fano (que describe la estadística del proceso de creación de portadores de carga y da cuenta de en qué medida esta estadística se desvía de la distribución de Poisson.), ϵ la energía necesaria para crear un par electrón-hueco (*2,96 eV/par electrón-hueco, para el Ge a* 77 *K*), y E la energía de la radiación incidente. La contribución del segundo término se debe a la recolección incompleta de carga, es decir, de portadores debido a impurezas y defectos del cristal de germanio. Este término depende del volumen del detector y del campo eléctrico aplicado, originando una cola de baja energía en el fotopico de la radiación incidente. La medida de este término se realiza variando el voltaje aplicado y midiendo la FWHM para cada voltaje. Si se representan las FWHM medidas frente a la inversa del voltaje aplicado, y se extrapola el valor de FWHM para voltaje infinito se obtiene una cuantificación de esta contribución. Cualitativamente la dependencia de dicho término con respecto a la energía sería lineal (Gilmore and Hemingway, 1995). El tercer factor representa el efecto de ensanchamiento producido por los componentes de la cadena electrónica del detector. Esta contribución se puede medir introduciendo una señal estable desde un generador de impulsos en el preamplificador. El efecto principal de este término consiste en añadir un ruido constante a cualquier señal de la cadena electrónica, por lo que sería

proporcional a una constante (Gilmore and Hemingway, 1995). Así, la importancia relativa de los tres factores depende de la energía y a bajas energías predominan los efectos de ruido electrónico y recolección incompleta de carga, mientras que a altas energías el ensanchamiento de los dos picos se debe fundamentalmente a las fluctuaciones estadísticas en la creación de pares electrónhueco.

Canal	Energía (keV)	\sqrt{E} (keV) ^{1/2}	FWHM (keV)
217	163,4	12,8	0,97
466	351,9	18,8	1,17
774	583,2	24,1	1,58
808	609,3	24,7	1,55
1142	860,6	29,3	1,80
1209	911,6	30,2	1,75
1486	1120,3	33,5	1,85
1938	1460,8	38,2	1,99
2341	1764,5	42	2,24
3469	2614,5	51,1	2,82

 Tabla 2.6.
 Datos de energía-canal y resolución del espectrómetro para diversas líneas del espectro gamma.

En este apartado se determinan experimentalmente la resolución en energía del detector y su factor de Fano y así se comprueba el acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante. Para ello, se ha determinado el FWHM de cada uno de los fotopicos correspondientes a las energías que se muestran en la tabla 2.6, procedentes de emisiones de radionúclidos naturales de los patrones de la IAEA ya descritos. Al realizar un ajuste lineal del FWHM frente a la raíz cuadrada de la energía se obtiene la siguiente relación lineal empírica:

$$FWHM(keV) = 0,0457\sqrt{E} + 0,379$$
[2.15]

Que proporciona la función de calibración entre la anchura de los picos frente a la energía Esta forma funcional es la que mejor se ajusta a los fenómenos físicos que se han explicado en los párrafos anteriores, si bien se pueden encontrar otras en la literatura. En la figura 2.36, se representa esta función, mostrando los parámetros estadísticos del ajuste realizado.

Para corroborar los datos del fabricante se sustituyen en la ecuación [2.15] las energías indicadas y se obtienen los resultados siguientes:

Energía	FWHM calculada	FWHM Fabricante.
122 keV	0,9±0,1 keV	0,875 keV
1332 keV	2,0±0,2 keV	1,8 keV

 Tabla 2.7.
 Resolución experimental y teórica del detector.

como se puede comprobar, los valores proporcionados por el fabricante están dentro del intervalo de error de la resolución experimental.



Figura 2.36 Recta de ajuste para el FWHM frente a $E^{1/2}$

Cuando se evalúan detectores o tipos de detectores, no se suele utilizar la resolución absoluta si no la resolución relativa a una determinada energía definida por

$$R(E) = \frac{FWHM}{E}$$
 [2.16]

Que, como se observa en la figura 2.37, es una función inversa de la energía y así, la resolución en energía relativa disminuye (picos más anchos) a medida que se desplaza hacia valores crecientes del espectro gamma.



Figura 2.37 Curva de la R(%) frente a la energía

Como se ha indicado, uno de los parámetros que determinan la FWHM es el factor de Fano (Debertin and Grosswendt, 1982) que puede definirse en la forma siguiente: si dos partículas mono energéticas penetran en el detector, cada una de ellas produce en media, \overline{N} pares electrón-hueco en el volumen sensible del detector. Experimentalmente se comprueba que el valor real de la desviación típica de la distribución de valores de N, es inferior al previsto por una distribución normal \sqrt{N} y puede expresarse como

$$\sigma_{\overline{N}} = \sqrt{F\overline{N}}$$
 [2.17]

Siendo F el factor de Fano. Este factor depende de todos los procesos fundamentales diferentes que pueden dar lugar a una transferencia de energía en el detector. El factor F es muy difícil de calcular teóricamente, ya que se necesitaría un conocimiento muy preciso de todos los procesos que puedan tener lugar en el detector. Sin embargo, se puede determinar

Para determinarlo, introduciendo la ecuación 2.14 en la 2.16, se obtiene la siguiente expresión para la resolución relativa:

$$R = 2,355\sqrt{\frac{F\varepsilon}{E}}$$
[2.18]

Esta relación indica que cuanto menor es F mejor es la resolución del detector. En los detectores de semiconductor, F<<1 de forma que su resolución es sustancialmente mejor de lo esperado cuando el proceso de creación de pares electrón-hueco se modela mediante una distribución de Poisson (F=1). En la tabla 2.8 se obtiene la resolución y el factor de Fano del detector para cada uno de las líneas estudiadas.

Energía (keV)	FWHM (keV)	R	F
163,4	0,97	5,94E-03	0,35
351,9	1,17	3,33E-03	0,24
583,2	1,58	2,71E-03	0,26
609,3	1,55	2,55E-03	0,24
860,6	1,80	2,09E-03	0,23
911,6	1,75	1,92E-03	0,21
1120,3	1,85	1,65E-03	0,19
1460,8	1,99	1,37E-03	0,17
1764,5	2,24	1,27E-03	0,17
2614,5	2,82	1,08E-03	0,19

Tabla 2.8.Se muestra la energía, ancho de banda, resolución y
factor de Fano

En la tabla 2.8 se comprueba que el Factor de Fano disminuye con la energía lo que nos muestra de forma experimental que la incertidumbre en la altura de los picos (y por tanto en anchura) aumentan a medida que aumenta la energía del fotón gamma incidente, disminuyendo, por tanto la resolución del detector.

2.5.2.4 Calibración de la eficiencia

En este apartado de detallan los procedimiento seguidos para la calibración de la eficiencia absoluta de fotopico¹ del espectrómetro gamma, de forma que puede relacionarse el área de un pico con la emisión gamma de la fuente. De acuerdo con lo indicado en el apartado 2.4.7, se define la eficiencia absoluta del fotopico ε , para la energía E, como la probabilidad de que un fotón gamma de esa energía, sea contabilizado en el fotopico correspondiente a la misma, es decir,

$$\mathcal{E} = \frac{N(E)}{T(E)}$$
[2.19]

donde N(E) es el número de cuentas registradas en el fotopico de energía E y T(E) es el número de fotones de dicha energía emitidos por la fuente en todas las direcciones. Esta relación entre los fotones emitidos y los detectados, es función del espectro energético de la radiación gamma emitida por la fuente, de la composición y dimensiones del detector, de la geometría y composición de la fuente y de la disposición relativa fuente-detector. La calibración en eficiencia puede realizarse exclusivamente para una serie de picos de interés, si se dispone de fuentes de actividad conocida de las energías seleccionadas, pero la técnica más utilizada es la determinación de una función empírica $\varepsilon(E)$ (curva de eficiencia) que relacione la energía con la eficiencia.

La determinación de la curva de eficiencia de un detector de germanio se realiza normalmente mediante el cálculo de una serie de eficiencias experimentales y, dado que el número de puntos experimentales disponible es siempre limitado, se hace necesario utilizar alguna técnica numérica para predecir el valor de la eficiencia para un valor cualquiera de la energía. En general se ajusta una forma funcional al conjunto de valores experimentales, teniendo en cuenta también, la incertidumbre asociada a la medida de la eficiencia. La forma funcional depende del detector, y para detectores coaxiales, como es nuestro caso, se suele utilizar un polinomio logarítmico en energías y eficiencias (Debertin and R.G., 1988b) del tipo:

$$\ln\left(\varepsilon\right) = \sum_{i=0}^{n} a_{i} \ln\left(\frac{E}{E_{0}}\right)^{i}$$
[2.18]

¹ Absolute full-energy peak efficiency en inglés.

Existen dos alternativas prácticas para determinar la curva de calibración en eficiencia del detector:

- i. Calibración ab initio a partir del conocimiento de las características del cristal del detector (caracterización), de la evaluación de los procesos de interacción radiación-materia que tienen lugar y de los coeficientes de absorción y atenuación de los materiales constitutivos del detector. Este método de calibración en eficiencia requiere de la solución computacional de un modelo numérico siendo un método comúnmente empleado el de Monte Carlo. Es un procedimiento relativamente reciente dado que requiere una gran potencia de cálculo.
- ii. *Calibración empírica:* Es el método tradicional y consiste en utilizar fuentes de actividad conocida en un amplio rango de energías T(E) para medir el número de cuentas N(E) registradas en el fotopico de interés y determinar así, la eficiencia del fotopico mediante la ecuación 2.19. A partir de estas eficiencias calculadas, por ajuste se obtiene la función empírica de calibración $\varepsilon(E)$.

En este trabajo de Tesis Doctoral se ha utilizado fundamentalmente el método *ab initio* mediante el código Monte Carlo LabSOCS¹ de Canberra. No obstante, también se ha realizado una calibración empírica para corroborar los resultados proporcionados por LabSOCS. A continuación se exponen los procedimientos de calibración utilizados.

a) Determinación ab initio de la eficiencia mediante el programa LabSOCS.

Los métodos de Monte Carlo (Abbas et al., 2002), como el empleado por LabSOCS, se basan en la creación de un modelo estocástico del sistema bajo estudio, de forma que los valores buscados de las magnitudes físicas que caracterizan al sistema se deducen a partir de los valores esperados de determinadas variables aleatorias. Estas variables se obtienen a su vez como combinaciones de otras variables aleatorias que describen los diferentes procesos acontecidos en el sistema. En el caso de la espectrometría gamma, los procesos físicos a estudiar son el transporte e interacción con los distintos medios de los fotones gamma desde la fuente al detector. Para ello, es necesario conocer las características físicas de la fuente y del detector e implementar un modelo físico de interacción con el detector basado en los procesos atómicos y nucleares involucrados (absorción fotoeléctrica, dispersión Compton y creación de pares) y los coeficientes de absorción y atenuación de los medios.

El primer requisito para este tipo de calibración es conocer con exactitud las características físicas del detector, proceso que se denomina, **caracterización del detector**. La caracterización es un procedimiento empleado por Canberra para determinar la eficiencia de un

¹ <u>http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/LabSOCS-SS-C38687.pdf</u>

detector de germanio en vacío para cualquier energía arbitraria y localización espacial dentro del rango de caracterización. Para ello, se crea, mediante el código Montecarlo MCNPP (Breimeister, 1997), un modelo detallado del detector específico de germanio que se quiere caracterizar utilizando las dimensiones nominales proporcionadas por el fabricante (longitud y el diámetro del cristal de Ge, espesores de las capas muertas, dimensiones del encapsulado y de la ventana, etc.). El modelo de detector se valida mediante la comparación de la eficiencia proporcionada por el código MCNP con eficiencias experimentales medidas para varias geometrías fuente-detector y en un amplio rango de energías. Si es necesario, se realizan cambios menores de las dimensiones de cristal modelado y de las capas muertas, y se vuelven a generar las eficiencias con el modelo MCNP. El modelo de detector se considerará válido si las eficiencias MCNP están de acuerdo con las eficiencias medidas experimentalmente con un nivel 20 de incertidumbre. Usando el modelo MCNP validado, se generan conjuntos de datos de eficiencia en vacío, para un gran número de puntos en torno al detector en un rango de 0-500 metros, y para 15 valores de energías entre 45 keV y 7 MeV. Estos datos de eficiencia sirven como los valores de referencia, y finalmente se recopilan en un único archivo de caracterización que es necesario proporcionar a LabSOCS como modelo del detector. Aunque este procedimiento de caracterización, requiere semanas de trabajo por parte del fabricante y encarece el detector, tiene la ventaja, de que, una vez caracterizado el detector, se puede utilizar cualquier configuración geométrica fuente-detector. Así, el programa LabSOCS permite, para detectores caracterizados, generar calibraciones por software para una amplia gama de geometrías y de composición de las muestras y recipientes. En la figura 2.38 se muestra un diagrama de flujo del proceso de calibración utilizando LabSOCS.



Figura 2.38 Diagrama de flujo del procedimiento de calibración mediante el programa LABSOC para detectores caracterizados.

El primer paso, una vez seleccionado el detector, es definir la geometría, para lo que se dispone de la utilidad "Geometry Composer" que permite definir el tipo de recipiente y su composición, la masa y altura de la muestra y su composición estimada. LabSOCS incluye plantillas de ejemplo de geometría de los contenedores más comunes disponibles en el mercado, pero su gran ventaja es que, se pueden modelar todas las características de un objeto cilíndrico simétrico. Cada plantilla LabSOCS permite especificar una amplia variedad de parámetros para definir la geometría. Además, el cálculo de la eficiencia se puede realizar para todas las posiciones detector-fuente, no sólo para la colocación de la muestra coaxial. También proporciona una base de datos de composición de muestras que se pueden modificar para adecuarse a cada problema concreto. En la figura 2.39 se muestra una de las pantallas de diseño con "Geometry Composer".





Geometry Composer Report

Date:

Description: Comment:

File Name: Software:

Template:

Detector:

Environment:

Integration:

Friday, July 01, 2011 - 13:22:59

C:\GENIE2K\jsocs\data\GEOMETRY\Laboratory\SIMPLIFI...\Bote iae 25 mm densidad 129.geo LabSOCS SIMPLIFIED_BEAKER, Version: (default) B10138 Temperature = 22 °C, Pressure = 760 mm Hg, Relative Humidity = 30% Convergence = 1.00%, MDRPN = 21 (16), GRPN = 21 (16)

				Di	mension	is (mm)					
No.	De	escription	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	d.6	Materia		Density
1		Beaker	1	46.5	54.6	72.7			polyprop		0.91
2	(Sample	25		(States and				iaeau		1.3
3	A	bsorber 1					1		none		
4	A	bsorber 2				1			none		
5	Sour	ce - Detector	1								
	46.5 500.0 1460.0	63.0 583.0 1765.0	List of 6 80.0 609.0 2000.0	energies f 100.0 661.5 2600.0	ior effici	ency cur 43.0 27.0	ve genera 186.0 911.0	ation 3 10	38.0 01.0	352.0 1120.0	



Una vez caracterizada la geometría, el tipo de detector y tipo de muestra (composición química, densidad, etc.), el programa LabSOCS procede a calcular la eficiencia para un conjunto de energías con sus correspondientes incertidumbres. El usuario debe introducir incertidumbres calculadas sobre curvas de eficiencia de calibración. Las incertidumbres relativas sugeridas por el fabricante para condiciones estándar de laboratorio son del orden de 7% a bajas energías (50-100 keV), el 6% a energías medias (100-400 keV) y el 4% a energías altas (400-7000 keV). LabSOCS también permite tener en cuenta la auto-absorción en las muestras consideradas. En la figura 2.40 se muestra la curva obtenida, así como el polinomio de ajuste correspondiente a la ecuación 2.18.



Figura 2.40 Gráfica y polinomio de calibración generado por LABSOCS

La salida LabSOCS es un certificado con los parámetros de la curva de calibración de la eficiencia, que se almacena directamente entre los archivos de calibración del software de análisis de espectros GENIE2000, y pueden ser utilizados como los generados por técnicas de calibración tradicionales. Este procedimiento de calibración ha permitido realizar la puesta en marcha del equipo en un tiempo record y maximizar el uso del espectrómetro para cubrir todos los objetivos de este trabajo.

2.6.5.3. Estudio de la eficiencia para la geometría "bote de orina"

Una de las primeras decisiones que ha sido necesario tomar en este trabajo de Tesis Doctoral, es qué tipo de recipiente es el idóneo para el análisis de muestras de suelos que se quería realizar. Para ello se consultó a varios laboratorios y se realizaron distintas simulaciones con LabSOCS para tres geometrías básicas: troncocónica ("bote de orina"), Marinelli y duquesa. Finalmente se optó por la geometría tipo "bote de Orina", por ser un recipiente universal, muy fácil de conseguir y de bajo coste. Además, cumple los requisitos de presentar una eficiencia óptima y es muy empleado por otros laboratorios, lo que permite, la intercomparación de resultados. Por tanto se ha medido y caracterizado geométricamente y en composición un contenedor "bote de orina" genérico, que se ha utilizado como base del trabajo y se han adaptado, a partir de la base de datos de LabSOCS, varios ficheros con las características de los tipos de suelo y arenas Canarias.

Una vez que se decidió utilizar la geometría tronco cónica "bote de orina" (cuyas dimensiones fijas son el radio inferior y superior), se realizó un estudio para determinar la altura óptima de la muestra que nos permita obtener los mejores resultados. Para ello, se ha determinado mediante LabSOCS la eficiencia para muestras con distintas alturas que varían desde 5 mm hasta 60 mm, en incrementos de 5 mm, así pues, se disponen de 12 alturas distinta con sus correspondientes eficiencias. El material utilizado ha sido el referenciado como DRYDIRT, cuya composición química es: 49, 62% de O, 27,38% de Si, 7,1% de Al, 4,04% de Fe, 1,6% de Mg, 4,21% de Ca, 0,84% de Na, 0,36% de H, 2,37% de K, 0,34% de Tl y 2,14% de C. En la tabla 2.9 se muestran los resultados obtenidos.

h (mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
E (keV)						Efici	encia					
46	0,134	0,081	0,057	0,043	0,034	0,028	0,024	0,021	0,018	0,016	0,014	0,013
63	0,181	0,128	0,096	0,076	0,062	0,052	0,044	0,038	0,034	0,030	0,027	0,025
80	0,200	0,153	0,121	0,099	0,083	0,071	0,061	0,054	0,048	0,043	0,038	0,035
100	0,201	0,159	0,130	0,109	0,092	0,080	0,070	0,062	0,055	0,049	0,045	0,041
143	0,180	0,148	0,124	0,106	0,092	0,081	0,072	0,064	0,058	0,053	0,048	0,044
186	0,153	0,127	0,108	0,094	0,082	0,073	0,065	0,058	0,053	0,048	0,044	0,040
295	0,100	0,085	0,073	0,064	0,056	0,050	0,045	0,041	0,037	0,034	0,031	0,029
338	0,088	0,074	0,064	0,056	0,050	0,045	0,040	0,036	0,033	0,030	0,028	0,026
352	0,084	0,072	0,062	0,054	0,048	0,043	0,039	0,035	0,032	0,029	0,027	0,025
500	0,060	0,052	0,045	0,040	0,035	0,032	0,029	0,026	0,024	0,022	0,020	0,019
583	0,052	0,045	0,039	0,035	0,031	0,028	0,025	0,023	0,021	0,019	0,018	0,017
609	0,050	0,043	0,038	0,033	0,030	0,027	0,024	0,022	0,020	0,019	0,017	0,016
661	0,047	0,040	0,035	0,031	0,028	0,025	0,023	0,021	0,019	0,017	0,016	0,015
727	0,043	0,037	0,033	0,029	0,026	0,023	0,021	0,019	0,018	0,016	0,015	0,014
911	0,036	0,031	0,027	0,024	0,021	0,019	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012
1001	0,033	0,029	0,025	0,022	0,020	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011
1120	0,030	0,026	0,023	0,020	0,018	0,017	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010
1239	0,028	0,024	0,021	0,019	0,017	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009
1460	0,024	0,021	0,018	0,016	0,015	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009	0,009	0,008
1765	0,020	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007	0,007

Tabla 2.9. Bote de orina. Eficiencias obtenidas para las diferentes alturas.

En la figura 2.41 se representan las curvas de eficiencia para cinco alturas. En función de la energía en el rango 0-1600 keV.



Figura 2.41 Representación gráfica de la eficiencia para diferentes alturas

Como se muestra en la figura 2.41, debido a que al aumentar la altura, la masa de la muestra aumenta linealmente, la eficiencia decrece, o bien por la propia autoabsorción de la muestra o por efectos geométricos.

m(g)	13,86	28,05	42,58	57,45	72,66	88,23	104,14	120,41	137,03	154,03	171,38	189,12
h(mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
E(kev)					I	Eficienci	a x masa	a				
46	1,86	2,28	2,41	2,45	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,48	2,48
63	2,51	3,58	4,10	4,36	4,49	4,56	4,60	4,63	4,64	4,65	4,65	4,66
80	2,77	4,28	5,16	5,70	6,03	6,24	6,37	6,46	6,52	6,56	6,59	6,61
100	2,79	4,46	5,53	6,23	6,71	7,03	7,25	7,41	7,53	7,61	7,67	7,72
143	2,49	4,14	5,29	6,11	6,71	7,16	7,49	7,74	7,94	8,09	8,21	8,31
186	2,11	3,57	4,61	5,38	5,96	6,40	6,74	7,01	7,22	7,39	7,53	7,64
295	1,39	2,38	3,11	3,67	4,10	4,44	4,71	4,93	5,10	5,25	5,37	5,47
338	1,21	2,09	2,74	3,23	3,62	3,93	4,17	4,37	4,54	4,67	4,79	4,88
352	1,17	2,01	2,63	3,12	3,49	3,79	4,03	4,22	4,38	4,51	4,62	4,72
500	0,84	1,45	1,92	2,28	2,56	2,79	2,98	3,14	3,26	3,37	3,46	3,54
583	0,73	1,26	1,67	1,99	2,25	2,45	2,62	2,76	2,87	2,97	3,05	3,13
609	0,70	1,22	1,61	1,92	2,16	2,36	2,53	2,66	2,77	2,87	2,95	3,02
661	0,65	1,13	1,50	1,79	2,02	2,21	2,37	2,49	2,60	2,69	2,77	2,84
727	0,60	1,04	1,39	1,66	1,87	2,05	2,19	2,31	2,41	2,50	2,57	2,63
911	0,49	0,86	1,15	1,38	1,56	1,71	1,83	1,94	2,03	2,10	2,17	2,22
1001	0,46	0,80	1,07	1,28	1,45	1,59	1,71	1,81	1,89	1,96	2,02	2,07
1120	0,42	0,73	0,98	1,17	1,33	1,46	1,57	1,66	1,74	1,80	1,86	1,91
1239	0,39	0,68	0,90	1,08	1,23	1,35	1,46	1,54	1,61	1,68	1,73	1,78
1460	0,33	0,58	0,78	0,94	1,07	1,17	1,26	1,34	1,41	1,46	1,51	1,55

Tabla 2.10. Eficiencias por masa, obtenidas para las diferentes alturas

Se define la eficiencia-masimétrica como el producto de la eficiencia por la masa de la muestra, se observa, como la eficiencia así definida, se aproxima a un valor asintótico conforme aumenta el tamaño, y por consiguiente la masa de la muestra. Se observa en la figura 2.42, como al aumentar la masa de la muestra, la eficiencia masimétrica, se aproxima asintóticamente a un valor fijo y cómo esta aproximación es más rápida para bajas energías (como se ve en el caso de 46,5 keV). En la figura 2.43, se representa la variación relativa de la eficiencia masimétrica en tanto por ciento frente a la masa.



Figura 2.42 Representación gráfica del producto eficiencia por masa frente a la masa para diferentes energías.



Figura 2.43 Representación gráfica de la variación relativa de la eficiencia

Se muestra como a partir de 100 g (h = 35 mm) las diferencias relativas quedan por debajo del 5%.

2.6.5.4. Búsqueda de una función empírica para la eficiencia

De acuerdo con el método de calibración seguido por (Pérez-Moreno et al., 2002b) puede conseguirse una función de ajuste para los valores obtenidos y mostrados en la tabla 2.11. Según estos autores, la eficiencia para cada energía sólo depende de la masa/altura de la muestra y de la energía de emisión gamma. El procedimiento a seguir consiste en encontrar la relación existente entre la eficiencia de cada fotopico con la masa/altura de la muestra. A continuación se determina la relación de los diferentes parámetros que aparezcan en la relación anterior con la energía.

Dispuesta la tabla 2.11 de forma que aparezca para cada energía la dependencia de Ln(ef) con la masa, se tiene:

Masa	ef(46)	ef(63)	ef(80)	ef(100)	ef(143)	ef(186)	ef(295)	ef(338)	ef(352)	ef(500)
14	-2,01	-1,71	-1,61	-1,60	-1,72	-1,88	-2,30	-2,44	-2,48	-2,81
28	-2,51	-2,06	-1,88	-1,84	-1,91	-2,06	-2,47	-2,60	-2,64	-2,96
43	-2,87	-2,34	-2,11	-2,04	-2,09	-2,22	-2,62	-2,74	-2,78	-3,10
57	-3,15	-2,58	-2,31	-2,22	-2,24	-2,37	-2,75	-2,88	-2,91	-3,23
73	-3,38	-2,78	-2,49	-2,38	-2,38	-2,50	-2,88	-3,00	-3,04	-3,34
88	-3,58	-2,96	-2,65	-2,53	-2,51	-2,62	-2,99	-3,11	-3,15	-3,45
104	-3,74	-3,12	-2,79	-2,66	-2,63	-2,74	-3,10	-3,22	-3,25	-3,55
120	-3,88	-3,26	-2,93	-2,79	-2,74	-2,84	-3,20	-3,32	-3,35	-3,65
137	-4,01	-3,39	-3,05	-2,90	-2,85	-2,94	-3,29	-3,41	-3,44	-3,74
154	-4,13	-3,50	-3,16	-3,01	-2,95	-3,04	-3,38	-3,50	-3,53	-3,82
171	-4,24	-3,61	-3,26	-3,11	-3,04	-3,13	-3,46	-3,58	-3,61	-3,90
189	-4,34	-3,70	-3,35	-3,20	-3,13	-3,21	-3,54	-3,66	-3,69	-3,98

Tabla 2.11. Ln(ef) para cada energía en función de la masa.

Masa	ef(583)	ef(609)	ef(661)	ef(727)	ef(911)	ef(1001)	ef(1120)	ef(1239)	ef(1460)	ef(1765)
14	-2,95	-2,99	-3,06	-3,14	-3,33	-3,41	-3,50	-3,58	-3,73	-3,92
28	-3,10	-3,14	-3,21	-3,29	-3,48	-3,56	-3,65	-3,73	-3,87	-4,05
43	-3,24	-3,27	-3,34	-3,43	-3,61	-3,69	-3,78	-3,85	-4,00	-4,18
57	-3,36	-3,40	-3,47	-3,55	-3,73	-3,81	-3,89	-3,97	-4,11	-4,29
73	-3,48	-3,51	-3,58	-3,66	-3,84	-3,91	-4,00	-4,08	-4,22	-4,40
88	-3,58	-3,62	-3,69	-3,76	-3,94	-4,02	-4,10	-4,18	-4,32	-4,49
104	-3,68	-3,72	-3,78	-3,86	-4,04	-4,11	-4,20	-4,27	-4,41	-4,58
120	-3,78	-3,81	-3,88	-3,95	-4,13	-4,20	-4,28	-4,36	-4,50	-4,67
137	-3,86	-3,90	-3,96	-4,04	-4,21	-4,28	-4,37	-4,44	-4,58	-4,75
154	-3,95	-3,98	-4,05	-4,12	-4,29	-4,36	-4,45	-4,52	-4,66	-4,83
171	-4,03	-4,06	-4,13	-4,20	-4,37	-4,44	-4,52	-4,59	-4,73	-4,90
189	-4,10	-4,14	-4,20	-4,27	-4,44	-4,51	-4,59	-4,67	-4,80	-4,97

Para cada energía de calibración se realiza un ajuste de la eficiencia con la masa de muestra, mediante una relación de tipo exponencial:

$$\ln(e_{f}) = A - Bm \qquad [2.39]$$

Los parámetros A y B tienen una dependencia con la energía que se ajustan mediante las funciones:

$$A = p + q \ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$$
 [2.40]

$$\ln\left(\frac{B}{B_0}\right) = r + s \ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$$
 [2.41]

En donde p,q,r,s son los parámetros que se obtienen del ajuste, y $B_0 = 1 g^{-1}$, $E_0 = 1 keV$ se introducen para que las ecuaciones [2.40] y [2.41] sean dimensionalmente correctas.

Realizados los ajustes para cada una de las energías, para las cuales se realiza la simulación, los parámetros A y B obtenidos se muestran en la tabla 2.12, así como el coeficiente de correlación de cada ajuste:

Ajustando los parámetros de la tabla 2.12 mediantes las ecuaciones [2.40] y [2.41], se obtienen, para los parámetros p, q, r y s, los siguiente valores: p=2,73714, q=-0,89141, r=-4,41703, s=-0,09734. Por tanto, la ecuación de ajuste que aparece en la ecuación [2.39] se escribe en, función de la masa como:

$$e_f = e^{(2,74-0,892\ln(E) - me^{-4,41-0,097\ln(E)})}$$
[2.42]

y en función de la altura:

$$e_f = 15,443 E^{-0.891} e^{\left(-0.38447 E^{-0.097} h\right)}$$
 [2.43]

Teniendo en cuenta que al ser el número de cuentas (N) proporcional a la actividad específica y a la eficiencia, éste, se puede expresar de la siguiente forma (Bolivar Raya, 1995):

$$N = C \times h \times e^{-bh}$$
[2.44]

siendo C una constante proporcional a la actividad específica, a su densidad, a la probabilidad de emisión del fotopico y al cuadrado de diámetro medio del recipiente. La altura óptima, será aquella para la cual el error relativo de la actividad específica sea mínimo, o lo que es lo mismo, que el número de cuentas (N) sea máximo. Derivando la ecuación [2.44] e igualando a cero, se tiene:

$$h_{opt}(E) = \frac{1}{b} = 2,601E^{0.097}cm$$
 [2.45]

Que nos proporciona la dependencia funcional de la altura óptima de muestra en el bote de orina con la energía. Para encontrar la altura óptima promedio se calcula el valor medio de la función anterior en el rango de energías considerado (de 46,5 keV a 1460,8keV), obteniendo:

$$\langle h_{opt}(E) \rangle = \frac{1}{E_{max} - E_{min}} \int_{E_{min}}^{E_{max}} h_{opt}(E) dE = 4,85 \text{ cm}$$
 [2.46]

Ese valor se ha tomado como cota máxima en el procedimiento de determinación de actividad de suelos. Existen otros factores, además de la altura óptima que deben tenerse en cuenta, fundamentalmente, la cantidad de muestra disponible, la dificultad en el tratamiento de la muestra, etc. Esto ha llevado a fijar la altura de muestra entre 2,5 y 3,5 cm¹.

Energía (keV)	B	A	R
	0.0100	2 2020	0.01004
40	0,0122	-2,2929	0,91824
63	0,0108	-1,8552	0,94788
80	0,0096	-1,6880	0,96320
100	0,0088	-1,6555	0,96981
143	0,0078	-1,7451	0,97569
186	0,0074	-1,9017	0,97747
295	0,0069	-2,3173	0,97914
338	0,0068	-2,4498	0,97940
352	0,0068	-2,4893	0,97949
500	0,0065	-2,8175	0,98007
583	0,0065	-2,9584	0,98027
609	0,0064	-2,9971	0,98032
661	0,0064	-3,0683	0,98044
727	0,0063	-3,1517	0,98061
911	0,0062	-3,3425	0,98074
1001	0,0062	-3,4203	0,98061
1120	0,0061	-3,5118	0,98057
1239	0,0061	-3,5912	0,98061
1460	0,0060	-3,7408	0,98077
1765	0,0059	-3,9241	0,98098

Tabla 2.12.Valoresdelosparámetrosparacadaenergía

¹ Otras de las razones ha sido la búsqueda de la intercomparabilidad con el laboratorio del Grupo de Investigación Física de Radiaciones y Medio Ambiente (FRYMA) del Departamento de Física Básica de la Universidad de Huelva que utiliza una altura de 2,5 cm. Como se indica en el capítulo 4, una parte de los trabajos realizados se ha llevado a cabo mediante un proyecto de investigación liderado por nuestro grupo de investigación en el que colaboraba FRYMA.

b) Determinación empírica de la eficiencia mediante patrones de la IAEA

Para corroborar los datos proporcionados por LabSOCS se realizó, también, una calibración empírica para la geometría "bote de orina" con una altura de muestra de 2,5 cm. A tal fin, se han preparado muestras patrones con cada uno de los materiales de referencia IAEA-RGK-1, IAEA-RGU-1 y IAEA-RGTh-1. Para la altura considerada, las muestras contienen una masa de 55,7±0,1 g la de RGK-1, 42,6±0,1 g la de RGU-1 y 42,8±0,1 g la de RGTh-1.

Previamente a la determinación del espectro de cada una de las muestras patrones se procedió a determinar el espectro del fondo del laboratorio (que será estudiado en el apartado 2.11), para ello se obtuvo el espectro durante un tiempo de 259200 s con una geometría idéntica a la empleada para la preparación de los patrones, conteniendo agua destilada hasta una altura de 2,5 cm. Al área de los fotopicos se les resta el área de los mismos en el espectro del fondo (multiplicado por el factor¹ $(t_{muestra}/t_{fondo})$), ya sean de las muestras patrón como de las tierras.

Se pasa ahora a determinar la eficiencia para cada una de las líneas de interés. Para la actividad de ⁴⁰K se tiene en cuenta la línea de emisión (1460,8 keV) para el ²³⁸U la línea (609 keV del ²¹⁴Bi) y para el ²³²Th la que corresponde al ²⁰⁸Tl (2614,5 keV).

A partir de la ecuación [2.19]

$$\varepsilon = \frac{Area/t_a}{A_m(c/s) \times m}$$
[2.22]

Siendo $Area / t_a$ el área de cada pico dividido por el tiempo de acumulación y A_m (c/s) la actividad de la muestra en el momento de la medida en Bq / kg

$$A_m(c / s) = A_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}} \times P(E) \cong A_0 \times P(E)$$
[2.23]

 $A_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T}} \cong A_0$ pues *t* es mucho menor que *T*, *P*(*E*) es la fracción de rayos γ emitidos

(razón de ramificación) y T el periodo de desintegración de la fuente.

Por consiguiente

$$\varepsilon(E) = \frac{Area}{A_0 \times P(E) \times t \times m}$$
[2.24]

Y la incertidumbre de la eficiencia vendrá dada por:

 $t_{muestra}$ y t_{fondo} son los tiempos de medida de la muestra y el fondo respectivamente.

$$\delta_{\varepsilon(E)} = \sqrt{\left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial Area}\right|^2} \,\delta_{Area}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial A_0}\right|^2 \,\delta_{A_0}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial P(E)}\right|^2 \,\delta_{P(E)}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial m}\right|^2 \,\delta_m^2 \qquad [2.25]$$

la cual puede expresarse

$$\delta_{\varepsilon(E)} = \varepsilon(E) \sqrt{\left(\frac{\delta_{Area}}{Area}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{A_0}}{A_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{P(E)}}{P(E)}\right)^2 + \left(\frac{\delta_m}{m}\right)^2}$$
[2.26]

En donde δ_{Area} , δ_{A_0} , $\delta_{P(E)}$ y δ_m son las incertidumbres asociadas al área del fotopico, a la actividad de la muestra patrón, a la probabilidad de emisión y a la masa respectivamente, se desprecia la incertidumbre debida al tiempo de recuento, ya que las muestras que se analizan son de poca actividad y si además, el funcionamiento del detector es correcto, el tiempo muerto es despreciable.

Dicho esto, se procede a calcular la eficiencia y su incertidumbre para cada una de las líneas de interés mostrando los resultados en la tabla 2.13.

E(keV)	Area	e _A	m (kg)	t (s)	Р	e _P	Ac (Bq)	e _{Ac}	ef	e _{ef}
446,5	93094	361	0,043	88077	0,0425	0,001215	4940	30	0,1182	0,0035
163,5	4719	167	0,043	88077	0,047	0,001524	228	2	0,1174	0,0057
338,3	71448	327	0,043	94765	0,114	0,003407	3250	90	0,0475	0,0020
352	321660	607	0,043	88077	0,372	0,011163	4940	30	0,0467	0,0014
583,2	112317	378	0,043	94765	0,3019	0,009057	3250	90	0,0282	0,0012
911	75762	281	0,043	94765	0,277	0,00831	3250	90	0,0207	0,0009
1460,8	1703	42	0,056	1393	0,1067	0,003201	14000	400	0,0147	0,0007
2614,5	34559	193	0,043	94765	0,3564	0,010692	3250	90	0,0074	0,0003

Tabla 2.13. Valores de los términos que intervienen en el cálculo de la eficiencia y sus errores.

A partir de los valores de la tabla anterior se obtienen los datos experimentales para determinar, por ajuste, la curva eficiencia-energía.

-	
Ln(E)	Ln(ef)
3,83945231	-2,13557008
5,09681299	-2,14245145
5,82393308	-3,0460665
5,86363118	-3,0650745
6,36853018	-3,56760857
6,8145429	-3,87525862
7,28673951	-4,22037165
7,86882815	-4,91222365

 Tabla 2.14. Logaritmo de los valores experimentales, de la curva eficiencia energía

De forma se obtiene que la ecuación que mejor se ajusta a los resultados viene dada por:

$$\ln(ef) = -15,8033 + 7,7810\ln(E) - 1,36948\ln^{2}(E) + 0,00709\ln^{3}(E)$$
[2.27]

Siendo su coeficiente de correlación $r^2 = 0,97186$, lo que indica la bondad del ajuste. La representación gráfica de los datos experimentales de la tabla 2.14 junto con la curva 2.27 y, los parámetros estadísticos del ajuste se muestran en la figura 2.44.



Figura 2.44 Gráfica del In(ef) frente a In(E)

Para finalizar, a modo de ejemplo, en figura, 2.45 se muestran las curvas de calibración obtenidas para la geometría indicada mediante los procedimientos *ab initio* y experimental, que muestra la gran concordancia entre ambas. Cabe destacar la versatilidad del método basado en LabSOCS que permite calibrar para cada muestra concreta mientras que la curva experimental, se

extrapola para un amplio conjunto de medidas, siendo, en principio, sólo válida para una única geometría.



Figura 2.45 Representación gráfica de la eficiencia frente a la energía

2.5.2.5 Razón Pico-Compton

Como se indica en el apartado 2.4.7, otro factor que se utiliza para caracterizar a los detectores es el la razón Pico-Compton (P/C). Este parámetro es interesante porque es una característica del detector que tiene elementos tanto de la resolución en energía como de su eficiencia. Se define, según el estándar ANSI/IEEE, como el cociente entre el número de cuentas en el canal del pico de 1332 keV y el número de cuentas promedio en el espectro que va de 1040 a 1096 keV. Es un parámetro análogo a la razón señal-ruido.



Figura 2.46 Espectro correspondiente al ⁶⁰Co indicando los factores que intervienen en el cálculo de la Razón Pico-Compton.

En la figura 2.46 se muestra el espectro de emisión gamma del ⁶⁰Co, si P es el máximo número de cuentas del pico de 1332 keV y C es el promedio de cuentas en el continuo, se cumple que:

Razón Pico-Compton =
$$\frac{P}{C}$$
 [2.28]

Como se puede observar, a mejor resolución, más estrecho será el pico, mayor el valor de P y, por tanto, mayor Razón Pico-Compton. De forma análoga a mayor eficiencia, más cuentas aparecerá en el pico y de nuevo un mayor valor de P. Otro factor que influye en la ecuación 2.28 es el fondo al que está sometido el equipo ya que los materiales cercanos al detector (elementos constitutivos del detector, blindaje, criostato, etc...) serán los responsables de la entrada de radiación gamma dispersa debido al efecto Compton con el consiguiente aumento de C y disminución de la Razón Pico-Compton. Los valores de este parámetro oscilan entre 40:1 de los detectores pequeños con un 10% de eficiencia a 90:1 para los detectores muy grandes y eficientes. En la práctica un valor alto de la Razón Pico-Compton significa que el detector tienen una mejor estadística de contaje al medir espectros complejos con una buena capacidad de medida de los picos de baja energía, en presencia de un continuo Compton debido a gammas muy energéticas. Para determinar experimentalmente el valor de la Razón Pico-Compton del detector se utilizó una fuente de ⁶⁰Co situada a 15 cm del detector y se tomó su espectro gamma durante 600 s. Los valores correspondientes al rango energético de 1040 a 1096 keV se recogen en la tabla 2.15.



Figura 2.47 Izquierda: Espectro correspondiente al ⁶⁰Co desde 1040 a 1096 keV. Derecha: Espectro correspondiente al ⁶⁰Co en el fotopico de 1332 keV

En la figura 2.47 se muestra la zona del espectro gamma que interviene en los cálculos. A partir de la tabla 2.8, se obtiene el promedio de cuentas en el espectro comprendido entre 1040 keV y 1096 keV

$$C = \frac{13056 + 13504}{1455 - 1380 + 1} = 349$$
 [2.29]

	- // - 2			- //	
Canal	E (keV)	Cuentas	Canal	E (keV)	Cuentas
1380	1040,16	346	1418	1067,29	358
1381	1040,91	361	1419	1068,05	360
1382	1041,67	325	1420	1068,8	345
1383	1042,42	378	1421	1069,55	352
1384	1043,17	343	1422	1070,31	339
1385	1043,93	350	1423	1071,06	356
1386	1044,68	365	1424	1071,82	366
1387	1045,44	335	1425	1072,57	309
1388	1046,19	350	1426	1073,32	349
1389	1046,94	325	1427	1074,08	356
1390	1047,7	323	1428	1074,83	373
1391	1048,45	328	1429	1075,58	336
1392	1049,2	323	1430	1076,34	344
1393	1049,96	345	1431	1077,09	350
1394	1050,71	356	1432	1077,84	347
1395	1051,47	347	1433	1078,6	363
1396	1052,22	343	1434	1079,35	359
1397	1052,97	333	1435	1080,11	337
1398	1053,73	351	1436	1080,86	329
1399	1054,48	314	1437	1081,61	331
1400	1055,23	385	1438	1082,37	355
1401	1055,99	360	1439	1083,12	367
1402	1056,74	342	1440	1083,87	358
1403	1057,49	366	1441	1084,63	388
1404	1058,25	316	1442	1085,38	334
1405	1059	383	1443	1086,14	343
1406	1059,76	330	1444	1086,89	379
1407	1060,51	336	1445	1087,64	378
1408	1061,26	340	1446	1088,4	337
1409	1062,02	338	1447	1089,15	336
1410	1062,77	318	1448	1089,9	382
1411	1063,52	364	1449	1090,66	351
1412	1064,28	346	1450	1092,92	379
1413	1065,03	334	1451	1093,67	388
1414	1065,79	325	1452	1094,43	356
1415	1040,16	346	1453	1095,18	395
1416	1040,91	361	1454	1095,93	354
1417	1041,67	325	1455	1096,69	365
Suma		13056			13504

Tabla 2.15. Relación de cuentas comprendidas entre 1040 keV y 1096 keV

El número de cuentas en el fotopico de 1332 keV es 21330, de forma que se obtiene el siguiente valor para la Razón Pico-Compton del detector:

$$\frac{P}{C} = \frac{21330}{349} = 61,1$$
[2.30]

Este valor coincide con las especificaciones del fabricante (Apéndice 3, apartado 3.3) que proporciona un valor de 61:1 para la Razón Pico-Compton. Este valor relativamente alto corrobora la capacidad del detector XtRa para la medida en el rango de baja energía.

2.5.3 Estudio de la radiación de fondo a la que está sometido el sistema de espectrometría

Otro de los parámetros fundamentales que determinan la formación de un espectro gamma en un detector de Germanio es el fondo al que está sometido el sistema. Puede definirse el fondo de un detector como la respuesta medida por el mismo en ausencia de muestra. Dado que este fondo se superpone con la radiación emitida por la muestra, es de vital importancia su medida así como minimizarlo, es por lo que la espectrometría gamma de alta resolución mediante detector de germanio requiere la medida periódica del fondo radiactivo del laboratorio donde se encuentra el detector. Este fondo debe restarse a cada uno de los picos que se obtienen en un espectro a la hora de calcular la actividad de los distintos radionúclidos que se analizan. Esta corrección es especialmente importante cuando las muestras que se miden son de radionúclidos naturales o cuando las actividades son tan pequeñas que están próximas a los límites de detección, como se verá en el siguiente apartado. La reducción del fondo presente se planteó como objetivo prioritario en las técnicas de recuento de bajo nivel (Libby et al., 1949), aunque no fue hasta principio de los años 70, cuando se realizó el primer estudio sistemático del fondo de un detector de INa (Kaye et al., 1972)

El fondo radiactivo medido en un detector puede variar por diferentes motivos: la electrónica asociada al detector, la radiactividad intrínseca del mismo, la radiación cósmica, blindaje y materiales que lo rodean y, el radón que se encuentre en el laboratorio donde se ubique el detector. El radón es un gas radiactivo que procede de la cadena natural del ²³⁸U que depende de las condiciones ambientales (ventilación del aire del laboratorio, temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa, etc).

Es por todo lo anterior, que desde la adquisición del detector en el año 2010, se han realizado medidas de fondo durante: noviembre 2010, febrero 2011, marzo 2011, junio 2011, febrero 2012 y julio 2012, aprovechando que en esas fechas no se disponían de muestras para su medida. El análisis se ha llevado a cabo mediante el Programa de Adquisición y Análisis de Espectros GENIE 2000 (Canberra, 2002). Dicho programa tiene un formato propio para almacenar

los espectros, pero además también pueden guardarse en un formato compatible con Excel, lo que ha permitido y facilitado la suma y análisis estadísticos de los mismos.

La suma de estos espectros consigue identificar picos que no pueden determinarse en uno sólo de ellos (PUJOL and ORDUÑA, 2008). Como consecuencia de las medidas de fondo realizadas se dispone un espectro de fondo con un tiempo acumulado de 2162872 segundos con el que caracterizar de una forma más precisa el fondo radiactivo en las medidas de espectrometría. Aunque la calibración canal energía puede variar a lo largo del tiempo, debido al envejecimiento de la electrónica, y variaciones de la temperatura, no se ha utilizado para la suma de espectros, el algoritmo descrito por (Ali et al., 2013), ya que el tiempo transcurrido entre la primera y última medida del fondo es relativamente corto y se corresponden en todos los espectros la calibración canal-energía. A continuación se analizan las distintas contribuciones que intervienen en el fondo.

2.5.3.1 Contribución al fondo de los detectores de germanio

Las contribuciones al fondo en los detectores, fundamentalmente, de germanio (Neder et al., 2000, Heusser, 1995) (Núñez-Lagos and Virto, 1996) se muestran listados en la siguiente secuencia por orden de su importancia:

- La radiación gamma externa.
- La radiactividad intrínseca del detector.
- El blindaje y los materiales que rodean al detector
- La contribución de los rayos cósmicos.
- El gas radón del ambiente.
- Electrónica del detector e interferencias eléctricas.
- a) La radiación gamma externa.

Dado que en los materiales de construcción empleados en el edificio donde se encuentra el detector, contienen concentraciones de las series naturales radiactivas, como también el elemento primigenio ⁴⁰K , y siendo sus concentraciones parecidas a las medias de las concentraciones en la corteza terrestre (Markkanen, 1995, Ackers et al., 1985b, Chong and Ahmad, 1982). De las tres series, se presentan en la tabla 2.16 las radiaciones y emisiones más importantes, que contribuyen al fondo.

Mediante un blindaje adecuado, realizado con un material de número atómico elevado, que rodee al detector, se consigue reducir la contribución de la radiación externa a niveles mínimos, comparados con el resto de los demás factores.

b) La radiactividad intrínseca del propio detector.

El propio detector, el circuito RC del diodo, juntamente con toda la cadena electrónica, preamplificador, convertidor analógico digital (ADC) y la memoria del propio PC, pueden verse afectados por las emisiones de radiofrecuencia, transformadores, fluorescentes del laboratorio, ruido acústico y efectos de microfonismo debido, principalmente a las vibraciones mecánicas del suelo y de las paredes (Núñez-Lagos and Virto, 1996). Los canales correspondientes a las zonas del espectro de baja energías son los más afectados. No obstante, esta fuente de fondo puede despreciarse frente a las otras componentes.

Los materiales utilizados en el detector, incluyendo el criostato, y todas las piezas pequeñas del interior del mismo, pueden tener ciertas cantidades de radiactividad en la mayoría de los materiales, los elementos de las series naturales radiactivas así como el ⁴⁰K serán los causantes de la posible contaminación del detector, es posible también encontrar trazas de ⁶⁰Co y ¹³⁷ Cs (Heusser, 1995), es conveniente, por tanto, que si se quiere conseguir un detector de bajo fondo, todas las partes deben limpiarse cuidadosamente con sustancias (en general ácidos) y métodos apropiados. (Akkaya et al., 2012) Así mismo, la radiación cósmica también contribuye, como se estudiará en el siguiente apartado, al fondo del detector.

Núclido	E(keV)	P _e (%)	Núclido	E(keV)	P _e (%)
²³⁴ Th	63,3	4,5	²²⁸ Ac	129,1	2,4
	92,4	2,1		209,3	3,9
	92,8	2,1		270,2	3,5
²²⁶ Ra	186,2	3,6		463,0	4,4
²¹⁴ Pb	242,0	7,2		794,9	4,3
	295,2	18,4		911,1	25,8
	351,9	35,6		964,7	5,0
²¹⁴ Bi	609,3	45,5		968,9	15,8
	768,4	4,9		1588,2	3,2
	934,0	3,1	²²⁴ Ra	241,0	4,1
	1120,3	14,9	²¹² Pb	238,6	43,6
	1238,1	5,8		300,1	3,3
	1377,6	3,9	²¹² Bi	727,3	6,7
	1408,0	2,4	²⁰⁸ TI	277,4	6,6
	1509,2	2,1		583,2	85,0
	1729,6	2,9		860,4	12,5
	1764,5	15,3		2614,7	99,7
	1847,4	2,0			
	2204,2	4,9	⁴⁰ K	1460,8	10,7

Tabla 2.16.	Energías y probabilidad de emisión de las principales emisiones
	gamma de las series naturales $^{\rm 238}\rm U,~^{\rm 232}\rm Th~y$ el primigenio $^{\rm 40}\rm K$
	(Laborie et al., 2000)

c) Blindaje y materiales que rodean el detector.

El blindaje y materiales que rodean al detector, pueden contribuir de diferente forma al fondo radiactivo; ya sea por la propia radiactividad natural (series radiactivas naturales y radionúclidos primordiales), por radiactividad artificial; debido a contaminación radiactiva, o bien por la interacción de los rayos cósmicos con los materiales del blindaje.

La interacción de los neutrones procedentes de los rayos cósmicos con los materiales del blindaje, contribuyen al pico de aniquilación e⁺e⁻ de 511 keV.

Los materiales más utilizados en el blindaje, descartando materiales caros y exóticos como podrían ser el tungsteno, tántalo o el peligroso mercurio, suelen ser materiales con número atómico alto, predominando el hierro o el plomo. Aunque el hierro es relativamente barato, presenta el inconveniente de que puede estar contaminado por trazas de ⁶⁰Co en su fabricación, por ello, suele utilizarse hierro que proviene de viejos barcos, libres de dichas trazas.

El plomo por su comportamiento físico, como es su baja sección eficaz para neutrones, alto número atómico y poca probabilidad de interacción con los rayos cósmicos suele ser la mejor elección para construir un blindaje, aunque, su propia contaminación intrínseca ²¹⁰Bi y ²¹⁰Pb influirá en el espectro de radiación del fondo. (Theodórsson, 1996, Heusser, 1995).

Para salvar este inconveniente, suele utilizarse en su fabricación plomo que proviene de viejas tuberías, o plomo antiguo que se haya producido hace varios periodos de semidesintegración del ²¹⁰Pb (22 años).

d) Radiación Cósmica.

La radiactividad natural, como ya se vió en el capítulo 1, o bien proviene de los radionúclidos presentes en la corteza terrestre (nucleídos primordiales) o bien de los producidos por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera (nucleídos cosmogónicos). Los rayos cósmicos primarios procedentes del Sol, las estrellas y del espacio interestelar están constituidos aproximadamente por un 86% de protones, 12,7% y 1,3% de núcleos más pesados (Tereesh et al., 2013) Éstos interaccionan con los núcleos de las altas capas de la atmósfera (por encima de 15 km, aproximadamente) produciendo núcleos radiactivos y partículas secundarias, que a su vez pueden crear nuevas especies radiactivas; el ³H tritio, ⁷Be, ¹⁴C, ²²Na son algunas de ellas. Entre las partículas que se crean están los protones, piones, neutrones, que reciben el nombre de rayos cósmicos secundarios. Las únicas que tienen interés en la determinación del fondo son los muones y neutrones, ya que los electrones y los fotones son directamente absorbidas por el blindaje. De las otras componentes, los protones, se convierten en neutrones cuando reaccionan con el blindaje, es por lo cual los picos debidos a los rayos cósmicos dependen del blindaje y de los materiales que constituyen el detector.

Los neutrones pueden reaccionar con los cinco isótopos estables del germanio. Los neutrones rápidos interaccionan mediante colisiones inelásticas:

Y los neutrones térmicos mediante procesos de captura :

$$X(n, \gamma)Y$$

En el caso de colisiones inelásticas, el neutrón que incide es capturado, y se forma un núcleo compuesto seguido de la emisión de un neutrón de menor energía. El núcleo residual al estar en un estado excitado, vuelve a su estado fundamental mediante emisión gamma.

En el espectro del fondo se observa la línea 139,68 keV debida al proceso

$$^{74}Ge(n,\gamma)$$
, $^{76}Ge(n,2n)$

e) El radón del ambiente.

El radón ²²²Rn, el torón ²²⁰Rn y sus progenies, constituyen la fuente más importante de radiactividad producida en el aire. Su concentración depende fundamentalmente de la ventilación, en un laboratorio bien ventilado su concentración puede variar entre 20 y 80 Bq/m³ y puede multiplicarse por un factor cinco si no se ventila adecuadamente. En nuestro laboratorio, se han realizado medidas de la concentración de radón durante un periodo de 13 días a lo largo del mes de octubre en los años 2011 y 2012 la cual se muestra en la figura 2.48.



Figura 2.48 Concentración de Rn del 6 al 18 de octubre en los años 2011/2012

El efecto de esta contribución, como se verá, es la aparición de las emisiones asociadas a los descendientes del radón fundamentalmente el ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹²Pb y ²⁰⁸T que tienen un gran número de fotopicos que contribuyen en todo el rango energético, siendo sus picos de mayor probabilidad de emisión como se muestra en la tabla 2.17 los situados en 351,9 keV y 609,3 keV,
238,9 keV y 583,1 keV respectivamente. La presencia de estos fotopicos dificulta la medida de emisiones próximas a ellos, además de aumentar el continuo Compton.



Figura 2.49 Blindaje del detector.

Un procedimiento para reducir su efecto, es regenerar con el nitrógeno que se evapora del Dewar, la cámara donde se ubica la muestra, tal como se observa en la figura 2.49. El efecto del blindaje queda de manifiesto en la figura 2.62 en la cual se compara el espectro del fondo del detector, con la puerta del blindaje abierta y con la puerta cerrada.

2.5.3.2 Fondo del detector XtRa.

Como ya se ha indicado, desde finales de 2010 se dispone de varias fondos de los cuales se ha efectuado la suma, lo que equivales a un fondo acumulado de 2162872 s \approx 25 días, que permite detectar fotopicos que no se pueden detectar en las medidas que suelen durar cuatro días. En la tabla 2.17 se presenta la siguiente información:

- Energía en keV
- Cuentas totales y cuentas por segundo en 10⁻³
- Posible radionúclido.
- Probabilidad de emisión.
- Origen del radionúclido

E(keV)	Cuentas	cps (10⁻³)	Radionúclido	PE %	Origen del radionúclido
46,54	18756	8,66	²¹⁰ Pb	4,25	Natural (Uranio 238)
63,29	20183	9,32	²³⁴ TH	4,8	Natural (Uranio 238)
77,11	19831	9,16	RX Plomo		Rayos X
92,80	34586	15,97	²³⁴ TH	2,8	Natural (Uranio 238)
139,68	23820	11,00	⁷⁵ⁿ Ge	39,35	Rayos Cósmicos
205,71	18640	8,61	²³⁵ U	5	Natural (Uranio 235)
238,92	19100	8,82	²¹² Pb	43,6	Natural (Torio 232)
295,21	12235	5,65	²¹⁴ Pb	18,5	Natural (Uranio 238)
338,32	8754	4,04	²²⁸ Ac	11,3	Natural (Torio 232)
351,92	11679	5,39	²¹⁴ Pb	35,38	Natural (Uranio 238)
511,00	11891	5,49			Pico de aniquilación
583,10	7160	3,31	²⁰⁸ TI	84,5	Natural (Torio 232)
609,35	6999	3,23	²¹⁴ Bi	4,8	Natural (Uranio 238)
727,12	3128	1,44	²¹² Bi	43,6	Natural (Torio 232)
766,36	Salanadaa		²³⁴ Pa	0,294	Natural (Uranio 238)
768,36	Solapados		²¹⁴ Bi	4,8	Natural (Uranio 238)
911,03	3882	1,79	²²⁸ Ac	26,6	Natural (Torio 232)
934,06	1665	0,77	²¹⁴ Bi	3,03	Natural (Uranio 238)
968,97	2976	1,37	²²⁸ Ac	16,2	Natural (Torio 232)
1001,03	2038	0,94	²³⁴ Pa	0,59	Natural (Uranio 238)
1120,14	2410	1,11	²¹⁴ Bi	14,8	Natural (Uranio 238)
1238,01	1494	0,69	²¹⁴ Bi	5,86	Natural (Uranio 238)
1377,48	872	0,40	²¹⁴ Bi	3,92	Natural (Uranio 238)
1460,67	20308	9,38	⁴⁰ K	10,67	Primordial
1592,52	973	0,45	²⁰⁸ TI(es)		Natural (Torio 232)
1729,42	514	0,24	²¹⁴ Bi	2,88	Natural (Uranio 238)
1764,40	1731	0,80	²¹⁴ Bi	15,26	Natural (Uranio 238)
1847,36	454	0,21	²¹⁴ Bi	2,04	Natural (Uranio 238)
2109,90	709	0,33	²¹⁴ Bi	2,04	Natural (Uranio 238)
2204,16	619	0,29	²¹⁴ Bi	2,04	Natural (Uranio 238)
2614,76	5665	2,62	²⁰⁸ TI	84,5	Natural (Torio 232)

 Tabla 2.17.
 Datos de las líneas del espectro de fondo del detector XtRa.

En las figuras 2.50 a 2.6 se muestra de forma detallada el espectro del fondo en el intervalo energético de 0 -2800 keV obtenido, como se ha dicho, con un tiempo de recuento acumulado de 2162872 s



Capítulo 2 – Material y métodos



Figura 2.51 Detalle del espectro fondo XtRa hasta 200 keV



Figura 2.52 Detalle del espectro fondo XtRa desde 200 keV hasta 400 keV



Figura 2.53 Detalle del espectro fondo XtRa desde 400 keV hasta 600 keV



Figura 2.54 Detalle del espectro fondo XtRa desde 600 keV hasta 800 keV



Figura 2.55 Detalle del espectro fondo XtRa desde 600 keV hasta 800 keV



Figura 2.56 Detalle del espectro fondo XtRa desde 800 keV hasta 1000 keV



Figura 2.57 Detalle del espectro fondo XtRa desde 1000 keV hasta 1200 keV



Figura 2.58 Detalle del espectro fondo XtRa desde 1200 keV hasta 1400 keV



Figura 2.59 Detalle del espectro fondo XtRa desde 1400 keV hasta 1600 keV



Figura 2.60 Detalle del espectro fondo XtRa desde 1600 keV hasta 2000 keV



Figura 2.61 Detalle del espectro fondo XtRa desde 2000 keV hasta 2700 keV



Figura 2.62 Espectro fondo XtRa desde 200 keV a 620 keV con blindaje y con la puerta abierta del blindaje

2.5.4 Procedimiento de cálculo de la actividad específica de muestras ambientales.

Una vez establecidos los procesos de calibración en energía y eficiencia y caracterizado el fondo del laboratorio, se está en condiciones de determinar la actividad específica de los distintos radioisótopos de interés. En este apartado describe el modelo de cálculo empleado en este trabajo de Tesis Doctoral, que está basado en los algoritmos implementados en el programa Genie-2000 de Canberra. El diagrama de flujo general se muestra en la figura 2.63.

Según el diagrama de flujo de la figura 2.63, una vez obtenido el espectro, el sistema localiza los picos utilizando el método de la segunda derivada (Mariscotti, 1967), y chequea la aceptabilidad del pico, utilizando los umbrales de discriminación definidos por el usuario. A continuación el sistema procede a la identificación de los picos, para lo cual el sistema se basa en el modelo desarrollado originalmente en el programa SAMPO (Canberra, 2002). En dicho modelo se tienen en cuenta todas las líneas de emisión, que se han definido previamente en una librería de análisis de los diferentes isótopos. El programa genera una matriz de posibles identificaciones comparando los isótopos de la librería con los picos del espectro. Para cada pico se mide su posición y se determina su ancho, utilizando la curva de calibración en energía. En un siguiente paso, el sistema identifica, si se trata de un pico simple o de un pico múltiple utilizando el criterio indicado en el apartado 2.5.2.3. En caso de tratarse de un pico múltiple, el sistema procede a realizar su deconvolución para resolverlo. ("limpieza del pico").

Una vez caracterizados los picos de interés, para cada uno de ellos se determina su área. El área neta (N) de un fotopico se calcula restándole al número total de cuentas netas existentes (I)¹, las cuentas correspondientes al fondo (F) y el valor del fondo continuo Compton (B) producido por otras emisiones (figura 2.59).

$$N = I - B - F$$
 [2.31]

El valor de *F* se calcula multiplicando por *t* el número de cuentas por segundo del fotopico de fondo en ausencia de muestra. El fondo continuo (*B*) se calcula mediante un método sencillo (Debertin and R.G., 1988b) que consiste en tomar a la derecha e izquierda del pico un número de canales aproximadamente igual a los ocupados por el pico $m_i=m_d=n/2$, si B_i es el número de cuentas en los m_i canales de la izquierda y B_d las cuentas correspondientes a los m_d canales a la derecha

$$B = \left(\frac{B_i}{m_i} + \frac{B_d}{m_d}\right) \frac{n}{2} = B_i + B_d$$
[2.32]

¹ Esta cantidad suele denominarse Integral en la notación de Canberra.



Figura 2.63 Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la actividad mediante el programa GENIE-2000 (Gilmore and Hemingway, 1995)



Figura 2.64 Cálculo del área en un fotopico

Por consiguiente, de acuerdo con la ecuación [2.31], el área neta del pico es:

$$N = I - (B_i + B_d) - F$$
 [2.33]

La incertidumbre en el valor del área se estima aplicando la propagación de errores en la ecuación [2.33], la varianza del área neta viene dada por:

$$\sigma_N^2 = \sigma_I^2 + \sigma_{B_i}^2 + \sigma_{B_d}^2 + \sigma_F^2 \qquad [2.34]$$

suponiendo que las incertidumbres se corresponden con una estadística de Poisson, puede sustituirse $\sigma_I = \sqrt{I}$, $\sigma_{B_i} = \sqrt{B_i}$, $\sigma_{B_d} = \sqrt{B_d}$, $\sigma_F = \sqrt{F}$, en la ecuación [2.34] para obtener que:

$$\sigma_N^2 = N + 2B + 2F$$
 [2.35]t

A continuación se estudia el valor obtenido del área del pico para determinar si se trata de un pico significativo o no en relación con su fondo Compton. Para ello se utiliza el criterio establecido por (Currie, 1968), que consiste en comparar el área neta calculada del pico con un límite crítico definido por:

$$L_C = k\sqrt{B + \sigma_B^2} = k\sqrt{2B}$$
[2.36]

Siendo k=1,645 para un nivel de confianza del 95%. Si el pico se considera significativo, se pasa a calcular su actividad mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{N}{\varepsilon P(E)mt} e^{\frac{t_r}{T}\ln 2}$$
[2.37]

Siendo N el área neta del fotopico (cuentas), \mathcal{E} la eficiencia del detector para la energía correspondiente al fotopico, P(E) la probabilidad de emisión, m la cantidad de masa en kg de la muestra, t el tiempo de recuento, t_r el tiempo transcurrido desde la recogida de la muestra , y T el periodo de semidesintegración del radionúclido. En el caso particular de calcular la actividad de radionúclido de un gran periodo de semidesintegración, la ecuación [2.37] se reduce a:

$$A = \frac{N}{\varepsilon P(E)mt}$$
 [2.38]

La incertidumbre en la determinación de la actividad viene dada por:

$$\delta_{A} = \sqrt{\left|\frac{\partial A}{\partial N}\right|^{2}} \delta_{N}^{2} + \left|\frac{\partial A}{\partial \varepsilon}\right|^{2}} \delta_{\varepsilon}^{2} + \left|\frac{\partial \varepsilon(E)}{\partial P(E)}\right|^{2}} \delta_{P(E)}^{2} + \left|\frac{\partial \varepsilon(E)}{\partial m}\right|^{2}} \delta_{m}^{2}$$
[2.39]

Que, sustituyendo explícitamente por el valor de las derivadas parciales indicadas y agrupando términos, se expresa como:

$$\delta_{A} = A \sqrt{\left(\frac{\delta_{N}}{N}\right)^{2} + \left(\frac{\delta_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^{2} + \left(\frac{\delta_{P(E)}}{P(E)}\right)^{2} + \left(\frac{\delta_{m}}{m}\right)^{2}}$$
[2.40]

El cálculo de Genie 2000, incluye además una serie de correcciones para tener en cuenta el decaimiento antes de comenzar el conteo y el que pueda producirse durante el contaje, la absorción dentro de la fuente, la atenuación externa y los efectos de suma aleatoria (Canberra, 2002)

Si el área neta del pico no cumple la condición 2.36 se considera no detectado y se indica que está por debajo de la mínima actividad detectable (MAD). Dada su importancia en el apartado siguiente se detalla el procedimiento de cálculo de la Mínima Actividad detectable.

2.5.4.1 Límite de detección y mínima actividad detectable (MAD)

Cuando se trata de medir niveles bajos de una magnitud, ya sea actividad, dosis... deben hacerse las siguientes preguntas: ¿cuál es el nivel mínimo de actividad que el sistema es capaz de detectar? Dependiendo de la respuesta, puede ser necesario buscar otro procedimiento o sistema de medida que detecte los niveles requeridos en una aplicación concreta. Se comienza definiendo el *límite inferior de detección LID* como la menor actividad que tiene que tener una muestra para que dé lugar a un recuento neto tal que se detecte actividad con un nivel de confianza fijado de antemano. Una vez en este punto, es conveniente distinguir entre dos errores posibles que se pueden encontrar:

- Error de primera especie (α), que consiste en suponer que hay actividad cuando en realidad no la hay.
- Error de segunda especie (β), consiste en suponer que no hay actividad cuando realmente si la hay.

Cuando se analiza una muestra, se efectúan dos recuentos, en el primero de ellos se determina el fondo F, y en el segundo las cuentas brutas I, siendo, por tanto, las cuentas netas:

$$N = I - F \tag{2.41}$$

Si se supone una muestra con actividad nula, el valor medio de N tiene que ser cero y se distribuye normalmente alrededor de este valor



Figura 2.65 Distribución de Poisson

Si se mide otra muestra, y se obtiene N' > 0 cuentas netas, hay que preguntarse, si éstas son consecuencia de la actividad de la muestra, o bien es debido a la fluctuación estadística de la medida. Es por lo que se define el *límite crítico* L_c asociado a un error de primera especie α como:

$$L_c = K_{\alpha} \sigma_0$$
 [2.42]

En donde σ_0 es la varianza de la distribución y K_{α} es un factor que depende del nivel de confianza que, habitualmente, se toma del 95% al cual corresponde $K_{\alpha} = 1,645$.

Si $N' > L_c$ entonces la muestra tiene actividad con un nivel de confianza del 95% y si $N' < L_c$ la muestra no tiene actividad con un nivel de confianza del 5%. El uso de L_c se aplica únicamente a posteriori, es decir, para determinar si una medida concreta es o no distinguible del fondo, o lo que es igual, si se ha detectado presencia de radiactividad en la muestra.

Por otro lado, también puede ocurrir que la muestra tenga un valor de actividad mayor que el límite crítico L_c pero debido al comportamiento aleatorio de la medida, se obtenga un valor menor que L_c , se dice entonces, erróneamente, que la muestra no presenta actividad. La pregunta concreta es: ¿cuál tiene que ser la actividad mínima de una muestra para que al efectuar una medida, se tenga una probabilidad β de cometer un error de segunda especie? Esta actividad mínima se llama *límite inferior de detección* (LID). Según se muestra en la figura 2.66

$$LID = L_c + K_\beta \sigma_D = K_\alpha \sigma_0 + K_\beta \sigma_D$$
[2.43]



Figura 2.66 Límite crítico y límite de detección

En donde K_{β} al igual que K_{α} depende del nivel de confianza, y σ_{D} es la desviación estándar de las cuentas netas de la muestra.

Puede simplificarse la ecuación [2.43] suponiendo: $K_{\alpha} = K_{\beta} = K = 1,645$ es decir tomando un nivel de confianza igual para los dos tipos de errores de un 95%, y suponiendo también que $\sigma_0 = \sigma_D$ la ecuación [2.43] puede escribirse en la forma:

$$LID = 2K\sigma_{D}$$
 [2.44]

y si la actividad bruta y la del fondo son parecidas

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_F^2} = \sigma_F \sqrt{2}$$
[2.45]

lo que permite obtener al sustituir [2.45] en [2.44] que:

$$LID = 2K\sigma_F \sqrt{2} = 2\sqrt{2}K\sqrt{F} = 4,65\sqrt{F}$$
 [2.46]

Una expresión no tan restrictiva en los cálculos se encuentra en (Saleh et al., 2013) (Badhan and Mehra, 2012) y es la que utiliza el software Genie 2000 de Canberra, que viene expresada mediante la ecuación [2.48]:

$$LID = K^{2} + 2K\sigma_{0} = 2,71 + 3,29\sigma_{0}$$
 [2.47]

donde; $\sigma_0 = \sqrt{2B + 2F}$, siendo B el continuo Compton bajo el fotopico , y F el área neta para dicho fotopico presente en el fondo ambiental. Por tanto la ecuación [2.47] se expresa:

$$LID = K^{2} + 2K\sigma_{0} = 2,71 + 4,65\sqrt{B} + F$$
[2.48]

A partir de esta cantidad se puede calcular la Mínima Actividad Detectable (MAD)¹.que se define como la actividad o actividad específica calculada a partir del límite inferior de detección y, por consiguiente, viene dada por:

$$MAD = \frac{LID}{\varepsilon P(E)mt} e^{\frac{t_{\gamma}}{T}\ln 2}$$
[2.49]

2.6. Instrumental adicional de campaña y de laboratorio

Para finalizar el capítulo, se describen, a continuación los principales equipos empleados en los procesos de toma y preparación de muestras.

2.6.1 Sistema de posicionamiento global Garmin GPS II plus

Para determinar la localización de los puntos se ha utilizado en las campañas el GPS Garmin GPS II plus. Es un localizador GPS que incorpora un receptor de 12 canales paralelos para una adquisición rápida y una recepción de satélites mejorada.

Puede utilizar hasta un máximo de doce satélites y realiza un seguimiento continuo con refresco de la señal cada segundo. La incertidumbre en el posicionamiento indicada por el fabricante es de ±15 m. El GPS también proporciona medidas precisas de altitud necesarias para la estimación de la componente cósmica. Permite almacenar las localizaciones de una ruta especificada de puntos.



Figura 2.67 Sistema GPS Garmin II plus.

¹ (BOE-A-2011-14864) Nivel de actividad verdadera que puede esperarse que una instrumentación y técnica de medida específica detecte un 95% de las veces.

En los estadios finales, y gracias al gran avance experimentado por las tecnologías de la información se han utilizado también como sistemas de posicionamiento, los proporcionados por dispositivos móviles tipo tablet o Smartphone.

2.6.2 Balanza de precisión Cobos serie CB

Para el pesado de las muestras de suelo se utiliza una balanza precisión de la marca Cobos correspondiente a la serie CB con una sensibilidad de 0,1 g. Para medidas que requieran una gran exactitud en el pesado de las muestras se dispone de una balanza de la serie LX con una sensibilidad de 0,1 mg.



Figura 2.68 Balanza de precisión Cobos serie CB

2.6.3 Cedazos calibrados

Para el cribado/tamizado de las muestras se dispone de un conjunto de cedazos de acero inoxidable calibrados de la marca CISA con distintos tamaños de mallado que permite la separación granulométrica de partículas sólidas.



Figura 2.69 Cedazos calibrados para tamización de muestras.

2.6.4 Estufa de secado

Para el secado de las muestras se dispone de una estufa de la marca Tarma con capacidad para más de 20 muestras con control del tiempo de secado y rango de temperaturas desde 40 a 120 °C.



Figura 2.70 Estufa de secado de muestras.

Capítulo 3

Estudio de la Radiación gamma natural a un metro del suelo. Mapas radiométricos

3.1. Introducción

Este trabajo de Tesis Doctoral tiene su origen en los trabajos llevados a cabo en el año 2008 por investigadores del Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, para elaborar el mapa radiométrico de las Islas Canarias Orientales mediante un convenio con el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en el marco del proyecto MARNA. Siguiendo la metodología establecida en MARNA se procedió a la medida de la radiación gamma natural a un metro del suelo para determinar la distribución geográfica de tasa de exposición. Este capítulo se dedica, en exclusiva, a mostrar los resultados de estos primeros trabajos de caracterización radiológica y en él se describe la planificación y desarrollo de las campañas de medida "in situ" de tasa de exposición. A continuación se describen los procedimientos de interpolación utilizados para elaborar los mapas radiométricos de las islas. El grueso del capítulo se dedica al análisis de la distribución espacial de tasa de exposición y de tasa de dosis absorbida en las distintas islas y su relación con la geología de la zona. Se discuten los resultados obtenidos comparándolos con estudios similares llevados a cabo a escala regional, nacional e internacional. El capítulo finaliza con un estudio de la persistencia temporal de las medidas.

3.2. Planificación y desarrollo de las campañas de medida

3.2.1 Elección de los puntos de medida

El primer paso en la elaboración de las campañas consistió en determinar el número y distribución de puntos de medida para obtener un mapa representativo de la radiación gamma natural en las Islas Canarias Orientales. Dado que se trataba de establecer niveles de fondo, se ha seguido la metodología propuesta en el "Procedimiento 1.1. Toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial" de la colección de informes técnicos del CSN¹, y, para cada isla, se ha establecido una malla regular, con una separación entre los puntos

¹ Consejo de Seguridad Nuclear. Colección Informes Técnicos 11.2003 Serie Vigilancia Radiológica Ambiental. Procedimiento 1.1. Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial. (2003).

de muestreo de aproximadamente 5 km. Para fijar la situación ideal de los puntos se utilizó la cartografía proporcionada por Google Earth y por la empresa GRAFCAN del Gobierno de Canarias. Dentro de lo posible, se intentó que el punto elegido estuviese a una distancia mínima de 50 m de los edificios más próximos y de más de 10 m de carreteras y otras superficies pavimentadas. En este sentido conviene aclarar, que el procedimiento habitual en este tipo de medidas establece que es necesario medir sobre suelos llanos, evitando, en lo posible hondonadas y altozanos. Esta recomendación, debido a la orografía de las Islas, ha resultado complicado de llevar a cabo, especialmente en Gran Canaria, ya que, en general las islas son muy montañosas con profundos barrancos dirigidos hacia el mar, escaseando las llanuras.

Otra alternativa hubiese sido utilizar un criterio basado en el muestreo de las distintas formaciones geológicas (que determinan la radiactividad ambiental) para seleccionar los puntos de medida, pero se consideró más adecuado seguir una malla regular, para no introducir ningún sesgo previo en la toma de medidas y cumplir con el procedimiento establecido por el CSN. No obstante, para tener en cuenta la geología, una vez realizadas las primeras medidas, se refinó la malla insertando más puntos en las zonas de mayor variabilidad de la radiación según lo indicado en el procedimiento 1.1 del CSN.

En la práctica, es complicado medir exactamente en el punto seleccionado debido a lo accidentado del terreno insular que en ocasiones no permite el acceso a los puntos de medida (sobre todo en las islas de mayor relieve como Gran Canaria). Este hecho, más la inclusión de los puntos de refinamiento, han provocado cierta irregularidad en la distribución de los datos. Siguiendo el protocolo previamente establecido, en las medidas de campo, la posición exacta de los puntos reales de medida se determinó utilizando el equipo GPS GARMIN II Plus. En la mayor parte de los puntos iniciales, la medida se realizó a no más de 500 m del punto establecido previamente.

El grueso de las campañas se llevó a cabo durante el año 2008, en el marco del proyecto MARNA del CSN, pero se han seguido tomando datos de tasa de exposición de forma sistemática, aprovechando otras campañas llevadas a cabo por el Grupo de Investigación (toma de muestras de suelos y medida de la concentración de radón en suelos) en el periodo 2009-2013. Uniendo los datos de las diferentes campañas realizadas, se dispone, en la actualidad, de 320 medidas de la Isla de Gran Canaria (1560 km²), 161 de la Isla de Fuerteventura (1660 km²), 119 de la Isla de Lanzarote (846 km²), y 8 de la Isla de La Graciosa (27 km²), lo que da un total de 608 puntos en toda la provincia de Las Palmas (4093 km²). De esta forma, en media, se dispone de una medida de tasa de exposición por cada 6,7 km². En las figuras 3.1 a 3.3 se muestran, sobre los mapas geológicos proporcionados por GRAFCAN la situación de los puntos de medida en cada isla. Se observa que la isla con menor densidad de puntos medidos es la de Lanzarote, debiéndose a que su orografía es mucho más sencilla respecto al resto de las islas (posee grandes llanuras) y teniendo, además, muy poca variabilidad en los datos radiológicos (que son también muy bajos). En contraposición, en Gran

han encontrado variaciones muy grandes de la tasa de exposición, lo que ha hecho necesario medir muchos puntos de refinamiento para caracterizar las anomalías encontradas. Otro dato que se ha tenido en cuenta a la hora de fijar el número de puntos de muestreo es que Gran Canaria, es con diferencia, la isla más poblada de la provincia concentrando al 77,3 % de la población, frente al 9,9 % de Fuerteventura y el 12,8 % de Lanzarote, lo que hace necesario un estudio más profundo para evaluar las posibles consecuencias dosimétricas sobre la población.



Figura 3.1 Situación de los puntos de medida en la isla de Gran Canaria. Coordenadas UTMhuso 28.



Figura 3.2 Situación de los puntos de medida en la isla de Fuerteventura. Coordenadas UTMhuso 28.



Figura 3.3 Situación de los puntos de medida en la isla de Lanzarote y La Graciosa. Coordenadas UTM-huso 28.

Los mapas reflejan que se ha muestreado densamente todo el territorio y se han cubierto todas las formaciones geológicas de las islas con un número significativo de puntos

3.2.2 Procedimiento de medida de la tasa de exposición a un metro del suelo

El procedimiento de medida utilizado es el recomendado para este tipo de toma de datos en una campaña terrestre. Una vez situados en el punto se instalan los equipos en trípodes, de modo que los detectores queden siempre a un metro del suelo, a continuación, se ponen en funcionamiento durante cinco minutos para que se estabilice su medida. En la figura 3.4 se muestra la disposición de los equipos de medida.

Debido a la naturaleza estadística de los fenómenos radiactivos es necesario tomar varias medidas del mismo punto; las recomendaciones de MARNA aconsejan tomar del orden de 5 medidas a intervalos de 5 minutos, adoptando como definitiva la media de las cinco. De forma simultánea se anotan en la hoja de campo normalizada (Apéndice 6) los siguientes datos: día y hora, estado del cielo, temperatura ambiente en °C, presión atmosférica en mm de Hg, humedad relativa en tanto por ciento, altura sobre el nivel del mar y tipo de suelo. Como ya se ha indicado, en el caso de las sondas GammaTRACER la medida se hace en continuo tomando 20 valores por detector en 20 minutos, por ello es necesario anotar, en sincronía con el medidor de tiempo interno de la sonda, la hora de comienzo y de fin de la medida. Como valor se toma la media de las 20 medidas y el error en las medidas se estima de 1 µR/h.



Figura 3.4 Disposición de equipos en un punto de medida.

En cuanto al periodo de toma de datos lo ideal sería medir todos los puntos simultáneamente, ya que la radiactividad gamma ambiental puede cambiar según día, hora y estación del año, debido a variaciones en la actividad del fondo cósmico o en la concentración de radón. Esto es obviamente imposible, pero las campañas de medida se han tomado en un intervalo de varios años. Como parte de otro trabajo, se han tomado datos para estudiar la variabilidad de la tasa de exposición en el periodo de un año y en un punto concreto. Los resultados de este estudio, se muestran en el apartado 3.6.

Para los equipos y método de medida utilizados en este trabajo, sólo se tienen en cuenta las fuentes externas de radiación gamma, que se deben a la presencia de los radioisótopos que se encuentran en el suelo, en los materiales de construcción, en el agua y en el aire; la existencia de la radiación cósmica y la formación de radionúclidos cosmogénicos que se producen por interacción de la radiación cósmica con los átomos presentes en la atmósfera. Para estimar la componente de radiación cósmica se emplea la expresión propuesta en el informe del UNSCEAR a la Naciones Unidas de 1993 (UNSCEAR, 1993)

$$\dot{R}(z) = 3,69[0,21e^{-1.65z}+0,79e^{0.453z}]$$
[3.1]

donde $\dot{R}(z)$ es la tasa de exposición debida al fondo cósmico para latitudes próximas a Canarias expresada en μ R/h y z la altitud expresada en kilómetros.

En varios puntos en la costa de la isla se midió la tasa de exposición con el fin de establecer una comparación con los resultados de esta expresión. La radiactividad en tierra procede en su inmensa mayoría de los isótopos existentes en el suelo, y sólo una pequeña parte procede de la radiación cósmica. En cambio, en el mar, la única fuente radiactiva es la cósmica más una pequeña contribución debida a los materiales de la embarcación que se puede considerar despreciable. Los valores medios de fondo cósmico medidos por este procedimiento (sobre 1,5 µR/h) son un poco menores que los que se obtienen de la expresión propuesta, pero, teniendo en cuenta las incertidumbres en las medidas a tan baja escala pueden considerarse válidas. En el Apéndice 6 se

muestran los datos de tasa de exposición obtenidos en las campañas incluyendo las coordenadas de localización de cada punto, su altitud y la contribución del fondo cósmico.

3.3. Análisis geoestadístico. Determinación de los mapas de isolíneas de tasa de exposición. El método de interpolación de Kriging

Como resultados de las campañas de medida se dispone de un conjunto discreto de datos que se suponen representativos del territorio y como consecuencia de los mismos se obtienen mapas predictivos de la magnitud medida (tasas de exposición, dosis, concentración, etc...). La interpolación de datos geoestadísticos permite obtener mapas o superficies continuas que se deducen de un número conocido de datos discretos medidos. Dependiendo del tipo de datos analizados, el costo y la dificultad de su obtención, así como la información previa del terreno, determinan la importancia de la interpolación (Haining, 1993).

El proceso de interpolación espacial consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable Z en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X, Y), partiendo de los valores de Z medidos en una muestra de puntos situados en el mismo área de estudio. En algunos casos pueden utilizarse otras variables de apoyo, V, de las que se conoce su variación espacial en el proceso de interpolación (en el caso de la interpolación de la radiación gamma ambiental puede ser la altitud ya que la componente gamma cósmica depende de ella). El área de estudio vendría definida por el entorno de los puntos en los que sí se dispone de datos. Lo más habitual es comenzar con medidas puntuales, (Gallardo, 2006).

Aunque los métodos que se utilizan son muy variados, todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos, los valores de cualquier variable cuantitativa que se mida en ellos serán más parecidos, es decir, las variables espaciales muestran mayor autocorrelación espacial.

Prácticamente todos los procedimientos de interpolación se basan, en gran medida, en el uso de técnicas estadísticas que permiten determinar las características de una población deducidas de una muestra de ella y de los parámetros estadísticos medidos sobre ésta. Existen diversos tipos de estadísticos para caracterizar una variable: de tendencia central (media, mediana y moda), de dispersión (rango, varianza y desviación típica) y de forma (sesgo y Kurtosis). Si en lugar de caracterizar una sola variable se quiere caracterizar el comportamiento conjunto de dos o más variables (X, Y) se utilizan técnicas de análisis multivariante. Otros dos estadísticos fundamentales son la covarianza y el coeficiente de correlación de Pearson.

Los métodos de interpolación partiendo de datos medidos son muy numerosos, y se pueden clasificar de diferentes maneras:

• Métodos globales frente a métodos locales. Una primera clasificación puede hacerse atendiendo a los puntos que se usan para estimar la interpolación. Los globales tienen en

cuenta todos los puntos muestreados en el cálculo del valor del punto estimado, mientras que los locales emplean sólo los puntos de muestreo más cercanos.

 Métodos directos frente a métodos analíticos. Una segunda clasificación puede hacerse mediante el mecanismo matemático de interpolación. Los directos formulan suposiciones generales, habitualmente no contrastadas, sobre el carácter de la superficie a interpolar, y establecen a partir de ellas la función matemática de interpolación. Por el contrario, los métodos analíticos estudian el carácter de la autocorrelación espacial de la variable a interpolar analizando los puntos medidos en una fase inicial de reconocimiento. Posteriormente, en la fase de cálculo generan una función de interpolación que tiene en cuenta el grado y tipo de autocorrelación espacial de la variable.

La Geoestadística se basa en la Teoría de las Variables Regionalizadas de Matheron (Matheron, 1963) que considera los procesos naturales como una combinación de estructuras globales suaves junto con variaciones locales aleatorias. En contraste con los métodos deterministas, los métodos geoestadísticos deben tener en cuenta explícitamente la correlación espacial del fenómeno investigado en el cálculo de los pesos atribuidos a puntos vecinos durante el proceso de interpolación (Chilès and Delfiner, 1999). Es por esto, que los métodos de interpolación geoestadísticos deben ser locales y analíticos según la clasificación indicada. El más utilizado de estos procedimientos es el denominado método de Kriging (ó krigeado).

Este método de interpolación se basa en el análisis de la autocorrelación a partir de la representación de la variabilidad espacial obtenida por un variograma, que consiste, en analizar la similitud entre los valores de la variable según aumenta la distancia entre ellos (Van Beers and Kleijnen, 2004). Desde el mismo, se obtiene una función que representa lo más fielmente posible esta relación espacial, y esa función es la utilizada para interpolar la variable a partir de los puntos ya conocidos. La interpolación espacial realizada con el kriging es un método de interpolación local óptimo, debido a cómo utiliza la programación dinámica para escoger los pesos de interpolación con el fin de obtener la mejor estimación lineal insesgada del valor de la variable en un punto cualquiera.

Matemáticamente, el fundamento de la interpolación Kriging es considerar la estimación del valor de la propiedad Z en un punto del espacio u_0 como una combinación lineal de las observaciones disponibles en distintos puntos $Z(u_i)$.

$$Z(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i), i = 1, ..., n$$
[3.2]

donde *n* es el número de puntos usados en la estimación y λ_i es el peso dado por el valor observado $Z(u_i)$ en las cercanías del punto u_0 (Lozano et al., 2004). Todos los estimadores Kriging son variantes del estimador de regresión lineal básico $Z^*(u_0)$ definido como:

$$Z^{*}(u_{0}) - \mu(u_{0}) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} [Z(u_{i}) - \mu(u_{i})], i = 1, ..., n$$
[3.3]

donde $\mu(u_0), \mu(u_i)$ son los valores esperados (medias) de $Z(u_0)$ y $Z(u_i)$; u_0 y u_i son los vectores localización del punto estimado y de uno de los puntos próximos.

En general, Z(u) se trata como una función aleatoria con una componente de tendencia, $\mu(u)$ y un residuo, $R(u) = Z(u) - \mu(u)$. El Kriging estima el residuo en *u* como una suma ponderada de los residuos de los puntos próximos utilizados en la estimación. Los pesos Kriging, λ_i , derivan de la función de covarianza o semivariograma, que debe caracterizar el residuo (Bohling, 2005). Partiendo del estimador Kriging, el objetivo fundamental es determinar los pesos λ_i que minimizan la varianza del estimador:

$$\sigma^2 = \operatorname{var}\left[Z(u_0) - Z^*(u_0)\right]$$
[3.4]

que debe ser insesgado, $E\left[Z\left(u_{0}\right)-Z^{*}\left(u_{0}\right)\right]=0$

Como se ha dicho, el campo aleatorio Z(u) se descompondrá en una componente residual y en una tendencia, donde el residuo se tratará como estacionario de media cero y covarianza estacionaria:

$$E[R(u)] = 0$$
[3.5]

$$Cov[R(u), R(u+d)] = E[R(u) \cdot R(u+d)] = C_R(d)$$
[3.6]

La función de covarianza residual deriva generalmente del semivariograma de entrada $\gamma(d)$, definido como:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} Var \left[Z(u) - Z(u+d) \right]$$
[3.7]

de forma que el semivariograma que alimente el cálculo de la estimación Kriging debe representar la componente residual de la variable,

$$C_R(d) = C_R(0) - \gamma(d)$$
[3.8]

Las tres variantes principales de Kriging, *simple*, *ordinario*, y *Kriging universal*, difieren en sus tratamientos de la tendencia, $\mu(x)$. Para el **Kriging simple** se asume que la tendencia es una media constante y conocida, $\mu(u) = m$ de forma que la estimación del error es una combinación

lineal de variables aleatorias que representan los residuos en los puntos medidos, u_i y en el punto estimado u_0 .

$$Z^{*}(u_{0}) - Z(u_{0}) = \left[Z^{*}(u_{0}) - m\right] - \left[Z(u_{0}) - m\right] = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} R(u_{i}) - R(u) = R^{*}(u) - R(u_{i})$$
[3.9]

La varianza del error se obtiene a partir de las reglas para la varianza como combinación lineal de variables aleatorias:

$$\sigma^{2} = Var \Big[R^{*}(u_{0}) \Big] + Var \Big[R(u_{0}) \Big] - 2Cov \Big[R^{*}(u_{0}), R(u_{0}) \Big] =$$

= $\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \lambda_{i} \lambda_{j} C_{R}(u_{i} - u_{j}) + C_{R}(0) - 2\sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_{i} C_{R}(u_{i} - u_{0})$ [3.10]

Para minimizar la varianza del error, se deriva la expresión anterior respecto a cada peso y se igualan a cero, cada una de las derivadas, y puede ser representado por el siguiente sistema de ecuaciones matricial:

$$K = \lambda_i k$$
 [3.11]

donde K es la matriz de covarianzas de los datos medidos, con elementos $K_{i,j} = C(u_i - u_j)$, k es el vector de covarianzas entre los datos medidos y los estimados, $k_{i,j} = C(u_i - u_0)$, y λ_i es el vector de los pesos del Kriging simple para los puntos de datos circundantes. Una vez que se tienen los pesos Kriging, se pueden calcular tanto la estimación Kriging y la varianza Kriging.

Para **Kriging ordinario**, en lugar de asumir que la media es constante en todo el dominio, se supone que es constante en la zona local de cada punto de estimación, es decir, que $\mu = m(u)$, una para cada valor de datos cercano, $Z(u_i)$ que se usa para estimar $Z(u_0)$. El Kriging universal es muy similar a Kriging ordinario, excepto, que en lugar de ajustar sólo una media local en el entorno de cada punto estimado, ajustan a una tendencia lineal o de orden superior sobre las coordenadas de los puntos estimados:

$$\mu(u) = m(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y$$
[3.12]

De todos ellos, el Kriging ordinario es en la actualidad, probablemente, el procedimiento que con más frecuencia es usado para el levantamiento de mapas de datos ambientales y por ello ha sido el método utilizado en este trabajo de Tesis Doctoral para la elaboración de los mapas radiométricos de las Islas. No obstante, también se han analizado otros procedimientos de interpolación: basados en otro tipo de aproximaciones. En la figura 3.5 se muestra el mapa de tasa de exposición de la isla de Gran Canaria obtenido a partir de los 320 datos medidos utilizando diversos métodos de interpolación.



Figura 3.5 Mapa de isolíneas de tasa de exposición en la Isla de Gran Canaria. en µR/h obtenido utilizando diversos métodos de interpolación.

Es evidente que la interpolación influye de forma notoria en la capacidad predictiva del mapa. Los dos primeros mapas de la figura 3.5 (a) y (b) corresponden a métodos directos globales, proporcionando mapas demasiado suaves que no se ajustan a las gran diversidad geológica de la isla, que se muestran en la figura 3.1. Los mapas (c) y (d) han sido interpolados utilizando métodos directos locales y muestra un mejor comportamiento, aunque localizan demasiado los valores en torno a los puntos medidos. Por último, los mapas (e) y (f) se corresponden con interpolaciones que tienen en cuenta explícitamente la correlación espacial y proporcionan resultados similares y que se ajustan mejor a la variabilidad geológica del terreno. Como ya se ha indicado, de ellos se ha seleccionado el kriging ordinario por ser el más usado, con diferencia, para la representación de la variación de parámetros geológicos.

3.4. Estudio de la tasa de exposición a un metro del suelo. Mapas radiométricos

3.4.1 Isla de Gran Canaria

Gran Canaria es la isla más estudiada en este trabajo, debido a su gran variabilidad geológica y al hecho ser la isla más habitada de la provincia de Las Palmas, con prácticamente el 80% de la población total lo que la hace la más relevante para posteriores estudios dosimétricos. Se disponía, además, de un estudio preliminar con 79 datos, llevado a cabo por nuestro grupo de investigación en el periodo 1995 -1997 (Doreste et al., 1998). Como se ha indicado, en el año 2008, en el marco de un convenio con el Consejo de Seguridad Nuclear para completar el mapa de MARNA en las Islas Canarias Orientales, se llevó a cabo una nueva serie de campañas de medidas que comprende la totalidad de la isla habiéndose tomado 100 nuevos datos. Durante el periodo 2009-2013 y en el marco de otros proyectos de investigación se ha seguido midiendo la tasa de exposición hasta llegar a un total de 320 datos (una medida por cada 4.88 km²). En el Apéndice 6 (apartado 6.1) se recogen en forma de tabla todos los datos de tasa de exposición de la isla de Gran Canaria junto con su localización y contribución del fondo cósmico. En la tabla 3.1 se muestran los principales indicadores estadísticos de la distribución de datos.

Entre los parámetros que caracterizan estadísticamente los datos experimentales, además de las medias aritmética y geométrica y de la desviación estándar, pueden destacarse la asimetría (skewness) y la Kurtosis que determinan la forma de la curva de distribución. La asimetría indica si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central (Media aritmética o moda). Tomando como eje de referencia a la moda, estas categorías de asimetría vienen definidas por el diferente grado de dispersión de los datos a ambos lados (colas) de ese eje virtual. La cola más dispersa en el lado de los valores altos de la variable caracteriza a la asimetría positiva de forma que la mayoría de los datos se encuentran por encima del valor de la moda. Si, por el contrario, la cola está más dispersa en el lado de los más bajos, la asimetría es negativa y la mayor cantidad de datos se aglomera en los valores menores que la moda. Finalmente si la dispersión es igual o

Estadístico	Tasa de exposición (µR/h)	Tasa de fondo(µR/h)
Media aritmética	14,92	4,6
Media geométrica	13,52	
Máximo	40,00	7,0
Mínimo	4,00	3,7
Desviación estándar	7,20	0,87
Mediana	12,00	
Kurtosis	2,45	
Asimetría	1,49	
Test de Kolmogorov-Smirnov	<0,010	

muy similar a ambos lados, la distribución de frecuencias es simétrica.

Tabla 3.1. Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria

En caso de asimetría los valores de la media, de la mediana y de la moda difieren. En concreto, si la asimetría es positiva se cumple que la media es mayor que la mediana y la mediana mayor que la moda, ocurriendo lo contrario en la simetría negativa. Para cuantificar la simetría se utiliza la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$
[3.13]

siendo μ_3 el momento central de tercer orden de la distribución y σ la desviación estándar. El valor positivo de la asimetría en la tabla 3.1 indica que, en el caso de Gran Canaria, la distribución es asimétrica positiva de forma que la cola derecha es mayor que la de la izquierda. Existe una tasa de exposición mínima que se corresponde con la debida a la radiación cósmica a nivel del mar y que limita los valores. Como era de esperar la media aritmética (14,92 µR/h) es mayor que la mediana (12 µR/h).

La Kurtosis determina el grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución. Se calcula, en referencia a la distribución normal, a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$$
 [3.14]

siendo μ_4 el momento central de orden cuarto de la distribución y σ la desviación estándar y 3 el valor de la Kurtosis para la distribución normal. Con esta definición una Kurtosis positiva indica que existe una concentración de valores en torno a la moda superior a los de una distribución normal cuya dispersión sea equivalente (distribución Leptocúrtica). Por el contrario, si el coeficiente de Kurtosis es negativo, los datos estarán dispersos respecto a una distribución normal (distribución Platicúrtica). Finalmente si la Kurtosis adopta valores en torno a cero, la distribución sigue el patrón de la distribución normal (distribución Mesocúrtica). La Kurtosis de la distribución espacial

de valores de tasa de exposición en Gran Canaria es positiva de forma que los datos se concentran más cerca de la mediana que de la media aritmética.

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de frecuencias de los datos de tasa de exposición que refleja las características que se han comentado. Con estas características la distribución teórica que mejor se aproxima a la distribución experimental es la función log-normal. Esta distribución de datos es muy utilizada en Geoestadística para el estudio de la distribución espacial de minerales y formación de suelos (Rendu, 1979). También es la distribución que siguen los datos de tasa de exposición utilizados en el Proyecto MARNA de la España peninsular.

El que la distribución experimental se ajuste a una distribución de tipo log-normal significa que la aleatoriedad de la variable espacial es la resultante de un número elevado de causas independientes con efectos positivos, que se componen de manera multiplicativa y cada una de estas causas tiene un efecto despreciable frente al global. Esto es congruente con el tipo de magnitud medida, ya que la variabilidad en la tasa de exposición está directamente relacionada (si se descuenta la componente cósmica) con la variabilidad de las propiedades del suelo de un punto a otro del paisaje, que tiene orígenes diversos, pudiendo provenir, bien de las características inherentes a los procesos de formación predominantes, o bien de los factores de formación, es decir, la litología, el clima, la topografía, la actividad biológica y la acción humana. Algunos de los procesos y factores de formación que inducen la variación espacial afectan a pequeños volúmenes de suelo e introducen heterogeneidad en distancias cortas; otros, por el contrario, provocan dependencia espacial de más largo alcance (Webster, 2000).



Figura 3.6 Diagrama de distribución de frecuencias de los datos de tasa de exposición de la Isla de Gran Canaria.

Estadísticamente, la distribución lognormal es característica de conjuntos de datos donde existe mayor frecuencia de valores pequeños, por lo cual la media se desplaza hacia la

derecha y esto hace que el mejor estadígrafo de posición sea la moda o la media geométrica (13,52 μ R/h) y no la media aritmética (14,92 μ R/h) como ocurre en este caso. En lo referente a la posición del centro de los datos puede situarse con más exactitud en el valor de la mediana (12 μ R/h), que no está influida por valores extremos, como ocurre con la moda. Si se analiza la distribución en la figura 3.6 efectivamente se encuentra, que el grueso de los datos corresponde a valora relativamente bajos de la tasa de exposición (el 75% de los datos se encuentran por debajo de 18 μ R/h) con pocos datos extraordinariamente altos (un 4% de los datos en el rango 38-40 μ R/h). En la figura 3.7 están resumidos en forma de gráfico de cajas y bigotes todas las características de la distribución discutidas.



Figura 3.7 Isla de Gran Canaria. Diagrama de cajas y bigotes de los datos de tasa de exposición.

A partir de estos datos, se han elaborado los mapas de tasa de exposición a un metro del suelo de Gran Canaria. Para realizar el cálculo de las isolíneas de tasa de exposición se ha empleado el método de Kriging ordinario (Samper Calvete and Ramírez, 1990) explicado en el apartado 3.3.



Figura 3.8 Mapa radiométrico de la isla de Gran Canaria. Izquierda: Datos de las campañas de 1996-97. Derecha: Datos parciales de la campaña de 2008.

En la figura 3.8 se muestran, los mapas de tasa de exposición realizados con los datos de las campañas de 1996-1997 y con los datos de 2008. Se han utilizado las coordenadas UTM en la localización geográfica y una escala de colores que va desde el verde (baja tasa de exposición por debajo de 10 μ R/h) al rojo (zonas de alta exposición, mayor de 30 μ R/h) pasando por el amarillo (exposición media en torno a 16 -18 μ R/h). Como se puede apreciar, existe una gran concordancia entre ambos mapas, detectándose las tasas de exposición máximas (con picos de hasta 40 μ R/h) en las mismas zonas. La coincidencia de las medidas realizadas con diez años de diferencia, permite comprobar que existe una gran persistencia en los valores de radiactividad ambiental (como era de esperar) y que la metodología empleada es coherente. Además, la campaña de 1996-1997 se realizó con detectores diferentes (aunque también de centelleo) y la coincidencia de los mapas permite inferir una calibración indirecta de las medias actuales. Como se ha indicado, desde la elaboración del nuevo mapa radiométrico en 2008 se han realizado nuevas medidas, especialmente en las zonas de mayor tasa de exposición lo que ha permitido perfilar con más detalle los gradientes encontrados. En la figura 3.9, se muestra el mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo elaborado a partir de todos los datos disponibles (320).



Figura 3.9 Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria corregido por fondo cósmico. Coordenadas UTM (huso 28).

Este mapa de tasa de exposición, incluye el efecto de la radiación cósmica explicada en el apartado 1.1.1. Para determinar la influencia exclusiva de los materiales del suelo en la tasa de exposición es necesario utilizar, en los cálculos de interpolación del mapa, los valores de tasa de

exposición corregidos con la radiación cósmica. Para ello se le resta a cada dato el valor de radiación cósmica obtenido, en función de la altura del punto, a partir de la ecuación [1.1] expresada en µR/h, esto es:

$$T(z) = 3,69 \left[0,21e^{-1,65 \cdot 10^{-3}z} + 0,79e^{4.53 \cdot 10^{-4}z} \right]$$
 [3.13]

en donde T(z) es la tasa de exposición a una altura z expresada en metros. Con esta corrección, los valores de tasa de exposición presentados en el mapa de la figura 3.10 se deben exclusivamente a los materiales del suelo.

Dado el carácter insular del territorio se considera necesario, además, imponer una condición de contorno en el proceso de interpolación que tenga en cuenta que en la costa de la isla se debe alcanzar el valor del fondo cósmico a nivel del mar. Por ello, en el mapa que presentamos en la figura 3.10 se ha impuesto esta condición a 50 puntos del contorno, asignándoles una tasa de exposición de $0 \mu R/h$ (ya que en el contorno la tasa de exposición debe ser cero una vez descontado el fondo cósmico), obteniéndose el resultado que se observa. Para facilitar la interpretación geológica en la figura 3.11 muestra, de nuevo, el mapa geológico simplificado que se han discutido en el capítulo 1 (figura 1.2.).



Figura 3.10 Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Gran Canaria corregido por fondo cósmico y con condición de contorno 0 μR/h en el contorno de la isla.



Figura 3.11 Mapa geológico de la isla de Gran Canaria. (Carracedo et al, 2002)

Al comparar ambos mapas se observa, como era de esperar, una estrecha relación entre los valores de tasa de exposición obtenidos, y las formaciones geológicas explicadas en el apartado 1.2, llegándose incluso a reconocer estructuras geológicas en el mapa radiométrico. Así, se encuentran zonas localizadas de alta tasa (por encima de 20 µR/h) en el centro, sur y noroeste de la isla donde se encuentran las formaciones geológicas más antiguas con más de 12 millones de años. Teniendo en cuenta el tipo de roca asociada a estas zonas (que formará parte mayoritaria de los suelos), éstas se corresponden principalmente con materiales del primer y segundo ciclo magmático de la isla (Ciclo Antiguo y Ciclo Rogue Nublo). Parte de estos materiales son rocas plutónicas (diques, plutones, etc), volcánicas (coladas, ignimbritas, etc) y diferenciadas (traquitas, fonolitas y sienitas), es decir, rocas magmáticas donde se acumulan elementos traza como uranio, torio, rubidio y estroncio, elementos de las tierras raras, y mayoritarios como el potasio, los cuales presentan isótopos radiactivos, y explican la mayor tasa de exposición encontrada. Por el contrario, las zonas de menor tasa de exposición se localizan en el noreste de la isla; de vulcanismo más reciente (post Roque Nublo) en las que abundan las rocas más básicas y en las zonas de depósitos aluviales y eólicos con muy bajas concentraciones de radioisótopos naturales. Con el fin de cuantificar esta correlación con la geología, en el capítulo 4 de esta Tesis Doctoral se estudiarán en detalle la composición radioisotópica de los suelos de las islas.
3.4.2 Isla de Fuerteventura.

La isla de Fuerteventura ha sido medida con gran detalle en los últimos años por parte de GIRMA (Rubiano et al., 2006a). En el periodo 2008-2012 se realizó un extenso estudio, con el fin de cubrir de forma densa la isla, disponiéndose en la actualidad de 161 medidas de tasa de exposición. Se ha puesto particular atención en las zonas de máximas tasa de exposición, con el fin, de obtener una mayor definición de las mismas. Si bien, la superficie de la isla es mayor que la de Gran Canaria (1659 km² frente a 1560 km²), la variabilidad radiológica medida es mucho menor (como corresponde a su geología) y además es la isla con menor población de la provincia. Por esta razón ha sido necesario tomar un número menor de medidas de forma que se ha realizado una medida por cada 10,3 km²

En el Apéndice 6 (apartado 6.2) se muestran en forma de tabla todos los datos de tasa de exposición de la isla de Fuerteventura junto con su localización y contribución del fondo cósmico. En la tabla 3.2 se resumen todas las medidas, mostrando los principales descriptores estadísticos de la distribución de datos.

Estadístico	Tasa de exposición (µR/h)	Tasa de fondo(µR/h)
Media aritmética	9,09	3,74
Media geométrica	8,16	3,73
Máximo	40	4,10
Mínimo	4	3,70
Desviación estándar	5,47	0,07
Mediana	8,00	3,70
Kurtosis	14,52	5,76
Asimetría	3,42	2,25
Test de Kolmogorov-Smirnov	<0,010	<0,010

Tabla 3.2.Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de
Fuerteventura.

El valor positivo del sesgo indica que, al igual que en Gran Canaria, la distribución es asimétrica con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda, si bien, en este caso la asimetría es mucho mayor por tener el sesgo valor prácticamente el doble que en el caso de Gran Canaria. La Kurtosis es positiva y muy grande lo que indica que los datos presentan una distribución muy picuda respecto a una distribución normal (distribución leptocúrtica). Estos indicadores dicen que los valores de tasa de exposición se concentran en torno a valores bajos con muy pocas excepciones. En la figura 3.12 se muestra el diagrama de frecuencias de los datos y su ajuste a una distribución log-normal.





El coeficiente de correlación de ajuste de los datos experimentales a la distribución lognormal es excelente (0,977) ya que los datos tienen todas las características de este tipo de distribución concentrándose en torno a la mediana (8 μ R/h) que prácticamente coincide con la media geométrica (8,16 μ R/h). La media aritmética (9,01 μ R/h) tiende a sobreestimar los valores característicos de Fuerteventura, ya que está influida por unos pocos valores muy altos.





Si se analiza la distribución en la figura 3.12 efectivamente se encuentra que el grueso de las medidas corresponde a valores bajos de la tasa de exposición (el 75% de los datos se encuentran por debajo de 10 μ R/h) con pocos datos extraordinariamente altos (se encuentran sólo algunos outliers en el rango 38-40 μ R/h). En la figura 3.13 se recogen de forma de diagrama de cajas y bigotes estos resultados. En la figura 3.14 se muestra el mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de Fuerteventura construido con todas las medidas disponibles y utilizando la

misma escala que en el de Gran Canaria para facilitar la comparación. Al igual que en el caso de Gran Canaria, se ha utilizado el método de interpolación Kriging ordinario y se han corregido los datos restando el fondo cósmico en función de la altura del punto obtenido de la ecuación [3.13] y se utilizan las coordenadas en proyección UTM referidas al huso 28.



Figura 3.14 Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Fuerteventura corregido por fondo cósmico. Coordenadas UTM (huso 28).

Este mapa refleja que el nivel basal de tasa de exposición en Fuerteventura es, en promedio, mucho menor que en Gran Canaria (8,16 μ R/h frente a 13,52 μ R/h). Las zonas donde se ha detectado mayor nivel de tasa de exposición son muy reducidas y se encuentran dentro del complejo basal (Betancuria y Pájara) y en zonas muy localizadas de Tindaya (40 μ R/h), Punta de Jandía y Tuineje, en las que afloran pitones sálicos. Cabe destacar, dentro de este complejo basal, las zonas de la presa de las Peñitas en Betancuria y, sobre todo de Ajuy en Pájara, en las que se alcanzaron los máximos valores llegando a superar los 40 μ R/h. Esta anomalía radiológica presenta una gran variabilidad en distancias incluso de metros dependiendo de la estructura de diques de la zona y de la presencia o no de la capa de caliche característica de la zona. Los niveles mínimos de radiación (en torno a 4 μ R/h) se han encontrado, como era de esperar, en las zonas dunares (sedimentos recientes) de Corralejo, El Cotillo, Jandía y Pájara. El resto de la isla —llanura central, cuchillos orientales, zonas volcánicas (malpaises)— presenta un nivel de radiactividad bastante uniforme que oscila entre 6 y 10 μ R/h.

Los resultados, son, por tanto, coherentes con la compleja y larga historia geológica de Fuerteventura y la alta variedad de materiales que se presentan. Desde el punto de vista geológico las rocas plutónicas y volcánicas más diferenciadas (sienitas, ijolitas, traquitas, fonolitas y carbonatitas) que está asociadas al complejo basal contienen un alto porcentaje en minerales con K (feldespatos potásicos, amfibol y biotita entre otros) y elementos incompatibles (Th, U, K y tierras raras) así como en el vidrio de las rocas volcánicas. Tanto en los diferenciados sálicos (sienitas y traqui-fonolitas) como en las carbonatitas, los minerales radioactivos (silicatos, fosfatos, carbonatos, óxidos, etc.) tienen una distribución irregular (al azar) en la roca a nivel centimétrico o milimétrico pero, a veces, se observa que aparecen concentrados en bandas de deformación, alteración o metamorfismo. Esta distribución particular en diversos puntos de los afloramientos va a influir en las medidas radiométricas puntuales, de tal forma que el valor medido será muy elevado si el muestreo se realiza sobre estas alineaciones centimétricas conteniendo concentraciones altas de minerales accesorios o accidentales radiogénicos. La anomalía radiométrica que existe en la zona de Jandía está asociada a un afloramiento de rocas traquíticas del volcán de Jandía con las mismas características que las rocas del complejo basal. En el capítulo 4 se analizará como en el caso de Gran Canaria la composición radioisotópica de los suelos para realizar un análisis más profundo del comportamiento radiológico de la isla.



Figura 3.15 Mapa de radiación gamma natural a un metro del suelo de la isla de Fuerteventura, corregido por fondo cósmico elaborado con todos los datos disponibles y con condición de contorno nula en la costa. Coordenadas UTM (huso 28).

En la figura 3.15 se observa el mapa radiométrico corregido imponiendo la condición tasa de exposición corregida nula en cincuenta puntos seleccionados de forma aleatoria en el contorno de la isla. De esta forma, se obtiene una transición continua de las isolíneas en la interfase tierramar. Si se compara el mapa radiométrico con el mapa geológico de Fuerteventura, mostrado en la

figura 3.16, se aprecia como el complejo basal (en rosa en la figura) concentra las zonas de máxima tasa de exposición encontradas, mientras que las zonas de vulcanismo mioceno y holoceno y los sedimentos recientes, que conforman la mayor parte de la isla, presentan niveles muy bajos de tasa de exposición.



Figura 3.16 Mapa geológico de Fuerteventura. (Vera, 2004b)

3.4.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa.

Las islas de Lanzarote y la Graciosa, han sido objeto de varias campañas de medida de tasas de exposición y toma de muestras de suelos que han cubierto toda su superficie. Al ser el territorio de menor tamaño (858 km²) se ha requerido un menor número de medidas disponiéndose, en la actualidad, de 126 datos de tasa de exposición entre ambas islas. No obstante, la densidad de medidas es mayor que la de Fuerteventura habiéndose realizado una medida cada 7,1 km². En el Apéndice 6 (apartado 6.3), se muestran en forma de tabla todos los datos de tasa de exposición de las islas de Lanzarote y La Graciosa junto con su localización y contribución del fondo cósmico. En la tabla 3.3 se muestran los principales indicadores estadísticos de la distribución de las medidas.

El valor casi nulo del sesgo indica que, a diferencia de Gran Canaria y Fuerteventura, la distribución sólo levemente asimétrica (hacia la izquierda). La Kurtosis negativa indica que los datos presentan una distribución ligeramente plana respecto a una distribución normal (distribución platicúrtica). Estos indicadores dicen que los valores de tasa de exposición se concentran en torno

a valores bajos no presentándose valores extremos. En la figura 3.6 se muestra el diagrama de frecuencias de los datos y su ajuste a una distribución log-normal. No obstante, con lo valores de asimetría y Kurtosis obtenidos también se podría haber utilizado una distribución normal y, de hecho, la media geométrica (7,09 μ R/h) prácticamente coincide con la media aritmética (7,34 μ R/h) y ambas son muy cercanas a la mediana 7,50 μ R/h). El límite inferior impuesto por la tasa de exposición cósmica es el principal causante de la ligera asimetría.

Estadístico	Tasa de exposición (μR/h)	Tasa de fondo(µR/h)
Media aritmética	7,34	3,76
Media geométrica	7,19	3,76
Máximo	12,00	4,30
Mínimo	4,00	3,70
Desviación estándar	1,98	0,10
Mediana	7,50	3,70
Kurtosis	-0,41	7,50
Asimetría	0,24	2,39
Test de Kolmogorov-Smirnov	<0,010	<0,010

Tabla 3.3.Datos estadísticos de la tasa de exposición a un metro del suelo de las islas de
Lanzarote y La Graciosa.

El coeficiente de correlación de ajuste de los datos experimentales a la distribución lognormal es excelente (0,900) y los datos siguen este tipo de distribución concentrándose en torno a la mediana (7,5 µR/h).



Figura 3.17 Diagrama de distribución de frecuencias de los datos de tasa de exposición de las Islas de Lanzarote y La Graciosa.

Al analizar la distribución en la figura 3.17 se observa que el grueso de las medidas corresponde a valores muy bajos de la tasa de exposición dado que el 75% de los datos se

encuentran por debajo de 8,5 μ R/h., ello indica que el fondo radiológico de Lanzarote es extraordinariamente bajo comparado con Gran Canaria tal y como corrobora que el valor máximo de los datos es 12 μ R/h e igual a la mediana e inferior a la media geométrica de los datos de tasa de exposición de Gran Canaria. Si se compara con Fuerteventura se descubre que los valores son muy similares en promedio y las dos islas tienen, prácticamente, la misma mediana (8 μ R/h y 7,5 μ R/h), si bien en Fuerteventura se encuentra, como ya se ha comentado, valores máximos de hasta 40 μ R/h en zonas de afloramiento del complejo basal que no existe en Lanzarote.

Desde un punto de vista geológico este comportamiento es lógico pues las dos islas forman un único edificio insular en el que domina la presencia de rocas basálticas básicas y ultra básicas, siendo la principal diferencia entre ambas la existencia del complejo basal en Fuerteventura en el que se encuentran las rocas plutónicas y volcánicas más diferenciadas (sienitas, ijolitas, traquitas, fonolitas y carbonatitas). En la figura 3.18 se resumen en forma de diagrama de cajas y bigotes estos resultados.



Figura 3.18 Isla de Lanzarote. Diagrama de cajas y bigotes de los datos de tasa de exposición

En la figura 3.19 se muestra el mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de Lanzarote construido con todas las medidas disponible y utilizando la misma escala que en el de Gran Canaria. Al igual que en los casos anteriores se ha utilizado un método de interpolación Kriging ordinario y se han corregido los datos restando el fondo cósmico en función de la altura del punto obtenido de la ecuación [3.1].

De la misma forma que en el caso de Gran Canaria y Fuerteventura, se ha elaborado un mapa de tasa de exposición imponiendo la condición de valor nulo en la costa que se muestra en la figura 3.20. Este mapa muestra, de forma más realista, el bajo fondo radiológico de la isla ya que, como se deduce de los mapas radiométricos y de los indicadores estadísticos, la isla de Lanzarote es la que presenta la menor variabilidad y menor tasa de exposición de todo el archipiélago, midiéndose, en algunas zonas, valores cercanos al fondo cósmico.



Figura 3.19 Mapa de tasa de dosis a un metro del suelo de la isla de Lanzarote. Coordenadas UTM (huso 28).



Figura 3.20 Mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de Lanzarote con condición de contorno nulo. Coordenadas UTM (huso 28).

Los valores obtenidos, están en concordancia con la geología de la isla en la que el 98% de las rocas son basálticas básicas y ultra básicas (olivinos y piroxenos) en las que no aparecen cantidades significativas minerales radiactivos tal y como se indica en las tablas 1.4 y 1.7 del capítulo 1. Tampoco en el vidrio volcánico hay elementos químicos con isótopos radiactivos (series

de Th o U, K y tierras raras). Las pequeñas diferencias encontradas entre los valores de tasa de exposición pueden deberse a: fluctuaciones estadísticas, variaciones en la radiación cósmica o en las medidas de los instrumentos.



Figura 3.21 Mapa de tasa de exposición a un metro del suelo de la isla de La Graciosa

La isla de La Graciosa sigue el mismo comportamiento. En la figura 3.21 se muestra el mapa de tasa de exposición de dicha isla y en la figura 3.22 el mapa geológico conjunto de Lanzarote y del archipiélago Chinijo. Los datos correspondientes a La Graciosa se recogen en el Apéndice 6 (apartado 6.3).



Figura 3.22 Mapa geológico de la Isla de Lanzarote, (Vera, 2004b)

3.4.4 Comparación con las Islas Canarias Occidentales.

En la figura 3.23 se muestran los mapas tasa de exposición a un metro del suelo de las islas Canarias Occidentales obtenidos, utilizando el método de krigeado, a partir de los datos del trabajo llevado a cabo por el Laboratorio Física Médica y de Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (Fernández de Aldecoa, 2000) en la década de los noventa.





En la tabla 3.4 se muestran las medias por isla de tasa de exposición a un metro del suelo entre las Islas Canarias Orientales (provincia de Las Palmas) y Occidentales (Provincia de Santa Cruz de Tenerife). Se indica, también, el número de datos medido para cada isla. En la tabla se constata que el número de puntos medidos en las Islas de La Palma, La Gomera y El Hierro, en el trabajo de Aldecoa (13, 10 y 6 respectivamente) es muy escaso, de forma que los mapas radiométricos presentados la figura 3.23 para estas islas no pueden mostrar en detalle su

variabilidad radiológica. Esto no ocurre con la Isla de Tenerife en la que se tomaron 103 medidas que permiten obtener un mapa más detallado.

Isla	Número medidas	Tasa exposición en (µRh ⁻¹)	Referencia
Islas Orientales			
La Graciosa	7	3,45	Este trabajo
Lanzarote	119	3,45	
Fuerteventura	161	5,63	"
Gran Canaria	320	9,89	"
Islas Occidentales			
Tenerife	103	7,67	(Fernández de Aldecoa, 2000)
La Palma	13	5,20	"
La Gomera	10	5,05	"
Hierro	6	3,85	"

 Tabla 3.4.
 Comparativa de la tasa de exposición a un metro del suelo entre las islas Canarias Orientales y Occidentales.

La isla de Tenerife presenta unos niveles de tasa de exposición similares a la de Gran Canaria y mayores que los encontrados en Fuerteventura o Lanzarote o el resto de las islas occidentales, debiéndose a que, si bien las coladas basálticas son comunes en todo el archipiélago, solo las islas centrales de Gran Canaria y Tenerife, concentran la mayoría de lavas traquíticas y fonolíticas. En efecto, desde un punto de vista geológico, en Tenerife, se distinguen cuatro grandes estructuras o unidades volcanoestratigráficas (Santamarta Cerezal et al., 2011): 1) Arco de Taganana, formado por materiales submarinos, rocas plutónicas félsicas, un complejo filoniano muy denso con diques básicos y félsicos y brechas tectónicas (anterior a 6 Ma). 2) basaltos tabulares (entre 11 y 3,5 Ma), visibles en los macizos de Anaga, Teno y Roque del Conde. Este ciclo, dominado por basaltos, aparece coronado, hacia el final, por la emisión de rocas fonolíticas. 3) edificio Cañadas, estratovolcán formado inicialmente por basaltos y traquibasaltos y coronado finalmente por potentes emisiones fonolíticas (entre 2,5 y 0,15 Ma) 4) dorsal de La Esperanza, formada por estratovolcanes y conos de cínder alineados a lo largo de una dirección NE-SW (entre 1-0,7 Ma) y 5) conos de cínder y lavas recientes basálticas (desde los últimos 0,15 Ma hasta las erupciones históricas de los 500 años más recientes). Como se puede comprobar, el mapa radiométrico mostrado es acorde con esta descripción geológica presentando los máximos en la zona de Las Cañadas en las que abundan las rocas magmática ácidas (fonolitas) y los mínimos en las zonas de vulcanismo más reciente dominadas por basaltos.

La isla de La Gomera presenta un fondo radiológico menor debido su geología está dominada por la presencia de rocas basálticas que, presentan un contenido muy bajo de radioisótopos naturales. La isla está formada por cuatro ciclos magmáticos: 1) complejo basal (entre 20-14 Ma), 2) ciclo antiguo, integrado por los basaltos antiguos y el complejo Traquítico-fonolítico (entre 11-9 Ma) situado al norte de la Isla en la zona de Vallehermoso (Rodríguez Losada, 1987) y en que se localizan los máximos de tasa de exposición, 3) ciclo de los basaltos subrecientes (entre 9-7 Ma) y 4) ciclo reciente (4,5 Ma), formado por los basaltos horizontales y las intrusiones félsicas en forma de domo (serie de los Roques). En consecuencia, desde un punto de vista radiológico promedio, presenta mayor similitud al edificio Fuerteventura-Lanzarote que a Gran Canaria, si bien, por causas geológicas distintas.

La isla de La Palma, está constituida por 3 grandes conjuntos de edificios subvolcánicos y volcánicos: 1) complejo basal (entre 4-3 Ma), 2) El conjunto de Cumbre Nueva al Norte (edificios de Taburiente I y II, Cumbre Nueva y Bejenado construidos hace entre 1,7-0,3 Ma) y 3) Cumbre Vieja (edificio más reciente, situado al Sur y construido desde hace 0,1 Ma). La isla está dominada por terrenos basálticos, existiendo pequeñas zonas distribuidas por la isla en la que se encuentran domos o domos colada traquíticos o fonolíticos en los que la tasa de exposición debería ser mayor. En este caso, el mapa radiométrico no refleja esta variabilidad local debido al escaso número de puntos medido. En promedio el perfil radiológico de la isla es bajo en comparación con Gran Canaria o Tenerife y está más cercana a al comportamiento observado en Fuerteventura o Lanzarote, aunque cómo se ha indicado en el caso de La Gomera, las causas geológicas son distintas por tratarse de una isla mucho más joven.

La isla del Hierro, es la de menor extensión del archipiélago (270 km²) y la más joven y por esto aparentemente presenta una mayor simplicidad geológica, destacando en ella, la emisión casi exclusiva de basaltos. Se pueden separar dos grandes conjuntos volcánicos: 1) basaltos antiguos del edificio Tiñor (entre 1,1 y 0,9 Ma), 2) El edificio de El Golfo (entre 0,5-0,1 Ma) y 3) volcanes post-Golfo (desde hace 15000 años). Debido a su carácter puramente basáltico esta isla presenta tasa de exposición muy baja, con un fondo medio similar al de Lanzarote. Así, la isla más vieja y la más joven presentan un carácter similar pero debido a razones distintas, en el caso de Lanzarote la mayor parte de la isla está cubierta por una erupción histórica de carácter basáltico que apantalla el efecto de los materiales más antiguos, mientras que en El Hierro al estar en formación sólo se encuentran materiales basálticos.

3.4.5 Comparación con los valores de MARNA

Uno de los objetivos principales de este trabajo era extender a las Islas Canarias Orientales el mapa de MARNA del CSN. En la figura 3.24 se muestran los niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo de la España peninsular.



Figura 3.24 Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo correspondiente a la España peninsular Fuente: Proyecto MARNA. Mapa de radiación gamma natural. CSN colección informes Técnicos 5.2000.

El mapa muestra una estrecha relación entre los niveles de tasa de exposición y las formaciones geológicas. Así, las unidades geológicas que presentan valores medios de tasa de exposición más altos se localizan en formaciones graníticas de diversa naturaleza situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central), en el arco hercínico gallego y en el oeste de las provincias de Salamanca y Zamora. También presentan valores similares los granitos de Cataluña y batolitos de Badajoz, Córdoba y Sevilla. Los niveles de radiación que se alcanzan son similares a los niveles de los granitos franceses o ingleses. Los valores más bajos se localizan en las formaciones sedimentarias de origen marino de Levante y Andalucía.

Con el fin de poder realizar una comparación directa, se reproducen conjuntamente en la figura 3.24, los mapas de tasa de exposición de las Islas Canarias Orientales elaborados sin imponer la condición de cero en la costa (para seguir la metodología de MARNA). La escala y el código de colores se han seleccionado para facilitar la comparación directa.

A la luz de los mapas se observa que la isla de Gran Canaria presenta una variabilidad radiológica comparable a la encontrada en la Península Ibérica. Prácticamente la mitad de la Isla tiene niveles de tasa de exposición superiores a 18 µR/h, similares a los que miden en las zonas graníticas de Extremadura, la parte oriental de Castilla y León o Galicia que, como se ha dicho,

son las regiones con los mayores niveles de España. Esto se debe a la presencia de rocas volcánicas ácidas (traquitas, fonolitas, o riolitas) que son el equivalente magmático a los granitos. La mitad nororiental de la isla en la que abundan las rocas magmática básicas presenta unos niveles medios inferiores a 18 µR/h.

Es importante resaltar, que a la hora de comparar la tasa de exposición entre las Islas Canarias y el territorio peninsular hay que tener en cuenta los efectos de escala, ya que los promedios e interpolaciones en la península se hacen sobre extensiones mucho mayores que en Canarias, de forma que los máximos están muy suavizados.



Figura 3.25 Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo de la Islas Canarias Orientales.

Tabla 3.5. Datos provinciales de tasa de exposición a un metro del suelo en μRh⁻¹ obtenidos del informe Marna del CSN. (Mahou and Amigot, 1996). Los datos de Melilla han sido medidos por nuestro grupo de investigación (Rubiano et al., 2011).

Provincia	Tasa de Exposición (μRh ⁻¹)	Tasa de Exposición (μRh ⁻¹) Provincia	
Álava	6,91	La Rioja	7,29
Albacete	5,30	León	8,94
Alicante	4,94	Lérida	7,95
Almería	6,09	Lugo	13,61
Asturias	9,95	Madrid	12,74
Ávila	15,11	Málaga	7,20
Badajoz	10,44	Melilla	5,70
Barcelona	7,08	Murcia	4,56
Burgos	6,79	Navarra	7,76
Cáceres	13,00	Orense	14,37
Cádiz	5,40	Palencia	6,80
Cantabria	6,57	Pontevedra	17,06
Castellón	4,85	Salamanca	12,31
Ciudad Real	7,87	Segovia	10,20
Córdoba	9,09	Sevilla	6,83
Cuenca	6,26	Soria	6,72
Gerona	9,28	Tarragona	5,97
Granada	6,79	Teruel	6.67
Guadalajara	6,90	Toledo	12.44
Guipúzcoa	10,64	Valencia	4.93
Huelva	7,49	Valladolid	9.11
Huesca	7.,80	Vizcaya	8,32
Jaén	7,94	Zamora	9,82
La Coruña	10,95	Zaragoza	7,38
Isla		Isla	
Tenerife	7,67	Gran Canaria	9,89
La Palma	5,20	Fuerteventura	5,63
Gomera	5,05	Lanzarote	3,45
Hierro	3,85	La Graciosa	3,45

Las Islas de Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa con niveles medios inferiores a 8 µR/h muestran un comportamiento radiológico similar a los encontrados en las provincias del

Mediterráneo. Como se ha dicho anteriormente sólo se presentan unas zonas de máximo muy localizadas en el complejo basal de Fuerteventura en las que se han medido los mayores valores de tasa de exposición de las Islas bajo estudio.

En la tabla 3.5 se recopilan los datos de tasa de exposición provincial a un metro del suelo extraído de proyecto MARNA del CSN. La provincia con la media mayor es Pontevedra con 17,06 μ R/h seguida de Ávila (15,12 μ R/h) y Orense (14,37 μ R/h). La Isla de Gran Canaria ocupa el puesto número 13 una tasa de exposición similar a la de Asturias o Zamora. Fuerteventura ocupa el puesto 43 entre Melilla y Cádiz. Finalmente, Lanzarote y La Graciosa ocupan los puestos finales de la tabla, presentando los valores mínimos de tasa de exposición de España.

En la figura 3.26 se resumen en forma de diagrama de barras los resultados anteriores y se destacan con líneas horizontales los valores correspondientes a Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote.





Para finalizar con el análisis de la tasa de exposición en la región, en la figura 3.27 se observan los mapas de tasa de exposición media por municipio. Para su elaboración se ha utilizado la totalidad de los datos disponibles de las islas y se ha calculado la media geométrica de cada municipio.

Como se puede ver, los mapas reflejan correctamente la variabilidad mostrada en el mapa de isolíneas. No obstante, dado que la división municipal es política y no geográfica las medias municipales son poco significativas en especial en municipio extensos. Un ejemplo de esto es el municipio de Mogán en Gran Canaria en el que en su parte norte se encuentran alta tasas de

exposición debido a las formaciones traquítico-fonolíticas de la zona mientras que en el sur del municipio las tasas de exposición corresponderán casi en exclusiva al fondo cósmico, por predominar los depósitos eólicos y playas. De forma que la media de los datos no refleja bien la variación en el territorio del municipio. Para municipios pequeños y con un territorio geológicamente homogéneo como Tejeda las medias municipales si es una cantidad representativa de la tasa de exposición media. En el caso de Fuerteventura y Lanzarote todos los municipios tienen prácticamente el mismo valor de tasa de exposición de unos 8 μ R/h (4,5 μ R/h aproximadamente al corregir por fondo cósmico). Sólo Betancuria en Fuerteventura presenta un valor un poco mayor de 14 μ R/h debido a las anomalías radiológicas del complejo Basal, ya comentadas.



Figura 3.27 Mapas de tasa de exposición media por de las islas Canarias Orientales-

3.5. Estudio de la tasa de dosis absorbida en aire

La dosis absorbida en aire es una magnitud definida en el Sistema Internacional de Unidades que permite caracterizar los efectos de la radiación gamma en su interacción con la materia como ya se ha indicado en el capítulo 2. Gran parte de los datos de radiación gamma a un metro del suelo de la literatura internacional están expresados en términos de dosis absorbida y por esto, se ha realizado una la transformación de los mapas de tasa de exposición a mapas de dosis absorbida en aire. Para ello se ha utilizado el factor de conversión 1 μ R/h = 8,7 nGy/h establecido en el NUREG 1501 (Huffert et al., 1994) de la USNRC (1994) que se aplica a medidas de radiación ambiental. En las figuras 3.29 a 3.31 se muestran estos mapas se han empleado todos los datos disponibles corregidos por la radiación cósmica. La figura 3.28 corresponde al mapa de dosis absorbida en aire de la España peninsular (Quindós Poncela et al., 2004a) en una escala de. 40 a 240 nGy/h que se ha utilizado también para las tres islas con el fin de facilitar la comparación.



Figura 3.28 Mapa de tasa de dosis absorbida en aire elaborado en el marco del Proyecto MARNA del CSN. (Quindós Poncela et al., 2004a)

Dado que se ha realizado una transformación lineal, los mapas de dosis absorbida presentan las mismas características que los ya discutidos al analizar la tasa de exposición y comparar las islas entre sí y con los territorios peninsulares.



Figura 3.29 Gran Canaria. Mapa de tasa dosis absorbida en aire. Coordenadas UTM.



Figura 3.30 Fuerteventura. Mapa de tasa dosis absorbida en aire. Coordenadas UTM (huso 28).



Figura 3.31 Mapa de tasa de dosis absorbida en aire de las islas de Lanzarote y La Graciosa. Coordenadas UTM (huso 28).

En la figura 3.32 se presentan los mapas de dosis absorbida en aire de diversos países de Europa Occidental y en la figura 3.33 los mapas correspondientes a las islas, siguiendo la misma escala de colores, con el fin, de facilitar su comparación. Están recopilados del documento "Atlas radiológico: fuentes naturales de radiación ionizante en Europa" editado por la Dirección General de Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil de la Comisión de las Comunidades Europeas (Green et al., 1992). El trabajo está realizado en 1993 y se basa en las medidas de la radiación natural llevadas a cabo por los Estados miembros de la Comunidad Europea que, en 1993, eran Alemania, Bélgica, Dinamarca, España, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Portugal y Reino Unido y así como por los países escandinavos, Austria y Suiza. Como anécdota cabe destacar que en el momento de su redacción no se disponía de datos sobre los Estados federados alemanes procedentes de la antigua República Democrática Alemana y por eso no aparecen en los mapas. Si bien es un trabajo relativamente antiguo, puede servir como referencia de cómo se distribuye la radiactividad gamma ambiental en gran parte del territorio europeo. Si se compara el mapa detallado de dosis absorbida de la España peninsular de la figura 3.28 con el que se muestran en la figura 3.32, se observa que hay un acuerdo cualitativo bastante satisfactorio y se distinguen las zonas de máximo, las intermedias y las de mínimo. Las zonas de máximo se encuentran en el Macizo Hercínico europeo que abarca el oeste de la península ibérica, el suroeste de Inglaterra (Cornualles), la Bretaña y el macizo central francés, Córcega y Cerdeña donde afloran granitos hercínicos con alto contenido en U y Th.



Figura 3.32 Mapa de tasa de dosis absorbida en aire de Europa Occidental. (Green et al., 1992)





Los trabajos de campo consistieron básicamente en la medida de tres magnitudes: dosis de radiación gamma al aire libre, dosis de radiación gamma en edificios y concentración de la actividad de radón en edificios. La dosis de radiación cósmica se calculó normalmente a partir de valores de referencia como los que se han detallado en capítulo 1. Si bien se utilizaron diferentes métodos de medida, magnitudes de radiación y procedimientos de registro de la información, todos los resultados se racionalizaron para elaborar los mapas. Cuando la información disponible era insuficiente o incompleta se estimaron algunos de los datos. En la mayoría de los países existía información sobre las dosis de radiación gamma al aire y a partir de ella se estimaron algunas magnitudes como la dosis absorbida indoor a partir de modelos teóricos. Salvo cuando se disponía de datos específicos, los valores correspondientes a las regiones se calcularon y promediaron para obtener un valor medio para cada país. Es importante hacer notar que al

tratarse de grandes extensiones de territorio, las medias pueden enmascarar un grado considerable de variabilidad local.

Isla	Número medidas	Media Arit. (nGyh ⁻¹)	Media Geom. (nGyh ⁻¹)
Medias Insulares			
Hierro	6	34	33
Gomera	10	44	39,1
La Palma	13	45	41
Tenerife	103	66,7	57,9
Gran Canaria	320	92,4	74,7
Fuerteventura	161	52,5	44,8
Lanzarote	119	38,9	37,9
Medias Provinciales			
Santa Cruz de Tenerife	132	61,4	53
Las Palmas	600	68	47,9
Media Archipiélago	732	66,8	48,8

Tabla 3.6. Media insulares de la dosis absorbida en aire en las Islas Canarias.

Con el fin de poder realizar una comparativa, en la tabla 3.6 se presentan los valores medios de dosis absorbida en aire del archipiélago de las Islas Canarias obtenidos en su totalidad a partir de los datos que soportan la tabla 3.4. Se proporcionan, además, las medias geométricas y aritméticas de cada una de las islas así como de las dos provincias que componen la región (Las Palmas y Santa Cruz de Tenerife). Como región, Canarias con una dosis (geométrica) media de 48,8 nGyh⁻¹ presenta un nivel medio-bajo de dosis absorbida de radiación gamma, debido a que, en el promedio, hay una gran influencia de las islas de menor dosis (Lanzarote, Fuerteventura, La Palma, La Gomera y El Hierro. Por provincias, ambas están en el rango medio o medio bajo.

Individualmente, la isla de Gran Canaria presenta una tasa media de dosis absorbida 74,7 nGyh⁻¹ de forma que se encuentra entre las regiones europeas con mayores niveles de dosis, por el contrario, las islas de Lanzarote y La Graciosa con unas dosis medias 37,9 nGyh⁻¹ de están situadas en el nivel inferior. Fuerteventura con 44,8 nGyh⁻¹ presenta un nivel de radiación mediobajo similar a la media regional En la figura 3.34 se muestran gráficamente las medias para facilitar su visualización.





Finalmente, en la tabla 3.7 se recopilan los resultados de una amplia revisión bibliográfica en la que se muestran los datos de tasa de dosis absorbida promedio de 42 países que cubren gran parte del planeta. Para cada país, se proporciona el número de medidas realizadas, la dosis media y el rango de variación de las medias, además de la fuente. En los países considerados, la dosis varía entre 24 nGyh⁻¹ (de Canadá) y 160 nGyh⁻¹ (de uno de los trabajos sobre Hong Kong). Es importante señalar, no obstante, que la disparidad de técnicas de medida e instrumentación empleadas en los trabajos, puede implicar diferencias considerables entre los valores. Hay una amplia tipología de técnicas empleadas para obtener los datos entre las que se pueden destacar: a) medida directa de la dosis absorbida utilizando detectores portátiles de diversa tecnología (Geiger, Centelleo o incluso dosímetros TLD), b) cálculos empíricos realizados a partir de la medida in situ de la concentración de radioisótopos naturales en el suelo empleando espectrómetros portátiles (de germanio o loduro de Sodio), c) por muestreo y posterior medida en laboratorio de la concentración de radioisótopos d) mediante prospecciones aéreas que emplean radiómetros o espectrómetros a bordo.

País	Número medidas	Tasa dosis en nGyh⁻¹	Rango	Referencia
Alemania	24739	53	4-350	(des Innern, 1978)
Alemania RDA	2000	55	4-430	(UNSCEAR 2000)
Argelia	35	70	60-80	(Benkrid et al., 1992)
Australia	8	93	64-123	(Clarke et al., 1993)
Austria	>1000	43	20-150	(Tschirf, 1980)
Bélgica	272	43	13-58	(Deworm et al., 1988)
Bulgaria	3670	70	48-96	(Vassilev, 1991)

Tabla 3.7. Dosis absorbida en aire promedio en diversos países del mundo.

País	Número medidas	Tasa dosis en nGyh ⁻¹	Rango	Referencia
Canadá	33	24	18-44	(Grasty et al., 1984)
Chile	7	60	30-90	(Stuardo)
China	1120	62	2-341	(Ziqiang et al., 1988)
Cuba	54	42	26-53	(Sed et al., 1991)
Dinamarca	14	38	17-52	(Nielsen, 1979)
Egipto	162	32	8-93	(Moharram et al., 2012)
España		76	43-148	(UNSCEAR 2000)
Estados Unidos		46	13-100	(Miller, 1992)
Filipinas	1300	56	31-118	(Duran et al., 1991)
Finlandia		65		(Madelmont et al., 1984, Arvela et al., 1995)
Francia	5142	68	10-250	(Rannou et al., 1985)
Grecia	724	42		(Anagnostakis et al., 1996)
Holanda	1049	32	10_60	(Julius and Van Dongen, 1985)
Hong Kong	27	76	37-113	(Leung et al., 1990)
Hong Kong	76	160	100-230	(Tso and Li, 1992)
Hungría	123	55	20-130	(Nikl and Sztanyik, 1988)
India	2800	55	20-1100	(Nambi et al., 1986)
Indonesia		55	47-63	(UNSCEAR 2000)
Irlanda	284	42	1-180	(McAulay and Colgan, 1980)
Islandia		28	11-83	(Ennow and Sigurður, 1982)
Italia	1365	57	7-500	(Cardinale et al., 1972)
Japón	1127	49	5-100	(Abe et al., 1980)
Luxemburgo	110	40		(UNSCEAR 2000)
México	1112	78	42-140	(UNSCEAR 2000)
Namibia	274	120	80-260	(Steinhäusler and Lettner, 1992)
Nigeria	253	62	25-222	(Farai and Jibiri, 2000)
Noruega	234	73	20-1200	(Stranden, 1977)
Paraguay		46	38-53	(UNSCEAR 2000)
Polonia	352	37	15-9	(Koperski, 1984)
Portugal		85	9-226	(Ameral et al., 1992)
Reino Unido	25	34	8-89	(Green et al., 1989)
Rumanía	2372	81	32-210	(lacob and Botezatu, 2004)
Serbia y Montenegro	140	67	35-98	(Dragović et al., 2006)
Sudán		53	26-690	(UNSCEAR 2000)
Suecia		56	41-69	(UNSCEAR 2000)
Suiza	3100	60		(Herbst, 1968)
Taiwán	20	57	17-87	(Chu et al., 1989)

De la comparación de los datos de las tablas 3.6. y 3.7 se deduce que el archipiélago presenta una dosis absorbida promedio (media geométrica) inferior en un 15% a la media de los países estudiados, fijada en 55 nGyh⁻¹ (UNSCEAR, 1988). La Isla de Gran Canaria sin embargo, presenta un fondo radiológico gamma superior en un 37% a la media mundial. Por el contrario, Lanzarote y Fuerteventura presentan valores un 35% y un 22% por debajo respectivamente, lo que muestra la diferencia de comportamiento de las islas debido a su distinta historia geológica. En la figura 3.4 se muestran sobre el diagrama de barras de las dosis promedio por país, los promedios de Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. En la figura 3.35 se representa la diferencia relativa porcentual de la dosis absorbida de las islas respecto de la media mundial. También se proporcionan los datos regionales y provinciales.



Figura 3.35 Tasa dosis absorbida en las diferentes islas del Archipiélago



Figura 3.36 Diferencia relativa porcentual respecto a la media mundial de la tasa de dosis absorbida en las islas del Archipiélago Canario.

3.6. Estudio sobre la variabilidad de la radiación de fondo en un punto fijo

Puesto que nuestro primer objetivo es generar un mapa de la radiactividad ambiental, también se planteó estudiar las fluctuaciones temporales de nuestra variable. En la figura 3.8 se mostraba el mapa radiométrico de Gran Canaria elaborado con datos recogidos con casi una década de separación temporal. Estos mapas reflejan la persistencia de los valores de tasa de exposición en el tiempo y la fuerte dependencia de la geología local en la distribución espacial de los valores.



Figura 3.37 Localización de la sonda GammaTracer para la medida horaria de la tasa de exposición durante el año 2007.

Como parte del proyecto de análisis de la radiación gamma natural en la Isla de Gran Canaria, se planteó el estudio de la persistencia temporal de las medidas radiométricas puntuales. Con el fin de realizar este análisis, se situó una sonda GammaTracer en la cumbre de la isla, en la zona militar del Pozo de las Nieves, a una altitud de 1945 m, para medir, durante el año 2007 la tasa de exposición (en μ R/h) a un metro del suelo a intervalos de una hora. Se eligió este punto por estar lejos de la influencia urbana de forma que las condiciones de medida son muy estables. La tasa de exposición obtenida en la zona en medidas puntuales es de 11 μ R/h.

La serie se representa en la figura 3.38, representa datos horarios desde el 17 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre del mismo año. La serie de tasa de exposición presenta una media aritmética de 10,90 μ R/h, una media geométrica de 10,89 μ R/h, una distribución log-normal, una mediana de 10,88 μ R/h y una desviación Standard de 0,27. Como muestran estos datos, la media anual tanto geométrica como aritmética coincide con la media instantánea medidas por los detectores Ludlum en un punto cercano. Esto muestra un indicio de la bondad del procedimiento de medida "*in situ*", aunque sería necesario realizar un aprueba de validación en un número de puntos mayor.



Figura 3.38 Serie temporal de tasa de exposición medida por la sonda GammaTracer durante el año 2007 en Los Pechos



Figura 3.39 Frecuencias de la tasa exposición durante el periodo de un año

Para caracterizar la variabilidad de la serie se utiliza inicialmente el análisis clásico de Fourier, herramienta muy potente y de fácil interpretación física. Esta herramienta posee una gran desventaja: solo se dispone de resolución en el dominio de la frecuencia, perdiéndose toda la información en el dominio del tiempo. Como refinamiento del análisis en frecuencia, se realiza la transformada wavelet discreta, transformada que descompone la serie tratada como suma de serie ortogonales, donde cada una de ellas recoge parte de la información en frecuencia de la serie. Primero se normaliza la serie temporal (figura 3.39) y a continuación se realiza el análisis espectral de la serie, representando la potencia espectral frente a la frecuencia (figura 3.40).



Figura 3.40 Serie temporal de tasa de exposición normalizada

Como se observa en el espectro de potencias de la serie que se presenta en la figura 3.40, ésta presenta una marcada componente estacional relacionada con la variación inviernoverano, típica de las medidas de radiactividad ambiental y que ha sido ampliamente estudiada en el trabajo de (Szegvary et al., 2007a). Esta variación puede deberse a variaciones en la emisión de radón por los suelos en las distintas estaciones (King and Minissale, 1994).



Figura 3.41 Potencia espectral de la serie temporal de tasa de exposición normalizada.

Para poder estudiar su espectro de Fourier en mayor profundidad, debe eliminarse la componente estacional, ya que puede enmascarar otras periodicidades que bien pudieran ser representativas de las variaciones temporales. Se observa igualmente un segundo pico para una frecuencia de 0,041 h⁻¹ que corresponde con un periodo de 24 h, variación diaria día- noche. En una primera transformada Wavelet discreta, se utiliza la componente de baja frecuencia para eliminar la componente estacional verano-invierno de la serie y volver a determinar su análisis espectral.



Figura 3.42 Serie temporal normalizada sin la componente verano-invierno



Figura 3.43 Análisis espectral de la serie desestacionalizada y normalizada

En el espectro de la serie una vez eliminada la componente estacional, aparece claramente la frecuencia correspondiente a la variabilidad diaria día-noche, así como indicios de que la serie presenta efecto de memoria (correspondiente a valores de baja frecuencia), que pueden reflejar comportamientos a otra escala. Para analizar este efecto memoria, se determinan los coeficientes de autocorrelación para la serie sin la componente estacional. En el análisis de los coeficientes de autocorrelación parece detectarse una persistencia de entre 60 y 75 h (unos tres días) en los valores de tasa de exposición sin componente estacional. Una de las causas que pueden explicar estas variaciones de la tasa de exposición es la variación de la presión atmosférica que, al influir directamente en la radiación cósmica, puede causar fluctuaciones de $\pm 4,3$ nGyh⁻¹.



Figura 3.44 Coeficientes de correlación de la serie desestacionalizada y normalizada

Hay otros factores que podrían ser aún más relevantes: (Lebedyte et al., 2002) observaron que la variación periódica diurna, de la concentración de ²²²Rn en el aire exterior se refleja en la tasa de dosis y puede explicar la oscilación día-noche detectada debida a la variación del grado de humedad entre la noche y el día. Una correlación espacial y temporal entre el flujo de ²²²Rn y la tasa de dosis terrestre también se ha demostrado en (Szegvary et al., 2007c). Otros factores a considerar son la capa de nieve, que tiene poca importancia en Gran Canaria, y la humedad ya que el agua presentes en el suelo absorbe los fotones y, por lo tanto, apantalla al detector de la radiación terrestre. Este efecto de blindaje puede tener una magnitud de \pm 10,15 %.

La fuente más importante de la variabilidad de la tasa de dosis natural es probablemente de lavado de progenie Rn durante el comienzo de la precipitación. Se han observado aumentos en la tasa de dosis de 71,4 nGyh⁻¹ y más debido a este fenómeno. La relación entre la tasa de lavado de radón y la dosis se ha descrito en (Greenfield et al., 2003). Dependiendo de la frecuencia y el tamaño de tales episodios de emisión y lavado de radón los datos de tasa de dosis gamma terrestre también contendrán la contribución correspondiente.

Capítulo 4

Distribución de Radioisótopos en suelos de las Islas Canarias Orientales

4.1. Introducción

Como se ha indicado en el capítulo 1 de este trabajo, las rocas y suelos de la corteza terrestre contienen concentraciones variables de los elementos radiactivos naturales (⁴⁰K, y los elementos procedentes de las series radiactivas del ²³⁸U, ²³⁵U y ²³²Th (Eisenbud and Gesell, 1997). La concentración con la que aparecen los componentes de las cadenas radiactivas en las distintas formaciones geológicas está directamente relacionada con los procesos de solidificación magmática de las mismas. En general, la radiactividad está asociada a formaciones antiguas de rocas intrusivas o ígneas, apareciendo en concentraciones menores en rocas sedimentarias.

La disgregación de las rocas produce suelos de similares características en lo que se refiere a la presencia de elementos radiactivos. Es por esto que la distribución de radioisótopos naturales en una determinada zona está íntimamente relacionada con su mapa geológico. En los suelos se pueden producir fenómenos de transporte debido a agentes físicos (aguas de escorrentía, aguas subterráneas, viento), biológicos (absorción por la materia vegetal) o antropogénicos que modifiquen (con mayor o menor importancia dependiendo de las características químicas del radioisótopo) la distribución de radioisótopos del suelo respecto de la roca madre. Otro proceso a tener en cuenta es la deposición de radionúclidos cosmogénicos como el ⁷Be o el ¹⁴C, o procedentes de la desintegración del radón atmosféricos como el ²¹⁰Pb. Desde la década de los 50 del siglo XX también se encuentran en la naturaleza radioisótopos artificiales como resultado de las pruebas de armas y accidentes nucleares (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu y ²⁴¹Am) de los cuales el más importante es el ¹³⁷Cs. Resumiendo, puede decirse, que el reparto de estos isótopos radiactivos en suelos tanto en cantidad como en tipo, depende mucho de su origen geológico, así como de los parámetros climáticos, hidrológicos e historia agrícola, particularmente por el uso de fertilizantes.

En este capítulo se exponen los resultados del estudio de la distribución de radioisótopos ambientales en las Islas Canarias Orientales. Este estudio se llevó a cabo, fundamentalmente, durante el periodo 2009-2012 en el marco de los Proyectos de Investigación "*Estudio sobre la distribución de radioisótopos naturales y de radón en las Islas Canarias Orientales*" financiado por el

Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) dentro de su plan de I+D 2009-2011 y "*Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales: implicaciones radiológicas sobre la población*" financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI). Estos trabajos tenían como finalidad el análisis detallado de la radiactividad ambiental en las Islas Canarias Orientales y son una continuación de los realizados para el proyecto MARNA del CSN en los que se establecieron los mapas radiométricos de las Islas Canarias Orientales cuyos resultados se han presentado en el capítulo anterior.

Se muestran en primer lugar, el diseño de las campañas de toma de muestras de suelos y los procedimientos de análisis, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación de las concentraciones de radionúclidos naturales (al menos ²³⁸U o ²²⁶Ra, ⁴⁰K, ²³²Th) de cada tipología de suelo, lo que permite establecer las concentraciones normales de radionúclidos en Islas Canarias Orientales y su dinámica. A continuación se realiza un análisis comparativo de la distribución radioisotópica de las islas y la de otras zonas geográficas a partir de datos recogidos de la literatura. También se estudia la posible presencia de radioisótopos no naturales, fundamentalmente ¹³⁷Cs, procedentes, en principio, de la contaminación externa. Finalmente se utilizan los resultados obtenidos para aplicar modelos empíricos que permiten estimar las dosis externas por radiación gamma a partir de la concentración de radioisótopos en los suelos. El interés de esta comparación se encuentra en la validación de modelos teóricos con los datos experimentales y en la adaptación de los modelos existentes a la tipología de suelos de las Islas Canarias Orientales.

4.2. Diseño de las campañas de toma de muestras de suelos, procedimiento de recogida y análisis espectroscópico

4.2.1 Elección de los puntos de muestreo

La planificación de las campañas de toma de muestras de suelos es una de las tareas más importantes en cualquier trabajo de campo ya que una buena selección de puntos de medida es determinante para una buena caracterización del territorio bajo estudio. Entre las cuestiones fundamentales a resolver en el muestreo de suelos están las relacionadas con el punto en el cual éste se realiza: características del terreno, definición de punto, su elección y carácter representativo, muestras simples o compuestas, número de submuestras por muestra, superficie representada, volumen/superficie recogido, profundidad y metodología del muestreo. Los criterios de elección están directamente relacionados con los objetivos del muestreo, el uso del suelo, sus características, la vegetación, las condiciones ambientales y orografía de la zona y también con qué parámetros se quieren analizar.

Uno de los principales factores a tener en cuenta en la planificación de las campañas es el tiempo necesario entre la recogida de la muestra y su medición por espectrometría gamma que, en media, es de un mes considerando el tiempo de preparación de la muestras, y a la necesidad

de espera de un mes para que se alcance el equilibrio secular. Es por tanto necesario planificar la recogida de muestras; de forma que no se produzca ni acumulación de muestras sin medir, ni periodos vacíos debido a que no haya muestras disponibles, en los que el detector esté ocioso. Otro factor a tener en cuenta (común a todas las campañas) es el carácter insular del territorio que obliga a planificar viajes en avión y barco, con el instrumental y con las muestras en los periodos de disponibilidad del personal investigador. Teniendo en cuenta estos condicionantes, el diseño de campañas realizado fue óptimo y permitió llevar a cabo todos los análisis programados.



Figura 4.1 Mapa de tasa de exposición de las Islas Canarias Orientales

Los puntos de medida seleccionados para la recogida de muestras de suelo cubren densamente todo el territorio bajo estudio y su localización está basada, en primer lugar, en los mapas radiométricos de tasa de exposición elaborados para el proyecto MARNA (Rubiano et al., 2006a) del CSN que se muestran en la figura 4.1 y que han sido analizados en el capítulo 3 de esta Tesis Doctoral. En lo posible, se ha intentado recoger muestras en los mismos puntos (se disponía de la localización GPS) para obtener, posteriormente, una relación empírica dosis-concentración de radionúclidos. El otro criterio para la selección de puntos, fue exigir que se cubrieran todas las formaciones geológicas de las islas bajo estudio, para tener una caracterización radiológica completa. Para mostrar que se han cumplido todos los condicionantes enunciados, en las figuras 4.2 a 4.4 se indican, sobre los mapas geológicos detallados de las islas

(GRAFCAN, 2013), la localización de los puntos de muestreo de suelos que finalmente se han realizado.



Figura 4.2 Localización de los puntos de toma de muestras de suelo sobre el mapa geológico de la Isla de Gran Canaria para la elaboración de los mapas de concentración de radioisótopos



Figura 4.3 Localización de los puntos de toma de muestras de suelo sobre el mapa geológico de la Isla de Fuerteventura para la elaboración de los mapas de concentración de radioisótopos





La geología de las islas, como se explicó en la sección 1.2 es muy compleja y está dominada por su origen volcánico intraplaca muy diferente a la geología continental. Desde el punto de vista petrológicos, en las islas, y muy especialmente en Gran Canaria se encuentran una gran diversidad de rocas magmáticas que abarcan todo tipo de composiciones; desde básicas a ultra ácidas con diverso contenido de radioisótopos naturales, lo que necesariamente determina su comportamiento radiológico. Debido a esto, la distribución de puntos de medida seleccionados no es homogénea ya que, como se ha indicado, se priorizó el muestreo de todos los tipos de formaciones geológicas y, además, se realizaron posteriores refinamientos de la malla inicialmente seleccionada en función de los resultados de los análisis de distribución de radioisótopos. La toma de muestras de suelo y sedimentos comenzó en el año 2009 y se han sucedido las campañas hasta el verano de 2012, cuando se llevó a cabo una campaña de refinamiento en Gran Canaria y se tomaron muestras en La Graciosa.

Durante 2010 y 2011 se dio prioridad al muestreo de las islas Lanzarote y Fuerteventura. Debido a que era necesario trasladarse a las islas durante periodos de, al menos, tres días: Los muestreos de la Isla de Gran Canaria, se planificaron en campañas cortas a lo largo de todo el periodo comprendido entre 2009 y 2012. Debido a las obligaciones docentes ha sido necesario planificar las campañas en periodos cortos aprovechando días no lectivos o fines de semana.

4.2.2 Códigos de clasificación geológica de los puntos de medida

Debido a la complejidad geológica mencionada y con el fin de facilitar el análisis posterior y buscar correlaciones entre las concentraciones de radioisótopos y la geología de las distintas
zonas de la región bajo estudio, se ha establecido un sistema de codificación simplificado que agrupa formaciones geológicas similares en función, fundamentalmente, de su petrología y que se describe a continuación:

ROCAS MAGMÁTICAS (ÍGNEAS)

ROCAS VOLCÁNICAS.

Código 1

ROCAS ULTRABÁSICAS Y BÁSICAS (basanitas, basaltos olivínicos, basaltos piroxénicos, basaltos plagioclásicos, nefelinitas, hawaitas, tefritas, mugearitas, tefritas fonolíticas, fonolitas tefritas, principalmente): PUEDEN SER LAVAS-COLADAS O MATERIAL PIROCLÁSTICO SUELTO (ceniza, lapilli y bombas-escorias)

Código 2

ROCAS INTERMEDIAS Y ÁCIDAS (traquitas, fonolitas, riolitas, traquibasaltos, benmoreitas, principalmente) PUEDEN SER LAVAS-COLADAS, COLADAS PIROCLÁSTICAS-IGNIMBRITAS O MATERIAL PIROCLÁSTICO SUELTO (ceniza, lapilli y bombas-escorias)

ROCAS PLUTÓNICAS Y SUBVOLCÁNICAS

Código 3

ROCAS ULTRABÁSICAS Y BÁSICAS (peridotitas: dunitas, werlitas, lerzolitas, piroxenitas; gabros olivínicos, gabros feldespáticos, noritas, ijolitas, principalmente): PUEDEN SER PLUTONES, STOCK O DIQUES

Código 4

ROCAS INTERMEDIAS Y ÁCIDAS (sienitas, sieno-diorita, sienita nefelítica, principalmente): PUEDEN SER DOMOS, PITONES, STOCK, DIQUES O COMPLEJOS DE DIQUES

SEDIMENTOS Y ROCAS SEDIMENTARIAS

SEDIMENTOS DETRÍTICOS SUELTOS

Código 5

MARINOS: arcillas, limos, arenas y gravas-cantos-bloques en zonas sumergidas, playas y dunas

Código 6

TERRESTRES: arcillas, limos, arenas y gravas-cantos-bloques en barrancos (aluviales), laderas (coluviones) y suelos

ROCAS SEDIMENTARIAS

Código 7

MARINAS: limonitas, areniscas-calcarenitas y conglomerados en zonas sumergidas, playas y dunas, y terrazas marinas y eolianitas

Código 8

TERRESTRES: limonitas, areniscas-calcarenitas y conglomerados en barrancos (aluviales), laderas (coluviones) y suelos

4.3. Procedimiento de recogida de muestras de suelo

Durante el periodo 2009-2012 de vigencia de los Proyectos de Investigación citados (CSN y ACSII) se realizaron diversas campañas de medida de tasa de exposición y toma de muestras de suelo que han permitido cubrir la totalidad de la provincia de Las Palmas. Como ya se ha dicho, la elección de los puntos de medida se ha basado en los mapas radiométricos previamente elaborados en el marco del proyecto MARNA y en los mapas geológicos disponibles de las Islas. Se ha seguido un protocolo propio diseñado a partir de las recomendaciones del CSN en el *Procedimiento 1.1 de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial (Herranz et al., 2003).* Según este procedimiento, los puntos de muestreo deben cumplir las siguientes características:

- Que el punto por su situación no pueda resultar apantallado en caso de ocurrir un depósito inesperado, para ello deberá encontrarse en un terreno despejado, alejado de árboles y edificaciones que puedan perturbar el discurrir de un depósito.
- b) El punto de muestreo seleccionado debe de estar lo menos inclinado posible y suficientemente drenado.
- c) Que en el punto no se hayan producido alteraciones ni humanas ni animales.
- d) Que el terreno no sea pedregoso.
- e) Que en el punto de muestreo no haya vegetación asociada.

En el caso de la Isla de Gran Canaria, debido a su configuración, es complejo encontrar puntos de muestreo que cumplan todas estas condiciones. Esta isla tiene una orografía muy abrupta dominada por barrancos y grandes alturas y con escasas llanuras (concentradas, principalmente, en el litoral) y además está muy poblada (523 habitantes por kilómetro cuadrado) (I.N.E., 2009) situándose la mayor parte de la población en las llanuras litorales. Las Islas Canarias tienen, en general, suelos muy poco desarrollados y han sufrido una profunda contaminación antrópica debido a la costumbre local de trasladar suelos de cultivo de unas zonas a otras de la isla. No obstante, se han intentado seleccionar puntos de muestro que cumplan en la medida de los posible las recomendaciones del procedimiento. En el caso de las islas de

Fuerteventura y Lanzarote, al tratarse de islas más antiguas (y por tanto mucho más erosionadas) el terreno es menos abrupto y predominan las llanuras, además tienen muy poca población en relación con Gran Canaria, por lo que ha sido mucho más sencillo seleccionar puntos que satisfagan las condiciones. Como la propia guía indica, estas condiciones deben considerarse como recomendadas, pero no como imprescindibles ni tampoco suficientes ya que los puntos de muestreo deben de representar las características de su zona.

Siguiendo la metodología establecida, en cada punto de muestreo se acota un área de aproximadamente 1 m² que se homogeneiza, eliminando los restos vegetales y las rocas y se toman varias muestras superficiales que se almacenaban en botes herméticos. Siguiendo las recomendaciones del Procedimiento 1.1, la profundidad del muestro es de 5 cm (IAEA, 1989). En la hoja de campo se anotan las coordenadas GPS del punto, las características de la localización y las climatológicas del día de recogida. También, de forma rutinaria, se mide la tasa de exposición a un metro del suelo.

En total se han recogido más de 350 muestras de suelo en toda la provincia de Las Palmas que tiene una superficie de 4093 km² lo que, en media, supone una medida por cada 11 km² tal y como se estableció en la planificación del proyecto. Como se puede observar en las figuras 4.2 a 4.4, la isla con menor densidad de puntos medidos es Lanzarote debido a que, como se ha dicho, su orografía es mucho más sencilla respecto al resto de las islas (posee grandes llanuras) y a que, además, debido a su geología tiene muy poca variabilidad en los datos radiológicos (que, por otra parte, son muy bajos) tal y como se corroboró en los mapas radiométricos elaborados para MARNA y mostrados en la figura 4.1. En contraposición, en Gran Canaria se han realizado una gran cantidad de muestreos (figura 4.2) porque presenta una orografía muy abrupta y una geología muy diversa. Además los mapas radiométricos elaborados durante el proyecto MARNA muestran variaciones muy grandes de la tasa de exposición que se corresponde también con una mayor irregularidad en distribución de radioisótopos.

4.4. Preparación y análisis radioisotópico de las muestras de suelo por espectrometría gamma de alta resolución.

Durante la primera etapa de este trabajo, y mientras no estaba disponible el sistema de espectrometría gamma de alta resolución descrito en el capítulo 2, los análisis de la composición isotópica de mu estras de suelo se realizaron en el laboratorio del grupo Física de Radiaciones y Medio Ambiente (FRYMA) de la Universidad de Huelva, en el marco del proyecto de investigación conjunto sobre radiactividad ambiental en las Islas Canarias Orientales financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACISII) del Gobierno de Canarias. De hecho, el autor de este trabajo de Tesis Doctoral, junto con otros miembros del Grupo de Investigación, tuvo la oportunidad de realizar dos estancias en el laboratorio de FRYMA para el aprendizaje de las técnicas de calibración y análisis con equipos de espectroscopia gamma.

Para las medidas en la Universidad de Huelva se utilizó un detector de Germanio hiperpuro de la marca ORTEC con un 27% de eficiencia relativa y FWHM de 0,68 keV a 122 keV (⁵⁷Co) and 1,73 keV a 1333 keV (⁶⁰Co). El detector tiene una cadena espectrométrica estándar y un blindaje cilíndrico de plomo de 10 cm de espesor y está calibrado mediante un método empírico diseñado por FRYMA. Siguiendo los procedimientos de FRYMA se analizaron 74 muestras distribuidas homogéneamente entre las tres islas, que en su mayor parte se han medido de nuevo con el equipo de Canberra descrito en el capítulo de Material y Métodos lo que ha permitido realizar una importante intercomparación de resultados para validar las medidas. Finalmente, para esta Tesis Doctoral, se han analizado 341 muestras de suelo de las islas (172 de Gran Canaria, 106 de Fuerteventura, y 60 de Lanzarote y 3 de La Graciosa).

Como parte de la puesta en marcha del laboratorio se han establecido unos procedimientos de recepción y tratamiento de las muestras basados en las prescripciones, recogidas en el *Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad* del CSN (Baeza et al., 2003). Según este procedimiento, tras su recepción las muestras de suelo se procesan en el menor tiempo posible. Se comienza con su trituración en un molino de bolas, con el fin de conseguir un tamaño de partícula inferior a 2 mm, tras lo cual son tamizadas y homogeneizadas. Con el fin de eliminar la humedad presente se secan en la estufa de secado Tarma durante un tiempo no inferior a 24 horas a una temperatura de 100°C. Por último, se depositan en botes estériles, como los destinados al análisis de orina, llenando los viales hasta una altura de 25 mm con los que se obtiene una masa que oscila entre 30 g y 60 g, dependiendo de la densidad de la muestra. Como se detalló en el apartado de material y método, el tipo de bote y la altura de la muestra, se han seleccionado después de realizar pruebas con distintas geometrías (marinelli, duquesa y bote de orina), por ser muy adecuada para minimizar la autoabsorción especialmente en la parte de baja energía del espectro.

En cada recipiente y en la libreta de entrada de muestras del laboratorio se anota el peso seco de la muestra, las coordenadas UTM del punto y la fecha de cierre de la misma. Los recipientes, debidamente sellados, se almacenan durante 30 días, antes de su medida por espectrometría gamma, para conseguir que el ²²⁶Ra alcance el equilibrio secular radiactivo con sus productos de desintegración de vida corta, como el ²¹⁴Pb y el ²¹⁴Bi. Una vez medida la muestra, los resultados se almacenan en formato digital en el laboratorio etiquetados con un código en el que figura el código del punto y el tiempo de recuento de la muestra. Para cada muestra en la libreta del espectrómetro se anota el código de la muestra, la masa, la densidad, la fecha y hora del inicio y fin del recuento.

Para cada muestra se realiza una calibración en eficiencia del espectrómetro mediante el programa LabSOCS de CANBERRA utilizando el procedimiento explicado en el capítulo 2. Una vez realizada la calibración, se coloca la muestra en posición de conteo, dentro del blindaje del detector y se inicia la adquisición del espectro por un tiempo no menor de 86400 segundos (24

horas), que puede llegar a ser de 48 horas en el caso de muestras muy débiles. Se ha fijado este tiempo por tratarse, en general, de muestras ambientales y, por tanto, con poca actividad. Al finalizar la adquisición, se ejecutan los programas de análisis que incorpora GENIE 2000 (Kaye et al., 1972) con la finalidad de obtener el resultado cualitativo y cuantitativo. Estos programas son "Peak Analysis with Report" a continuación "Efficiency" y finalmente "Nuclide Identification". En el primer programa, los fotopicos se localizan en el espectro mediante el método de la diferencia segunda generalizada (Mariscotti, 1967) luego se calcula el área de los mismos y, si el fotopico está aislado, un algoritmo se encarga de sumar el número total de cuentas en la región donde se encuentra. En caso de tratarse de un multiplete, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados mediante métodos desarrollados por (Canberra, 2002). Una vez identificados los nucleidos mediante los algoritmos presentes en "Nuclide Identification" se calcula según lo explicado en el capítulo 2 la actividad mínima detectable y la actividad específica medida en Bq/kg, de los radionúclidos especificados.

Para cada muestra, se han determinado las actividades específicas de los radioisótopos naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K. Suponiendo el equilibrio secular, el ²²⁶Ra se determinó a partir del ²¹⁴Pb, utilizando la línea de emisión 351,9 keV (intensidad 37,6%). El ²³²Th se determinó a partir del ²²⁸Ac y el ²⁰⁸Tl mediante las líneas de emisión de 911,2 keV (intensidad 25,8%) y 583,2 keV (intensidad 84,5%), respectivamente realizando una media ponderada por las incertidumbres según la expresión:

$$\begin{bmatrix} {}^{232}Th \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} {}^{228}Ac \end{bmatrix} u_{Ac}^{-2} + \begin{bmatrix} {}^{208}Tl \end{bmatrix} u_{Tl}^{-2}}{u_{Ac}^{-2} + u_{Tl}^{-2}}$$
[4.1]

donde, como es usual, los términos entre corchetes indican la concentración de actividad y los (u_x) las incertidumbres con las que se han determinado las concentraciones.

El ⁴⁰K se midió de forma directa, mediante la línea de emisión de 1460,8 keV (intensidad 10,7%). También se ha determinado la actividad específica del radioisótopo artificial ¹³⁷Cs (661,7 keV), en aquellos casos en los que se ha detectado. Las líneas de energía desconocidas, se pueden analizar e identificar con una tabla de radioisótopos. Como resultado GENIE 2000 proporciona una serie de informes con los datos de los análisis que pueden ser directamente volcados a EXCEL, minimizando así, los errores en el manejo y traslado de información. El análisis de las 341 muestras ha supuesto más de 500 días de medida ininterrumpida del espectrómetro. Si se considera, además la calibración, las intercomparaciones con el equipo de FRYMA y las medidas de fondo del laboratorio en total han supuesto más de tres años ininterrumpidos de medidas. En el Apéndice 7 se recogen los resultados de las medidas de concentración de radioisótopos de las muestras.

4.5. Distribución de radioisótopos naturales en las Islas Canarias Orientales.

Como resultado de los análisis realizados, en este trabajo se han determinado las concentraciones de distintos radioisótopos de las series naturales en los suelos de las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote y La Graciosa. Para discutir los resultados, se estudian en esta sección las concentraciones de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K, a partir de los valores que se recogen en el Apéndice 7. La concentración de actividad del ²³⁸U se estima a partir de la del ²²⁶Ra ya que usualmente se encuentran en equilibrio aproximado. No se proporcionan datos ²³⁵U porque no se ha detectado en las muestras analizadas. A continuación, se discuten los resultados detallados para cada isla mientras que el análisis de la distribución del radioisótopo artificial ¹³⁷Cs se deja para el apartado 4.6.

4.5.1 Isla de Gran Canaria

En la tabla 4.1 se proporcionan los indicadores estadísticos de los datos de concentración de actividad de los distintos radioisótopos analizados en las muestras de suelos de la isla recogidos en el Apéndice 7.

[²²⁶ Ra] (Bq/kg)	[²³² Th] (Bq/kg)	[⁴⁰ K] (Bq/kg)
37,53	48,96	561,16
33,88	43,96	421,32
88,96	146,80	1795
4,88	5,60	24
16,86	22,10	378,49
34,35	47,15	487
0,59	2,69	-0,62
0,91	1,09	0,59
0,05	0,011	<0,01
	[²²⁶ Ra] (Bq/kg) 37,53 33,88 88,96 4,88 16,86 34,35 0,59 0,91 0,05	[226Ra] (Bq/kg)[232Th] (Bq/kg)37,5348,9633,8843,9688,96146,804,885,6016,8622,1034,3547,150,592,690,911,090,050,011

 Tabla 4.1.
 Gran Canaria. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad de las muestras para los radionúclidos determinados.

El valor positivo de la asimetría en la distribución de los tres radioisótopos indica que las distribuciones son asimétricas con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda tal y como ocurre con la tasa de exposición. Las distribuciones de torio y radio presentan una asimetría del mismo orden y casi el doble que la del potasio. La Kurtosis es positiva en el caso de los isótopos ²²⁶Ra y ²³²Th de forma que sus distribuciones son leptocúrticas En el caso del potasio la Kurtosis en negativa y la distribución será entonces platicúrtica, aunque su valor cercano a 0 indica que es muy cercana a la normal.

Los indicadores estadísticos predicen que los datos de concentración de radioisótopos se concentran en torno a valores relativamente bajos con muy pocas excepciones. En la figura 4.5 se muestran los diagramas de frecuencias de los datos y su ajuste a una distribución log-normal que corroboran lo dicho en el párrafo anterior. La actividad específica de los radionúclidos varía entre 4,9±0,5 Bq/kg y 89,0±7,3 Bq/kg para el ²²⁶Ra, 5,61±0,6 Bq/kg y 146,8±7,5 Bq/kg en el caso del ²³²Th y en el rango comprendido entre 24±3 Bq/kg y 1796±80 Bq/kg para el ⁴⁰K. Las distribuciones de ²²⁶Ra y ²³²Th, se ajustan bien a una log-normal con coeficientes de correlación en torno a 0,9. La distribución de ⁴⁰K presenta una menor correlación (0,76) y muestra una estructura bimodal que se atribuye a la clara división geológica en dos mitades prácticamente iguales en superficie que puede observarse en el mapa geológico de la isla (figura 3.11). Así los datos estarán mejor representados por las medias geométricas que por las aritméticas que, al estar influidas por pocos valores altos, tenderán a sobreestimar los valores medios de las distribuciones.





Como quedó de manifiesto en el capítulo 3, existe una clara correlación entre la naturaleza volcánica de las islas y su comportamiento radiológico. Desde un punto de vista geoquímico, las rocas volcánicas de Gran Canaria (y de todo el archipiélago), pertenecen a la serie ígnea alcalina, en este caso, asociada a volcanismo de intraplaca (Rodríguez Losada, 2014). Esta serie ígnea está formada por una

secuencia de rocas cuya composición evoluciona desde términos indiferenciados, representados por basaltos, términos intermedios, representados por traquibasaltos y finalmente, términos más diferenciados o evolucionados, representados por traquitas y fonolitas. En la figura 4.6 se muestra el diagrama TAS (Total Alkali Silica) que se utiliza en geoquímica para clasificar las rocas volcánicas en base a la relación entre el contenido de minerales alcalinos (Na2O y K2O) y el contenido de silicatos (SiO₂). Estos parámetros químicos son determinantes, porque la cantidad relativa de minerales alcalinos y silicatos de las rocas magmáticas condicionan, en mayor o menor medida, el resto de sus parámetros físico-químicos. Un magma básico presenta contenidos en SiO₂ entre 45-52%. Por el contrario, un magma ácido tiene valores por encima de 63% de SiO₂. El color de las rocas es una primera manifestación de su composición química. En general, los colores más claros (como los de las fonolitas) indican un mayor contenido en sílice y álcalis (sodio y potasio), mientras que los colores de las lavas más oscuras (como los basaltos) indican un predominio de minerales ricos en hierro y magnesio. En la figura 4.6 derecha se han representado sobre el diagrama TAS (Le Maitre, 2002), las rocas características del archipiélago, como se puede comprobar, en las islas bajo estudio son más abundantes las rocas básicas correspondientes a términos indiferenciados, con la excepción de Gran Canaria que en su parte SO presenta extensas áreas dominadas por la presencia de traquitas y fonolitas.





Las rocas ultrabásicas y básicas están constituidas esencialmente, desde el punto de vista mineralógico, por silicatos de Fe-Mg-Ca (olivinos, piroxenos, anfíboles, feldespatos, etc.) y, en menor proporción, por óxidos de Fe-Ti-Al (magnetita, ilmenita, espinela, etc.) y fosfatos de calcio (apatito) que se han formado a altas temperaturas y presiones (por encima de 1100° C y varios kilobares). Estas rocas contienen, además de los minerales descritos anteriormente, vidrio volcánico que une a los cristales entre si con una composición química pobre en sílice (entre 45 y

52% de SiO₂), rica en Fe, Mg, Ca y Al, y pobre en Ti, Mn, P, Na y K. Por lo que se refiere a las rocas más diferenciadas (consolidadas a temperaturas y presiones más bajas), están las intermedias, ácidas y carbonatitas que son más ricas en SiO₂ (por encima de 52% de SiO₂) o CO₃Ca. Estas rocas diferenciadas contienen fundamentalmente silicatos de Al-Na-K (feldespatos, feldespatoides, micas, zeolitas, etc.), carbonatos de calcio (calcita) y fosfatos de calcio (apatito) y, en menor proporción, muestran minerales accesorios o accidentales que pertenecen a las clases mineralógicas de carbonatos, sulfatos, óxidos, fosfatos y silicatos (por ej., minerales como epidota, pirocloro, britholita, barita, allanita, titanita, etc.) y que contienen elementos químicos raros y escasos (La, Ce, Sm, Nd, Sr, Ba, Th, Nb, etc.), algunos de ellos radiogénicos.

En el enfriamiento de cámaras magmáticas con líquidos esencialmente silicatados, la mayor parte de los elementos traza (elementos con concentraciones de ppm en el análisis global de la roca) suelen acumularse en los líquidos silicatados tardíos (que se consolidan a temperaturas y presiones menores) puesto que no forman parte de los minerales precoces solidificados a altas temperaturas y presiones. Estos elementos raros (muchos de ellos radiogénicos) se pueden distribuir de varias formas en la fase sólida: a) entran a formar parte de minerales accesorios de la roca por sustituciones isomorfas, b) forman minerales accidentales con esos elementos traza, y c) quedan distribuidos al azar en los vidrios volcánicos sálicos (composiciones intermedias o ácidas). Son estos minerales, que al contener en su estructura cristalina algunos elementos traza y potasio, y que, como se ha resaltado, aparecen concentrados en las rocas más diferenciadas (sienitas, traquitas, fonolitas, carbonatitas, etc.), los que van a presentar una mayor concentración de actividad radiológica. Sin embargo, las rocas básicas y ultrabásicas (peridotitas, piroxenitas, gabros, basaltos, etc.) no contienen estos elementos inestables en la estructura cristalina de sus minerales y por lo tanto presentan muy baja radioactividad.

Los resultados de los análisis de suelos corroboran lo expuesto y la distribución de radioisótopos naturales en la Isla de Gran Canaria refleja con gran precisión la geología de la Isla. En las figuras 4.7 a 4.9 se muestran los mapas de concentración de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K obtenidos a partir de los datos mostrados en el Apéndice 7. Para el cálculo de las isolíneas se ha utilizado la técnica de interpolación de Kriging ya explicada en el capítulo 3. Las mayores concentraciones de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K se han encontrado en el centro-suroeste de la isla, que se corresponde con la parte más antigua (más de 12 millones de años) donde se encuentran materiales del primer y segundo ciclo magmático que se corresponden principalmente con rocas plutónicas y volcánicas diferenciadas (traquitas, fonolitas y sienitas). Es decir, rocas magmáticas ácidas donde se acumulan elementos traza como uranio, torio, rubidio y estroncio, elementos de las tierras raras, y mayoritarios como el potasio, lo que explica una mayor presencia de radioisótopos naturales. Existe una gran variabilidad en la concentración de ²²⁶Ra y ²³²Th, con valores máximos que pueden llegar a ser el triple de los mínimos encontrados. El valor medio de concentración de actividad de ²²⁶Ra es de 36,9 Bq/kg es muy cercano, a la media mundial de 35 Bq/kg propuesta por el informe UNSCEAR

2000 (UNSCEAR, 2000). En el caso del ²³²Th el valor medio de 48,9 Bq/kg es ligeramente superior a la media mundial de (30 Bq/kg). La concentración media de ⁴⁰K es también ligeramente superior a la media mundial (400 Bq/kg).





Figura 4.7 Mapa de concentración de ²²⁶Ra (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria.

Figura 4.8 Mapa de concentración de ²³²Th (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria.



Figura 4.9 Mapa de concentración de ⁴⁰K (Bq/kg) de la Isla de Gran Canaria.

Con el fin de realizar un análisis cuantitativo, en las figuras 4.10 a 4.12 se muestran los diagramas de cajas y bigotes de los datos de concentración de radioisótopos correspondientes a las distintas categorías geológicas de Gran Canaria definidas según la clasificación del apartado 4.2.2. La asignación de cada dato a un código geológico se ha realizado utilizando los mapas geológicos de suelos proporcionados por la cartografía de GRAFCAN. El procedimiento adoptado puede introducir errores dependiendo de la resolución del GPS y de la bondad de los mapas de GRAFCAN cuando los puntos estén muy cerca de la frontera de dos zonas geológicos de una zona y la concentración de radioisótopos obtenida, es importante tener en cuenta que se trata de muestras de suelos, en zonas en las que la roca madre está compuesta por rocas del código geológico indicado. Debido al transporte de sedimentos entre unas zonas y otras puede ocurrir que puntos con código geológico de un tipo no muestren el comportamiento esperado, debido a que existe una importante proporción de material proveniente de otras zonas (por causas naturales o antrópicas). Los resultados se analizarán, por tanto desde un punto de vista global.

Como se puede observar, los suelos asociados a los códigos geológicos 2 y 4, que se corresponden con zonas en las que dominan las rocas intermedias y ácidas (volcánicas y plutónicas) presentan una concentración media de ⁴⁰K de 869±42 Bq/kg aproximadamente tres veces superior, a los 337±19 Bq/kg que se encuentran en los suelos asociados al código geológico 1 (rocas básicas y ultrabásicas) en consonancia con su posición en el diagrama TAS mostrado en la figura 4.6. En los suelos asociados a los códigos geológicos 5 y 6 (sedimentos detríticos marinos y terrestres) la concentración media de ⁴⁰K tienen un valor intermedio entre los casos

anteriores, este comportamiento es lógico ya que debido a la elevada heterogeneidad geológica de la isla, es de esperar una acusada mezcla de materiales (ácidos y básicos) en estos sedimentos. El comportamiento es similar en el caso de las concentraciones de actividad de ²²⁶Ra y de ²³²Th siendo, en promedio, superiores en los suelos de código 2 y 4 que en el resto de las clases. Es de destacar el alto contenido promedio en radio de las rocas plutónicas ácidas que presentan una media aritmética en torno a 75 Bq/kg y una mediana de unos 70 Bq/m³ en contraste con los basaltos que se sitúan en unos 30 Bq/kg.



Figura 4.10 Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ⁴⁰K de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona



Figura 4.11 Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²²⁶Ra de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona.



Figura 4.12 Gran Canaria. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²³²Th de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona.

Al interpretar estos resultados es importante tener en cuenta, que sólo se dispone de cuatro datos en áreas geológicas dominadas por rocas plutónicas (código 4), debido al pequeño tamaño relativo de las mismas en Gran Canaria, mientras que para el código 2 se disponen de 44 datos y para el 1 de 96. Esto implica que la variedad de datos en códigos 1 y 2 es mucho mayor y las medias están más matizadas.

Finalmente se muestran, en la tabla 4.2 la matriz de correlación de Pearson entre los distintos radioisótopos analizados en este estudio. Aunque en áreas de litología muy homogénea resulta lógico suponer una alta correlación entre los radionúclidos presentes en los suelos, nuestros resultados indican sólo una fuerte correlación entre las concentraciones de ²²⁶Ra y ²³²Th y algo menor entre ²³²Th y ⁴⁰K. Esta débil correlación puede explicarse debido a la compleja geografía de la isla de Gran Canaria con fuertes pendientes y escorrentías que propician la mezcla de materiales de distintas zonas. Además, su variada composición geológica con intrusiones de distintos tipos de roca debido a su génesis volcánica y a los posteriores ciclos de rejuvenecimiento, implica poca homogeneidad local.

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
²²⁶ Ra	1		
²³² Th	0,7132	1	
⁴⁰ K	0,3007	0,5792	1

Tabla 4.2.Gran Canaria. Matriz de correlación de Pearson entre las
concentraciones de actividad de los radionúclidos
determinados

4.5.2 Isla de Fuerteventura.

En la tabla 4.3, se proporcionan los indicadores estadísticos de los datos de concentración de actividad de los distintos radioisótopos analizados en las muestras de suelos de la isla recogidos en el Apéndice 7. El valor positivo de la asimetría en la distribución de los tres radioisótopos indica que las distribuciones son asimétricas con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda tal y como ocurre con la tasa de exposición. Las distribuciones de torio y radio presentan una fuerte asimetría respecto a una distribución normal, sin embargo, el pequeño valor de la asimetría en el caso del ⁴⁰K, indica que su distribución está próxima en forma a la distribución normal.

La Kurtosis es positiva en el caso de las concentraciones de actividad de los isótopos ²²⁶Ra y ²³²Th siendo sus distribuciones son leptocúrticas. El potasio presenta un cercano a cero lo que indica, de nuevo, que la distribución es cercana a la normal tal y como se aprecia en la figura 4.13.

Estadístico	[²²⁶ Ra] (Bq/kg)	[²³² Th] (Bq/kg)	[⁴⁰ K] (Bq/kg)	
Media aritmética	25,04	30,04	494,65	
Media geométrica	20,40	20,59	376,20	
Máximo	142,86	280,45	1214	
Mínimo	5,57	1,51	13	
Desviación estándar	20,86	33,83	288,69	
Mediana	20,46	22,71	462	
Kurtosis	12,55	29,48	0,25	
Asimetría	3,20	4,61	0,47	
Test de KS	<0,005	<0,005	0,05	

 Tabla 4.3.
 Fuerteventura. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad (Bq/kg) de las muestras para los radionúclidos determinados.

Los indicadores estadísticos predicen que los datos de concentración de radioisótopos se agrupan en torno a valores relativamente bajos con muy pocas excepciones. En la figura 4.13 se muestran los diagramas de frecuencias de los datos y su ajuste a una distribución log-normal que corroboran lo dicho en el párrafo anterior. La actividad específica de los radionúclidos varía entre 5,57±0.5 Bq/kg y 142,86±11,54 Bq/kg para el ²²⁶Ra, 1,48.±0,41 Bq/kg y 280,45±17 Bq/kg en el caso del ²³²Th y en el rango comprendido entre 13±4 Bq/kg y 1214±52Bq/kg para el ⁴⁰K.

La distribución de ²²⁶Ra se ajusta bien a una log-normal con coeficiente de correlación de 0,97. Las distribuciones de ²³²Th y ⁴⁰K presentan una menor correlación (0,77). Al igual que en el caso de Gran Canaria, los datos estarán mejor representados por las medias geométricas que por las aritméticas, ya que, al estar influidas por pocos valores altos, tenderán a sobreestimar los valores medios de las distribuciones.



Figura 4.13 Diagramas de frecuencias de las concentraciones de los distintos radioisótopos naturales (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K) en la Isla de Fuerteventura.

Como se explicó en el capítulo 1, en Fuerteventura se distinguen dos zonas geológicas bien diferenciadas: El Complejo Basal formado por rocas plutónicas, volcánicas y sedimentarias submarinas, que se corresponde con las zonas más antigua de la isla, y el grupo de rocas volcánicas subaéreas más tardías. Desde un punto de vista radiológico, los grandes afloramientos kilométricos o decimétricos de rocas plutónicas y subvolcánicas diferenciadas (esencialmente plutones y domos de sienitas, traquitas y fonolitas) son los deben tener mayores concentraciones de minerales con elementos radioactivos (Montañetas, Montaña Blanca, Tindaya y Tebeto en la zona del Barranco de Esquinzo en el noroeste de la isla; Las Peñitas, Morro del Recogedero, Ajuí, Tierra Mala, Llano Grande, Morro de la Cruz y Puntas de Gaspar González, Viento y Diego Díaz en la zona de Pájara-Betancuria en el centro oeste de la isla; y Cofete y Punta de Barlovento en el sur de la isla). Lo mismo sucede a las reducidos afloramientos de carbonatitas por su alta concentración en minerales radioactivos (zona del Barranco de Esquinzo y Agua Salada en el noroeste de la isla, y Punta de Nao-Caleta Mansa, Punta de Peñón Blanco y Caleta de la Cruz en el centro-oeste).

En las figuras 4.14 a 4.16 se muestran los mapas de concentración de actividad de los isótopos naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de la isla de Fuerteventura. Para el cálculo de las isolíneas de los mapas se ha utilizado la técnica de interpolación de Kriging ya explicada en el apartado anterior.



Fuerteventura.



Figura 4.15Mapa de concentración de 232
Th (Bq/kg) de la Isla de
Fuerteventura.





Los mapas son acordes con la geología de la isla, y así en las zonas dominadas por rocas ígneas básicas (basaltos, gabros, etc.) y ultrabásicas (piroxenitas, peridotitas, etc.) del Complejo Basal (porciones de la litosfera oceánica, Vulcanismo submarino, Complejos intrusivos y malla de diques) y de la Unidad de Vulcanismo subaéreo (Vulcanismo Mioceno y Reciente) se encuentran bajas concentraciones de radioactividad natural. Mientras que las zonas en las que abundan las rocas diferenciadas (especialmente sienitas, traquitas y carbonatitas) del Complejo Basal (Complejo de intrusiones plutónicas y subvolcánicas mesozoicas y terciarias) son las que muestran una mayor concentración de radioisótopos. La variable configuración estructural de los afloramientos rocosos en Fuerteventura hay que tenerla en cuenta a la hora de interpretar las mediciones de radioactividad natural puesto que podrían tener anomalías puntuales (positivas o negativas) que no son representativas de la zona.

Existe, también en Fuerteventura, una gran variabilidad en la concentración de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K con valores máximos que pueden llegar a triplicar de los mínimos encontrados. La isla presenta, en general, un nivel basal menor de concentración de actividad de radioisótopos naturales que Gran Canaria, como se puede concluir de la comparación de sus valores medios con los de Gran Canaria. Así se encuentra que el valor medio de concentración de actividad de ²²⁶Ra es de 25 Bq/kg bastante inferior, a la media de Gran Canaria (36,9 Bq/kg) y a la de España (38,9 Bq/kg). En el caso del ²³²Th ocurre lo mismo estando valor medio de 29,7 Bq/kg muy por debajo de los 48,9 Bq/kg de Gran Canaria y de los 41 Bq/kg de la media española. La concentración media de ⁴⁰K es también bastante inferior a la media de España (578 Bq/kg) y de Gran Canaria (554 Bq/kg).

Estos resultados se reflejan de una forma cuantitativa, en las figuras 4.17 a 4.19 donde se muestran los diagramas de cajas y bigotes de los datos de concentración de radioisótopos correspondientes a las distintas categorías geológicas de Fuerteventura definidas según la clasificación del apartado 4.2.2. Utilizando el mismo procedimiento que para Gran Canaria, la asignación de cada dato a un código geológico se ha realizado utilizando los mapas geológicos de suelos proporcionados por la cartografía de GRAFCAN y se deben tener en cuenta, al interpretar los resultados, las mismas precauciones que se indicaron en el apartado 4.5.1.

Como se observa, los suelos asociados a los códigos geológicos 2 y 4, que se corresponden con zonas en las que dominan las rocas intermedias y ácidas (volcánicas y plutónicas) presentan una concentración media de ⁴⁰K de 869±42 Bq/kg aproximadamente tres veces superior, a los 337±19 Bq/kg que se encuentran en los suelos asociados al código geológico 1 y 3 (rocas básicas y ultrabásicas) en consonancia con su posición en el diagrama TAS mostrado en la figura 4.6. En los suelos asociados a los códigos geológicos 5 y 6 (sedimentos detríticos marinos y terrestres) la concentración media de ⁴⁰K tienen un valor intermedio entre los casos anteriores, este comportamiento es lógico ya que debido a la elevada heterogeneidad geológica de la isla, es de esperar una acusada mezcla de materiales (ácidos y básicos) en estos sedimentos. El comportamiento es similar en el caso de las concentraciones de actividad de ²²⁶Ra y de ²³²Th siendo, en promedio, superiores en los suelos de código 2 y 4 que en el resto de las clases. Es de destacar el alto contenido promedio en radio de las rocas plutónicas ácidas que presentan una media aritmética en torno a 75 Bq/kg y una mediana de unos 70 Bq/kg en contraste con los basaltos que se sitúan en unos 30 Bq/kg.



Figura 4.17 Fuerteventura. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²²⁶Ra de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona



Figura 4.18 Fuerteventura. Datos estadísticos correspondiente a la relación entre la concentración de ²³²Th de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona





Finalmente; .en la tabla 4.4, se muestra la matriz de correlación de Pearson entre los distintos radioisótopos analizados en este estudio.

las concentraciones de actividad de los radionúclidos determinados						
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K			
²²⁶ Ra	1					
²³² Th	0,8014	1				
⁴⁰ K	0,5828	0,5703	1			

Tabla 4.4. Euerteventura Matriz de correlación de Pearson entre

Esta tabla muestra una correlación entre los radioisótopos naturales mucho mayor que en Gran Canaria (en especial la correlación ²²⁶Ra y ²³²Th). Este resultado es concordante con la geología de Fuerteventura mucho más homogénea que la de Gran Canaria.

4.5.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa

En la tabla 4.5, se proporcionan los indicadores estadísticos de los datos de concentración de actividad de los distintos radioisótopos analizados en las muestras de suelos de la isla de Lanzarote recogidos en el Apéndice 7. En este caso, la asimetría en la distribución de los tres radioisótopos es positiva pero cercana a cero de forma que las distribuciones son sólo levemente asimétricas con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda. La Kurtosis es positiva en el caso de las concentraciones de actividad de los isótopos ²²⁶Ra y ²³²Th siendo sus distribuciones, al igual que en Fuerteventura, leptocúrticas, aunque en el ²³²Th es prácticamente nula, el potasio presenta un valor negativo, pero también muy cercano a cero. De estos valores se puede inferir que tanto el ²³²Th como el ⁴⁰K siguen una distribución cercana a la normal.

Estadístico	[²²⁶ Ra] (Bq/kg)	[²³² Th] (Bq/kg)	[⁴⁰ K] (Bq/kg)
Media aritmética	19,58	19,45	394,43
Media geométrica	18,82	17,51	332,39
Máximo	40	43	940
Mínimo	11,23	6,50	34
Desviación estándar	5,62	8,67	212,53
Mediana	20,20	19,12	372,50
Kurtosis	1,84	0,04	-0,02
Asimetría	0,79	0,61	0,66
Test de KS	P<0,15	P<0,15	p<0,15

 Tabla 4.5.
 Lanzarote. Indicadores estadísticos de la distribución de concentraciones de actividad (Bq/kg) de las muestras para los radionúclidos determinados.

Los indicadores estadísticos predicen que los datos de concentración de radioisótopos se agrupan en torno a valores muy bajos respecto a Gran Canaria o Fuerteventura. La actividad específica de los radionúclidos varía entre 11,23±0.80 Bq/kg y 40,00±3,00 Bq/kg para el ²²⁶Ra, 6,40.±0,30 Bq/kg y 43,00±0,30 Bq/kg en el caso del ²³²Th y en el rango comprendido entre 34±6 Bq/kg y 940±60Bq/kg para el ⁴⁰K. En la figura 4.20 se muestran los diagramas de frecuencias de los datos y su ajuste a distribuciones de tipo log-normal y normal. Las distribuciones de ²²⁶Ra y ⁴⁰K se ajustan mejor a una distribución de tipo gaussiano (normal), mientras que la distribución de ²³²Th presenta un ajuste similar a ambas distribuciones teóricas, tal y como se deduce de los coeficientes de correlación que se muestran en la figura. Por tanto, a diferencia de los casos de Gran Canaria y Fuerteventura, las medias geométricas y las aritméticas son muy cercanas debido a la distribución casi normal de los datos de los tres radioisótopos. No obstante resulta





radioisótopos naturales (226 Ra, 232 Th, 40 K) en la Isla de Lanzarote.

De los resultados anteriores, se deduce que la isla de Lanzarote presenta la menor variabilidad y menor concentración de actividad de los radioisótopos naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de las tres islas estudiadas. Los valores obtenidos, están en concordancia con la geología de la isla en la que el 98% de las rocas son basálticas en las que, como se ha indicado la explicar las características de las rocas volcánicas de Canarias en el apartado 4.5.1, no aparecen minerales radiactivos (olivinos y piroxenos), ni en el vidrio volcánico hay elementos químicos radiactivos (Th, U, K y tierras raras). En la literatura (Suárez Mahou and Fernández Amigot, 1996) se cifra la proporción de Torio en 0,1 ppm y de Uranio en 0,02 ppm en las rocas ígneas ultrabásicas

En las figuras 4.25 a 4.27 se muestran los mapas de concentración de actividad de los isótopos naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de la Isla de Lanzarote. Para el cálculo de las isolíneas de los mapas se ha utilizado la técnica de interpolación de Krigeado. Los mapas ilustran la baja actividad

radiológica de la isla dominada por bajos valores de concentración en toda su superficie donde sólo se aprecia un pequeño máximo local en la costa norte en la zona de La Santa.



Figura 4.21 Mapa de concentración de ²²⁶Ra (Bq/kg) de la Isla de Lanzarote.







Figura 4.23 Mapa de concentración de ⁴⁰K (Bq/kg) de la Isla de Lanzarote.

Lanzarote es, por tanto, una isla formada casi totalmente por rocas basálticas tal y como se puede apreciar en la figura 4.6, en la que los datos correspondientes a esta isla se concentran en la zona básica correspondiente del diagrama TAS. Se pueden distinguir cuatro series. Los basaltos de la Serie I corresponden a los Basaltos Antiguos. Son materiales básicos alcalinos extruidos mediante erupciones fisurales que formaron grandes mesetas tabulares. Esta serie, atravesada por numerosos diques subverticales e intrusiones tipo sill y lacolitos, constituye la base de la isla La Serie II está formada por lavas muy básicas y se distingue de la Serie III por estar parcialmente destruidos sus edificios volcánicos. La Serie IV está formada por los productos de erupciones históricas y subhistóricas que dieron lugar a los llamados "malpaíses" como las Montañas de Fuego y La Corona, aún con intensos efectos geotérmicos. Sobre las series más antiguas, intensamente meteorizadas, se ha desarrollado una capa calcárea característica. Las rocas sedimentarlas están representadas por arenas de origen eólico, parcialmente cementadas, que forman pequeñas acumulaciones aisladas. Por esto según la clasificación de las rocas volcánicas utilizadas en este trabajo de Tesis Doctoral que se detalla en el apartado 4.2.2, en Lanzarote sólo se encuentran suelos correspondientes a los códigos 1 "Rocas ultrabásicas y básicas" y 5 "Sedimentos detríticos sueltos marinos o terrestres". En las figuras 4.24 a 4.26 se muestran los diagramas de cajas y bigotes de los datos de concentración de radioisótopos correspondientes a las dos categorías geológicas de Fuerteventura indicadas, en los que se resume lo discutido en los párrafos anteriores. Se ha seguido el mismo procedimiento en los casos anteriores para la asignación de cada dato a un código geológico y se deben tener en cuenta, al interpretar los resultados, las mismas precauciones que se indicaron.











Figura 4.26 Lanzarote. Datos estadísticos correspondiente a la concentración de ⁴⁰K de los puntos de muestreo y el código geológico de la zona

Finalmente se muestra, en la tabla 4.6 la matriz de correlación de Pearson entre los distintos radioisótopos analizados en este estudio. Esta tabla confirma la hipótesis de que en territorios homogéneos la correlación entre los radioisótopos es alta. Así en Lanzarote se encuentra una muy alta correlación entre los radioisótopos naturales (en este caso cabe destacar la alta correlación ⁴⁰K y ²³²Th con un valor de 0.90 frente al valor de 0.50 de Gran Canaria o Fuerteventura).

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
²²⁶ Ra	1		
²³² Th	0,7394	1	
⁴⁰ K	0,5703	0,9086	1

4.6. Lanzarote. Matriz de correlación de Pearson entre las concentraciones de actividad de los radionúclidos determinados

La isla de La Graciosa sigue el mismo comportamiento que Lanzarote, de la que es geológicamente similar, encontrándose muy baja concentración de radioisótopos naturales en las muestras analizadas de la isla. Así, la concentración de actividad media de ²²⁶Ra es de 14,6 Bq/kg, la de ²³²Th de 13,5 6 Bq/kg y para el ⁴⁰K se obtiene 337,7 Bq/kg.

4.5.4 Comparación con las Islas Canarias Occidentales.

Comenzamos los análisis de los resultados, estudiando los valores de concentración de radioisótopos en el contexto regional. Para ello, en las tablas 4.7 y 4.8 se recogen los valores medios de la concentración de actividad de los radioisótopos naturales ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K y sus rangos de variación para las siete islas principales del Archipiélago Canario. Los datos para las lslas de la provincia de Santa Cruz de Tenerife están extraídos de los trabajos publicados por el grupo de Física Médica y Radiactividad Ambiental de las Universidad de La Laguna (Fernández de Aldecoa et al., 1992) (Fernández de Aldecoa, 2000) sobre las campañas de toma de muestras llevadas a cabo en los años 90. Los procedimientos de análisis de espectrometría gamma empleados son similares a los descritos en este capítulo. En estas tablas se indica, además el número de muestras analizado para cada isla. Como se puede comprobar, la mayoría de los datos de las islas occidentales se refieren a la Isla de Tenerife mientras que hay muy pocos datos del resto (La Gomera, La Palma y el Hierro), por esto las conclusiones respecto a estas islas se deben considerar poco concluyentes.

En la tabla 4.7 se han determinado las actividades medias de cada isla realizando la media aritmética de los datos de cada isla. Con estos datos se han determinado las actividades medias por provincia y la media total del archipiélago, Dado que el número de puntos de muestreo no es proporcional a la superficie de cada isla, se ha realizado una media ponderada por la superficie de cada isla, según la siguiente expresión:

$$[R] = \frac{\sum_{islas} S_{isla} [R]_{isla}}{\sum_{islas} S_{isla}}$$
[4.2]

en la que [R] es la concentración media provincial de un determinado radioisótopo y S_{isla} y [R]_{isla} la superficie y la concentración media de cada isla respectivamente. Para la determinación de las medias provinciales, la suma se realiza en las islas de la provincia y para la media regional la suma se extiende a todas las islas. De esta forma las islas de menor superficie influyen menos en los valores medios finales y se obtiene un resultado más realista. Las islas con más peso estadístico son Tenerife con un 27,3% del territorio (el 60,2% de su provincia) seguida de Fuerteventura con un 22,3% (40,8% de su provincia) y Gran Canaria con el 21% (38,4% de su provincia).

 Tabla 4.7.
 Medias aritméticas y rangos de variación de las concentraciones de actividad por isla y media ponderada del Archipiélago por superficie

	Número	[²²⁶ Ra]	[²²⁶ Ra] Bqkg ⁻¹ [²³² Th		³² Th] Bqkg ⁻¹		[⁴⁰ K] Bqkg⁻¹	
Isla	medidas	Media Aritm.	Rango	Media Aritm.	Rango	Media Aritm.	Rango	
Lanzarote	63	19,6	11-40	19,4	6-43	395	34-940	
Fuerteventura	106	25	5-143	30,0	2-280	495	13-1214	
Gran Canaria	172	37,5	5-89	48,8	6-147	561	24-1795	
Tenerife	103	43,4	7-104	54,6	12-112	658	142-1489	
Gomera	10	20,5	6-43	30,6	9-51	317	113-778	
La Palma	13	32,6	6-55	36,3	9-57	228	57-484	
El Hierro	6	21,2	14-30	23,6	13-30	262	130-347	
Las Palmas	341	28,7	5-143	35,0	2-280	499,5	13-1795	
S/C de Tenerife	132	36,7	6-104	45,7	9-112	499,2	57-1489	
Archipiélago	473	32.4	5-143	39.9	2-280	499,4	13-1795	

La tabla 4.8 es similar a la tabla 4.7, pero en ella se han determinado las medias geométricas de cada isla y las ponderaciones para obtener las medias provinciales y regionales se han realizado utilizando estas medias geométricas. Como se puede comprobar, los valores medios determinados así son entre un 15% y un 19% inferiores a los obtenidos si se utiliza la media aritmética. Según lo discutido en los apartados 4.5.1. a 4.5.3., debido a las distribuciones estadísticas asimétricas de los datos, las medias geométricas son más representativas del comportamiento radiológico de las islas que las medias aritméticas, que están influidas por valores puntuales muy altos. Por esto, en las discusiones que siguen, adoptaremos los valores medios procedentes de la tabla 4.8 como representativos de cada provincia y del archipiélago en su totalidad.

	Número	[²²⁶ Ra] Bqkg ⁻¹		[²³² Th]	Bqkg ⁻¹	[⁴⁰ K] Bqkg⁻¹	
Isla	medidas	Media Geom.	Rango	Media Geom.	Rango	Media Geom.	Rango
Lanzarote	63	18,82	11-40	17,51	6-43	332,4	34-940
Fuerteventura	106	20,4	5-143	20,59	2-280	376,2	13-1214
Gran Canaria	172	33,88	5-89	43,96	6-147	421,32	24-1795
Tenerife	103	38,7	7-104	48,4	12-112	563,6	142-1489
Gomera	10	18,6	6-43	28,3	9-51	270,3	113-778
La Palma	13	28,8	6-55	33,4	9-57	193,5	57-484
El Hierro	6	20,3	14-30	22,8	13-30	249,1	130-347
Las Palmas	341	25,2	5-143	28,9	2-280	384,4	13-1795
S/C de Tenerife	132	33,0	6-104	41,0	9-112	429,0	57-1489
Archipiélago	473	28,8	5-143	34,4	2-280	404,7	13-1795

Tabla 4.8. Medias geométricas y rangos de variación de las concentraciones de actividad por isla y media ponderada del Archipiélago por superficie

En la figura 4.27-a se representan, en forma de diagrama de barras los promedios de las tablas 4.7 y 4.8. Aunque redundante con dichas tablas, esta representación es interesante porque muestra la variación de la concentración de las actividades de los tres radioisótopos estudiados a lo largo del eje este-oeste del archipiélago. Este eje coincide con la línea cronológica de formación del archipiélago desde las islas más antiguas (Lanzarote y Fuerteventura con unos 25 Ma) hasta las más joven (El Hierro en torno a 1 Ma) y ayuda a interpretar los resultados.





En concordancia con lo discutido en el apartado 3.4.4., al estudiar la tasa de exposición, son las islas de Gran Canaria y Tenerife las que presentan las mayores concentraciones de radioisótopos naturales, ya que en estas islas encontramos zonas extensas en las que abundan las rocas ácidas de tipo fonolítico (en Las Cañadas en Tenerife y en la zona SO en Gran Canaria) en las que la proporción de elementos traza radiogénicos es mayor, como ya se ha discutido

extensamente en esta memoria. La Isla de Lanzarote es la que presenta los mínimos de concentración de ²²⁶Ra y ²³²Th seguida de la Isla de El Hierro, debido a que, en ambas islas, predominan en superficie los basaltos procedentes del vulcanismo subaéreo reciente, en Lanzarote debido a su etapa de rejuvenecimiento tardío (es una isla en proceso de desmantelamiento) y en El Hierro debido a su "juventud" geológica (es una isla en proceso de construcción). En lo que se refiere al ⁴⁰K, las concentraciones menores aparecen en las tres Islas más Occidentales, aunque puede haber un sesgo debido a que en estas islas el número de medidas con el que se cuenta es mucho menor que en las orientales o Tenerife. Esto puede provocar que la concentración de ⁴⁰K, esté subestimada tal y como se indicó en el apartado 3.4.4. El comportamiento descrito, se puede observar de forma gráfica en la figura 4.27-b en la que se han calculado las variaciones porcentuales de las medias geométricas de las concentraciones de los distintos radioisótopos de cada isla, respecto a la media geométrica del archipiélago.



Figura 4.27-b. Diferencia relativa porcentual respecto a la media regional de las concentraciones medias de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de las islas principales del Archipiélago Canario.

En esta figura se refleja claramente cómo las islas de Gran Canaria y Tenerife las que presentan la mayor riqueza radiológica, con concentraciones de radioisótopos por encima de la media de la región. El resto de las islas presentan concentraciones de ²²⁶Ra y ²³²Th entre un 20 y un 40% inferiores a la media como corresponde su historia geológica. La concentración media de ⁴⁰K es cercana a la media del archipiélago en las tres islas más cercanas a África y muy inferior en las tres islas más externas puede deberse, como se ha dicho, a discrepancias en los promedios realizados debido al reducido número de muestras disponible de La Gomera, La Palma y el Hierro.

4.5.5 Comparación con los valores de MARNA

Para evaluar de forma cuantitativa la importancia relativa de los niveles de concentración de radioisótopos respecto al resto de regiones de España, en la tabla 4.9 se muestran los valores de concentración media de actividad de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K y su rangos de variación, para todas las autonomías de España salvo Ceuta. También se proporciona el número de medidas utilizadas para hacer la media. Los datos se han obtenido del Proyecto MARNA del CSN (CSN, 1998),(Suárez Mahou et al., 2000) y se calcularon a partir de los datos recogidos de una campaña de medidas llevada en el periodo 1989-1992 para determinar las concentraciones de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K en España. En dicha campaña, se recogieron muestras de 952 lugares a lo largo del país y en cada uno se recogieron cinco muestras en una superficies de 1.000 m² a una profundidad de 5 cm que posteriormente se mezclaron para su medida por espectrometría gamma de alta resolución (Quindós et al., 1994).

Tabla 4.9.	Concentraciones	madias	de	actividad	en	las	diferentes	autonomías	españolas
	(Suárez Mahou ar	nd Ferná	ndez	z Amigot, 1	996))			

C. Autónomo	Número	[²²⁶ Ra]	Bqkg⁻¹	[²³² Th]	Bqkg ⁻¹	[⁴⁰ K]	Bqkg ⁻¹
C. Autonoma	medidas	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
Andalucía	126	29,0	8-82	30,0	5-79	426	46-1660
Aragón	44	35,8	48-72	34,7	16-77	485	141-1120
Asturias	17	43,7	20-167	44,5	21-81	410	64-800
Baleares	11	34,5	23-70	31,2	10-58	367	153-600
Canarias	473	28,8	5-143	34,4	2-280	405	13-1795
Cantabria	94	44,3	10-141	45,8	8-87	565	107-1560
Castilla-La Mancha	119	29,4	9-65	42,4	9-108	526	93-1390
Castilla y León	144	38,8	9-300	41,4	8-128	674	87-1710
Cataluña	45	39,5	13,138	38,4	7-96	598	33-1200
Extremadura	73	49,5	11-240	56,8	9-258	712	118-1840
Galicia	71	93,9	18-310	68,4	10-215	999	280-2040
Madrid	37	48,6	12-158	57,7	7-139	1113	113-1720
Murcia	16	31,5	18-63	24,6	11-45	424	240-700
Melilla	22	21,5	10-56	24,1	4-73	292	64-671
Navarra	15	33,5	19-80	28,6	16-39	410	230-670
La Rioja	12	42,2	16-69	50,4	27-85	653	360-1060
País Vasco	45	45,1	9-93	46,5	8-92	516	31-1380
Valencia	32	28,1	8-61	29,4	10-66	382	78-910
España	1396	38,9	5-310	40,6	2-280	572	13-2040

Las concentraciones medias de Canarias han sido determinadas ponderando las medias geométricas insulares de la tabla 4.8. Los datos de la Ciudad Autónoma de Melilla han sido obtenidos por nuestro grupo de investigación siguiendo la misma metodología de recogida de muestras y análisis por espectrometría gamma explicada en este capítulo (Rubiano et al., 2011) (Rubiano et al., 2012). Dado que se han incluido nuevos valores para las Islas Canarias respecto a los presentados en MARNA (en el informe sólo hay datos de Tenerife) y que se ha incluido Melilla. ha sido necesario recalcular la media de España. En el trabajo original de MARNA el número de muestras tomado en cada región era proporcional a la superficie de la misma, evidentemente, los datos de la Islas Canarias y Melilla no cumplen esta regla y no se puede ponderar la media nacional utilizando el número de muestras. Por esto, para determinarla, se ha empleado un promedio ponderado por la superficie relativa de cada autonomía respecto a la superficie total de España, análogo a de la ecuación 4.2. Dada la reducida superficie relativa de las Islas Canarias y de Melilla (no llegan al 1,5% del total) los valores medios se mantienen; disminuyendo sólo ligeramente, la concentración media de ⁴⁰K, que pasa de 578 Bq/kg a 572 Bq/kg. También se ha estudiado la distribución de los datos de la tabla 4.9 aplicando el test de normalidad de Anderson-Darling y analizando su ajuste a una distribución de tipo log normal. Se constata que los datos siguen una distribución de este tipo, como queda reflejado en las figuras 4.28 a 4.30 en las que se muestran los datos de los tres radioisótopos estudiados, sobre las gráficas de probabilidad de dicha distribución. Todos los datos (salvo el correspondiente al ²²⁶Ra de Galicia) se encuentran dentro de los límites de tolerancia del 95% de confianza.





Figura 4.28 Pruebas de ajuste a una distribución lognormal de las concentraciones de actividad de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de 18 autonomías de España.

Como se constata en la tabla 4.9 Canarias, pese a su acusada diferencia geológica con el territorio peninsular, presenta valores medios cercanos a regiones como Andalucía, Baleares (sólo se incluyen datos de Mallorca) o Murcia que son regiones consideradas de bajo perfil radiológico en MARNA. Sin embargo si analizamos el rango de variación de las concentraciones, encontramos valores máximos para los tres radioisótopos cercanos a regiones como Madrid, Extremadura o Castilla y León consideradas zonas con un comportamiento radiológico alto. En Fuerteventura se han encontrado máximos de ²³²Th que superan la media en un factor 6 y de ²²⁶Ra en un factor 4, localizado en la zona del Complejo Basal. Por otra parte, en Canarias se encuentran, además, los mínimos de concentración en todos los casos, lo que puede deberse a que se han tomado muestras en zonas costeras arenosas, que en especial en Fuerteventura, ocupan extensiones relativamente grandes. Así el espectro de variabilidad radiológica de las islas es extraordinariamente grande como corresponde a su compleja naturaleza geológica. Para analizar esta variabilidad, en la figura 4.28 se han calculado las desviaciones porcentuales de las medias de las concentraciones de los distintos radioisótopos de cada una de las islas Canarias, respecto a la media de España. También se ha calculado lo mismo para el resto de las autonomías (excepto Canarias globalmente que ya se ha comparado en el apartado anterior).





Todas las islas, salvo Tenerife y Gran Canaria, presentan valores muy por debajo de la media debido a la naturaleza eminentemente basáltica de sus suelos. Gran Canaria tiene unos valores medios de concentración de actividad de ²²⁶Ra y ⁴⁰K muy cercanos a la media y mientras

que de los de ²³²Th son un 25% superior. Tenerife es la Isla que presenta mayores desviaciones respecto a la media nacional en las concentraciones de los tres radioisótopos con un comportamiento similar a La Rioja. Cabe destacar que estas dos islas presentan una concentración media de ²³²Th entre las 6 primeras de España.

4.5.6 Comparación con estudios internacionales.

Para finalizar con el estudio de las concentraciones de radioisótopos naturales en Canarias realizaremos una comparativa con los resultados obtenidos investigaciones llevadas a cabo otras zonas del planeta recopilados de la literatura. Para ello, se ha realizado una extensa búsqueda bibliográfica analizando las metodologías empleadas, la instrumentación y los procedimientos de análisis con el fin de recopilar sólo datos que fuesen comparables con los obtenidos en este trabajo de Tesis Doctoral. Así, en los casos presentados, la metodología de planificación de campañas, recogida y tratamiento de muestras es similar a la explicada en este capítulo. La determinación de las concentraciones de radioisótopos se ha llevado a cabo, fundamentalmente, mediante espectrometría gamma de alta resolución utilizando, en su mayoría, equipo de la marca CANBERRA u ORTEC con diverso grado de eficiencia, utilizando procedimientos similares de análisis de las líneas espectrales para la obtención de las concentraciones en su mayoría son empíricas utilizando fuentes patrón certificadas o referenciadas.

El resultado de esta revisión se recopila en la tabla 4.10 se muestran las concentraciones de actividad de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K, en cincuenta países del mundo. La fuente principal ha sido el informe UNSCEAR-2000 pero también se dispone de numerosas referencias de revistas especializadas. En la última columna se indica la fuente bibliográfica, de forma que, un país puede aparecer repetido, si se han encontrado varias fuentes diferentes sobre el mismo. En los casos de Méjico y Bélgica las fuentes consultadas no proporcionaban la concentración media de ⁴⁰K. Tampoco se dispone de la concentración de ²³²Th en el caso de Chipre. Al final de la tabla se recogen los valores medios para España según tres fuentes (MARNA; UNSCEAR y este trabajo) y la media mundial según UNSCEAR. Con el fin de poder comparar con los resultados obtenidos para las Islas Canarias Orientales, y para facilitar el análisis, se resumen sus datos al final de la tabla tabla indicando las medias geométricas insulares y la provincial.

La concentración de ²²⁶Ra varía entre 16 y 339 Bq/kg correspondientes, respectivamente, a Lituania y Libia, este último valor es, claramente un "*outlier*" ya que supera en un factor 3 al siguiente de 116 Bq/kg (Egipto) y en un factor 10 a la media mundial. El rango de variación de la concentración de ²³²Th está comprendido en el rango 11 – 89 Bq/kg (Costa Rica y Australia), no habiendo en este caso "*outliers*" en la distribución de valores. La concentración de ⁴⁰K tiene sus límites de variación en el intervalo 140-1224 Bq/kg, obtenidos en Chipre y Libia.

País	[²²⁶ Ra] Bqkg ⁻¹	[²³² Th] Bqkg ⁻¹	[⁴⁰ K] Bqkg ⁻¹	Referencia
Albania	23	24	360	(UNSCEAR, 2000)
Alemania	59	67	670	(Eisenbud, 1987)
Argelia	23	18	310	(Amrani and Tahtat, 2001)
Armenia	51	30	360	(UNSCEAR, 2000)
Austria	38	45	635	(Sorantin and Steger, 1984)
Australia	41	89	681	(Beretka and Matthew, 1985)
Bangladesh	109	58	234	(Mollah et al., 1986)
Bélgica	40	33		(Poffijn et al., 1985)
Bélgica	26	27	380	(UNSCEAR, 2000)
Brasil	52	65	747	(Malanca et al., 1993)
Bulgaria	45	30	400	(UNSCEAR, 2000)
Canadá	37	49	800	(Zikovsky and Kennedy, 1992)
China	59	50	714	(Xinwei, 2005)
Chipre	17		140	(UNSCEAR, 2000)
Costa Rica	46	11	140	(UNSCEAR, 2000)
Croacia	54	45	490	(UNSCEAR, 2000)
Dinamarca	35	27	460	(UNSCEAR, 2000)
Egipto	116	64	480	(Ahmed, 2005)
Eslovaquia	32	38	520	(UNSCEAR, 2000)
Eslovenia	48	74	690	(Kovács et al., 2013)
EEUU	40	35	370	(UNSCEAR, 2000)
Estonia	35	27	510	(UNSCEAR, 2000)
Finlandia	80	62	986	(Mustonen, 1984)
Grecia	49	24	670	(C et al., 1984)
Holanda	39	41	560	(Ackers et al., 1985a)
Hungría	27	30	339	(Szabó et al., 2013)
India	45	60	217	(Dhawal et al., 2013)
India	51	69	589	(Zubair et al., 2013)
India	28	51	569	(Badhan and Mehra, 2012)
Irán	28	22	640	(UNSCEAR, 2000)
Irlanda	32	18	353	(Lee et al., 2004)
Irlanda	60	26	350	(UNSCEAR, 2000)
Italia	47	50	694	(Sciocchetti et al., 1984)

Tabla 4.10. Concentración de actividad de radionúclidos en diferentes países del mundo.

País	[²²⁶ Ra] Bqkg ⁻¹	[²³² Th] Bqkg ⁻¹	[⁴⁰ K] Bqkg ⁻¹	Referencia
Japón	33	28	310	(UNSCEAR, 2000)
Jordania	41	58	500	(Sharaf and Hamideen, 2013)
Libia	339	73	1224	(Tereesh et al., 2013)
Lituania	16	25	600	(UNSCEAR, 2000)
Luxemburgo	35	50	620	(UNSCEAR, 2000)
Malasia	37	53	293	(Saleh et al., 2013)
Malasia	67	82	310	(UNSCEAR, 2000)
Méjico	16	23		(Espinosa et al., 1986)
Nigeria	16	35	253	(Farai and Ademola, 2005)
Noruega	50	45	850	(UNSCEAR, 2000)
Pakistán	45	62	693	(Tufail and Hamid, 2007)
Pakistán	56	58	743	(Ali et al., 2013)
Polonia	35	50	573	(Niewiadomski et al., 1985)
Polonia	26	21	410	(UNSCEAR, 2000)
Portugal	44	51	840	(UNSCEAR, 2000)
Rumanía	32	38	490	(UNSCEAR, 2000)
Rusia	27	30	520	(UNSCEAR, 2000)
Siria	20	20	270	(UNSCEAR, 2000)
Suecia	42	42	780	(UNSCEAR, 2000)
Suiza	40	25	370	(UNSCEAR, 2000)
Sri Lanka	72	35	583	(Hewamanna et al., 2001)
Tailandia	48	51	230	(UNSCEAR, 2000)
Turquía	19	27	460	(Eroğlu and Kabadayi, 2013)
Turquía	25	26	435	(Akkaya et al., 2012)
España	39	41	578	(Quindós et al., 1994)
España	32	33	470	(UNSCEAR, 2000)
España	39	41	572	Este trabajo
Mundo	35	30	400	(UNSCEAR, 2000)
Gran Canaria	33,88	43,96	421,32	Este trabajo
Fuerteventura	20,4	20,59	376,2	Este trabajo
Lanzarote	18,82	17,51	332,4	Este trabajo
Las Palmas	25,2	28,9	384	Este trabajo

De forma similar a lo realizado en el apartado anterior al estudiar los datos nacionales, se ha analizado la distribución de los datos de concentración media de actividad de los datos mundiales de la tabla 4.10 aplicándoles el test de normalidad de Anderson-Darling y estudiando su ajuste a una distribución de tipo log normal. De nuevo los datos siguen claramente una distribución de tipo lognormal, como queda reflejado en la figura 4.30 en las que se muestran simultáneamente los datos y las gráficas de probabilidad para una distribución de este tipo para los tres radioisótopos estudiados. Todos los datos se encuentran dentro de los límites de tolerancia del 95% de confianza.





Figura 4.30 Pruebas de ajuste a una distribución lognormal de las concentraciones de actividad de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de 50 países.

Para visualizar la posición relativa de cada país respecto de los valores mundiales, se han calculado las variaciones porcentuales de las medias de las concentraciones de los distintos radioisótopos de cada uno respecto a la media mundial indicada en el informe UNSCEAR 2000. También se ha hecho lo mismo para las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. En las figuras 4.31 a 4.33 se muestran estos resultados agrupados por continente para facilitar su visualización. Para permitir su comparación, en cada gráfica, separadas por una línea discontinua, se muestran los valores correspondientes a las Islas Canarias Orientales.

La región de la que se dispone del mayor número de datos es Europa con de la que se han recopilado datos de 26 países. Cabe destacar que España presenta sólo valores de ²³²Th y ⁴⁰K ligeramente superiores a la media, pero no se encuentra entre los países con mayores concentraciones. En lo que se refiere a las Islas Canaria Orientales, la isla de Lanzarote presenta el segundo perfil más bajo de concentración de radioisótopos, con concentraciones de ²²⁶Ra y ²³²Th inferiores en más de un 40% a la media mundial y de ⁴⁰K un 20% inferior. Fuerteventura tiene un comportamiento análogo, si bien la concentración de ⁴⁰K es ligeramente superior a la media. Gran Canaria, como ya se ha constatado, supera la media mundial de concentración de ²³²Th en un 50% y de ⁴⁰K en un 12%. Globalmente la provincia de Las Palmas tiene unos valores de concentración de radioisótopos inferiores a la media mundial.







Figura 4.32 Concentración de radionúclidos en diferentes países de África y América. Comparación con las Islas Canarias Orientales.




Se puede concluir que las Islas Canarias Orientales presentan un comportamiento radiológico bajo en comparación con los valores mundiales encontrándose los valores medios de concentración de actividad e ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K en el segundo cuartil de las distribuciones de datos mundiales estudiados.

4.6. Estudio de la distribución de ¹³⁷Cs en las Islas Canarias Orientales

En los análisis radioisotópicos de suelos llevados a cabo se ha estudiado también la presencia del isótopo artificial ¹³⁷Cs mediante el análisis de su emisión gamma de 661,7 keV (sección 4.4). Como se explicó en el capítulo1, este radioisótopo ha sido generado, principalmente, en las pruebas de armamento nuclear llevadas a cabo en la segunda mitad del siglo XX (UNSCEAR, 1982) y los accidentes de las Centrales Nucleares de Chernobyl (UNSCEAR, 1988) y Fukushima (UNSCEAR, 2013). La distribución global del ¹³⁷Cs está controlada tanto por las inyecciones estratosféricas del isótopo, como por los patrones de circulación atmosférica. El ¹³⁷Cs inyectado a la estratosfera desciende a la troposfera principalmente en las latitudes medias y polares y posteriormente, precipita, en forma húmeda y seca, sobre la superficie terrestre (el denominado "fallout"). La deposición de ¹³⁷Cs no ha sido contante en el tiempo de forma que los niveles de cesio procedentes de las pruebas de armas nucleares en los años 50 y 60 han disminuido gradualmente a medida que el radionúclido (que tiene una vida media de 30 años) ha decaído. En la figura 4.41 se muestra una estimación hecha por UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) a partir de un modelo de transporte atmosférico de la deposición superficial de ¹³⁷Cs debido, exclusivamente, a productos de fisión procedentes de pruebas de armamento nuclear, en los hemisférios norte y sur y se comprueba como, efectivamente, disminuye de forma constante en el tiempo. Es importante señalar que para la latitud de las islas Canarias el modelo predice la mitad de deposición que para el sur y centro de Europa. Esta deposición continua conocida, permite utilizar este radiioisótopo como trazador de procesos ambientales. Así, la cantidad total de ¹³⁷Cs existente en el perfil completo de un punto de terreno se utiliza para calcular la erosión en los últimos 50 años de las capas superficiales.





El accidente de Chernobyl supuso la introducción de un importante pico de ¹³⁷Cs en 1986 aunque que tuvo su principal impacto en Europa Central tal y como se muestra en la figura 4.35. En los años posteriores al accidente se llevaron a cabo numerosos estudios para evaluar su impacto en diversos países (Smith et al., 1997), (Isaksson et al., 2000), (Dubois and Bossew, 2003); (De Cort, 1998). Si bien la influencia del accidente ha sido detectada en la península ibérica, Legarda y colaboradores en un detallado trabajo publicado en 2011 (Legarda et al., 2011), y dedicado al estudio del inventario y migración vertical de ¹³⁷Cs en suelos de la España continental, constatan que la influencia de Chernobyl en la concentración de cesio peninsular es despreciable frente al procedente del fallout de las pruebas nucleares. Esto nos lleva a formular la hipótesis de que tampoco tendrá relevancia en las Islas Canarias Orientales debido a su mayor lejanía y pequeña superficie.

El accidente de la central nuclear japonesa de Fukushima en 2011 a causa de la acción conjunta de un terremoto y un tsunami, también ha supuesto una inyección de ¹³⁷Cs en la atmósfera, aunque de un orden de magnitud inferior al de Chernobyl según las estimaciones actuales (UNSCEAR, 2013), (Steinhauser et al., 2014). En España se han publicado trabajos sobre un leve aumento de la concentración de ¹³⁷Cs en el sur de la península Ibérica (Lozano et al., 2011) y en la isla de Tenerife (López-Pérez et al., 2013).



Figura 4.35 Deposición superficial de ¹³⁷Cs en Europa debido al accidente de Chernobyl. Extraido de (De Cort, 1998).

En los muestreos llevados a cabo en Islas Canarias Orientales se ha detectado la presencia de ¹³⁷Cs en la mayoría de los puntos estudiados. En el Apéndice 7 se muestran los datos completos de concentración de actividad de ¹³⁷Cs y en las figuras 4.36 a 4.38 se proporcionan los indicadores estadísticos de dichos datos. Todas las distribuciones presentan asimetría positiva, siendo Gran Canaria la isla que presenta el valor máximo (4,3) y Lanzarote el mínimo (0,95). El análisis de la kurtosis muestra que las distribuciones de Gran Canaria y Fuerteventura son leptocúrticas mientras que la de Lanzarote es platicúrtica. En las figuras, 4.36 a 4.38 también se muestran los resultados del test de normalidad de Anderson-Darling y su ajuste a una distribución de tipo log normal. Los datos de las tres islas se ajustan claramente a este tipo de distribución, como queda reflejado en las figuras en las que todos los datos son similares (4,80 Bq/kg, Gran Canaria, 4,05 Bq/kg, Fuerteventura y 4,77 Bq/kg, Lanzarote). Cabe destacar un valor anómalamente alto en Gran Canaria de 99 Bq/kg siendo los de Fuerteventura y Lanzarote mucho más moderados. (28,76 Bq/kg y 17,05 Bq/kg) lo que nos indica que el valor de Gran Canaria puede deberse a acumulación de ¹³⁷Cs procedente de otras zonas.













La deposición del ¹³⁷Cs en el suelo no es uniforme y numerosos autores han demostrado que las variaciones en la deposición están estrechamente relacionadas con la precipitación (Arnalds et al., 1989);(Mitchell et al., 1990);(Blagoeva and Zikovsky, 1995);(Isaksson et al., 2001). El transporte de cesio en el suelo, una vez que se deposita, se ve afectado por muchos factores específicos del sitio, incluyendo el tipo de suelo, la precipitación, el drenaje, el terreno, la vegetación, las actividades y las condiciones locales (Eisenbud 1987), (Monna et al., 2009). Además, las condiciones meteorológicas locales pueden tener un impacto significativo sobre la deposición de precipitación y de transporte en una zona determinada. Con el fin de estudiar la influencia del "fallout" de ¹³⁷Cs en los suelos de las Islas Canarias Orientales, se ha analizado su distribución espacial. En la figura 4.39 se muestran los mapas de concentración de ¹³⁷Cs de dichas islas y de la Isla de Tenerife elaborado a partir de los datos de Aldecoa et al. Para el cálculo de las isolíneas se ha utilizado la técnica de interpolación de Kriging ya explicada en el capítulo 3.



Figura 4.39 Mapas de concentración de ¹³⁷Cs de la Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y Tenerife.

En los suelos, las concentraciones medidas se encuentran dentro un rango relativamente bajo de ¹³⁷Cs respecto a los valores publicados en la literatura (IAEA, 1987) (Radiation, 2000), (Lechmann, 1991). En general, se observa un patrón característico, con las concentraciones más altas en los lados de barlovento que, por otra parte, son los más lluviosos de las islas lo que es coherente con la literatura en la que se demuestra una alta correlación entre la concentración de ¹³⁷Cs y las precipitaciones en forma de lluvia. Este comportamiento es similar al observado en las islas de Hawaii, (que presentan unas características geológicas similares a Canarias por ser también islas volcánicas intraplaca) (Cox and Fankhauser, 1984). En la figura 4.40 mostramos los mapas de precipitación media de las Islas Canarias Orientales y de Tenerife con el fin de tener un marco de comparación cualitativo de la relación entre la precipitación y la deposición de ¹³⁷Cs.



Figura 4.40 Mapas de precipitación media de las islas canarias orientales y Tenerife. Extraído del atlas climático de los archipiélagos de canarias, madeira y azores temperatura del aire y precipitación (1971-2000) elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología de España y el Instituto de Meteorología de Portugal Comparando las figuras 4.39 y 4.40 se puede observar la alta coincidencia entre las zonas de mayor pluviometría y las zonas de mayor concentración de ¹³⁷Cs, en especial en Gran Canaria y en Tenerife. La mayor pluviometría de Tenerife puede explicar la presencia de valores mayores de concentración, aunque es importante puntualizar que, al comparar los datos de Tenerife con los de las Islas Orientales, hay que tener en cuenta que las primeras se realizaron unos quince años antes (a principios de los noventa) cuando la deposición de ¹³⁷Cs era más intensa, tal y como como se indica en la figura 4.34, lo que también puede explicar, en parte, la presencia de máximos más acusados en Tenerife. El máximo que aparece en el sur de Gran Canaria no se corresponde con el régimen de lluvias y debe ser investigado en más detalle, aunque no se puede descartar que sea debido al transporte antropogénico o por escorrentía de material desde otras zonas de la isla.

En las islas de Fuerteventura y Lanzarote el patrón es menos claro, por presentar un clima desértico con una pluviometría nula en comparación con Gran Canaria y Tenerife. Se puede apreciar en los mapas, que los máximos de concentración siguen un patrón Norte-Sur alineados con los vientos dominantes y se concentran en las llanuras interiores y en las zonas con menos actividad antropogénica y menos erosionadas. Esta distribución puede estar relacionada con el transporte de polvo sahariano desde el continente africano durante los episodios atmosféricos característicos de las Islas denominados Calima, que estudios publicados recientemente, relacionan con el ¹³⁷Cs en las Islas Canarias (Chu et al., 1989). Una de las líneas que deja abiertas este trabajo de Tesis Doctoral es el estudio del transporte de ¹³⁷Cs en las Islas Canarias, para lo que se están recogiendo muestras de polvo atmosféricos durante los episodios de calima. Es de destacar la estructura de máximos de concentración que se aprecia en la zona del Parque Nacional de Timanfaya en Lanzarote que, debido a su protección de Parque Nacional, permite encontrar suelos sin alteración y con poca erosión, ya que el régimen de lluvias de Lanzarote es muy escaso y, además, el parque se encuentra en una gran llanura salpicada de pequeños conos volcánicos.

El estudio detallado de la dinámica del ¹³⁷Cs requiere realizar muestreos con extracción de núcleos de suelo a profundidades de al menos 50 cm para realiza un análisis pormenorizado del perfil vertical de concentraciones de ¹³⁷Cs. En efecto, la mayor parte ¹³⁷Cs que se deposita sobre el terreno es absorbido por intercambio iónico sobre las partículas del suelo. Este proceso hace que se fije principalmente sobre las partículas del suelo que poseen un tamaño menor, aunque en conjunto presenten una superficie específica mayor, quedando distribuido en los primeros centímetros en suelos arcillosos o que contengan materia orgánica abundante. En cambio, en suelos arenosos el ¹³⁷Cs penetra hasta profundidades mayores, ligado a la fracción coloidal y en suspensión en el agua (Soto et al., 2002).

Esta técnica permite, además, obtener el denominado inventario de ¹³⁷Cs sumando la actividad por unidad de área de los distintos cortes en lo que se divide el núcleo analizado que es

la magnitud que suele estudiarse. Este tipo de estudio no constituía uno de los objetivos de este trabajo de tesis doctoral y, por tanto, las campañas de toma de muestras no fueron diseñadas para ello. Como se ha indicado, en los análisis llevados a cabo se ha determinado únicamente la concentración de actividad en la capa superficial de 5 cm de forma que no se dispone de la información suficiente para un análisis cuantitativo ya que el perfil de ¹³⁷Cs en suelos. No obstante, con el fin de realizar una comparación cualitativa con datos de inventario de ¹³⁷Cs de la España peninsular obtenidos por (Legarda et al., 2011), se ha realizado una estimación del mismo a partir de las medidas de concentración, suponiendo tres posibles escenarios de distribución en profundidad, basados en los perfiles experimentales determinados en estudios realizados por diversos autores (Schuller et al., 2002), (Sanchez-Cabeza et al., 2007) (Soto and Navas, 2008) para ello se ha empleado la siguiente expresión:

Inventario de ¹³⁷Cs
$$\left(\frac{Bq}{m^2}\right) = \frac{\rho_{suelo} 10h}{f(h)} \left[{}^{137}Cs\left(\frac{Bq}{kg}\right) \right],$$
 [4.3]

donde ρ_{suelo} es la densidad de la muestra que, en este cálculo aproximado, se ha supuesto constante para todas ellas utilizando un valor promedios 1,2 g/cm³ y h es la profundidad en cm, que se ha fijado en 5 cm de acuerdo al procedimiento adoptado en los muestreos. El factor *f*(*h*) es un factor adimensional que permite modelar distintos escenarios para la distribución de ¹³⁷Cs en el suelo. En el cálculo se han tomado los valores 0,8, 0,6 y 0,4 para *f*(*h*) lo que corresponde a suponer que la concentración de ¹³⁷Cs en los primeros 5 cm (que es el valor del numerador en la expresión 4.3) es del 80%, 60% y 40% respectivamente. El factor 10 se introduce por coherencia en las unidades. A partir de los datos de inventario se ha elaborado los mapas de distribución correspondientes que mostramos en las figuras 4.41 y 4.42.

Los escenarios elegidos intentan barrer tres comportamientos posibles de la dinámica del ¹³⁷Cs en suelos que, como se ha indicado, es muy compleja y depende de multitud de parámetros (presencia de materia orgánica, porosidad, tipo de grano, humedad, presencia de arcillas, etc...). Así el supuesto del 80% modela suelos poco permeables al ¹³⁷Cs de forma que la mayor parte se concentra en la capa superficial de 5 cm, y proporciona un mapa con un inventario de cesio pobre en relación con el de la península. Este modelo puede ser adecuado para Canarias, ya que los suelos de la región están muy poco desarrollados y, por tanto, tienen poco espesor. Además debido a su latitud, según las estimaciones de UNSCEAR, las islas Canarias están sometidas a una menor deposición de ¹³⁷Cs tal y como se muestra en la figura 4.34 lo que refuerza la verosimilitud de los valores obtenidos. Las estimaciones del 60% y el 40% son más congruentes con estudios internacionales ya que en los mismos se suele informar sobre una retención entorno al 50% en los primeros 5 cm de suelos, de forma que son escenarios más acordes con la dinámica habitual del ¹³⁷Cs en algunos suelos. En este caso se obtienen mapas de distribución de inventarios más cercanos al de la península. Respecto la distribución espacial, en la península ibérica también se observa que en las zonas más lluviosas del norte se localizan los valores máximos de inventario.





Para finalizar este el estudio de ¹³⁷Cs, realizaremos una comparación cualitativa con la distribución de otro trazador ambiental de origen natural, el ²¹⁰Pb. Este radioisótopo es un producto de decaimiento de la serie del ²³⁸U con una vida media de 22,3 años. Se puede detectar midiendo su emisión gamma de 46,5 keV y se encuentra, de forma natural, distribuido en rocas y suelo de la corteza terrestre.

El ²¹⁰Pb procede del ²²⁶Ra que, como se ha explicado en el capítulo 1, se desintegra para generar el ²²²Rn que, con una vida media de 3.83 días, se difunde a la atmósfera de forma continua. Uno de los descendientes del ²²²Rn es el ²¹⁰Pb por lo que también se encuentra en la atmósfera de forma natural. Así, existen entonces dos contribuciones diferentes relacionadas con la actividad de ²¹⁰Pb presente en las muestras de suelo superficial. La primera tiene su origen en la concentración en el suelo de los radioisótopos precursores del ²¹⁰Pb (²²⁶Ra) y se considera que



el ²¹⁰Pb generado por esta vía está en equilibrio con el ²²⁶Ra del que procede. La concentración de ²¹⁰Pb de esta procedencia suele denominarse, ²¹⁰Pb soportado.

Figura 4.42 Inventario de ¹³⁷Cs de la Isla de Fuerteventura u Lanzarote suponiendo que en la capa superficial de 5 cm se retiene el 80% (a), el 60%, (b) y el 40% (c).

La segunda contribución al ²¹⁰Pb en suelos, es de origen atmosférico como resultado de la desintegración del ²²²Rn difundido a la atmósfera. La posterior incorporación a los suelos de este último mediante deposición seca o precipitación húmeda, produce un "exceso" de este radioisótopo en relación a la concentración de actividad del ²²⁶Ra presente en el suelo por lo que el ²¹⁰Pb de este origen, se conoce como ²¹⁰Pb no soportado o ²¹⁰Pb en exceso. Como consecuencia de su origen atmosférico, este plomo en exceso, tiene una dinámica similar al ¹³⁷Cs, por lo que también es muy utilizado como radiotrazador natural de procesos erosivos entre otros (Smith et al., 1997) (Huh and Su, 2004) (Sanchez-Cabeza et al., 2007) (Sanchez-Cabeza et al., 2012).

El ²¹⁰Pb en exceso se determina restando la concentración de ²²⁶Ra a la concentración de ²¹⁰Pb total en cada muestra, lo que implica suponer el equilibrio secular entre el plomo soportado y el radio. Para cada muestra se ha medido el ²¹⁰Pb total por espectrometría gamma de alta resolución utilizando la línea de 46.5 keV. Debido a su baja energía, la medida de la concentración de actividad de ²¹⁰Pb por espectrometría gamma tiene muchas incertidumbres a causa de los efectos de autoabsorción, y se recomienda que sea medida por espectrometría alfa (Sanchez-Cabeza et al., 2012). Una medida detallada por espectrometría gamma requiere de un conocimiento muy preciso de la composición química de la muestra para poder incluir los efectos de autoabsorción en el proceso de calibración en eficiencia. Dado que es estudio del ²¹⁰Pb no era uno de los objetivos de este trabajo de Tesis Doctoral, la determinación del mismo se ha llevado a cabo utilizando una calibración estándar, por lo que los datos obtenidos se deben considerar más bien orientativos. En futuros desarrollos se elaborará un protocolo de calibración específico para radioisótopos de baja energía.



Figura 4.43 Mapas de ²¹⁰Pb en exceso y ¹³⁷Cs de la Isla de Gran Canaria.

A modo de ilustración de los comportamientos, en la figura 4.43, se presentan los mapas de ²¹⁰Pb en exceso y ¹³⁷Cs de la Isla de Gran Canaria. Como cabe esperar, según los antecedentes explicados, existe una gran semejanza entre la distribución espacial de ¹³⁷Cs y

²¹⁰Pb, encontrándose los máximos de ambas distribuciones en las zonas de mayor pluviometría siguiendo un patrón Norte-Sur alineado con los vientos dominantes.

4.7. Comparación de distintos modelos dosimétricos

La caracterización radiológica de los suelos tiene múltiples aplicaciones entre las que pueden destacarse, la evaluación de las concentraciones del suelo con respecto a los niveles de fondo naturales, las acciones de control reglamentario, la estimación del potencial de transporte ambiental hacia el hombre, o el estudio de la magnitud y el alcance de la deposición por trasporte, sobre todo la de emisiones a larga distancia (Quindos et al., 2004). Hay dos efectos radiológicos principales, derivados de la radiactividad en los suelos, que justifican el interés de su medición. La primera es la irradiación interna del pulmón por los emisores alfa, productos de desintegración de vida corta del ²²²Rn y ²²⁰Rn. El segundo, es la irradiación externa del cuerpo por rayos gamma emitidos desde los radionúclidos en situ. En la tabla 4.11 se proporcionan las tasas de exposición por irradiación externa debidas a cada serie radiactiva natural en función del tipo de rocas preponderante en el terreno. En el caso de la irradiación externa, con el fin de conocer el nivel de radiación gamma ambiental a partir de la composición geológica del terreno y poder predecir sus posibles valores a partir de las concentraciones de materiales radiactivos presentes, numerosos autores han desarrollado expresiones matemáticas para calcular la tase de dosis absorbida en aire en función de las concentraciones de los radionúclidos emisores gamma más significativos presentes en el terreno. Estas relaciones permiten evaluar de forma rápida las posibles contribuciones de origen no natural a los niveles de radiación ambiental.

Rocas	Potasio		Torio		Uranio		Tasa de exposición
	%	µRh⁻¹	%	µRh⁻¹	%	µRh⁻¹	Total µRh ⁻¹
Basálticas							
Valor medio	0,8	1,2	4,0	1,2	1,0	0,6	3,0
Rango	0,2-2,0	0,3-3,0	0,5-10	0,1-3,0	0,2-74,0	0,0-2,4	0,5-8,5
Graníticas							
Valor medio	3,0	4,5	12,0	3,6	3,0	1,9	10,0
Rango	2,0-6,0	3-9	1,0-25	0,3-7,7	1,0-7,0	0,6-4,5	4,0-21
Arcillosas							
Valor medio	2,7	4,1	12,0	3,6	3,7	2,3	10,0
Rango	1,6-4,2	2,5-6,4	8,0-18,0	2,4-5,4	1,5-5,5	1,0-3,5	6-15
Areniscas							
Valor medio	1,1	1,7	1,7	0,5	0,5	0,3	2,5
Rango	0,7-3,8	1-5,8	0,7-2,0	0,2-0,6	0,2-0,6	0,1-0,3	1,0-7,0
Carbonatadas							
Valor medio	0,3	0,4	1,7	0,5	2,2	1,3	2,2
Rango	0,0-2,0	0,0-3,0	0,1-7,0	0,0-2,1	0,1-9,0	0,0-5,5	0,0-10,0

Tabla 4.11.	Tasa de ex	posición debida	a a rocas ígneas	s y sedimentarias	(Adams and Col	is)
-------------	------------	-----------------	------------------	-------------------	----------------	-----

La forma general de estas expresiones, que se encuentran en la literatura, es una combinación lineal de contribuciones debido a la concentración de los distintos radioisótopos presentes en el suelo. Es decir:

$$D = \sum_{i} a_{i} \left[X_{i} \right]$$

$$[4.4]$$

siendo *D* la dosis absorbida (o la dosis equivalente según el autor), [X_i] la concentración del radioisótopo *i*-ésimo considerado y *a_i* los denominados factores de conversión de tasa de dosis (DRF "Dose Rate conversion Factors") que se definen como la tasa de dosis absorbida o tasa de dosis equivalente a 1 metro de la superficie del suelo, por unidad de concentración de actividad del radionúclido considerado.

En la bibliografía se encuentran varios modelos que difieren, básicamente, en los radioisótopos considerados en la ponderación y en el valor de los factores de conversión. Así hay autores que, a partir de investigaciones llevadas en distintos países, consideran para estos cálculos los radionúclidos: ²³⁸U o ²²⁶Ra y/o ²¹⁴Pb y ²¹⁴Bi para la serie del ²³⁸U; ²²⁸Ac o ²³²Th y/o ²¹²Pb, ²¹²Bi y ²⁰⁸Tl en la serie del ²³²Th y el ⁴⁰K. Algunos autores a veces también ponderan la contribución de los radionúclidos artificiales ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs. Las distintas expresiones se diferencian unas de otras en los diferentes coeficientes que ponderan la influencia de cada uno de los radionúclidos emisores gamma. Explícitamente se trata de una expresión general del tipo:

$$\dot{H}(nSvh^{-1}) = a[K^{40}] + b[U^{238}] + c[Ra^{226}] + d[Th^{232}] + ..m[Cs^{134}] + n[^{137}Cs]$$
[4.5]
$$\dot{D}(pGyh^{-1}) = a'[K^{40}] + b'[U^{238}] + c'[^{226}Ra] + d'[^{232}Th] + ..m'[^{134}Cs] + n'[^{137}Cs]$$
[4.6]

según se trate de calcular la tasa de dosis equivalente $(nSvh^{-1})$ o bien la tasa de dosis absorbida $(pGyh^{-1})$. En el primer caso los factores de ponderación a, b, c, d,..., m y n, vienen expresados en $nSvh^{-1}(Bqkg^{-1})^{-1}$ mientras que en la segunda expresión los coeficientes a', b', c',d'....,m' y n' se expresan en $pGyh^{-1}(Bqkg^{-1})^{-1}$. Las expresiones entre corchetes, que se refieren a la actividad en Bq por kg, de cada uno de los radionúclidos, se expresan por tanto en $Bqkg^{-1}$. Dado que la actividad del ¹³⁴Cs y del ¹³⁷Cs suelen estar por debajo de la actividad mínima detectable (AMD) los coeficientes o factores de conversión que afectan a los radioisótopos del ¹³⁷Cs ("m" y "n") se consideran nulos. Con frecuencia tampoco se tienen en cuenta, los factores que ponderan elementos alternativos de una misma serie, como por ejemplo el ²³⁸U o el ²²⁶Ra ("b" o "c", respectivamente), según cuál de ellos se haya analizado en el trabajo concreto estudiado. En las tablas 4.12 y 4.13 se muestran diferentes factores de conversión obtenidos por distintos autores.

²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	Referencia
0,301	0,466	0,0295	(Beck et al., 1972)
0,35	0,51	0,033	(Eckerman and Ryman, 1993)
0,324	0,423	0,0292	(Saito and Jacob, 1995)
0,329	0,4	0,0295	(Markkanen, 1995)
0,323	0,423	0,0287	(UNSCEAR, 2000)
0,28	0,381	0,0279	(Clouvas et al., 2001)
0,318	0,408	0,03	(Quindos et al., 2004)
0,461	0,337	0,0209	(Krstic and Nikezic, 2010)

Tabla 4.12. Factores de conversión para dosis efectiva (nSv/h por Bq/kg)

Utilizando el factor de conversión (UNSCEAR, 2000) $_{0,7Sv}$ $_{Gy^{-1}}$ entre la dosis absorbida y la tasa de dosis equivalente, pueden transformarse los factores de conversión de la tabla 4.12 en factores de dosis absorbida que se muestran en la tabla 4.13. Algunos autores presentan también coeficientes para el cálculo directo de la tasa de exposición en µR/h.

²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K	Referencia
0,430	0,666	0,042	(Beck et al., 1972)
0,500	0,729	0,047	(Eckerman and Ryman, 1993)
0,463	0,604	0,042	(Saito and Jacob, 1995)
0,470	0,571	0,042	(Markkanen, 1995)
0,462	0,604	0,041	(UNSCEAR, 2000)
0,400	0,544	0,040	(Clouvas et al., 2001)
0,454	0,583	0,043	(Quindos et al., 2004)
0,659	0,481	0,030	(Krstic and Nikezic, 2010)

Tabla 4.13. Factores de conversión para dosis efectiva (nGy/h por Bq/kg)

Llegados a este punto, se puede encontrar la concordancia entre los diversos modelos teóricos con los datos experimentales medidos, con el fin de seleccionar el modelo óptimo para la tipología de suelos de las Islas Canarias Orientales. Con este fin se ha llevado a cabo un estudio comparativo de las dosis teóricas calculadas según distintos modelos y las dosis experimentales obtenidas a partir de la medida directa de la tasa de exposición con el radiómetro durante la elaboración del mapa radiométrico para MARNA. El estudio se ha realizado para los modelos de Beck et al., Saito et al., Quindós et al. Y UNSCEAR.

En el análisis realizado, se han utilizado los datos de concentración de radioisótopos de las Islas Canaria Orientales y los de tasa de exposición a un metro del suelo (\dot{R}^{Medido}) mostrados

en el Apéndice 6: Evidentemente sólo se han utilizado los datos de tasa de exposición que se corresponden con puntos en los que se ha recogido muestras de suelo. En total se han utilizado 152 puntos de muestreo para el análisis (entre las tres islas). El procedimiento de selección del modelo óptimo se ha realizado mediante análisis de la distribución de errores entre los datos experimentales de tasa dosis absorbida (obtenida de la tasa de exposición. .que es lo que se ha medido directamente, utilizando el factor de conversión 1 μ R/h =8,7 nGy) y los valores de tasa dosis absorbida calculados según los distintos modelos (\dot{D}^{Model}). Los datos calculados se corrigen, para hacerlos comparables a los datos experimentales, sumándoles la contribución debida al fondo cósmico calculada a partir de la expresión propuesta en el informe (UNSCEAR, 1993)

$$\dot{R}^{cosmico}(z) = 3,448 \left[0,21e^{-1.6z}+0,79e^{0.45z}\right]$$
 [4.7]

donde $\dot{R}^{c\acute{o}smico}(z)$ es la tasa de exposición debida al fondo cósmico, para latitudes próximas a Canarias expresada en µR/h y z la altitud expresada en kilómetros. De esta forma, la función error definida es:

$$d_{r} = \left[\frac{\dot{D}^{Model}\left(\frac{nGy}{h}\right) - \left[\dot{R}^{Medido}\left(\frac{\mu R}{h}\right) - \dot{R}^{cosmico}\left(z\right)\right] \times 8,7\left(\frac{nGy}{\mu R}\right)}{\dot{R}^{Medido}\left(\frac{\mu R}{h}\right) \times 8,7\left(\frac{nGy}{\mu R}\right)}\right]$$
[4.8]

Además de la función error a estudiar, se define también un parámetro de calidad de la distribución de errores, como la suma de errores normalizada al número de datos,

$$P_{CD} = \frac{1}{N} \sum_{i} \left| d_{r_i}(B) \right|$$
[4.9]

Evidentemente cuanto menor sea este parámetro mejor será la distribución de errores. En la figura 4.42 se muestran las distribuciones de error de los distintos modelos y los datos estadísticos de las distribuciones.

En la distribución de errores del modelo de Beck el 72% de los valores calculados están el intervalo [-0,2,+0,2] que se corresponde con valores de error inferiores al 20% y su parámetro de calidad vale P_{CD} =0,1934. El modelo de Saito, tiene un comportamiento similar con un 70% de los datos en el intervalo [-0,2, + 0,2] y un P_{CD} =0,1955. Un mejor comportamiento se obtiene con el modelo UNSCEAR que si bien incluye un 71% de los errores en el intervalo [-0,2,+0,2] tiene un parámetro de calidad P_{CD} =0,1919 lo cual indica que los errores son menores que en las dos anteriores distribuciones. Finalmente el mejor comportamiento se obtiene con los parámetros del Modelo de Quindós y colaboradores, que incluye el 86% de los datos en el intervalo [-0,2,+0,2] (y el 50% en el intervalo [-0,1,+0,1]) y tiene un parámetro de calidad P_{CD} =0,1877. Esto ha llevado a seleccionar este modelo como el más adecuado para la estimación de la dosis gamma externa a partir de las concentraciones de radioisótopos en Canarias.



Figura 4.44 Distribución de frecuencias de error de la tasas de dosis absorbida teórica y experimental para distintos modelos.



Figura 4.45 Mapa de tasa de exposición de la Isla de Gran Canaria obtenido a partir del modelo de Quindós et al. (izquierda) y obtenido a partir de medidas "*in situ*" (derecha).

Como ilustración de la bondad del ajuste se presentan en la figura 4.45 los mapas de tasa de exposición de la isla de Gran Canaria elaborados por interpolación mediante krigeado a partir de los datos de tasa de exposición calculados con el modelo empírico de Quindós y a partir de los datos medidos "in situ" que se presentados en el capítulo 3. Como se puede ver el modelo analítico muestra una gran coincidencia con el mapa experimental y tiene un gran poder predictivo, ya que permite identificar las distintas zonas con mayor y menor tasa de exposición o dosis absorbida. Los valores máximos obtenidos son, en media, inferiores a los experimentales, pero son tolerables dada la incertidumbre propia de la medida in situ de tasa de exposición ambiental.

Capítulo 5

Análisis de las implicaciones dosimétricas sobre la población de las Islas Canarias Orientales

5.1. Introducción

En este último capítulo de resultados de este trabajo de Tesis Doctoral, se analizan las consecuencias dosimétricas para la población de las Isla Canarias Orientales de los niveles de radiación natural estudiados en los capítulos 3 y 4. En primer lugar, se determinan los valores de dosis equivalente anual de las tres islas a partir de los mapas radiométricos obtenidos en el capítulo 3, y se levantan los mapas de isolíneas y dosis por municipio correspondientes. A continuación, para cuantificar el riesgo radiológico del público debido a la radiación natural, en la siguiente sección, se determinan dos índices indicadores del impacto de la radiación, definidos en la literatura y denominados, Índice de Radio Equivalente e Índice de Riesgo Radiológico por exposición externa, obtenidos a partir de los datos de concentración de actividad de los distintos radioisótopos ambientales de las Islas Canarias Orientales analizados en el capítulo 4. Por último se estima el riesgo radiológico sobre la población estableciendo la dosis equivalente media por habitante y el índice de exceso de probabilidad de cáncer para los distintos rangos de dosis equivalente.

5.2. Determinación de la dosis equivalente anual de las Islas Canarias Orientales

Con el fin de obtener una estimación de las consecuencias dosimétricas para la población de la radiación gamma natural, se han determinado las tasas de dosis equivalente anual a partir de los datos de dosis absorbida en aire discutidos en la sección 3.5. Evidentemente, se trata de una estimación, porque la conversión de tasa de dosis absorbida en aire en dosis equivalente anual no es trivial. En efecto, para realizar esta conversión de forma rigurosa es necesario evaluar la distribución de la dosis absorbida entre los distintos tejidos del cuerpo humano lo que requiere el conocimiento de la distribución angular y en energía de cada componente del flujo de radiación recibido (electromagnética o de partículas). También es necesario un conocimiento preciso de los coeficientes de interacción de la radiación con la materia orgánica. La medida detallada de estas magnitudes implica realizar un complicado trabajo de espectrometría para diversas distribuciones de fuentes (continuas o discretas).

Dada la dificultad de las medidas, normalmente se describe el campo de radiación en ausencia de la persona expuesta ("condiciones libres de receptor"), de esta forma, la tasa de dosis absorbida en aire queda totalmente especificada y suele utilizarse para describir las situaciones de exposición debidas a emisores gamma. Una vez descrito el campo de radiación se puede evaluar la dosis absorbida por una persona, bien en todo el organismo, o por un tejido concreto de interés. Esta evaluación implica la asunción de una serie de hipótesis respecto a los factores que afectan a los cálculos de las dosis profundas y sobre los periodos de tiempo que el individuo está expuesto a los distintos campos de radiación (si los hay). Así, deben determinar los factores de absorción másica y las profundidades de transmisión de los distintos tejidos, la retrodispersión y el grado de isotropía así como diversos factores angulares. Se trata, por tanto de un problema complejo, que ha sido estudiado por numerosos autores (Kramer and Drexler, 1982) (Spiers and Overton, 1962). En este trabajo, para realizar la conversión, utilizaremos el valor de 0,7 Sv Gy-1 adoptado en el informe (UNSCEAR, 1982) y que incluye la estimación de todos los factores mencionados. Este valor ha sido adoptado en numerosos estudios posteriores, entre los que cabe destacar el informe NUREG 1501 y el informe MARNA del CSN que constituye la referencia principal de este trabajo. Así, la operación realizada para convertir la tasa de dosis absorbida (\dot{D}) en tasa de dosis equivalente anual (H) es:

$$\dot{H}(mSv/a\tilde{n}o) = \dot{D}(nGy/h) \times 8760(h/a\tilde{n}o) \times 0, 7 \times 10^{-6}(mSv/nGy) \times f_{ocup}$$
[5.1]

donde el factor f_{ocup} se ha introducido para tener en cuenta el tiempo que el individuo permanece en el área bajo estudio. En este trabajo, siguiendo lo indicado en el proyecto MARNA del CSN, se ha estimado la dosis al cuerpo entero procedente de la radiación gamma que pudiera recibirse en una zona, suponiendo una exposición al aire libre durante todo el año, sin ningún tipo de protección, tomado $f_{ocup} = 1$. Esta suposición puede cambiarse fácilmente y adaptarse a la que cada estudio considere más adecuada (outdoor o indoor), y recalcular los valores utilizando la base de datos de esta Tesis Doctoral, de hecho es frecuente en la literatura utilizar un factor 0.2 para la dosis outdoor. La transformación se ha aplicado a los datos medidos directamente, sin restar la contribución debida al fondo cósmico ya que se quiere determinar la dosis por irradiación externa total que recibe la población residente en las Islas Canaria Orientales. Los datos de dosis equivalente obtenidos para los puntos medidos en las cuatro islas se recogen en el Apéndice 6. A continuación se discuten los resultados para cada isla.

5.2.1 Isla de Gran Canaria

En la figura 5.1 se resumen los indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de la isla de Gran Canaria que, lógicamente, presentarán unas características similares a los datos de tasa de exposición o de dosis absorbida ya que se han obtenido mediante transformaciones lineales de los mismos. Así, la distribución es asimétrica con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda, como refleja el valor positivo de la asimetría. La Kurtosis es

también positiva lo que indica que los datos presentan una distribución leptocúrtica. La distribución no se ajusta a una Gaussiana como queda reflejado en los valores del test de normalidad de Anderson-Darling estando los datos mejor representados por una distribución log-normal ya que mayoritariamente, los valores de dosis equivalente se concentran en torno a valores relativamente bajos (75% de los datos está por debajo de 0.96 mSv/a).



Figura 5.1 Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Gran Canaria y prueba de ajuste a una distribución normal.

La distribución quedará mejor descrita por la mediana (0.64 mSv/a) o la media geométrica (0.72 mSv/a) que por la media aritmética (0,79 mSv/a). Estos valores medios se encuentran en torno a un 20% por debajo del promedio mundial de dosis absorbida por irradiación externa de 0.9 mSv/a establecido por UNSCEAR que incluye la debida a los suelos y a la radiación cósmica (figura 5.2).



Figura 5.2 Tasa dosis media mundial debida a fuentes naturales (UNSCEAR, 1988)

El máximo de la distribución es de 2,13 mSv/a que alcanza, por tanto más del doble de este valor. Para mostrar la distribución espacial, en la figura 5.3 se muestra el mapa de dosis equivalente anual obtenido por interpolación de los datos del apéndice 6 mediante el método de krigeado.



Figura 5.3 Gran Canaria. Mapa de tasa dosis equivalente. Coordenadas UTM.

Este mapa, similar a los de tasa de exposición o de dosis absorbida presentados en el capítulo 3, muestra que la dosis no se distribuye de forma homogénea por la isla, encontrando zonas de máximo en el interior que doblan a las dosis que se reciben en la costa Norte o Este. Para poder realizar una estimación de las dosis medias recibidas por la población de la isla se han calculado las dosis medias por municipio haciendo la media aritmética de las dosis correspondientes a los puntos medidos en cada término municipal. Se ha utilizado la media aritmética porque al tratarse de municipios pequeños los valores no varían mucho dentro de cada uno de ellos. La excepción la constituyen los municipios de Mogán y San Bartolomé de Tirajana que son los más extensos de la Isla y abarcan zonas del interior con alta tasa de exposición y zonas de costa en las que se mide, prácticamente, la componente cósmica. No obstante para ellos también se ha utilizado madia aritmética por homogeneidad en los cálculos. En la figura 5.4 se muestran los resultados sobre un mapa de municipios y se incluye, también un mapa de densidad de población en el que se muestra el número de habitantes por municipio (ISTAC, 2013) en el año 2012.



Figura 5.4 Gran Canaria. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio.

Como se puede apreciar en el mapa los municipios del centro de la isla presentan los valores tasa de dosis absorbida más altos entre los que destaca Artenara con 1,26 mSv/a y Tejeda con 1,05 mSv/a. También, entre las zonas con mayor tasa de dosis equivalente anual, se encuentran los dos municipios turísticos por excelencia de Gran Canaria, San Bartolomé de Tirajana (1,03 mSv/a) y Mogán (1,18 mSv/a).

Como se ha indicado anteriormente, en San Bartolomé de Tirajana, al ser un municipio muy grande, se observa mucha disparidad en los valores obtenidos: las zonas del interior presentan puntos de alta dosis equivalente (p.e. Fataga, 1,98 mSv/a) mientras que en las zonas de dunas y playas de la costa, donde se encuentran los núcleos turísticos, los valores son relativamente bajos (p.e. Maspalomas 0,46 mSv/a). En el caso de Mogán los valores son más homogéneos porque la costa es abrupta, sin grandes extensiones de playas, siendo la dosis media mayor, (prácticamente 1,2 mSv/a).

Si se cruzan los datos de dosis equivalente anual con los de población por municipios mostrados en la figura 5.4, se observa que las zonas con mayores valores corresponden a las de menor densidad de población (salvo en el caso de Arucas). De hecho, los municipios de Tejeda y Artenara, son los de menor población de la Isla. No obstante, ambos están experimentando un importante desarrollo debido al auge del turismo rural y de aventura. Además, En Artenara, es frecuente encontrar casas-cueva, algunas de las cuales se están habilitando como hoteles rurales (aunque esto también ocurre en otros lugares de la isla). Es por ello, que en esta zona y en Tejeda sería conveniente realizar estudios sobre la presencia de radón en viviendas y cuevas, ya que de

los resultados de MARNA, se deduce una estrecha correlación entre las zonas de alta tasa de exposición y el potencial de emisión de radón.

Mogán también está teniendo un creciente desarrollo turístico en los últimos años, con el consiguiente aumento de población fija y flotante. La finalización de la autopista entre Puerto Rico y Mogán y entre Agaete y La Aldea, supone un acicate a este desarrollo de la zona. Precisamente una de las áreas en las que se encuentra mayor tasa de exposición en el municipio de Mogán es la conocida como "Los Azulejos" que es un lugar habitual de parada de los autobuses turísticos debido al colorido de las rocas, tal y como se puede apreciar en figura 5.5. Estas rocas corresponden a riolitas que, por procesos de alteraciones hidrotermales durante la evolución geológica de la isla, (Donoghue et al., 2008) han concentrado radioisótopos naturales en mayor proporción de lo habitual en este tipo de rocas¹.



Figura 5.5 Zona de "Los Azulejos" en el municipio de Mogán.

También se encuentran valores altos de tasa de exposición en el Barranco de Verga que desemboca en la zona turística de Anfi del Mar. Además, en el pueblo de Arguineguín (también perteneciente a Mogán) se ha medido en una cantera de puzolanas en la que se midió una tasa de exposición de 20 µR/h que equivale a una dosis anual de 1,07 mSv/a. También se encuentran valores elevados en los municipios de Agaete (0,82 mSv/a) y Arucas (0,83 mSv/a). En Arucas

¹ En medidas realizadas por nuestro grupo mediante espectrometría gamma de este tipo de rocas, se ha encontrado una concentración de ²²⁶Ra de 310±25 Bq/kg frente a los 44±4 Bq/kg medidos en riolitas no alteradas.

existen, también, canteras de un tipo piedra muy utilizada en los edificios históricos de Gran Canaria y en la actualidad como piedra ornamental.

La mera observación del mapa de dosis por municipio de la figura 5.4 indica que la isla, desde el punto de vista dosimétrico, puede dividirse en dos mitades bien diferenciadas, separadas por una línea imaginaria que transcurre en dirección NO-SE y que señala, además, la división entre las zonas de vulcanismo antiguo y reciente de la isla. La zona noreste, con menores índices de dosis, corresponde a los municipios de Gáldar, Guía, Moya, Firgas, Valleseco, Arucas, Teror, San Mateo, Las Palmas de Gran Canaria (capital de la isla y ciudad más poblada del archipiélago), Santa Brígida, San Mateo, Telde, Valsequillo, Ingenio, Agüimes y Santa Lucia y abarca una superficie de 788 km². La zona suroeste con mayores índices de dosis está compuesta por los municipios de Agaete, Artenara, Tejeda, San Bartolomé de Tirajana, Mogán y San Nicolás de Tolentino y cubre un área de 773 km². Se comprueba que las dos zonas son prácticamente iguales en cuanto a superficie. Curiosamente, esta línea separa también las zonas densamente pobladas, (que se corresponden con las de menor dosis), de las poco pobladas. Para relacionar la distribución de población con la dosis se ha calculado dosis equivalente colectiva (S) para cada una de las dos zonas. Esta magnitud se define como:

$$S(Sv \times \text{persona}/a) = \sum_{i} p_{i}H_{i}(Sv/a)$$
[5.2]

Donde H_i es la dosis equivalente en el subgrupo de población i (municipio) en promedio y p_i el número de individuos del subgrupo (población del municipio). Se ha obtenido unas dosis colectiva de 101 Sv·persona/año para la zona suroeste y de 468 Sv·persona/año para la noreste. Este resultado puede parecer paradójico ya que la zona sureste corresponde a la de mayor dosis equivalente promedio, sin embargo sólo concentra a poco más del 11% de la población de la Isla.

Para obtener una dosis promedio por habitante de la isla se ha calculado la media ponderada por la población de cada municipio según la expresión,

$$\left\langle H\left(mSv/a\right)\right\rangle_{isla} = \frac{\sum_{municipios} p_{municipio} \left[H\left(mSv/a\right)\right]_{municipio}}{\sum_{municipios} p_{municipios}}$$
[5.3]

siendo $\left[H\left(mSv/a\right)\right]_{municipio}$ y $p_{municipio}$, la tasa de dosis equivalente promedio y la población de cada municipio indicadas en la figura 5.4. El valor obtenido para toda la isla de Gran Canaria es de 0,69 mSv/a que se corresponde a un valor intermedio entre la media geométrica y la mediana de los datos. Consideramos este valor como el promedio más representativo de dosis equivalente de la isla.

5.2.2 Isla de Fuerteventura

Siguiendo la metodología ya descrita en el caso de Gran Canaria, en la figura 5.6 se resumen los indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de la isla de Fuerteventura. Esta isla presenta una distribución fuertemente asimétrica con la cola de la derecha mayor que la de la izquierda, como indica el alto valor positivo de la asimetría. La Kurtosis es también positiva y muy grande respecto a los datos de Gran Canaria de forma que la distribución de los datos es fuertemente leptocúrtica. La distribución no se ajusta tampoco a una Gaussiana como queda reflejado en los valores del test de normalidad de Anderson-Darling estando mejor representados los datos por una distribución log-normal ya que, en mucha mayor proporción que en Gran Canaria, los valores de dosis equivalente se concentran en torno a valores bajos (75% de los datos está por debajo de 0,53 mSv/a).



Figura 5.6 Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Fuerteventura y prueba de ajuste a una distribución normal.

La distribución quedará mejor descrita por la mediana (0,43 mSv/a) que en este caso coincide con la media geométrica que por la media aritmética (0,48 mSv/a). Estos valores medios se encuentran en torno a un 50% por debajo del promedio mundial de dosis absorbida por irradiación externa de UNSCEAR (figura 5.2). El máximo de la distribución es de 2,13 mSv/a que por tanto, duplica este valor pero que se alcanza sólo en muy pocos puntos muy localizados.

Para analizar la distribución espacial, en la figura 5.7 se muestra el mapa de dosis equivalente anual obtenido por interpolación de los datos del apéndice 6 mediante el método de krigeado



Figura 5.7 Gran Canaria. Mapa de tasa dosis equivalente anual de la isla de Fuerteventura. Coordenadas UTM (huso 28).

Se observa que en los máximos se alcanzan tasas de exposición superiores a 1,5 mSv/a en zonas localizadas de Betancuria y en el entorno de la montaña de Tindaya en el municipio de La Oliva. El resto de la isla presenta niveles inferiores a 0,5 mSv/año muy bajos respecto a los obtenidos en Gran Canaria.

Fuerteventura no presenta el comportamiento diferenciado en dos zonas que se estudió en Gran Canaria. Como se ha indicado repetidamente a los largo de este trabajo, salvo en las zonas del complejo basal, que están muy localizadas, el resto de las isla presenta un perfil muy bajo de radiactividad natural y, por tanto de dosis equivalente. De la misma forma que en el caso de Gran Canaria, para la estimar las dosis medias recibidas por la población de la isla se han calculado las dosis medias por municipio haciendo la media aritmética de las dosis correspondientes a los puntos medidos en cada término municipal. En este caso, la utilización de la media aritmética está más justificada por tratarse de municipios de extensión similar en los que valores no varían mucho dentro de cada uno de ellos debido la gran homogeneidad de la isla. Sólo el municipio de Betancuria y el de La Oliva presentan disparidad de valores, pero tan localizados que adoptamos como válida la media aritmética. En la figura 5.8 se muestran los resultados sobre un mapa de municipios y se incluye, también un mapa de densidad de población en el que se muestra el número de habitantes por municipio (ISTAC, 2013) en el año 2012.



La dosis absorbida media por municipio se muestra en la figura 5.8 en la que también se incluye el mapa de distribución de la población en la isla.

Figura 5.8 Fuerteventura. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio.

Se pone de manifiesto, mejor si cabe, la uniformidad radiológica de la isla a pesar de los máximos puntuales localizados. Desde el punto de vista de la protección radiológica, se debe tener en cuenta que las rocas de la zona de Tindaya se piensan utilizar como material de construcción. De hecho hay un proyecto de vaciado de la montaña para hacer un grupo escultórico monumental ideado por el escultor Eduardo Chillida. Según se indica en la página web del museo Chillida, se trataría de crear una gran caverna en el interior de la montaña que sería la atracción turística. En este caso, podría ser necesaria la vigilancia radiológica durante el proceso de construcción y en el proceso de explotación turística de la caverna. En cualquier caso, se considera conveniente realizar estudios y el potencial de emanación de radón tanto de las rocas de Tindaya como de los otros máximos de Fuerteventura.

Si se cruzan los datos con los de población, se estima que la dosis colectiva será muy baja (51 Sv-hombre/año) porque tanto la densidad de población como las dosis promedio por municipio son bajas. Se ha determinado también la media ponderada por población de la isla utilizando la ecuación 4.3 y los datos de la figura 5.8 .El valor obtenido para la isla de Fuerteventura es de 0,46 mSv/a que se corresponde a un valor intermedio entre la media geométrica y la media aritmética de los datos. Consideramos este valor como el promedio más representativo de dosis equivalente de la isla.

5.2.3 Islas de Lanzarote y La Graciosa

Para finalizar, en la figura 5.9 se resumen los indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de las islas de Lanzarote y La Graciosa. La Isla de Lanzarote presenta una distribución que a diferencia de la correspondiente a Fuerteventura es bastante simétrica, como indica el valor relativamente pequeño de la asimetría (0,214). La Kurtosis es negativa y muy pequeña lo que nos indica que la distribución de los datos se ajusta mejor a una Gaussiana que los relativos a Gran Canaria y Fuerteventura, aunque el test de normalidad de Anderson-Darling señala que los datos no se corresponden a este tipo de distribución. Como es característico de este tipo de magnitud, están mejor representados por una distribución log-normal. De forma más acusada que en el caso de Fuerteventura los valores de dosis equivalente se concentran en torno a valores bajos (75% de los datos está por debajo de 0,44 mSv/a). Como se ha discutido en el capítulo 3 estos bajos valores son coherentes con la geología de la isla.



Figura 5.9 Indicadores estadísticos de la distribución de dosis equivalente de Lanzarote y prueba de ajuste a una distribución normal.

La mediana de la distribución es 0,43 mSv/a que en este caso supera ligeramente a la media geométrica (0,38 mSv/a) y a la media aritmética (0,39 mSv/a). La gran homogeneidad en dosis equivalente de la isla queda reflejada en el solapamiento de los intervalos de confianza de la media aritmética y la mediana que está uno contenido en el otro, mientras que en el caso de Fuerteventura están solo parcialmente solapados y para Gran Canaria son totalmente disjuntos. Estos valores medios se encuentran por debajo del 60% de la media mundial de dosis absorbida

por irradiación externa de UNSCEAR (figura 5.2). Incluso el máximo de la distribución de 0,64 mSv/a es un 30% inferior a este valor.

La Isla de La Graciosa tiene unos valores de dosis equivalente, menores aun que los de Lanzarote. La media aritmética es de 0,31 mSv/a y prácticamente igual a la mediana de los datos de 0,30 mSv/a. La Kurtosis y la asimetría de los datos son positivas y de valor muy pequeño, de forma que la distribución es prácticamente normal, aunque al disponerse sólo de 8 datos es poco significativo.

La distribución espacial de la dosis equivalente anual de las Islas de Lanzarote y La Graciosa que se muestra en la figura 5.10 refleja la escasa variación discutida en los párrafos anteriores.





Se comprueba que la dosis equivalente es un orden de magnitud inferior a los máximos encontrados en Gran Canaria o Fuerteventura. Desde el punto de vista dosimétrico la isla de Lanzarote presenta una contribución muy baja a la dosis total por irradiación externa debido a causas exclusivamente geológicas, tal y cómo se ha discutido en los capítulos 3 y 4. Se ha medido incluso la dosis equivalente "indoor" en la Cueva turística de "Los Verdes" formada por un tubo de lava volcánico de varios kilómetros, encontrando valores sólo levemente superiores al fondo cósmico en el interior, lo que muestra la escasa tasa de dosis debida a los materiales constitutivos del entorno. Es de destacar, los valores tan bajos de los datos correspondientes al Parque

Nacional de Timanfaya y a las costa norte del municipio de Teguise en los que prácticamente sólo se mide el fondo cósmico (0.19 mSv/a). En la figura 5.11 los mapas de dosis equivalente media anual por municipio y de distribución de población (ISTAC, 2013) en Lanzarote.



Figura 5.11 Lanzarote. Izquierda: Mapa de tasa dosis equivalente media anual por municipio. Derecha: mapa de población por municipio.

Para Lanzarote y La Graciosa, la dosis colectiva también es muy baja (55 Sv-hombre/año) porque la densidad de población es baja, aunque superior a la de Fuerteventura, y la dosis promedio por municipio extremadamente reducida. La media ponderada por población de la isla utilizando la ecuación 4.3 y los datos de la figura 5.11 es de 0,38 mSv/a que se coincide con la media geométrica y la aritmética de los datos conforme a su distribución prácticamente normal y homogénea. De nuevo, consideramos este valor como el promedio más representativo de dosis equivalente de la isla. En el caso de La Graciosa, debido a su reducida población (660 habitantes) que, además se concentra en la costa sur, no se ha considerado relevante el cálculo de la dosis ponderada por habitante y se asume como valor promedio la media aritmética de los datos (0,31 mSv/a).

5.2.4 Comparación con las Islas Canarias Occidentales

Con el fin tener un marco de comparación local para los datos obtenidos en este trabajo y calcular un valor promedio de dosis equivalente del archipiélago Canario, se han utilizado los datos de tasa de dosis absorbida de las Islas Canarias Occidentales determinados en el trabajo llevado a cabo por el Laboratorio Física Médica y de Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (Fernández de Aldecoa, 2000) en la década de los noventa, para obtener la tasa de dosis equivalente de éstas islas aplicando la ecuación 5.1. En la figura 5.12 se muestras los mapas dosis equivalente por irradiación externa de las islas Canarias Occidentales elaborados a partir de los resultados obtenidos.



Figura 5.12 Niveles de tasa de dosis equivalente por irradiación externa de la Islas Canarias Occidentales.

En coherencia con la geología del territorio ya discutida en los capítulos 3 y 4, la isla de Tenerife presenta unos niveles de dosis equivalente por irradiación externa similares a la de Gran Canaria y mayores que los encontrados en Fuerteventura o Lanzarote o el resto de las islas occidentales con valores máximos en la zona de las Cañadas del Teide del orden de 1,4-1,5 mSv/año.

Los valores promedio de los resultados obtenidos para las islas occidentales, se recogen en la tabla 5.1 donde también se recopilan los valores medios de las islas orientales ya discutidos y el número de datos correspondiente a cada isla. Aunque lo ideal hubiese sido utilizar las medias ponderadas por habitante ya discutidas, en esta tabla se han utilizado las medias geométricas porque son las que proporciona el trabajo citado. No obstante, debido al tipo de distribución estadística de los datos la media geométrica es también un buen parámetro para caracterizarlos.

En la tabla 5.1 se muestran, las medias de dosis equivalente de las provincias de Las Palmas y de Santa Cruz de Tenerife y la media del archipiélago al completo. Para la determinación estos promedios, dado que el número de datos por isla no es homogéneo, se ha utilizado una media ponderada por extensión calculada según la ecuación 4.2 y una media ponderada por habitante según la expresión 5.3.

Isla	Número medidas	Media Arit. (mSva ⁻¹)	Media Geom (mSva ⁻¹)
Medias Insulares			
Hierro	6	0,46	0,45
Gomera	10	0,51	0,49
La Palma	13	0,53	0,53
Tenerife	103	0,66	0,62
Gran Canaria	320	0,74	0,72
Fuerteventura	161	0,54	0,53
Lanzarote	119	0,39	0,39

 Tabla 5.1
 Medias insulares de la dosis equivalente en aire en las Islas Canarias.

Tabla 5.2Medias provinciales y del archipiélago de la dosis equivalente en aire en lasIslas Canarias.

Provincia	Medias ponderadas por extensión (mSva ⁻¹)	Medias ponderadas por población (mSva ⁻¹)
Santa Cruz de Tenerife	0,57	0,61
Las Palmas	0,61	0,61
Archipiélago	0,59	0,61

Siguiendo el mismo comportamiento detectado al estudiar el resto de magnitudes radiológicas, Lanzarote es la isla que presenta la menor dosis anual promedio con 0,39 mSv/año seguida de El Hierro y La Gomera. Gran Canaria y Tenerife presentan los valores máximos lo que implicará un aumento de la dosis colectiva ya que estas islas concentran más del 80% de la población total del archipiélago. La dosis promedio del Archipiélago ponderada por población es de 0,61 mSv/año inferior en un 30% a la dosis mundial promedio de UNSCEAR.

5.2.5 Comparación con los valores de MARNA

El principal marco de referencia de este trabajo de Tesis Doctoral son los valores radiológicos de la España peninsular recogidos en el informe MARNA del CSN. En este trabajo se determinan, a partir de los datos de tasa de exposición disponibles, las dosis equivalentes efectivas al cuerpo humano para todas las provincias de las España peninsular. En la figura 5.13

se ha redibujado el mapa provincial incluido en MARNA. Los datos utilizados para elaborar esta figura se recopilan en la tabla 3.8 en la que también se han incluido los datos de dosis equivalente promedio correspondientes a las Islas Canarias y discutidos en el apartado anterior y los de la Ciudad Autónoma de Melilla también obtenidos por nuestro grupo de investigación.



Figura 5.13 Promedios provinciales de dosis equivalente por irradiación externa de la España peninsular. Redibujada de MARNA:

Para discutir los valores de las Islas Canarias Orientales respecto a los datos de MARNA, se ha dividido España en tres categorías en función de la dosis equivalente provincial: Zona Baja de 0 a 0,5 mSv/año, Zona Intermedia de 0,50 a 0,90 mSv/año y Zona de Alta de 0,50 a 0,90 mSv/año. Con esta división, la dosis promedio de España de 0,73 mSv/año está situada, como es lógico en la zona intermedia. En este contexto, tanto la provincia Las Palmas como la de Santa Cruz de Tenerife se encuadran en la zona de valores intermedios, con una dosis equivalente anual de 0,61 mSv/año, similar las provincias de Barcelona (0,61 mSv/año), La Rioja (0,61 mSv/año), Álava (0,60 mSv/año) o Guadalajara (0,60 mSv/año). Los mínimos de España, corresponden a la costa mediterránea de las provincias de Castellón, Valencia, Alicante y Murcia con valores entorno a (0,40 mSv/año) y los máximos a las zonas graníticas del centro peninsular y Galicia donde se alcanzan dosis superiores a (1 mSv/año).

No obstante, si se comparan los valores individuales de cada isla con el resto de España, Lanzarote (0,39 mSv/año) se encuentra junto a las provincias de menor dosis equivalente, Fuerteventura con (0,53 mSv/año) está en el límite bajo de la zona de dosis intermedia mientras que Gran Canaria se encuadra en el centro de dicha zona con una dosis similar a la media de España.

Tabl	a 5.3	Datos provinciales de	e dosis	equivalente (mSva ⁻¹) obtenidos del informe M	ARNA
C	del CSN.	(Mahou and Amigot, 19	996). Los	s datos de Melilla han sido medidos por nuestro	grupo
C	de investig	gación (Rubiano et al., 2	2011).		

Provincia	Dosis equivalente (mSva ⁻¹)	Provincia	Dosis equivalente (mSva ⁻¹)
Álava	0,60	La Rioja	0,61
Albacete	0,46	León	0,79
Alicante	0,43	Lérida	0,69
Almería	0,52	Lugo	1,16
Asturias	0,86	Madrid	1,11
Ávila	1,33	Málaga	0,63
Badajoz	0,91	Melilla	0,42
Barcelona	0,61	Murcia	0,39
Bilbao	0,73	Navarra	0,68
Burgos	0,59	Orense	1,25
Cáceres	1,13	Palencia	0,59
Cádiz	0,47	Pontevedra	1,49
Cantabria	0,57	Salamanca	1,07
Castellón	0,43	Segovia	0,89
Ciudad Real	0,69	Sevilla	0,59
Córdoba	0,8	Soria	0,58
Cuenca	0,52	Tarragona	0,52
Gerona	0,81	Teruel	0,58
Granada	0,59	Toledo	1,08
Guadalajara	0,6	Valencia	0,43
Guipúzcoa	0,93	Valladolid	0,8
Huelva	0,66	Vizcaya	0,86
Huesca	0,68	Zamora	0,64
Jaén	0,69	Zaragoza	0,89
La Coruña	0,95	España	0,73
Isla		Isla	
Tenerife	0,62	Gran Canaria	0,72
La Palma	0,53	Fuerteventura	0,53
Gomera	0,49	Lanzarote	0,39
Hierro	0,45	La Graciosa	0,31

Cuatro municipios de Gran Canaria (Artenara, Mogán, San Bartolomé de Tirajana y Tejeda) superan el valor de 1 mSv/año, alcanzándose en ellos dosis similares a la de Galicia o Extremadura que son las más altas de España. Estos municipios abarcan, además, casi el 50% de la superficie de la isla siendo, por tanto, una zona relativamente extensa aunque poco poblada, como ya se ha discutido en la sección anterior.



Figura 5.14 Intervalos de dosis y valores medios de dosis equivalente anual por provincia. (Proyecto MARNA del CSN y valores medios de las Islas Canarias Orientales obtenidos en este trabajo)

Lo discutido en los párrafos anteriores se ilustra, de forma gráfica, en la figura 5.14 donde se presentan las tres zonas de dosis equivalente, establecidas y los valores provinciales promedio. Se han resaltado en verde los correspondientes a las provincias de Las Palmas y Santa Cruz de Tenerife. En azul a la derecha se han incluido las dosis promedio de Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria.

5.2.6 Comparación con estudios internacionales.

Para relacionar las dosis en las Islas Canarias Orientales con el entorno geopolítico más próximo de España- La Unión Europea-, se han utilizado los mapas de dosis equivalente de Europa obtenidos en el trabajo de Szegvary y colaboradores (Szegvary et al 2007). En este trabajo, se utilizan los datos de la Plataforma Europea de Intercambio de Datos Radiológicos (EURDEP, http://eurdep.jrc.ec.europa.eu/Basic/Pages/Public/Home/Default.aspx) para obtener

mapas de dosis gamma de Europa. Los datos se obtienen de las diversas redes de vigilancia radiológica de los distintos países miembros. Estas redes tienen como objetivo principal la detección temprana de posibles incrementos en la dosis de radiación debido a causas artificiales y fueron implantadas, en su mayoría a raíz del accidente de Chernobyl. En trabajo indicado se armonizan los datos de las diversas fuentes y se homogenizan. Se estima, la influencia del fondo de los equipos de medida y se descuenta la dosis debida a la radiación cósmica y con ello se elaboran los mapas. En la figura 5.15 se muestran los mapas de dosis equivalente de Europa en verano e invierno elaborados en el trabajo citado. Debido a que los datos utilizados provienen de una red de vigilancia, no de estudio ambiental pueden no reflejar de forma correcta la variabilidad local. Así, en la zona mediterránea de España la dosis equivalente está claramente sobrestimada, ya que se le que se atribuyen valores similares a los del centro de la península o de Galicia, en contra de lo que indican los datos mucho más de tallados de MARNA y de la geología local. Debe tenerse en cuenta que se trata de una extrapolación de los datos obtenidos en 32 estaciones muchas de las cuales están localizadas en la inmediaciones de instalaciones del ciclo nuclear. No obstante para una comparación cualitativa de los niveles de dosis europeos puede ser de utilidad.



Figura 5.15 Dosis anual en Europa en verano (izquierda) e invierno (derecha) del año 2006. Adaptada de (Szegvary et al., 2007b).

Con este fin, se han elaborado mapas de tasa de dosis equivalente de las Islas, descontando la radiación cósmica y utilizando el mismo rango de variación (0-170 nSv/h) y una escala de colores similar. Nos se han elaborado mapas de verano e invierno, ya que en Canarias no hay una gran diferencia entre los dos periodos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.16.


Los mapas ponen de manifiesto, una vez más, la escasa actividad radiológica de Lanzarote, Fuerteventura y la zona Noreste de Gran Canaria, y el comportamiento diferenciado de la zona centro-suroeste de Gran Canaria en la que se alcanzan tasas de dosis equivalente similares a los máximos europeos.

5.3. Índices indicadores del riesgo radiológico

Una vez analizada la dosis equivalente debido a la irradiación externa, a partir de los datos de tasa de exposición discutidos en el capítulo 3, estudiaremos el riesgo radiológico debido al contenido radioisotópico de los suelos de la isla, a partir de los datos de concentración de actividad del capítulo4. Este estudio complementa al del apartado anterior ya que la contribución de los suelos está contenida en la dosis equivalente calculada.

Al no ser uniforme la distribución de los radionúclidos naturales en las muestras resulta conveniente introducir un índice común radiológico para evaluar la actividad conjunta a partir del

nivel de concentración de actividad de ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K de las muestras y de esta forma poder cuantificar en una sola magnitud los riesgos radiológicos asociados a estos radionúclidos. Si bien en la literatura se definen varios índices (Beretka and Matthew, 1985) con este fin, uno de los más utilizados es el denominado Índice de radio equivalente (Ra_{eq}) (Hamilton, 1971). Este índice promedia las concentraciones de los distintos radioisótopos naturales y se calcula suponiendo que 10 Bq kg⁻¹ de ²²⁶Ra producen el mismo número de rayos gamma en la tasa de dosis, que 7 Bq kg⁻¹ de ²³²Th y 130 Bq kg⁻¹ de ⁴⁰K. El Ra_{eq} de una muestra en (Bq/kg) se determina entonces utilizando la siguiente ecuación (UNSCEAR, 1982):

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + \frac{10}{7}C_{Th} + \frac{1}{13}C_k \simeq C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,077C_k$$
[5.4]

donde C_{Ra} , C_{Th} y C_K son las concentraciones de actividad del ²²⁶Ra, ²³²Th y ⁴⁰K respectivamente. El valor de Ra_{eq} en los materiales de construcción se requiere que sea menor que el valor límite de 370 Bq kg⁻¹ (OECD, 1979) para un uso seguro, es decir, para mantener la dosis externa por debajo de 1 mSv/año. Otros límites son los siguientes: 740 Bq kg⁻¹ para uso industrial, 2200 Bq kg⁻¹ para carreteras y vías férreas, 3700 Bq kg⁻¹ para los materiales de relleno, y está prohibido el uso de materiales con Ra_{eq}> 3700 Bq kg⁻¹ para cualquier construcción (Somlai et al., 1996).

Otro parámetro muy utilizado para radioprotección es el Índice de Riesgo por Exposición Externa. Este parámetro fue introducido en 1999 por el documento de la Unión Europea " Radiation Protection 112: Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials" *(Commission, 1999)* con el fin de tener un índice de referencia para limitar las concentraciones de actividad de los radionúclidos naturales presentes en los materiales de construcción, solo teniendo en cuenta la radiación gamma emitida por ellos. El documento "Radiation Protection 112" proporciona una tabla de valores límite para este índice en función del criterio de dosis aprobado y el uso previsto del material (estructural o de acabado). A nivel general, muchos países europeos y no europeos han tomado algunas decisiones con respecto a estos límites máximos, expresados normalmente por medio de una suma (o índice) que habitualmente debe ser inferior o igual a 1. En este trabajo se ha adoptado la siguiente expresión para este índice:

$$I_{\gamma} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_{K}}{4810} \le 1$$
[5.5]

que como puede observarse no es más que el radio equivalente dividido por 370.

Para caracterizar el riesgo radiológico a la población de las Islas Canarias Orientales debido a la exposición a la radiación natural procedente de los materiales del suelo, se han determinado la concentración de radio equivalente y el índice de riesgo para cada una de las muestras de suelo de las tres islas estudiadas. Los valores obtenidos se presentan en el Apéndice 8.

En la tabla 5.4 se muestran los principales indicadores estadísticos de la concentración de actividad de radio equivalente y del índice de riesgo calculados para las tres islas a partir de los datos medidos.

		Ra _{eq} (Bq/kg	3)		Índice de Ries	sgo (Iγ)
	Gran Canaria	Fuerteventura	Lanzarote	Gran Canaria	Fuerteventura	Lanzarote
Media	150,7±8,6	108,4±7,1	77,5±5,4	0,4	0,3	0,2
Máximo	365,9±20,5	537,3±2,5	169,3±11,1	1,0	1,5	0,46
Mínimo	20,4±2,9	8,7±1,5	33,3±2,9	0,1	0.01	0,09
Desv E	67,2±3,2	80,9±4,6	32,6±1,8	0,2	0,2	0,1

Tabla 5.4	Gran	Canaria.	Indicadores	estadísticos	de	la	concentración	de	Radio
equivalent	e (Bq/k	(g) e índic	e de Riesgo d	e los radionúo	clido	s d	eterminados.		

Como se desprende del análisis de los valores medios de las tres islas, la concentración media de actividad de radio equivalente (Ra_{eq}) de las muestras de suelo son inferiores en los tres casos a 370 Bq/kg de forma que, en promedio, los suelos de las Islas Canarias orientales no presentarían riesgo radiológico según este criterio, tal y como corroboran los valores medios de índice de riesgo que son muy inferiores a la unidad. No obstante hay que tener en cuenta que estos índices están diseñados para el análisis de muestras de materiales para certificar su uso seguro como material de construcción. En este sentido, es más lógico realizar un análisis local para ver si los materiales de determinadas zonas pueden presentar riesgo radiológico al ser utilizados. Para ello, si se analizan los valores máximos, se observa que en el caso de Gran Canaria y de Fuerteventura se alcanza o incluso se supera la unidad en el índice de riesgo. Esto indica que existen zonas localizadas con alto índice de riesgo y Raea, y puede suponerse que hay materiales en la zona que exceden incluso en mayor medida, los límites, ya que las muestras de suelos pueden estar diluidas debido al transporte de materiales desde otras zonas. Esto implicaría, por ejemplo, que las rocas de estas zonas podrían no ser aptas para ser utilizadas como material de construcción, lo que justifica la necesidad de estudiar las propiedades radiológicas de los litotipos de Gran Canaria y de Fuerteventura que queda como campo abierto de este trabajo.

En la figura 5.16 se visualizan los mapas de concentración de actividad de radio equivalente, para las tres Islas. En ellas se puede apreciar, de forma gráfica, lo explicado en el párrafo anterior y así, se ve que Gran Canaria presenta zonas relativamente amplias del interior en las que se obtienen valores cercanos al límite. Esta zona se corresponde, en concordancia con lo discutido en apartados anteriores, con el complejo traquítico-sienítico, la parte más antigua de las isla (13 Ma aprox.), formada en las etapas de escudo y post caldera. La base geológica de esta

zona está formada por traquitas, fonolitas, intrusiones sieníticas y riolitas peralcalinas, rocas ígneas ácidas con significativos contenidos de U (en torno a 4,5 ppm) y de Th (15 ppm) (IAEA, 1988).

En Fuerteventura, las zonas donde se obtiene mayor nivel de radio equivalente, se encuentran dentro del complejo basal (zona de Betancuria y Pájara) y en zonas muy localizadas de Tindaya, punta de Jadía y Tuineje, en las que afloran pitones sálicos. Es de destacar, dentro del complejo basal, la zona de la presa de las Peñitas y la montaña de la Atalaya en las que se alcanzan los máximos valores. El alto valor del índice de riesgo en la zona de Tindaya es un dato relevante porque existen proyectos, como ya se ha comentado, para abrir explotaciones de piedra dedicada a construcción. El radio equivalente de Lanzarote confirma su bajo perfil radiológico, el menor de España según todos los datos de la literatura científica analizados.







Figura 5.17 Mapas de concentración de radio equivalente (Bq/kg) de las tres Islas.

5.4. Estimación de las consecuencias dosimétricas sobre la población.

Con objeto de realizar una estimación dosimétrica del efecto de la radiación gamma externa sobre la población de las Islas Canarias Orientales, se ha calculado el porcentaje de población que recibe un determinado rango de dosis y se han comparado los valores obtenidos, con los relativos a los del informe MARNA para el resto de España. Para ello, a partir de la tasa de dosis media por municipio y el número de habitantes de cada municipio se ha confeccionado un diagrama de frecuencias población-dosis equivalente sumando el número total de habitantes de los municipios cuya dosis promedio está dentro de cada intervalo considerado y determinando su porcentaje respecto al total de la población de las Islas Canarias Orientales. De forma similar, se ha procedido con la población de cada provincia de España y la dosis media de cada provincia proporcionada por MARNA.

Los diagramas de frecuencia, se muestran en las figuras 5.18 y 5.19. De los resultados que se presentan, cabe destacar que mientras en las islas motivo de este estudio, un 14 % de la población se encuentra sometida a una dosis equivalente superior a 0,7 mSv/a, este porcentaje es del 39% en el caso de la Península. En las islas un 39% de su población recibe una dosis inferior a 0,6 mSv/a frente a un 32% en la Península. En cuanto a los valores máximos, tan sólo el 7,4% de la población de las islas está sometida a una dosis superior a 1 mSv/a, frente al 21,5 % de la población peninsular. En consecuencia podemos concluir que la población de las islas estudiadas recibe, en promedio, menos dosis que la población de la península debido a la radiación natural.



Figura 5.18 Porcentaje de población de las Islas Canarias Orientales y dosis equivalente a la cual se ve sometida



Figura 5.19 Porcentaje de población de la España Peninsular y dosis equivalente a la cual se ve sometida

Otro parámetro que se utiliza para estimar las consecuencias de la radiactividad sobre la población es el llamado "*Exceso de riesgo de cáncer para una vida media*" (Icrp, 1991), *ELCR*, que viene dado según la expresión:

$$ELCR = D_{ea} \times DL \times DR$$
[5.6]

donde D_{eq} es la dosis equivalente anual , determinada a partir de la ecuación 5.1 considerando un factor de ocupación de 0,2 para que los resultados sean comparables con los de la literatura (Taskin et al., 2009), *DL* es la esperanza de vida media (70 años) y *DR* es el factor de riesgo (en Sv^{-1}) que representa el riesgo de producir cáncer fatal por Sievert. Para efectos estocásticos, ICRP 60 utiliza el valor de 0,05 para la población en general (Icrp, 1991). Este parámetro cuantifica el aumento en la probabilidad de padecer cáncer debido a una determinada dosis. Evidentemente está basado en un modelo probabilista lineal sin dosis umbral.

Para cada uno de los municipios de las tres Islas Orientales se ha determinado este índice obteniéndose los valores que se reflejan en la figura 5.20. Se ha incluido también en la figura una línea horizontal correspondiente al valor medio mundial de 2,9×10⁻⁴ determinado en el informe UNSCEAR-2000. Los valores de ELCR en el archipiélago están comprendidos entre 2,5×10⁻⁴ y 8,8×10⁻⁴. Como es lógico los mínimos corresponden a los municipios de la isla de Lanzarote que se encuentra todos por debajo de la media mundial. Fuerteventura presenta valores cercanos a la

media salvo el municipio de Betancuria que se desvía al alza en un factor 2. Esto es lógico pues en esta zona es donde se han encontrado los máximos de tasa de exposición y de concentración de radioisótopos en los afloramientos del complejo Basal.



Figura 5.20 Índice de exceso riesgo de cáncer para una vida media de 70 años debido a la radiación natural gamma externa, para cada uno de los municipios de las Islas Canarias Orientales.

Siguiendo el comportamiento ya reflejado ampliamente a lo largo de este trabajo de Tesis doctoral Gran Canaria, presenta valores que superan hasta en un factor 3 a la media mundial. El valor máximo de $8,8 \times 10^{-4}$ corresponde a Artenara seguido de Mogán ($8,2 \times 10^{-4}$), Tejeda ($7,4 \times 10^{-4}$) y San Bartolomé de Tirajana ($7,2 \times 10^{-4}$).

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo realizado en esta Tesis Doctoral, se pueden resumir en los siguientes apartados:

- Se ha puesto en marcha y calibrado los equipos de espectrometría gamma INSPECTOR 1000, equipo analizador multicanal con sonda de INa(TI) y el detector coaxial de Germanio hiperpuro de rango extendido (XtRa) en configuración vertical Modelo GX3518 7500 SL, ambos de la marca Canberra.
- Se ha caracterizado la contribución al fondo de los detectores midiendo en distintas sesiones el fondo del laboratorio, elaborando un fondo medio patrón que equivale a un tiempo de medida de unos 25 días.
- Mediante el software LabSOCS se ha calibrado, para distintas geometrías, la eficiencia del detector coaxial de Germanio hiperpuro de rango extendido (XtRa).
- Se han diseñado y llevado a cabo campañas de medidas de tasa de exposición en aire de las islas canarias orientales, obteniéndose un total de 320 medidas para la isla de Gran Canaria, 161 para la isla de Fuerteventura, 119 para Lanzarote y 8 para la isla de La Graciosa.
- A partir de los datos obtenidos y mediante el método de interpolación de krigeado ordinario se han elaborado los mapas de tasa de exposición a un metro del suelo de las islas canarias orientales.
- 6. Se han comparado los mapas de tasa de exposición de la isla de Gran Canaria obtenidos en una campaña previa, entre los años 1996-1997, con los de la campaña realizada entre los años 2008 y 2012, encontrándose una gran concordancia entre ambos mapas, detectándose las tasas de exposición máximas (con picos de hasta 40 μR/h) en las mismas zonas.
- 7. La distribución de los valores obtenidos en las dos campañas en Gran Canaria mantienen una estrecha relación con las formaciones geológicas de la isla. Las zonas de alta tasa (por encima de 20 μR/h) se localizan en el centro, sur y noroeste de la isla, donde se encuentran las formaciones geológicas más antiguas.

- 8. La isla de Fuerteventura presenta en promedio una tasa de exposición mucho menor que Gran Canaria (8,16 µR/h frente a 13,52 µR/h). Se han detectado dos zonas de alta de tasa de exposición (40 µR/h), localizadas dentro del complejo basal (Betancuria y Pájara) y en zonas muy localizadas de Tindaya, Punta de Jandía y Tuineje, en las que afloran pitones sálicos.
- El fondo radiológico de la isla de Lanzarote es extraordinariamente bajo comparado con Gran Canaria tal y como corrobora que el valor máximo de los datos es 12 μR/h e igual a la mediana e inferior a la media geométrica de los datos de tasa de exposición de Gran Canaria.
- Lanzarote presenta valores muy similares en promedio a Fuerteventura; las dos islas tienen, prácticamente, la misma mediana (8 μR/h y 7,5 μR/h), si bien no se han obtenido en la isla los máximos que se encuentran en Fuerteventura.
- 11. Los mapas de tasa de exposición obtenidos de las islas son concordantes con el comportamiento radiológico que se espera a partir delos mapas geológicos de las islas.
- 12. Para completar este estudio se han comparado los resultados obtenidos con los mapas de tasa de exposición de la provincia de Santa Cruz de Tenerife elaborados a partir de los datos de Fernández de Aldecoa y con los valores del MARNA.
- 13. Sólo la isla de Tenerife presenta unos niveles de tasa de exposición similares a la de Gran Canaria. La Gomera, La Palma y El Hierro presentan un fondo radiológico similar a Fuerteventura y Lanzarote.
- 14. La isla de Gran Canaria presenta una variabilidad radiológica comparable a la encontrada en la Península Ibérica. Prácticamente la mitad de la Isla tiene niveles de tasa de exposición superiores a 18 μR/h, similares a los que miden en las zonas graníticas de Extremadura, la parte oriental de Castilla y León o Galicia. Las Islas de Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa con niveles medios inferiores a 8 μR/h muestran un comportamiento radiológico similar a los encontrados en las provincias del Mediterráneo
- 15. Para caracterizar los efectos de la radiación gamma sobre la materia se ha obtenido la tasa de dosis absorbida en aire para las islas canarias orientales, que permite comparar con los valores del MARNA y los valores medios de distintos países europeos.
- 16. Comparado con la media mundial (55 nGyh⁻¹), la Isla de Gran Canaria presenta un fondo radiológico gamma 37% superior. Por el contrario, Lanzarote y Fuerteventura presentan valores un 35% y un 22% por debajo respectivamente, lo que muestra la diferencia de comportamiento de las islas debido a su distinta historia geológica.
- 17. Como parte del análisis de la radiación gamma natural en la Isla de Gran Canaria se situó una sonda GammaTracer en la cumbre de la isla. Los resultados obtenidos para la serie de un año reflejan una clara componente estacional (variación verano-invierno), una variación día-noche,

así como indicios de que la serie presenta efecto de memoria (correspondiente a valores de baja frecuencia), que pueden reflejar comportamientos a otra escala.

- 18. Para el estudio de la distribución de radioisótopos de las islas canarias orientales se obtuvieron 172 muestras de suelo de la isla de Gran Canaria, 106 de Fuerteventura, 60 de Lanzarote y 3 de La Graciosa.
- Mediante el análisis inicial de 74 muestras obtenidas en las tres islas, se realizó una intercomparación de nuestro detector con el del Laboratorio de Física de Radiaciones y Medio Ambiente (FRYMA) de la Universidad de Huelva.
- 20. Las medidas realizadas de las 341 muestras de suelo de las tres islas orientales, han permitido establecer los siguientes valores medios de las concentraciones de radionúclidos en sus suelos:
 - Isla de Gran Canaria [²²⁶Ra]=33,88 (Bq/kg) ; [²³²Th]=44,96 (Bq/kg); [⁴⁰K] =421,32 (Bq/kg)
 - Isla de Fuerteventura [²²⁶Ra]=25,04 (Bq/kg) ; [²³²Th]=20,59 (Bq/kg); [⁴⁰K] =376,20 (Bq/kg)
 - Isla de Lanzarote [²²⁶Ra]=18,82 (Bq/kg) ; [²³²Th]=17,51 (Bq/kg); [⁴⁰K] =332,39 (Bq/kg)
- 21. La distribución de estos valores ha puesto de manifiesto que salvo la concentración de ²³²Th de la isla de Gran Canaria, todos los demás están por debajo de los valores medios de España. Al igual que ocurre con los valores medios mundiales.
- 22. Gran Canaria junto con Tenerife son las islas que presentan mayores concentraciones de radioisótopos naturales siendo la Isla de Lanzarote la que presenta los mínimos de concentración de ²²⁶Ra y ²³²Th.
- 23. De las 341 muestras analizadas en 238 de ellas se ha encontrado ¹³⁷Cs por encima del valor límite de detección (LID≈0,6 Bq/kg), siendo los valores medios de 8,5 Bq/kg,6 Bq/kg y 6,5 Bq/kg para Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote respectivamente.
- 24. Se han realizado los mapas correspondientes al inventario de ¹³⁷Cs en las tres islas y se ha comprobado, como era de esperar, que los valores son inferiores a los de la España Peninsular.
- 25. Para cada una de las islas se ha calculado la tasa de dosis equivalente, habiéndose obtenido: 0,72 mSva⁻¹ para la isla de Gran Canaria, que coincide con la media obtenida para España en el informe MARNA. Sin embargo los valores obtenidos por Fuerteventura y Lanzarote 0,53 mSva⁻¹ y 0,39 mSva⁻¹ respectivamente se encuentran por debajo de la media.
- 26. En el caso de Gran Canaria, existen municipios, caso de Artenara, Tejeda ,Mogán y San Bartolomé de Tirajana, cuyos valores de tasa de dosis equivalente están por encima de 1 mSv/a, aunque debido a su baja densidad de población la dosis colectiva de esta parte de la

isla (ver Figura 5.4) es de 101 $Sv \cdot \text{hombre} \cdot a^{-1}$; 4 veces inferior a la parte NORESTE que es de 468 $Sv \cdot \text{hombre} \cdot a^{-1}$

- 27. El 47% de la población de las tres Islas Orientales, recibe una tasa de dosis equivalente comprendida entre 0,6 m Sv/a y 0,7 mSv/a, siendo tan solo un 13,7 % de población la que está sometida a una tasa dosis superior a 0,7 mSv/a, mientras el resto, 39,1% se encuentra recibiendo una tasa de Dosis equivalente inferior a 0,6 mSv/a
- 28. El Radio Equivalente calculado para Gran Canaria es de 151 Bq/kg, siendo de 108 Bq/kg y 77 Bq/kg para la isla de Fuerteventura y Lanzarote respectivamente. Tan sólo en Fuerteventura una muestra ha superado los 370 Bq/kg, que corresponde a rocas carbonatitas localizadas en Ajuy.
- 29. Todos los municipios de la Islas de Lanzarote tienen un índice de Exceso de riesgo de cáncer para una vida media (ELCR,) debido a la radiación natural por debajo de la media mundial.. Fuerteventura presenta tres municipios con ELCR que superan ligeramente la media mundial y en el caso de Gran Canaria, todos los municipios superan la media.
- 30. A modo de conclusión indicaremos que se ha realizado una completa caracterización radiológica de las Islas Canarias Orientales a partir del análisis de la radiación gamma natural a un metro del suelo y de la concentración de radioisótopos ambientales en las islas, estableciendo los valores promedios de dosis equivalente recibidos por la población de las islas y los riesgos correspondientes.

6.2. Líneas Futuras

En todo trabajo de Tesis doctoral quedan multitud de líneas abiertas que surgen de los datos obtenidos. De las originadas en este trabajo destacaremos las que contribuyen a profundizar en la caracterización radiológica de la región y al análisis de las posibles consecuencias sobre la población. Algunas de ellas ya se han apuntado en este trabajo de tesis y otras se están llevando a cabo por nuestro grupo de investigación, de forma que son un conjunto de propuestas realistas:

- Análisis de desequilibrios entre la capa superficial y la zona profunda del suelo o roca madre para establecer la dinámica vertical de las concentraciones de radionúclidos en Islas Canarias Orientales.
- b) Caracterización radiológica de las aguas subterráneas y costeras de las Islas midiendo su contenido radioisotópico y su contenido en radón. Este estudio completaría este trabajo de Tesis Doctoral en el que se ha estudiado la radiación en aire y suelos, pero no en aguas.

- c) Estudiar de forma cuantitativa la dinámica del ¹³⁷Cs en las islas y su correlación con el ²¹⁰Pb para caracterizar su posible uso como trazador de procesos erosivos e indicador de procesos de transporte.
- d) Caracterización de los suelos frente a sus propiedades de emanación de radón (factores de emanación, porosidad, etc.). El interés de esta línea abierta radica en la importancia de conocer las propiedades de emanación de los suelos para poder estimar las dosis por radón en viviendas, bien por la zona geográfica donde localicen, bien porque el material procedente de ellos se utilice como material de construcción. Estos estudios se pueden comparar con los ya realizados sobre concentración de radón en viviendas y obtener un conocimiento más preciso de los riesgos por radón en Canarias.
- e) Determinación del potencial de emanación de radón en materiales de construcción de las islas Canarias orientales.
- f) Identificación de las zonas con riesgo de radón a partir de los mapas radiométricos, de distribución de radioisótopos y de radón en suelos de las islas Canarias orientales. Elaboración de un mapa de riesgo de radón outdoor para las Islas Canarias Orientales.
- g) Medida de la concentración de radón en viviendas y puestos de trabajo en zonas de riesgo de radón de las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. Elaboración de un mapa de riesgo de radón indoor para las Islas Canarias Orientales.

Apéndice 1

Unidades radiológicas

1.1. Introducción

Cuando la energía es absorbida, principalmente a través de los mecanismos de ionización y excitación atómica, da lugar a descomposiciones químicas de las moléculas presentes en los tejidos del organismo. Sus posibles efectos, dependen, en primera instancia, de la energía absorbida por las células y los tejidos que lo forman.

Para poder medir las energías absorbidas por los tejidos en diferentes condiciones se han definido los conceptos: *exposición*, *dosis absorbida y dosis equivalente*, así como las unidades correspondientes. Sus definiciones y unidades han ido cambiando conforme se ha tenido un mayor conocimiento del mecanismo de la radiación.

La Comisión Internacional de Unidades de Radiación (CIUR) (Icrp, 1991) se ha visto en la necesidad de definir un sistema de unidades que sea aceptado internacionalmente, y de uso común en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). Las unidades que vienen a sustituir al Curie, al rad y al rem, que son unidades tradicionales, son el Becquerel, el Gray y el Sievert, y su definición se basa en el sistema internacional (S.I.). A continuación se definen, en primer lugar, las unidades del S.I. para cada uno de los conceptos, y después las antiguas. La transición de un sistema de unidades al otro ha sido lenta, por lo que es frecuente encontrar las antiguas unidades en los textos, en los medidores de radiación y en el uso cotidiano.

1.2. Exposición (El Roentgen)

La exposición está relacionada con la ionización producida por una radiación; su unidad es el Roentgen. Un Roentgen (R) (definido por vez primera en 1908 por American Roentgen Ray Society) es la exposición (X o gamma) tal que en un kilogramo de aire en condiciones estándar de presión y temperatura (CN) produce un número de pares de iones equivalente a 2,58 x10^{- 4} Culombios. Como la carga de un ion es 1,602 x 10⁻¹⁹ Culombios, esto equivale a que se produzcan 1,61 x 10¹⁵ pares de iones/ kilogramo de aire. En resumen:

$$1 R = 2,58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$$
 de aire en CN [A1.1]

$$1 R = 1,61 \times 10^{15}$$
 pares de iones • kg^{-1} de aire en CN [A1.2]

Esta definición es totalmente equivalente a la antigua, en que se tomaba 0,001293 gramos (1 cm³ de aire en vez de un kilogramo, y una unidad electrostática de carga en vez de un Culombio)

$$1 R = 1 \text{ u.e.e } / \text{cm}^3 = \frac{1/3 \cdot 10^{-9} C}{1,293 \cdot 10^{-6} kg} = 2,58 \cdot 10^{-4} C kg^{-1}$$
 [A1.3]

Del número de iones producidos en aire por un Roentgen se puede calcular la energía empleada, si se recuerda que la energía necesaria para cada ionización del aire es de 34 eV, equivalente a $34 \times 1,6 \cdot 10^{-19} J = 5,4 \cdot 10^{-18} J$ Resulta ser:

$$1,61 \cdot 10^{15} \times 5,4 \cdot 10^{-18} = 8,69 \cdot 10^{-3} J \cdot kg^{-1}$$
 de aire [A1.4]

Debido a que la energía de ionización en el tejido es diferente que en el aire, este factor resulta ser

$$9,6 \times 10^{-3} J \cdot kg^{-1}$$
 de tejido [A1.5]

1.3. Dosis absorbida (El Gray y El Rad)

Dado que el Roentgen deposita diferentes cantidades de energía dependiendo del material que recibe la exposición (ver ecuaciones [A1.4] y [A1.5]), resulta más práctico y cómodo definir un nuevo concepto, la dosis absorbida (D), como la energía depositada por unidad de masa, independientemente de qué material se trate.

En el S.I. la unidad de dosis absorbida es el Gray (Gy), definido, por tanto, como

$$1 Gy = 1 J \cdot kg^{-1}$$
[A1.6]

La antigua unidad de dosis absorbida es el rad, definido en los mismos términos pero en el sistema c.g.s., según se indica en la ecuación [A1.7]

$$1 rad = 10^{2} erg / g = 10^{2} \times 10^{-7} J / 10^{-3} kg = 10^{-2} J \cdot kg^{-1}$$
[A1.7]

Como se puede ver en esta ecuación, la equivalencia será: 1 rad = 0,01 Gy. Nótese también (ecuación [A1.5]) que un Roentgen deposita en tejido una dosis de 0,96 rad, casi un rad, por lo que con frecuencia estas dos unidades se confunden.

1.4. Dosis equivalente (El Sievert y el Rem)

A pesar de que todas las radiaciones ionizantes suelen producir efectos biológicos similares, sin embargo, dependiendo del tipo de radiación de que se trate, cierta dosis absorbida puede producir efectos de magnitudes distintas. Esta diferencia de comportamiento ha llevado a definir una cantidad llamada factor de calidad (Q) para cada tipo de radiación. Se seleccionó arbitrariamente Q = 1 para rayos X y gamma, y para las otras radiaciones los valores dados en la tabla A.1 El factor de calidad da cuenta de los efectos biológicos producidos por las distintas radiaciones, comparados con los producidos por los rayos X y gamma, para una dosis absorbida dada. Así, por ejemplo, un Gray de partículas alfa produce efectos biológicos 20 veces más severos que un Gray de rayos X (según los valores de la tabla A1.1). El factor de calidad Q depende de la densidad de ionización de las diferentes radiaciones. La dosis equivalente es un nuevo concepto que se definió tomando en cuenta el factor de calidad (Vidal-Cuadras and Ortega, 1986). Es igual a la dosis absorbida multiplicada por el factor de calidad. La unidad de dosis equivalente en el S.I. es el Sievert (Sv), definido como:

$$1 Sv = 1 Gy \times Q$$
 [A1.8]

La antigua unidad es el rem, como 1 rem = 1 rad x Q.

$$1 rem = 0,01 Sv$$
 [A1.9]

Tabla A1.1Factor de calidad

Factor de calidad
1
1
2,3
10
10
20

1.5. Múltiplos y submúltiplos

Es relativamente frecuente utilizar múltiplos o submúltiplos de las unidades de radiación, si se tienen en cuenta los prefijos: c (centi = 10^{-2}), m (mili = 10^{-3}), µ (micro = 10^{-6}), k (kilo = 10^{-3}), y M (mega = 10^{6}) para indicar. Algunas conversiones útiles son:

```
1 Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq = 3,7 \times 10^4 MBq

1 mCi = 3,7 \times 10^7 Bq = 3,7 \times 10^1 MBq = 37 MBq

1 Gy = 100 rad

1 cGy = 1 rad

1 Sv = 100 rem

1 mSv = 0,1 rem

1 mSv = 0,1 mrem

1 \mu R/h = 8,69nGy/h (en aire)

1 \mu R/h = 9,57nGy/h (en tejido)

1 Sv = 0,7Gy (para órganos humanos)
```

 Tabla A1.2
 Cuadro resumen de unidades

Concepto	Proceso físico	S.I.	Unidades antiguas
Actividad	Desintegración nuclear	Bq	Ci
Exposición	Ionización del aire	R	R
Dosis absorbida	Energía depositada	Gy	rad
Dosis equivalente	Efecto Biológico	Sv	rem

1.6. Tasa de dosis

Las unidades de dosis absorbida y dosis equivalente expresan la cantidad total de radiación recibida, por ejemplo, en una operación dada. Sin embargo, para controlar los riesgos por radiación también es necesario conocer la rapidez (razón o tasa) a la cual se recibe la dosis. Para conocer la razón de dosis $\dot{D} = \Delta D / \Delta T$, se divide la dosis recibida (ΔD) entre el intervalo de tiempo (ΔT) correspondiente. La dosis total recibida es igual a la razón de dosis multiplicada por el tiempo de exposición.

$$D = D \times t$$
 [A1.10]

Apéndice 2

Calibración y eficiencia del detector INa Inspector 1000

2.1. Introducción.

La calibración del detector Inspector 1000 se llevó a cabo en los comienzos de este trabajo de tesis, antes de la adquisición del detector de Germanio, tanto la calibración en energía como en eficiencia se obtuvo mediante las tres muestras patrones ya comentadas en el capítulo 2 y que brevemente se resumen y recuerdan:

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C.I.
⁴⁰ K	14000	Bq/kg	13600-14400
К	448000	mg/kg	445000-451000
Th	6744		
U	7390		

Tabla A2.1 Características de la muestra patrón IAEA-RGK-1, Potassium Sulfate

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C I
	magintaa	omada	
²³² Th	<4	Bq/kg	
²³⁵ U	228	Bq/kg	226-230
²³⁸ U	4940	Bq/kg	4910-4970
⁴⁰ K	<0,63	Bq/kg	
К	<20	mg/kg	
U	400	mg/kg	398-402

 Tabla A2.2
 Características de la muestra patrón IAEA-RGU-1, Uranium Ore

Núclido	Magnitud	Unidad	Incertidumbre 95% C.I.
²³² Th	3250	Bq/kg	3160-3340
²³⁵ U	3	Bq/kg	3,3-3,9
²³⁸ U	78	Bq/kg	72-84
⁴⁰ K	63	Bq/kg	3,1-9,5
К	200	mg/kg	100-300
Th	800	mg/kg	784-816
U	6,3	mg/kg	5,9-6,7

Tabla A2.3 Características de la muestra patrón IAEA-RGTh-1

2.2. Calibración en energía

Con el fin de proceder a calibrar el detector en energía y eficiencia, se prepararon tres muestras con cada uno de los patrones. Se llenaron tres botes ("bote orina") hasta una altura de 5,7 cm y antes de roscar la tapa se procedió a colocar sobre la rosca, varias capas de te-flón, para impedir la salida del ²²²Rn. Desde la fecha de cierre y obtención del espectro se dejó transcurrir un periodo de un mes, con el fin de conseguir el equilibrio secular. Para cada una de las muestras se obtuvo un espectro durante un tiempo de 24 horas, dichos espectros se muestran en las figuras A2.1, A2.2 y A2.3. Hay que hacer notar, como la resolución de los mismos es muy inferior a los obtenidos en el Capítulo 2 (apartado 2.2), mediante el espectrómetro XtrA.



Figura A2-1 Espectro correspondiente al IAEA-RGK-1, Potassium Sulfate



Figura A2-2 Espectro correspondiente al IAEA-RGU-1, Uranium Ore



Figura A2-3 Espectro correspondiente al IAEA-RGU-1, Thorium Ore

Del estudio de los tres espectros se elabora la tabla A2-4 que estable una relación canal energía:

	Ũ
Canal	Energía (KeV)
340	238,6
493	352
804	583
838	609
1522	1120
1968	1460,8
2367	1765
3487	2615,5

Tabla A2.4 Relación canal energía

Realizando un ajuste por mínimos cuadrados se llega a establecer una relación lineal entre el número de canal frente a la energía, como se muestra en la figura A2.4 y expresa la ecuación [A2.1]:



Figura A2-4 Recta de ajuste canal- energía

$$E = 0,755 \times Canal - 23,16$$
 [A2.1]:

2.3. Resolución en energía

Como ya se ha comentado en el capítulo 2, una de las características más importantes de los detectores es la resolución en energía, que es, la capacidad que tiene el detector para distinguir entre dos energías muy próximas.



Figura A2-5 FWHM en el fotopico del 40K

Para cada una de las energías de interés, se ha calculado el FWHM cada uno de los picos. Los valores quedan reflejados en la tabla A2.5

Canal	Energía (keV)	\sqrt{E}	FWHM (keV)
340	238,6	15,4	22,2
493	352	18,8	31,5
804	583	24,1	41,3
838	609	24,7	45,8
1522	1120	33,5	58,4
1968	1460,8	38,2	74,6
2367	1765	42,0	78,2
3487	2614,5	51,1	98,1

Tabla A2.5 Energía -FWHM

Realizado un ajuste por mínimos cuadrados entre las columnas tres y cuatro de la tabla A2_5 se obtiene que :

$$FWHM = 2,08 \times \sqrt{E} - 8,51$$
 [A2.2]

Que tiene un valor de $FWHM = (40 \pm 4) keV$ en la línea del ¹³⁷Cs (661,8 keV)



Figura A2-6 Recta de ajuste energía-FWHM

La resolución se expresa mediante la ecuación:

$$R(E) = \frac{FWHM}{E}$$
 [A2-3a]



Figura A2-7 curva que muestra la relación entre resolución y energía.-

Puede comprobarse que para $E = 662 \ keV$ la resolución que se obtiene viene dada por:

$$R(\%) = \frac{2,07\sqrt{662 - 7,23}}{662} \times 100 \cong (7 \pm 0,6)\%$$
 A[2.3b]

que coincide con el valor dado por el fabricante(ver apartado 3.2 Apéndice 3).

2.4. Eficiencia del detector

Se define la eficiencia absoluta del fotopico \mathcal{E} , para la energía E, como la probabilidad de que un fotón gamma de esa energía, sea contabilizado en el fotopico correspondiente a la misma:

$$\varepsilon = \frac{N(E)}{T(E)}$$
[A2.4]

Donde N(E) es el número de cuentas registradas en el fotopico de energía E y T(E) es el número de fotones de dicha energía emitidos por la fuente en todas las direcciones.

Dicha relación entre los fotones emitidos y los detectados, es función del espectro energético de la radiación gamma emitida por la muestra, de la geometría y composición de la misma, así como de las dimensiones del detector, y disposición relativa fuente-detector. Dado que T(E) depende de la actividad de la fuente, para determinar la eficiencia, es preciso disponer de fuentes de actividad conocida y medir el número de cuentas registradas en el fotopico de interés.

A tal fin, se han dispuesto tres muestras una con cada uno de los patrones IAEA-RGK-1, IAEA-RGU-1 y IAEA-RGTh-1 en lo que se denomina geometría "Bote Orina" Las muestras contienen: 147,10 g , 142,80 g y 128,38 g de RGK-1, RGU-1 y RGTh-1 respectivamente, las cuales llenan por completo el recipiente (h=5,7 cm).



Figura A2-8 .Espectro del fondo de laboratorio para un tiempo de 259200 s

Previamente a la determinación del espectro de cada una de las muestras patrones se procedió a determinar el espectro del fondo del laboratorio y para ello se obtuvo el espectro durante un tiempo de 259200 s de un bote idéntico a los empleados para la preparación de los patrones, conteniendo agua destilada hasta una altura de 5,7 cm. Para cada pico de interés del

espectro, se le resta las cuentas del fondo, multiplicado por el factor $\left(\frac{t_{muestra}}{t_{fondo}}\right)$

en donde:

 $t_{muestra}$ es el tiempo de medida de la muestra.

y t_{fondo} el tiempo de medida del fondo (259200 s).

En la figura A2-8 se muestra el espectro del fondo, así como la intensidad relativa de las líneas. Cabe destacar el pico correspondiente a la emisión de rayos X de 76 keV debidos al blindaje de plomo, a pesar de la existencia de láminas de cobre y estaño para reducir dicha emisión .

PEAK WITH NID REPORT **** ****** Detector Name: Scionix3x3 InSpector 1000 spectrum Sample Title: Peak Analysis Performed on: 28/12/2009 19:19:25 Peak Analysis From Channel: 1 Peak Analysis To Channel: 4096 Tentative NID Library: C:\GENIE2K\CAMFILES\huelva.NLB Peak Match Tolerance : 6.000 keV Peak ROI ROI Energy Net Peak Net Area Continuum Tentative Peak No. Start End Centroid Nuclide (keV) Uncert. Counts Area 32.29 1.15E+004 135.79 2 49-82 57.63 7.54E+003 3.17E+004 49-82 189.87 з 68.10 39.98 1.47E+004 99- 139 5 118.96 77.33 5.66**E**+004 447.99 1.21E+005 7 178-305 214.79 147.76 5.69E+003 424.75 1.95E+005 178-305 263.34 183.47 7.15E+003 458.03 2.14**E+**005 U-235 8 Ra-226 13 659- 790 725.54 524.37 2.62E+004 482.43 2.10**E+**005 15 793- 938 868.27 629.99 6.64**E**+003 426.97 2.12E+005 17 1224- 1408 1324.72 968.85 6.20E+003 1.99**E**+005 458.39 Ac-228 Ac-228 19 1462- 1664 1566.12 1148.74 1.07E+004 434.77 1.72E+005 7.65E+004 439.24 K-40 20 1874- 2105 1991.09 1466.55 1.18E+005 22 2263- 2518 2396.36 1770.98 239.18 6.81E+003 5.13E+004 Bi-214 23 2765- 3048 2891.82 2144.94 5.61E+003 210.17 3.80E+004 25 3356- 3670 3513.61 2617.02 1.90E+004 196.03 1.97E+004 Th-232

Figura A2-9 . Análisis del espectro mediante Genie2000

2.4.1. Eficiencia para cada una de las líneas de interés

Para la actividad de ⁴⁰K se tiene en cuenta la línea de emisión (1460,8 keV) para el ²³⁸U la línea (609 keV del ²¹⁴Bi) y para el ²³²Th la que corresponde al ²⁰⁸Tl (2614,5 keV).

A partir de la ecuación A2.4

$$\varepsilon = \frac{Area / t_a}{A_m(c/s) \times m}$$
[A2.5]

Siendo $Area/t_a$ el área de cada pico dividido por el tiempo de acumulación y $A_m(c/s)$ la actividad de la muestra en el momento de la medida en Bq/kg

$$A_m(c/s) = A_0 e^{\frac{-t \ln 2}{T}} \times P(E) \simeq A_0 \times P(E)$$
[A2.6]

Aproximadamente igual a la actividad inicial $A_0 \times P(E)$ pues $t \ll T$. P(E) es la fracción de rayos γ emitidos (razón de ramificación) y T el periodo de desintegración de la fuente.

Por consiguiente

$$\varepsilon(E) = \frac{Area}{A_0 \times P(E) \times t \times m}$$
[A2.7]

Y la incertidumbre de la eficiencia vendrá dada por:

$$\delta_{\varepsilon(E)} = \sqrt{\left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial Area}\right|^2} \,\delta_{Area}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial A_0}\right|^2 \,\delta_{A_0}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial P(E)}\right|^2 \,\delta_{P(E)}^2 + \left|\frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial m}\right|^2 \,\delta_m^2 \qquad [A2.8]$$

la cual puede expresarse

$$\delta_{\varepsilon(E)} = \varepsilon(E) \sqrt{\left(\frac{\delta_{Area}}{Area}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{A_0}}{A_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{P(E)}}{P(E)}\right)^2 + \left(\frac{\delta_m}{m}\right)^2}$$
[A2.9]

Siendo δ_{Area} , δ_{A_0} , $\delta_{P(E)}$ y δ_m las incertidumbres asociadas al área del fotopico, a la actividad de la muestra patrón, a la probabilidad de emisión y a la masa respectivamente, se desprecia la incertidumbre debida al tiempo de recuento, ya que las muestras que se analizan son de poca actividad, y por tanto, si el funcionamiento del detector es correcto, el tiempo muerto es despreciable.

Dicho esto se pasa a calcular la eficiencia y su incertidumbre para cada una de las líneas de interés.



Figura A2-10 .Fotopico correspondiente a la energía de 1460,8 keV

En la figura A2-10 se muestra el área del fotopico así como su incertidumbre, Para la línea del ⁴⁰K (1460,8 keV). Luego:

$$\varepsilon(1460) = \frac{371567}{14000 \times 0,1067 \times 86400 \times 0,1471} = 1,957 \cdot 10^{-2}$$
 [A2.10]

$$\delta_{\varepsilon(1460)} = 1,957 \cdot 10^{-2} \sqrt{\left(\frac{1820}{371567}\right)^2 + \left(\frac{400}{14000}\right)^2 + \left(\frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{10^{-5}}{0,1471}\right)^2} = 8,163 \cdot 10^{-4}$$

Figura A2-11. Fotopico correspondiente a la energía de 609 keV

Se procede del mismo modo para la línea del ²¹⁴Bi (609 keV), obteniendo:

$$\varepsilon(609) = \frac{940870}{4940 \times 0,4628 \times 86400 \times 0,1428} = 3,335 \cdot 10^{-2}$$
[A2.11]
$$\delta_{\varepsilon(609)} = 3,335 \cdot 10^{-2} \sqrt{\left(\frac{3199}{940870}\right)^2 + \left(\frac{30}{4940}\right)^2 + \left(\frac{1,39 \cdot 10^{-3}}{0,4628}\right)^2 + \left(\frac{10^{-5}}{0,1428}\right)^2} = 3,701 \cdot 10^{-4}$$



Figura A2-12. Fotopico correspondiente a la energía de 2614,5 keV

MARKER INFO	1.0.1	2004 - 0401 EL-V	D.(1)4 D.(1)4 00.041 100.0171-3/
	Left Marker:	3334 : 2491.5 KeV	FWHM, FWIM: 33.041, 130.817 KeV
Next	Right Marker:	3647 : 2732.2 keV	Gaussian Ratio: 1.057
Drove	Centroid:	3491 : 2612.1 keV	ROI Type: 1
FIEV	Area:	102588 ± 1.54%	Integral: 161855

Y mediante la Figura A2-12 se obtiene la eficiencia en la energía que corresponde a la línea del ²⁰⁸TI (2614,5 keV

$$\varepsilon(2614,5) = \frac{102588}{3250 \times 0,3463 \times 86400 \times 0,12838} = 8,216 \cdot 10^{-3}$$
 [A2.12]

$$\delta_{\varepsilon(609)} = 8,216 \cdot 10^{-3} \sqrt{\left(\frac{1580}{102588}\right)^2 + \left(\frac{90}{3250}\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,3463}\right)^2 + \left(\frac{10^{-5}}{0,12838}\right)^2} = 2,770 \cdot 10^{-4}$$

Repitiendo el proceso para las líneas de 1120 keV y 1765 keV del ²¹⁴Bi, se obtiene que:

$$\varepsilon(1120) = 2,559 \cdot 10^{-2} ; \delta_{\varepsilon(1120)} = 5,781 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon(1765) = 1,569 \cdot 10^{-2} ; \delta_{\varepsilon(1765)} = 4,731 \cdot 10^{-4}$$

En la tabla A2.6 se muestran los resultados obtenidos, se han añadido las columnas tercera y cuarta, después de calcular los logaritmos neperianos de la energía y la eficiencia.

E	Е	$\ln(E)$	$\ln(\varepsilon)$
609	3,336E-02	6,41181827	-3,40053279
1120	2,560E-02	7,02108396	-3,66524645
1460,8	1,957E-02	7,28673951	-3,93369431
1765	1,570E-02	7,47590597	-4,15438372
2614,5	8,216E-03	7,86882815	-4,80169748

Tabla A2.6 Eficiencia para cada una de las energías de interés

Una posible función, para este tipo de detectores, es la mostrada por la ecuación A2.13 (Gilmore and Hemingway, 1995) (Debertin and R.G., 1988).

$$\ln(\varepsilon) = \sum_{i} a_{i} \left(\ln\left(\frac{E}{E_{0}}\right) \right)^{i}$$
 [A2.13]

Donde $E_0 = 1 \ keV$ se introduce para que la ecuación A2-13 sea dimensionalmente correcta.

Mediante un ajuste del $\ln(\varepsilon)$ a un polinomio de potencias de $\ln(\frac{E}{E_0})$, por el método de mínimos cuadrados, se obtiene:

$$\ln(\varepsilon) = -28,467 + 7,977(\ln(E_{E_0})) - 0,6188(\ln(E_{E_0}))^2$$
[A2.14]

Siendo su coeficiente de correlación r = 0,999



Figura A2-13. Curva de calibración en eficiencia.

Apéndice 3

Calibración y características de los equipos utilizados.

3.1. Características Ludlum

Como se indica en el apartado 2.2, el equipo básico de campo es el detector de centelleo Ludlum microR modelo 12S, del que se disponen dos unidades. Uno de ellos se ha adquirido expresamente para la realización de esta tesis doctoral y se utiliza como detector de referencia (Nº de serie: 252912). En la figura A5.1 se muestra su certificado de calibración de fábrica.

Scientific and in Instrument	te CE	RTIFICATE OF CAL	IBRATION 501 SW	GAN STREET GETWATER, TEXAS 7	FAX ND: 325-235-4 9559. U.S.A.
STOMER TECHASA				ORDER ND.	20117550
Ludium Maanu	rementa, inc. M	odel	125	Sesal No. 45291	
	M	cdei		Secol No.	
Cate 6-0	Cal Dyr	Date 6-0	Cal. Interval	1 Year Metod	202-004
mark Goples to apps	cable insy, and/or delect	tor WW mtg spec.	T72FF F	RH 41 % A	t698.8_ mm н
New Instrument, Instr	unert Received	Within Teler. •- 1976 [] 10	Sale Dign of Lot of Lot. Dies	struct History	ter see commonts
Mechanical ok. P/G Resp. ck	Z Basel ck.	• _ •	organiand statistics indow Operation	C Gedroes	vs. Logenty
ALEG (K.	Alam Setin	ga ŽBa	2. ok. (Min. Volt) 22	VDC	
Calibrated in accordance v	with LMI SOP 14.8 rev 12	205/92. V(Cal	brafaid in accordance with U	MISOP 14.9 rev 02/07/5 Threshold	97.
ment Volt Set725	V Input Sens.	35 mV Det. Oper.	V at	mV Olai Ratio	
HV Readout I2 points	Pot/Yal		V Ref./ret	······································	v
ra Calibration GM detectors p	estioned peperdicular to a	outs except to N 44-6 in which	the front of probe faces source	- Neton	ENT
RANGE/MULT	REIDER CA	FERENCE	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	D INSTRUM	ENT EADING*
RANGE/MULT X 1000	RE IPLIER CA 2000 J	FERENCE RUL POINT RAY	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	D INSTRUM	ENT EADING*
RANGE/MULT X 1020 X 1020 X 1020	PLIER CA 2000 1 1000 - 2000 2	FERENCE AL POINT Ray Mar 16 200 can	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	INSTRUM	EADING*
RANGE/MULT X 1020 X 1020 X 1020 X 1020 X 1020	01010140 peperdicular to 1 1PLIER CA 2000 s 1000 s 200 uP 1000 s	EFERENCE AL POINT BAY Mar JL, 268 JM Bar	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	7D INSTRUM ING" METER R 1 1	EADING*
RANGE/MULT X 1000 X 1000 X 100 X 100 X 100 X 100 X 100	1010991 peperdicule to 1 RE 2000 J 2000 J 200 J 1000 J 1000 J 1000 J 1000 J 1000 J 1000 J	ERENCE L. POINT BAY BAY BAY BAY BAY CON	Instructions does not a INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	NSTRUM METER R 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING
RANGE/MULT X 1050 X 1050 X 105 X 105 X 105 X 105 X 10 X 10 X 10 X 10	1000 peperdicule to 1 RE 2000 L 2000 L 2000 L 1000 p 1000 p 100	FERENCE L. POINT Ray Ray Ray Ray Son Son Son Son Son	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ!	CD INSTRUM ING" METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	EADING*
RANGE/MULT X 1000 X 1000 X 100 X 100 X 10 X 10 X 1	estioned seperaticale to a RE IPLIER CA 1000 y 1000	FERENCE L. POINT RAY RAY RAY RAY Son Son Son Son Son Son Son Son	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ	D INSTRUM METER R 1 1 1 1 1	EADING"
A Celebration GM Selectors (RANGE/MULT X 1050 X 100 X 100 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10 X	01/0040 Beperdicular to a RE 1PLIER CA 2009 J 200 U 1000 y 1000 1000 y 1000 1000 y 1000 1000	Can cap b VA4 h Act FERENCE LL POINT Bity Rity Rity Rity Rity Rity Rity Rity R	Instrument Reco	CD INSTRUM ING METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	EADING"
A Celestor OV Selector (RANGE/MULT X 1050 X 100 X 100 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10 X	entronal properticule to a RE IPLIER CA 2000 g 1000 g 1000 g 100 g	Leven out to 44 & to 40 FERENCE LL POINT Rate Rate Gan Gan Gan	re for discle form Long INSTRUMENT REC "AS FOUND READ	CD INSTRUM ING METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING*
A Calculor OV Selectors RANGE/MULT X 1000 X 100 X 100 X 10 X 10	Control properticule to a RE IPLIER CA 2009 b 200 b 200 b 1000 c 1000 c	RETRUENCE LL POINT RAT RAT Son con con con con con con con	INSTRUMENT REC 'AS FOUND READ AS F	NGT NSTRUM NG" METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	IENT EADING*
A Calculator OM Salactor p RANGE/MULT X 1000 X 100 X 100 X 100 X 10 X 10	Other Repaired care Repaired care <td>INSTRUMENT</td> <td>INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUNT BUT TO THE ASSOCIATION AND AND AND AND AND AND AND AND AND AN</td> <td>NGT NISTRUM NIGT NIETER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</td> <td>ENT EADING*</td>	INSTRUMENT	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! "AS FOUNT BUT TO THE ASSOCIATION AND AND AND AND AND AND AND AND AND AN	NGT NISTRUM NIGT NIETER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING*
A Celestic CM Selector (RANGE/MULT X 1020 X 1020 X 102 X 102 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10 X 10	Initial papersicule to a RE RE IPLIER CA 1002 2000 II 1002 1002 1001 100 1001 101 101 111 111 111 112 111 113 111 114 111 115 111 116 111 117 111 118 111 119 111 111 111 112 111 113 111 114 111 115 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 <td>INGTRUMENT METER READING</td> <td>INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! AS FOUND READ</td> <td>2D INSTRUM INST METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1</td> <td>ENT EADING*</td>	INGTRUMENT METER READING	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! AS FOUND READ	2D INSTRUM INST METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING*
A Calebration GM Salactory RANGE/MULT X 1020 X 1000 X 100 X	Initial papersicule to a RE RE Inpluer CA 1000 µ 2000 µ 1000 µ 200 µ 1000 µ 100 µ 1001 µ 10	Not sound to MAR I And I FERENCE LL POINT Raty Raty Gan Gan Not TRUMENT METER READING	A BOY I JOSE SUB LLOCA INSTRUMENT REC 'AS FOUND READ! 'AS FOUND READ!	NGT INSTRUM NGT NETER R 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	ENT EADING*
A Calibador OV Selectors RANGE/MULT X 1000 X 100 X 100 X 100 X 10 X 10	Control properticule to a RE RE LIER CA 2009 J 1000	RETRUCE LL POINT RAT RAT RAT RAT RAT RAT RAT RA	INSTRUMENT REC INSTRUMENT REC 'AS FOUND READ! AS FOUND READ	NGT NISTRUM NIGT METER R 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	ENT EADING*
Calculator OM Selectors RANGE/MULT X 1000 X 1000 X 100 X 100 X 100 X 101 X 10 X	NE NE IPLIER CA 2009 J 1000 J 200 JE 1000 J 1000 J 1	Instrument	INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! "AS FOUND READ! AS FOUND REA	NGT INSTRUM NGT METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING*
A Calibration CM Salactory RANGE/MULT X 1020 X 1020 X 1020 X 1020 X 102 X 102 X 10 CAL POINT Gal Gal Gal Gal Gal Gal Gal	CF APPLIER CA CO	Not Register V All & All	Per forei di pode fuga Lucra INSTRUMENT REC "AS FOUND READ! "	7D INSTRUM INST METER R 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	ENT EADING*
A Calibador OM Selector (Res Res IPLIER CA 2000 June 1000 p 1000 p 100 p 1000 p 100 p 1000 p 100 p 1000 p 100 p 100 p 100 p	Note TRUMENT Not TRUMENT		TO INSTRUM INST METER R T T T T T T T T T T T T T	ENT EADING*
A Calibration CM Selectors (RANGE/MULT X 1000 X 1020 X 1020 X 1020 X 102 X 102 X 103 X 103	CFX white a Dispersional Program (Constraint) CFX white a Dispersional Program (Constraint) CFX white a Dispersion (Constraint) CFX white a Dispersio	Not Regist to VALS in and Concept to VALS in	A for a factor factor to a constraint of a con	Tomme of the number of the nu	ENT EADING*
A Calibration CM Selectors (RANGE/MULT X 1000 X 1020 X 1020 X 102 X 102 X 102 X 102 X 102 X 102 X 102 X 10 X 10	CF with 200 CF with 2	POIS COUNT 1 Add in and the open of th	A STEURINT ABC INSTRUMENT ABC AS FOUND READ AS F	DD INSTRUM ING* NETER R I I	ENT EADING* EADING* Instead Electronically RESTRUMENT METER READING INSTRUMENT METER READING INSTRUMENTI INSTRUMENT INSTR
A Calibration CM Selectors (RANGE/MULT X 1000 X 1020 X 1020 X 102 X 102 X 102 X 103 X 10 X 10	BIDLIER RE 1002 2003 2003 1002 1002 2004 1002 1002 1001 1002 1002 1002 1001 1002 1002 1002 1001 1002 1001 1002 111 111 112 111 113 111 114 111 115 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111 111	POIS COUNT 10000 FERENCE L. POINT Altr Altr Cont Gan Gan Gan Gan Gan Gan Gan Gan Gan Solid	A Brown of potent Sector Larger INSTRUMENT REC AS FOUND READI AS FOUND READ	DD INSTRUM ING" NETER R I I I	ENT EADING* hrand Excernically RETRANENT METER READING INFORMATION

Figura A3.1. Certificado de calibración del equipo Ludlum Micro 12S de referencia.

El segundo equipo Ludlum (Nº de serie: 124224) se ha verificado con el detector de referencia, aunque de forma independiente, también se llevó a cabo una calibración en el Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de Cataluña. La verificación entre ambos detectores, se realizó mediante una prueba estándar de medida frente a la distancia, utilizando una fuente encapsulada de ¹³⁷Cs. Los valores obtenidos se presentan en la tabla A3.1

Ludlum NS:251912	Ludium NS:124224	
90	80	
40	40	
24	24	
18	18	
16	16	
14	14	
12	12	

Tabla A3.1. Medidas de tasa de exposición en µR/h para distintas distancias

Los datos presentan un coeficiente de correlación lineal de 0.9969 y se ajustan a una recta y = 0.8723 x + 2.4754, lo que nos indica una gran concordancia entre ambos.



Figura A3.2. Recta de verificación de los detectores Ludlum

El otro equipamiento de campo utilizado son las sondas GammaTracer de Genitrón. La comparación con el detector de referencia, es en este caso más complicada, ya que miden en continuo, con un muestreo variable, no son de lectura instantánea y son tubos Geiger. No obstante, se encuentra también una excelente correlación con el equipo de media tal y como se observa en la figura A5.3.



Figura A3.3. Correlación entre el equipo Ludlium Micro 12S de referencia y las sondas GammaTracer.

La correlación de 0,9417 nos indica un acuerdo excelente, entre los dos detectores.



3.2. Hoja características del espectrómetro Inspector 1000

Channel number

TEST RESULTS

Nuclide	: Cs-137 (662 keV)
Energy Resolution	: 7.2 %
Noise	= N/A
Peak to Valley	: N/A
Pulser-GEE	: N/A
High Voltage	: 550 V
Date	: 28 October 2003
Tested by	: Luuk Timmerman

SCIONIX HOLLAND BV. P.O. BOX 143, 3980 CC BUNNIK, THE NETHERLANDS TEL. 31 (0)30 657 0312, FAX, 31 (0)30 656 7563, EMAIL: SCIONIX@WXS.NL

3.3. Hoja de características del espectrómetro XtRa



DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA

Detector Model Cryostat Model Preamplifier Mo	6783518			and the lot of the second		
Cryosiat Model Preamplifier Ma	21022118		Serial	number 510	138	
Preamplifier Me	7500SL					
	del 2002CSL					
The purchase up	ecifications and there	efore the warrant	ed performance	of this detector	are as follows :	
Nominal volum	53 10	Rela	tive efficiency	35 %		
Resolution	1.80 keV (FWHM	4) at 1.33 MeV				
	keV (FWT	FM) at 1.33 MeV				
	.875 keV (FWH)	d) at 122 keV				
	keV (FW1	rm) at	All and a second	a second a		
Peak/Compton	61:1	Cryostat wel	I diameter	Well de	epthmm	
Cryostat descrip	tion or Drawing Nun	nber if special V	ertical dipatick,	type 7500SI		
Diaminat Cha	and and address					
Physical C.na	acteristica					
Geometry	Coaxial one open e	end, closed end fa	acing window			
Diameter	<u>60</u>	mm	Active volu	ime	DC	
Length	51	mm	Crystal we	l depth	170/111	
Distance from v	rindow (ourside) 5	mm	Crystal we	I diameter	mm	
Electrical Ch	inacteristics					
Present is not were	in mercer partes					
a second second		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				
Depletion volta	e <u>11)2500</u>	Vde	100			
Depletion volta Recommended	e <u>(-12500</u> bias voltage Vdc	Vde (+)3000	Vde			
Depletion volta Recommended Leakage curren	e (2)2500 bias voltage Vdc at recommended bia	Vdc (+)3000 is 0.01	Vde 1A	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier ses	e (11)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco	Vde (+)3000 / is 0.01 i ommended volta	Vde nA ge <u>-0.4</u>	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier ses	e (1)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco	Vdc (+)3000 is 0.01 ommended volta	Vde 1A ge <u>-0.4</u>	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution ar	te <u>112500</u> bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency	Vdc (±13000 / is 0.01 / ommended volta	Vde 1A. ge <u>-0.4</u>	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution ar With amp time	te (1)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of	Vdc (+)3000 / is 0.01 / ommended volta 4	Vde 1A. <u>g</u> e <u>-0.4</u> s	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution at With amp time	e <u>(1)2500</u> bias voltage Vdc at recommended bia c point voltage at reco d Efficiency constant of	Vdc <u>(+)3000</u> as <u>0.01</u> bommended volta <u>4</u> <u>900</u>	Vdd 1A. ge <u>- 0.4</u> s	Vác		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution at With amp time Isotope	te 1/2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of	Vdc (+)3000 as 0.01 ommended volta 4	Vdc 1A. ge <u>-0.4</u> s	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution at With amp time Isotope Energy (keV)	the L1/2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of 122	Vdc (+)3000 / as 0.01 / ommended volta 4 // ⁶⁰ Co 1332	Vdc nA ge <u>-0.4</u> s	Vác		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution at With amp time Isotope Energy (keV) FWHM (keV)	te (1)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of 122 .834	Vdc (+)3000 is 0.01 ommended volta 4 4 0°Co 1332 1.77	Vde nA ge <u>-0.4</u> s	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution ar With amp time Isotope Energy (keV) FWHM (keV) FWTM (keV)	e (1)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of 122 .834	Vdc (±13000 / is 0.01 / ommended volta 4 / ⁶⁰ Co 1332 1.77 3.26	Vdc nA ge <u>-0.4</u> s	Vac		
Depletion volta Recommended Leakage curren Preamplifier tes Resolution at With amp time Isotope Energy (keV) FWFIM (keV) FWFIM (keV) Peak/Compton	e (1)2500 bias voltage Vdc at recommended bia t point voltage at reco d Efficiency constant of 122 .834	Vdc (+)3000 / is 0.01 / ommended volta 4 // ⁶⁰ Co 1332 1.77 3.26 67.2.1	Vde nA ge <u>-0.4</u> s	Vac		

Apéndice 4

Códigos geológicos

Tabla A4.1 Códigos geológicos (GRAFCAN, 2013)

Código	Nombre	Descripción
		Borde de colada
173	Coladas basálticas	Coladas basálticas de espesor individual comprendido entre 2 y 4 m., con disyunción columnar en sección. Niveles de almagres intercalados, de espesor, gene- ralmente, no superior al metro.
174	Conos de tefra y piroclásticos basálticos	Niveles de espesor métrico, o conos enterrados, cons- tituidos por material piroclástico de color ocre- anaranjado, y granulometría fina.
183	Coladas basálticas	Coladas basálticas, con disyunción columnar en sec- ción.
194	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos porfídicos o afaníticos, en coladas de espesor individual de hasta 10-12 m. Estructura prismática (disyunción columnar), en sección.
195	Delgados recubrimientos de lapillis sobre coladas basálticas en el Edificio Famara	9
205	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos olivínicos, porfídicos o afaníticos.
209	Coladas basálticas, basálticas olivínicas y olivínico-piroxénicas, de diversas alinea ciones volcánicas, coladas basálticas "intracayon" del bco. Teneguime y cola das basálticas pahoehoe.	/ - Basaltos olivínicos, generalmente porfídicos y de ma- striz afanítica. Espesores individuales de hasta 10-40 - m. para las coladas "intracanyon".
213	Conos de tefra de diversas alineaciones volcánicas.	Lapillis, con frecuencia oxidados, de tamaños centimé- tricos, escorias y bombas (éstas, de hasta 60-70 cm., de tamaño). Enclaves duníticos.
218	Coladas basálticas y basálticas olivínicas de diversas alineaciones volcánicas.	s Basatlos afaníticos vesiculares, con fenocristales de olivino. Enclaves duniticos.
Código	Nombre	Descripción
--------	--	--
224	Depósitos piroclásticos y arenosos alte- rados.	Materiales areno-arcillosos, de color anaranjado, pro- cedentes de la alteración edáfica de material piroclás- tico-arenoso. Presencia frecuente de nódulos y niveles ferruginosos.
225	Depósitos aluvio-coluviales, areno- arcillosos.	Materiales areno-arcillo-llimosos, de color marrón rojizo, y espesor inferior a 4-5 m. A veces, pequeñas intercalaciones de material detrítico más grueso (colu- vial), procedente de relieves próximos.
226	Arenas eólicas y arenas sobre sustrato.	Arenas sueltas, de color claro (blanco, amarillento, raramente asalmonado), finas, organógenas, de espesor variable (por lo general menor de 2 m. pero, a veces, más de 10 m.). Presencia de helícidos. A veces, encostramiento a techo.
227	Coladas basálticas y basálticas olivínicas de diversas alineaciones volcánicas.	Basaltos olivínicos, por lo general porfídicos, con textu- ra afieltrada, con enclaves duníticos (escasos o abun- dantes, según las coladas) y enclaves sedimentarios esporádicos.
229	Conos de tefra, centros de emisión (lapi- lli, escorias y bombas) de diversas ali- neaciones volcánicas.	Lapillis (de tamaños más comunes 1,5 – 3 cm.), esco- rias y bombas (de hasta 50 cm.). Enclaves duníticos, y bloques lávicos decimétricos, a veces.
230	Piroclastos de dispersión de diversas alineaciones volcánicas.	Lapillis finos.
234	Coladas basálticas de la alineación de Montaña Bermeja.	Basaltos olivínicos porfídicos.
238	Piroclastos de dispersión.	Lapillis finos. Espesor a veces superior a los 2 m.
239	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos olivínicos vesiculares, con frecuencia "aa" y, a veces, pahoehoe. Espesor, generalmente de 1-4 m. (a veces, mayor de 10 m.). Disyunción columnar.
243	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos olivínicos en mayor parte microporfídicos. Enclaves duníticos.
246	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos olivínicos habitualmente microporfídicos. Enclaves duníticos.
248	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos olivínicos, por lo general, microporfídicos. Enclaves duníticos.
249	Conos de tefra.	Lapillis, escorias y bombas. Enclaves duníticos.
250	Coladas basálticas y basálticas olivínicas	Basaltos afaníticos o microporfídicos, olivínicos, con frecuencia de tipo pahoehoe. Enclaves duníticos.
253	Piroclastos de dispersión de los tres episodios.	Manto de lapilli fino, negro, de espesor métrico. Pre- senta estructuras típicas de depósitos eólilcos, tales

Código	Nombre	Descripción
		como laminación paralela y estratificación cruzada.
258	Depósitos de ladera y coluviones (arenas y gravas).	Cantos y bloques de tamaño centi-decimétrico, hete- rométricos, angulosos o subangulosos, sin ordenación interna, y espesores hasta decamétricos (en zonas de mayores relieves). Material piroclástico derrubiado, sin selección ni ordenación.
269	Conos de tefra estrombolianos	Acumulaciones de lapilli, bombas y escorias.
291	Lavas basáltico-olivínicas, olivínico- piroxénicas y plagioclásicas, con traqui- basaltos subordinados. Hawaiitas, ban- moreitas y mugearitas.	 Apilamientos de coladas basalticas, con intercalacio- nes de almagres, más frecuentes hacia la parte alta. Hacia la parte baja, las coladas son más de tipo pahoehoe, y con potencias individuales de 1 - 2,5 m.
299	Coladas riolítico-traquíticas.	Rocas criptocristalinas con abundantes fenocristales feldespáticos de 2-4 mm. y lajeado característico. Se disponen como coladas masivas de 15-25 m. de espesor individual, local e internamente brechificadas, y con base obsidiánica. Potencia del conjunto.
302	Ignimbritas, coladas piroclásticas y cola- das riolítico - traquiticas peralcalinas.	Apilamientos de ignimbritas de colores gris-crema, con bases obsidiánicas. También aparecen vitrófidos roji- zos. Espesor del conjunto, de 200 a más de 350 m.
304	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico - traquíticas peralcalinas.	Apilamiento de coladas, la mayor parte de las veces, ignimbríticas, de composición traquitica peralcalilna, con niveles de sedimentos y depósitos epiclásticos. También se presentan niveles lávicos intercalados, sills y materiales riolitico-traquíticos brechificados.
305	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico - traquíticas peralcalinas. Complejo de diques del "Cone Sheet" entre 10 y 60 %.	- Apilamiento de coladas frecuentemente ignimbríticas, e de composición traquitica peralcalilna, con niveles de sedimentos y depósitos epiclásticos.
306	Tobas ignimbríticas y coladas riolitico - traquíticas peralcalinas. Complejo de diques del "Cone Sheet" mayor del 70 %.	Apilamiento de coladas frecuentemente ignimbríticas, - de composición traquitica peralcalilna, con niveles de e sedimentos y depósitos epiclásticos. También se pre- sentan niveles lávicos intercalados, sills y materiales riolitico-traquíticos brechificados.
308	Sienitas alcalinas y peralcalinas.	Rocas de color grisáceo, con facies variable: porfídica (fenocristales de hasta más de 1 cm.), microsienítica o, menos frecuente, pegmatítica. Cuando porfídicas es- tán constituídas por fenocristales de feldespato potási- co y nefelina en una pasta de grano.
309	Brecha volcánica central del "Cone sheet"	Rocas de aspecto cataclástico y polimíctico, con e abundantes fragmentos (aproximadamente, el 70%) traquíticos y traquibasálticos de 2 - 10 cm. de tamaño, y escasa matriz.

Código	Nombre	Descripción
311	Ignimbritas y lavas fonolítico-traquíticas peralcalinas.	Ignimbritas con intercalaciones de lavas fonoliticas y s fonolitico-traquíticas. Las ignimbritas presentan aspec- tos variables, entre tobáceos, poco flameados, y euta- xíticos, con soldadura intensa.
317	Lavas fonolíticas, fonolítico-nefelínicas y a veces, traquíticas, peralcalinas.	Apilamiento de coladas fonolíticas, traquíticas y traqui- fonolíticas de 2-22 m. de espesor individual, color 'verdoso, característicamente lajeadas y frecuentemen- te afaníticas (tan solo suelen destacar, a veces, crista- les de sanidina de 2-4 mm.). Espesores.
321	Tobas e ignimbritas no soldadas de tipo "ash and pumice".	Rocas de color blanquecino-naranja, compuestas por fragmentos muy vesiculares de pómez (60-80%) (de tamaño milimétrico pero que pueden llegar a los 18 cm.), no aplastados ni soldados, fragmentos líticos subangulosos (35-40%), generalmente fonolíticos.
324	Sedimentos aluviales: conglomerados g arenas.	Conglomerados heterométricos, monomícticos, de cantos predominantemente fonolíticos de tamaño decimétrico, raramente métrico. Materiales arenosos como niveles intercalados con los anteriores. Espesor de conjunto, 10-70 m.
325	Conglomerados y arenas continentales con intercalaciones de niveles detríticos marinos.	s Conglomerados heterométricos, monomícticos, de s cantos redondeados fonolíticos verdosos y 15-30 cm. de tamaño medio (máximo de hasta 9,5 - 1 m.).
329	Facies detríticas de arenas y conglome rados poco clasificados ("mud flows" lahares frios). Facies Santidad.	Conglomerados heterométricos de 8-70 cm. de tama- -ño de cantos. Cantos de basanitas y tefritas del Ciclo y Roque Nublo. Arenas como matriz de los conglomera- dos o en niveles poco importantes. Depósitos volcano- clásticos. de materiales detríticos gruesos y depósitos
333	Lavas basálticas, basáltico olivinico piroxénicas, ankaramíticas, basaníticas tefríticas. Hawaiitas, benmoreitas.	Conjunto de espesor igual o superior a 200m., de - coladas "aa" de espesor individual variable entre 2 y y 10m. (excepcionalmente, 20-30 m.). Presentan bases muy escoriáceas y zonas internas masivas, poco vesi- culares, así como lajeado subhorizontal.
334	Conos de tefra y conos piroclásticos (lapillis, escorias y bombas).	Conos de altura inferior a 100m. y de tipo estrombo- s liano, constituídos por lapillis, escorias y bombas bien estratificados, y con granulometrías diversas. Presen- tan color rojizo-ocre y acusada consolidación.
336	Alternancia de brechas y coladas.	Diferenciación cartográfica que engloba brechas de tipo Roque Nublo e intercalaciones lávicas traquíticas, fonolíticas y tefríticas similares a las de otros términos del Ciclo Roque Nublo. Se presenta cortada por diques basanitico-tefríticos.
338	Brecha volcánica Roque Nublo (f.d. facies deslizadas), (f.c.: facies central).	Conjunto de materiales brechoides, de espesores máximos del orden de 500 m. (en las proximidades del Pico de las Nieves), dispuestos en potentes mantos de espesor individual variable entre 5 y 60 m. Son litolo-

Código	Nombre	Descripción
		gías de colores crema y marrón oscuro.
339	Gabros alcalinos de grano medio, y peg- matoides.	Gabros oscuros de tamaño de grano medio-grueso, con cristales de piroxeno y olivino (frecuentemente alterado) y facies pegmatoides asociadas. El conjunto se presenta atravesado por diques.
341	Intrusiones y pitones de fonolitas, fonolitas y foiditas hauynicas.	Generalmente se trata de estructuras de tipo cumulo- domos y domos derramados, de extensión hectométri- ca y disyunción columnar frecuente. Son materiales a veces de color gris claro, con fenocristales feldespáti- cos.
347	Depósitos de deslizamientos gravitacionales. Brechas y materiales epiclásticos.	Depósitos brechoides caóticos que muestran espeso- res variables, normalmente superiores a 60 m. y fre- cuentemente cercanos a 100 m., pudiendo alcanzar hasta 200-300 m. en determinados lugares.
350	Lapillis, depósitos epiclásticos y freato- magmáticos.	Tobas marrones con fragmentos basaltico-basaníticos de 4-15 cm.de tamaño. Lapillis y arenas finas, interes- tratificadas. Depósitos con hasta 20-30 m. de espesor de conjunto.
353	Lavas basanítico-nefeliníticas, basálticas y basáltico olivínico-piroxénicas. Tefritas subordiriadas (tp=intercalaciones de tobas piroclásticas).	Coladas masivas y de hasta 2-3 m. de espesor indivi- dual. Ligera disyunción columnar. Rocas oscuras, porfídicas (olivinico-piroxénicas), con matriz afanítica o con tramos vesiculares. Espesor de conjunto variable según sectores: 15-20 m. o hasta 100-150 m.
355	Conos de tefra y piroclásticos (lapillis escorias y bombas, y piroclástos basálti- cos olivínico-piroxénicos y basaníticos).	Acumulaciones de lapillis, escorias y bombas, de color negro en fresco, y rojizo cuando alteradas.
359	Piroclastos de dispersión.	Acumulaciones de material de tamaño lapilli, y a ve- ces, escorias.
361	Depósitos de deslizamientos gravitacio- nales.	Depósitos caóticos heterométricos, formados por can- tos subangulosos de 50-60 cm. de tamaño, y bloques de hasta 30 m3, a veces algo empastados en material arcillo-arenoso. Los cantos y bloques son de naturale- za variada, predominantemente sálica.
362	Lavas basanítico-nefeliniticas, tefritico- fonolíticas, basaníticas y basálticas.	Apilamientos tabulares de coladas de 2-10 m. de po- tencia individual, dispuestos a veces rellenando paleo- valles (coladas "intracanyon"). Coladas generalmente de tipo "aa", con disyunción columnar, y con menor frecuencia "pahoehoe".
363	Conos de tefra y piroclásticos (lapillis escorias y bombas,y piroclastos nefeliní- ticos, basaníticos y tefríticos).	, Edificios con morfologías cónicas o tronco-cónicas, a veces calderiformes, con perfiles asimétricos, de unos 20 - 200 m. de altura. Constituídos por lapillis, escorias y bombas, de color negro o rojizo, dependiendo del

Código	Nombre	Descripción
		grado de alteración meteórica.
364	Piroclastos de dispersión.	Acumulaciones de material de tamaño lapilli. Espesor métrico.
368	Lavas basaníticas y basanítico nefeliníticas.	Coladas de tipo "aa" de hasta 15-20 m. de espesor y 250-300 m. de anchura, con disyunción columnar grosera. Rocas frecuentemente afaníticas, o de textura microporfídica, con abundantes fenocristales de olivino y augita.
369	Conos piroclásticos y conos de tefra (lapillis, escorias y bombas).	Conos de cinder de 150-625 m. de extensión y 120 m. de altura. Constituídos por lapillis (de 0,5 - 4 cm.), escorias (a veces de tipo "spatter") y bombas (de 10- 50 cm., más raramente hasta 1 m.). Estos materiales piroclásticos pueden tener colores negros.
373	Conos de tefra: piroclastos tefrítico fonolíticos	Cono piroclástico, sin cráter somital, de 0,3 km2 de extensión y 160 m. de altura, constituído por bombas, escorias y lapillis negros heterométricos (3-12 cm., de tamaño).
375	Arenas de playa con cantos y Strombus calcarenitas.	Depósito denominado también "Rasa Jandiense" o "Terraza baja de Las Palmas" (localizada, en este 'caso, entre el istmo de Guanarteme y la zona sur de la ciudad). Se encuentra a 7-10 m. sobre el nivel del mar en Las Palmas y alrededores.
377	Lavas basaníticas.	Recorrido y espesores variables según sectores (2-3 m., 7-8 m., 4-12 m.). En seccilón presentan disyunción columnar no siempre patente o, a veces, disyunción esferoidal. Son rocas oscuras con cristales.
378	Conos de tefra y piroclásticos (lapillis escorias y bombas).	Conos de cinder o escorias ("spatter cones"), de 80- 190 m. de altura y unos 500-1000 m. de extensión, 'constituídos por lapillis (de 1-6 cm.), bombas y esco- rias (de hasta 70 cm.) de color negro, o amarillento por oxidación.
379	Piroclastos de dispersión.	Lapillis de 1-2 cm. de tamaño, dispuestos en mantos de hasta 3-8 m. de espesor. Alternan, a veces, con niveles finos de tipo "surge" (en la zona de Santa Brígida, procedentes de la Caldera de Bandama).
381	Piroclastos de dispersión de Bandama.	Constituyen una gran extensión al sur de los aflora- mientos eruptivos de Bandama, con espesores de 1,5 - 4 m. Se trata de lapillis negros finos (de 0,5 - 1 cm. de tamaño), alternando con niveles de tipo "surge", de color crema.
383	Sedimentos conglomeráticos y arenas fluviales ("fan-delta").	Formación de gravas, arenas y limos marrones, deno- minada por algunos autores Formación Tirajana, co- rrespondiendo probablemente a abanicos aluviales.

Código	Nombre	Descripción
		Las gravas son de 4-22 cm. de tamaño (habiendo algún bloque de hasta 40 cm).
384	Depósitos y derrubios de ladera y colu- viones, a veces con arenas fosilíferas conos de deyección con intercalaciones eólicas, glacis-conos de composición traquítico-fonolítica.	Depósitos de edades y naturaleza variadas, y relacio- nes diversas con la red hidrográfica. Asimismo, el espesor es también variable, máximo en las zonas más bajas. Ocasionalmente, pueden presentar interca- laciones eólicas.
387	Depósitos y sedimentos aluviales anti- guos, y de terrazas fluviales.	Depósitos de espesor y posición (altura) respecto de los cauces actuales, variados. Formados por arenas oscuras y gravas heteromícticas y heterométricas (de 1-2 y hasta 40-50 cm. de tamaño). Depósitos de origen torrencial.
388	Arenas eólicas y dunas, a veces cor helícidos.	Se disponen, sobre todo, en el litoral oriental de la isla. Son arenas eólicas, bien seleccionadas, que forman dunas de hasta 20 m. de altura. Las dunas, en sec- ción, reflejan alternancias de períodos secos y húme- dos.
392	Depósitos aluviales actuales, y de fondo de barranco y de valle.	Depósitos de 1-5 m. de espesor formados por arenas oscuras y gravas heteromícticas y heterométricas (de 1-2 y hasta 40-50 cm. De tamaño). Depósitos torren- ciales localizados en los principales barrancos de la isla, preferentemente cerca de sus desembocaduras.
394	Depósitos de suelos, a veces actuales, y depósitos de recubrimiento, otros depósi- tos indiferenciados y a veces rellenos de fondo de valle.	Son más abundantes en la mitad noreste de la isla, donde el clima es más húmedo, tendiendo a desarro- ellarse sobre superficies y materiales alterables (depósi- tos de cinder, piroclastos finos, etc.)
396	Depósitos antrópicos	Depósitos de naturaleza y granulometría diversas, preferentemente diferenciados cartográficamente en la mitad oriental (más poblada) de la isla, dada su aso- ciación con la actividad constructiva y turística.
399	Ritmitas, lutitas, areniscas y calizas Complejo Basal con > 75 % de diques.	Corresponden a las unidades A, B y C de ROBER- TSON y BERNOULLI (1982). Posee un espesor total superior a 600 m. cuya base no es visible por estar cortada por intrusiones posteriores. Está formada por turbiditas terrígenas y cálcicas mixtas.
405	Lavas, tobas y brechas indiferenciadas, submarinas. Complejo Basal con < 20 % de diques	El conjunto de estos materiales conforman los eventos volcánicos del momento del nacimiento submarino de la isla, y todos los posteriores que configuraron la potente serie previa a la intrusión de los plutones.
407	Lavas, tobas y brechas indiferenciadas, submarinas. Complejo Basal con > 75 % de diques.	El conjunto de estos materiales conforman los eventos volcánicos del momento del nacimiento submarino de la isla, y todos los posteriores que configuraron la potente serie previa a la intrusión de los plutones.

Código	Nombre	Descripción
408	Piroxenitas melteigitas, ijolitas, sienitas y carbonatitas. Complejo Basal con < 20 % de dique.	Se trata probablemente de los tipos litológicos más espectaculares de esta serie. El mejor lugar de expo- sición y, por tanto, de observación, es toda la rasa costera, ya que hacia el interior, la malla de diques encalichada obstaculiza la visión.
421	Intrusiones de gabros plurifaciales indife- renciados. Complejo Basal con < 20 % de diques.	Es, con mucho, el tipo petrológico mejor representado del conjunto. Son los que ocupan mayor extensión superficial dentro de los materiales plutónicos, hacien- do abstracción del espacio ocupado por los diques que los atraviesan.
422	Intrusiones de gabros plurifaciales indife- renciados. Complejo Basal con diques entre 20 y 75%.	- Es, con mucho, el tipo petrológico mejor representado s del conjunto. Son los que ocupan mayor extensión superficial dentro de los materiales plutónico.
423	Intrusiones de gabros plurifaciales indife- renciados. Complejo Basal con > 75 % de diques.	Es, con mucho, el tipo petrológico mejor representado del conjunto. Son los que ocupan mayor extensión superficial dentro de los materiales plutónicos, hacien- do abstracción del espacio ocupado por los diques que los atraviesan.
439	Sienita circular "La Peñita".	Es, sin duda, la unidad intrusiva más representativa del carácter circular del complejo. Se trata de un po- tente dique acampanado ("ring dike") con forma de semiluna, de unos 700 m. de anchura máxima.
440	Tobas e intrusivos traquíticos indiferen- ciados.	El dique circular de La Muda constituye el relieve más alto de todo el complejo circular (625 m). Es una de las unidades más externas del complejo y, sin duda, una de las últimas en intruir. Tiene un claro carácter sub- volcánico.
442	Brechas basálticas.	Son brechas líticas heterométricas y polimícticas, aunque los fragmentos son mayoritariamente basálti- cos. Está muy compactada, con una matriz también oscura y de composición básica.
450	Leucogabros y melanogabros. Complejo Basal con diques entre 20 y 75%.	EL plutón de Morro Negro tiene una forma ovalada, ligeramente elongada al norte, con un diámetro mayor de 700 m por otro menor de 600 m.
468	Coladas basálticas olivínico-piroxénicas e indiferenciadas.	Los materiales de naturaleza basáltica pertenecientes a este tramo inferior del edificio constituyen una suce- sión monótona de coladas que muestran un buzamien- to de 10-250 de forma periclinal hacia la costa sur y oriental.
484	Coladas basálticas olivínicas, olivínico- piroxénicas-plagioclásicas y traquibasal- tos.	En general estas coladas se apoyan discordantemente sobre el tramo inferior, fosilizando su paleorrelieve, pero también sobre el Complejo Basal, El modo más común de yacimiento está constituido por importantes apilamientos tabulares de coladas.

Código	Nombre	Descripción
489	Sedimentos aluviales localmente co intercalaciones de brechas.	En la base de las coladas de los Episodios Tardíos casi siempre aparecen estos depósitos aquí descritos, on y aunque no tienen por qué estar relacionados con ellos, desde el punto de vista volcanológico, si que constituyen un buen criterio de campo para caracteri- zarlos.
516	Diques y sills básicos.	
519	Cuarzotraquitas Montañas Tindaya Tebeto.	La Montaña de Tindaya se localiza en la zona norte del valle central, junto al pueblo del mismo nombre. ^y Aparece como un prominente relieve de 210 m de altura y morfología cónica, destacando sobre una extensa planicie subhorizontal.
520	Brechas liticas ampuyenta.	Esta unidad aflora principalmente en la zona del valle central, en el frente de los cuchillos del Edificio Se trata de unos depósitos brechoides que no presentan estructuración interna, estando sus componentes dis- tribuidos de manera caótica y mal seleccionados.
525	Coladas basálticas olivínicas, olivínica piroxénicas, plagioclásicas y traquibasa tos subordinados.	El volumen principal de materiales emitidos durante la p-fase volcánica miocena en el Edificio Tetir, está consti- ll-tuído por coladas basálticas olivínico-piroxénicas y plagioclasas, que configuran la parte intermedia-alta del citado estratovolcán de Tetir.
535	Depósitos aluviales. Arenas y conglomo rados.	Se han asignado a este epígrafe unos depósitos detrí- e-ticos gruesos que aparecen sobre la rasa pliocena, en el sector costero y por similitud con ellos otros aflora- mientos del interior de la isla.
538	Sedimentos conglomeráticos y depósito caóticos.	Esta unidad aflora fundamentalmente en el sector occidental del "arco de Jandía", entre las casas de Cofete y el Roque del Moro. Estos depósitos están relacionados con los deslizamientos post-miocenos que han provocado los grandes escarpes existentes.
541	Coladas basálticas olivínicas. Edif. L Venta. Mña.Bermeja, Valle Central	Se trata de episodios volcánicos más puntuales y, a volumétricamente menos significativos que sus prede- cesores miocenos, en gran medida controlados por fracturas eruptivas de dirección NNE-SSO.
543	Conos de cinder (Edificio Mña. Tirafé).	Este edificio se encuentra situado al NO. de Valle de Santa Inés, entre los barrancos del Valle y Campo Viejo. Se trata de un cono piroclástico, relativamente mal conservado, sin cráter visible.
546	Arenas eólicas plio-pleistocenas.	Esta unidad es una unidad comprensiva que se ha distinguidoi a efectos prácticos agrupando las arenas eólicas anteriormente descritas en la zona del istmo de

Código Nombre		Descripción		
		la Pared.		
549	Depósitos de caliche	La fase principal de encalichamiento tiene lugar con posterioridad a las emisiones pliocenas, representadas fundamentalmente, por las coladas de los volcanes en escudo y por la alineación "La Ventosilla Montaña Bermeja".		
551	Coládas basálticas. Olivínicas.	La diferenciación entre la fase volcánica pliocena y la fase pleistocena inferior, no siempre es fácil, ya que el volcanismo se sucede de manera casi continua desde el Plioceno hasta tiempos históricos.		
554	Coladas basálticas (Edif. Mña. Negra) Pajarita).	Se describen en este epígrafe las coladas asignadas a los edificios de Mña. Negra y Pajarita. Estos volcanes emitieron gran cantidad de coladas basálticas que corrieron principalmente hacia el norte y sureste, origi- nando extensos y amplios malpaíses.		
556	Arenas y arcillas rojas.	Estos materiales ocupan la depresión existente en el campo volcánico de Tetir La Matilla. Se trata probablemente de una antigua cuenca endorreica que quedó cerrada por los piroclastos de estas emisiones.		
558	Coladas basálticas olivínicas (Edif. Mña Los Saltos).	Las coladas son auténticas morrenas de bloques y cascotes sueltos, de aspecto caótico, que a medida que se desplazaban formaban largos costillares que se entrecruzaban y superponían, originando taludes frontales y laterales muy desarrollados.		
560	Arenas eólicas consolidadas.	La formación de campos de dunas litorales es un he- cho bastante frecuente a lo largo del registro geológico de Fuerteventura, desde el Plioceno hasta la actuali- dad, destacando entre estos últimos, por su extensión y vistosidad, los Jables" de Corralejo.		
562	Coladas basálticas.	Se describen a continuación, las últimas emisiones que han tenido lugar en la isla, concretamente lo que suele denominarse como episodios recientes, sus coladas ocupan extensos malpaises, en los que son frecuentes encontrar "Hornitos" o pequeños salideros.		
566	Depósitos cuaternarios indiferenciados.	Se describen en este epígrafe unos materiales que presentan características mixtas entre aluviales, colu- viales, y depósitos edáficos. En general, constituyen delgados recubrimientos sobre las coladas pliocenas.		
570	Depósitos areno-arcillosos, suelos y cuarzo.	Estos depósitos de naturaleza arenosa-arcillosa tienen una coloración marrón-anaranjada, son de granulome- tría generalmente fina y a veces de carácter pulveru- lento. En la zona de La Oliva pueden alcanzar poten- cias de hasta 5-7 m.		

Código	o Nombre	Descripción
572	Conos de deyección y ramblas	Estos depósitos aparecen localizados en las laderas de aquellos relieves donde las diferencias de altura son mayores y los materiales son facilmente moviliza- bles. Alcanzan un especial desarrollo a lo largo de gran parte de los valles.
573	Arenas eólicas sobre sustrato.	En el área cartografiada aparecen algunas zonas cu- biertas por arenas eólicas sueltas, de edad reciente, aunque no ocupan una gran extensión cubren a las coladas recientes, siendo su espesor bastante reduci- do.
574	Arenas eólicas sueltas.	Estos depósitos eólicos están constituidos por arenas blancas de grano fino (entre 0,1 y 0,5 mm), sueltas y móviles, que están formadas principalmente por frag- mentos de caparazones calcáreos.
576	Coluviones y depósitos de ladera	Estos depósitos. se asocian con los relieves más im- portantes de la isla, que suelen corresponder a los cuchillos miocenos y algunos relieves aislados del dominio del complejo basal.
577	Depósitos de barranco y/o aluviales.	Se incluyen aquí los materiales sedimentarios que ocupan los cauces de los barrancos y valles de la Isla. Estos suelen estar secos dadas las bajas precipitacio- nes, pero en caso de lluvias fuertes y continuas, pue- den arrastrar gran cantidad de material.

Apéndice 5

Características geológicas y geográficas de los puntos de muestra.

5.1. Gran Canaria

Tabla A5.1 Puntos Gran Canaria

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TGC1	442596	3097427	San Mateo	339	1218
TGC2	426290	3096346	San Nicolás	361	226
TGC3	438999	3095015	Tejeda	306	1225
TGC4	426290	3096346	San Nicolás	361	176
TGC5	420760	3089057	San Nicolás	392	214
TGC6	461506	3087634	Ingenio	353	17
TGC7	457258	3097622	Telde	381	260
TGC8	441555	3068682	San Bartolomé	388	10
TGC9	427809	3087238	Mogán	392	262
TGC10	433242	3077418	Mogán	311	424
TGC11	433365	3080714	Mogán	311	655
TGC12	442328	3112529	Moya	362	200
TGC13	462003	3092665	Telde	394	46
TGC14	432773	3107439	Agaete	377	138
TGC15	447468	3106878	Arucas	317	532
TGC16	426269	3096166	San Nicolás	304	141
TGC17	442943	3111773	Moya	317	309
TGC18	452400	3111643	Las Palmas de GC	384	105
TGC19	427770	3095603	Artenara	305	250
TGC20	445144	3092675	San Mateo	353	1860
TGC21	447513	3112583	Arucas	353	161
TGC22	424414	3087448	San Nicolás	291	333
TGC23	433076	3082312	Mogán	338	720
TGC24	439544	3103813	Moya	353	1066
TGC25	457315	3107403	Las Palmas de GC	325	102
TGC26	422864	3097317	San Nicolás	361	83
TGC27	448534	3091862	Ingenio	361	1525
TGC28	427537	3101022	Agaete	384	274

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TGC29	443009	3094823	San Mateo	350	1715
TGC30	442129	3075319	San Bartolomé	392	110
TGC31	451113	3075312	San Bartolomé	317	58
TGC32	437029	3111503	Gáldar	384	249
TGC33	450164	3074497	San Bartolomé	317	61
TGC34	457872	3092668	Telde	362	282
TGC35	444320	3081607	San Bartolomé	347	395
TGC36	427993	3086519	Mogán	291	233
TGC37	431466	3086535	Mogán	302	784
TGC38	433939	3088706	Tejeda	0	877
TGC39	439997	3092213	San Bartolomé	305	1223
TGC40	446325	3106723	Teror	353	678
TGC41	453423	3080738	Santa Lucía	383	171
TGC42	446778	3084091	San Bartolomé	347	486
TGC43	437540	3074141	San Bartolomé	334	275
TGC44	455134	3101334	Las Palmas de GC	378	482
TGC45	455631	3105449	Las Palmas de GC	329	300
TGC46	455405	3105376	Las Palmas de GC	362	300
TGC47	455438	3105142	Las Palmas de GC	362	317
TGC48	455082	3105003	Las Palmas de GC	362	317
TGC49	455586	3106105	Las Palmas de GC	362	256
TGC50	458422	3116442	Las Palmas de GC	355	151
TGC29A	442983	3094824	San Mateo	350	1718
TGC29E	442931	3094828	San Mateo	350	1718
TGC29B	443001	3094810	San Mateo	350	1718
TGC29C	443022	3094819	San Mateo	350	1718
TGC29D	442948	3094788	San Mateo	350	1718
TGC55	449776	3112807	Arucas	362	132
TGC56	448738	3111134	Arucas	373	393
TGC57	447567	3108628	Arucas	317	365
TGC58	446341	3106742	Teror	353	673
TGC59	444934	3104014	Teror	359	776
TGC60	443029	3101158	Valleseco	379	1130
TGC61	441053	3100500	Valleseco	353	1395
TGC62	438947	3100897	Gáldar	379	1488
TGC63	440333	3099683	Valleseco	355	1581
TGC64	441460	3097216	San Mateo	353	1573
TGC65	440836	3097931	Tejeda	333	1430
TGC66	440811	3096119	Tejeda	341	1157
TGC67	438724	3096004	Tejeda	308	1085
TGC68	438724	3096004	Tejeda	308	1085
TGC69	437823	3093352	Tejeda	333	1334

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TGC70	441496	3092842	Tejeda	338	1635
TGC71	442117	3094528	Tejeda	362	1689
TGC72	450049	3099036	Santa Brígida	333	663
TGC73	453804	3100649	Santa Brígida	338	519
TGC74	455272	3102012	Las Palmas de GC	377	287
TGC75	448218	3098970	San Mateo	353	788
TGC76	442320	3093889	Tejeda	353	1674
TGC77	439905	3092893	Tejeda	338	1427
TGC78	455070	3088247	Agüimes	353	323
TGC79	448705	3090557	Agüimes	353	1335
TGC80	453970	3084885	Agüimes	353	205
TGC81	446667	3084885	San Bartolomé	0	384
TGC82	453369	3096233	Valsequillo	392	363
TGC83	461073	3084428	Agüimes	394	4
TGC84	459177	3082697	Agüimes	355	34
TGC85	454884	3079866	Santa Lucía	383	125
TGC86	436453	3070276	San Bartolomé	317	24
TGC87	434720	3080685	Mogán	291	188
TGC88	434192	3075920	San Bartolomé	392	74
TGC89	430844	3073677	Mogán	311	84
TGC90	428079	3076367	Mogán	302	65
TGC91	426380	3077840	Mogán	392	50
TGC92	425119	3078284	Mogán	302	45
TGC93	440298	3081304	San Bartolomé	299	319
TGC94	439654	3079195	San Bartolomé	311	487
TGC95	450720	3083788	Agüimes	392	300
TGC96	459163	3098749	Telde	321	104
TGC97	451330	3097648	Valsequillo	333	551
TGC98	451149	3094680	Valsequillo	384	675
TGC99	453997	3095057	Telde	368	403
TGC100	450665	3110186	Arucas	329	261
TGC101	434767	3114224	Gáldar	364	34
TGC102	432525	3114725	Gáldar	384	60
TGC103	435103	3105232	Agaete	291	388
TGC104	432892	3107555	Agaete	377	126
TGC105	431816	3109348	Agaete	353	113
TGC106	436193	3110226	Gáldar	353	410
TGC107	437199	3108626	Gáldar	353	700
TGC108	436826	3105382	Gáldar	353	1004
TGC109	440616	3103886	Moya	353	975
TGC110	442630	3108896	Moya	353	492

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TGC111	451709	3097282	Valsequillo	317	560
TGC112	451311	3107267	Las Palmas de GC	333	298
TGC113	450907	3106026	Las Palmas de GC	353	399
TGC114	448776	3105228	Teror	333	522
TGC115	438653	3100042	Artenara	336	1435
TGC116	436811	3099490	Artenara	338	1261
TGC117	434340	3100342	Artenara	306	1121
TGC118	433073	3103439	Artenara	304	1300
TGC119	431540	3104156	Agaete	304	1161
TGC120	431444	3101967	Artenara	305	1244
TGC121	433565	3098730	Artenara	353	953
TGC122	431896	3096872	Artenara	308	588
TGC123	430465	3096581	Artenara	308	290
TGC124	427122	3096085	Artenara	305	157
TGC125	449608	3074147	San Bartolomé	333	42
TGC126	449957	3075324	San Bartolomé	317	75
TGC127	447880	3074361	San Bartolomé	317	44
TGC128	439490	3085126	San Bartolomé	387	578
TGC129	440065	3082593	San Bartolomé	347	482
TGC130	457171	3111558	Las Palmas de GC	388	62
TGC131	447550	3073503	San Bartolomé	392	28
TGC132	440241	3072836	San Bartolomé	392	60
TGC133	444009	3103398	Valleseco	353	904
TGC134	451126	3103048	Las Palmas de GC	317	573
TGC135	451120	3099602	Santa Brígida	338	751
TGC136	461505	3087604	Ingenio	353	17
TGC137	453573	3109961	Las Palmas de GC	355	260
TGC138	457812	3100220	Telde	381	170
TGC139	442982	3094815	San Mateo	350	1719
TGC140	444075	3093262	San Mateo	353	1915
TGC141	447526	3101254	Santa Brígida	333	761
TGC142	447072	3098558	San Mateo	363	991
TGC143	442473	3097408	San Mateo	339	1196
TGC144	441315	3098480	San Mateo	338	1532
TGC145	439890	3099877	Valleseco	379	1651
TGC146	442112	3100015	Valleseco	336	1328
TGC147	444570	3107642	Firgas	353	622
TGC148	431619	3104005	Agaete	304	1162
TGC149	433393	3098837	Artenara	353	955
TGC150	432816	3107607	Agaete	377	124
TGC151	431727	3112201	Gáldar	359	45
TGC152	439497	3111374	Guía	353	401

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TGC153	437141	3108672	Gáldar	353	701
TGC154	436560	3105404	Gáldar	353	936
TGC155	441792	3105537	Моуа	353	835
TGC156	447659	3096558	Valsequillo	384	960
TGC157	442080	3093014	Tejeda	353	636
TGC158	437438	3091175	Tejeda	305	1073
TGC159	432345	3088762	Tejeda	304	972
TGC160	436920	3072498	San Bartolomé	338	198
TGC161	448545	3074047	San Bartolomé	317	54
TGC162	456132	3081686	Santa Lucía	383	95
TGC163	460312	3088315	Ingenio	394	70
TGC164	449151	3083701	Santa Lucía	353	562
TGC165	441702	3090293	San Bartolomé	384	1171
TGC166	461913	3097802	Telde	394	44
TGC167	455751	3096904	Telde	381	373
TGC168	451421	3096734	Valsequillo	353	541
TGC169	443024	3073926	San Bartolomé	317	186
TGC170	444273	3081580	San Bartolomé	347	391
TGC171	443919	3087297	San Bartolomé	347	913
TGC172	440539	3081531	San Bartolomé	299	361

5.2. Fuerteventura

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TFT1	552040	3106917	Pájara	576	
TFT2	587901	3138491	Pájara	423	341
TFT3	600851	3164049	La Oliva	549	156
TFT4	582628	3141907	Pájara	537	27
TFT5	574943	3115716	Pájara	546	67
TFT6	589129	3123911	Tuineje	468	71
TFT7	604000	3124000	Tuineje	484	112
TFT8	588992	3129014	Tuineje	570	154
TFT9	603808	3128979	Antigua	576	125
TFT10	593966	3129959	Tuineje	535	134
TFT11	593788	3134018	Tuineje	549	190
TFT12	583513	3143814	Betancuria	540	81
TFT13	600415	3144290	Antigua	Antigua 541	
TFT14	593286	3149096	Betancuria	407	256
TFT15	608960	3149043	P del Rosario 576		83

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Municipio Cdgo.Geol	
TFT16	600996	3154036	P del Rosario	576	379
TFT17	560601	3104389	Pájara	576	86
TFT18	571484	3111337	Pájara	576	80
TFT19	612670	3158686	P del Rosario	551	40
TFT20	606860	3174079	La Oliva	562	102
TFT21	601383	3178978	La Oliva	562	2
TFT22	610745	3151175	P del Rosario	551	12
TFT23	589129	3151194	Betancuria	537	44
TFT24	599592	3163226	La Oliva	519	180
TFT25	597055	3172291	La Oliva	549	19
TFT26	614146	3170052	La Oliva	562	14
TFT27	609908	3137169	Antigua	577	1
TFT28	607256	3155051	P del Rosario	551	245
TFT29	599485	3163222	La Oliva	519	169
TFT30	582067	3140245	Pájara	408	5
TFT31	612904	3177440	La Oliva	574	5
TFT32	592625	3146304	Betancuria	407	580
TFT33	595498	3146640	Antigua	535	308
TFT34	592421	3146395	Betancuria	407	591
TFT35	610266	3137633	Antigua	541	21
TFT36	609844	3136895	Antigua	484	26
TFT37	594792	3134050	Tuineje	549	170
TFT38	588635	3139598	Betancuria	399	41
TFT39	588635	3139598	Betancuria	439	425
TFT40	599792	3151177	P del Rosario	520	261
TFT41	599485	3163222	La Oliva	519	169
TFT42	599488	3163228	La Oliva	519	169
TFT43	613558	3161720	La Oliva	551	23
TFT44	560846	3104259	Pájara	538	65
TFT45	557953	3108070	Pájara	576	124
TFT46	549819	3105762	Pájara	573	6
TFT47	575093	3115819	Pájara	546	60
TFT48	608046	3163428	La Oliva	570	230
TFT49	605644	3164396	La Oliva	570	221
TFT50	594435	3162892	La Oliva	405	22
TFT51	603739	3177910	La Oliva	562	40
TFT52	605473	3172749	La Oliva	570	76
TFT53	595002	3156394	P del Rosario	576	117
TFT54	593865	3150431	Betancuria	407	264
TFT55	608613	3154908	P del Rosario	551	226
TFT56	600143	3143806	Antigua	541	211
TFT57	592156	3143690	Betancuria	577	357

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TFT58	583828	3135199	Pájara	577	125
TFT59	570343	3108790	Pájara	576	48
TFT60	573497	3113778	Pájara	546	67
TFT61	577635	3121120	Pájara	468	47
TFT62	582575	3130558	Pájara	489	336
TFT63	584339	3135218	Pájara	422	145
TFT64	588052	3138949	Pájara	423	344
TFT65	588947	3140385	Betancuria	440	340
TFT66	606918	3142823	Antigua	541	96
TFT67	604271	3139275	Antigua	549	116
TFT68	604371	3134714	Antigua	576	68
TFT69	597366	3126394	Tuineje	577	39
TFT70	589636	3129417	Tuineje	405	184
TFT71	588750	3130047	Tuineje	577	195
TFT72	602552	3159388	P del Rosario	556	361
TFT73	600465	3163181	La Oliva	576	176
TFT74	602590	3172547	La Oliva	560	69
TFT75	602836	3168425	La Oliva	549	166
TFT76	609792	3155044	P del Rosario	551	130
TFT77	587410	3122004	Tuineje	576	47
TFT78	567735	3105604	Pájara	535	59
TFT79	563971	3103102	Pájara	535	49
TFT80	599590	3163237	La Oliva	519	181
TFT81	588607	3139598	Pájara	439	420
TFT82	605175	3133509	Antigua	572	56
TFT83	587605	3128904	Tuineje	570	193
TFT84	596517	3171452	La Oliva	578	0
TFT85	610568	3179559	Corralejo	562	4
TFT86	614095	3174282	La Oliva	578	0
TFT87	613786	3157067	P del Rosario	578	0
TFT88	596071	3120934	Tuineje	578	0
TFT89	576791	3115805	Pájara	546	2
TFT90	571212	3108155	Pájara	504	3
TFT91	563713	3102852	Pájara	577	2
TFT92	594533	3148838	Betancuria	577	230
TFT93	597080	3153378	P del Rosario	549	169
TFT94	593508	3155901	P del Rosario	450	110
TFT95	594559	3153966	P del Rosario	407	125
TFT96	560778	3109857	Pájara	578	5
TFT97	588036	3119475	Tuineje	577	50
TFT98	583138	3128705	Tuineje	407	352

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TFT99	599719	3124946	Tuineje	577	74
TFT100	597846	3149130	P del Rosario	570	239
TFT101	602872	3150048	P del Rosario	P del Rosario 541	
TFT102	607118	3168956	La Oliva	558	202
TFT103	607896	3159137	P del Rosario	551	305
TFT104	580926	3118244	Pájara	484	74
TFT105	584425	3118231	Pájara	Pájara 484	
TFT106	593174	3139961	Antigua	577	354

5.3. Lanzarote

Tabla A5.2 Puntos Lanzarote

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TLZ1	635305	3209632	San Bartolomé	226	272
TLZ2	637060	3222302	Teguise	226	39
TLZ3	613970	3197934	Yaiza	218	36
TLZ4	647564	3222919	Haría	224	123
TLZ5	643413	3221097	Teguise	194	581
TLZ6	616434	3200197	Yaiza	218	144
TLZ7	618277	3191450	Yaiza	173	24
TLZ8	615565	3206083	Yaiza	227	81
TLZ9	645406	3226212	Haría	238	294
TLZ10	644638	3236635	La Graciosa (Teguise)	269	52
TLZ11	629722	3219656	Tinajo	227	44
TLZ12	623307	3198989	Yaiza	213	61
TLZ13	619012	3198726	Yaiza	174	394
TLZ14	635404	3211262	Teguise	250	251
TLZ15	641190	3218342	Teguise	225	316
TLZ16	635782	3211174	Teguise	226	242
TLZ17	641190	3218342	Teguise	225	316
TLZ18	623832	3200972	Yaiza	258	152
TLZ19	615696	3206067	Yaiza	227	86
TLZ20	636926	3219706	Teguise	226	80
TLZ21	643833	3212231	Teguise	225	148
TLZ22	636419	3204483	San Bartolomé	227	37
TLZ23	642326	3207896	Teguise	227	65
TLZ24	627909	3216228	Tinajo	227	195
TLZ25	621678	3208434	Yaiza	248	358
TLZ26	650249	3232367	Haría	239	37
TLZ27	628915	3220219	Tinajo	234	22
TLZ28	620564	3208055	Yaiza	249	273
TLZ29	625526	3215517	Tinajo	227	173

Punto	X(UTM)	Y(UTM)	Municipio	Cdgo.Geol	Altitud
TLZ30	644610	3221508	Haría	195	597
TLZ31	621988	3208992	Tinajo	249	420
TLZ32	634508	3219861	Teguise	229	135
TLZ33	632728	3208516	San Bartolomé	250	301
TLZ34	651389	3232914	Haría	9	2
TLZ35	629990	3217463	Tinajo	227	127
TLZ36	619723	3208230	Yaiza	249	311
TLZ37	631264	3207465	Tias	253	323
TLZ38	647438	3231322	Haría	224	404
TLZ39	649627	3219044	Haría	243	47
TLZ40	629354	3205314	Tias	229	320
TLZ41	639518	3209507	Arrecife	230	189
TLZ42	651374	3232818	Haría	239	5
TLZ43	621381	3209294	Tinajo	248	339
TLZ44	626089	3203992	Tias	253	376
TLZ45	620777	3200064	Yaiza	183	334
TLZ46	610878	3193699	Yaiza	258	22
TLZ47	617407	3194408	Yaiza	258	45
TLZ48	647083	3225248	Haría	209	291
TLZ49	624216	3215134	Tinajo	246	130
TLZ50	612286	3194316	Yaiza	205	77
TLZ51	620645	3209418	Yaiza	248	304
TLZ52	619682	3208672	Yaiza	253	249
TLZ53	621756	3208468	Yaiza	248	361
TLZ54	622339	3208703	Tinajo	249	448
LG2	644101	3239535	Teguise	229	0
LG3	642258	3233239	Teguise	229	15
TLZ55	644794	3219295	Teguise	205	442
TLZ56	632239	3200549	Tías	205	14
TLZ57	633670	3219886	Teguise	226	92
TLZ58	651408	3232871	Haría	209	3
TLZ59	642266	3210845	Teguise	227	151
TLZ60	627693	3213599	Tinajo	227	259
TLZ61	618141	3197584	Yaiza	258	183
TLZ62	641116	3215800	Teguise	225	331
TLZ63	623789	3198686	Yaiza	227	23

Apéndice 6

Tablas tasa exposición y dosis.

6.1. Gran Canaria

Tabla A6.1 Puntos de medida con la altitud (m), tasa exposición (μ R/h) fondo (μ R/h), dosis (nGyh⁻¹) y dosis equivalente (mSva⁻¹) de la isla de Gran Canaria.

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
GC1	427500	3102500	Agaete	74	8	3,7	70	0,43
GC2	432816	3107607	Agaete	124	12	3,7	104	0,64
GC3	432892	3107555	Agaete	126	12	3,7	104	0,64
GC4	432500	3107500	Agaete	132	12	3,7	104	0,64
GC5	432775	3107432	Agaete	188	7	3,7	61	0,37
GC6	435103	3105232	Agaete	388	14	3,9	122	0,75
GC7	431540	3104156	Agaete	1161	22	5,1	191	1,17
GC8	431619	3104005	Agaete	1162	18	5,1	157	0,96
GC9	431444	3101967	Agaete	1244	26	5,2	226	1,39
GC10	432500	3102500	Agaete	1295	20	5,3	174	1,07
GC11	433073	3103439	Agaete	1300	26	5,4	226	1,39
GC12	428154	3103112	Agaete	94	7	3,7	61	0,37
Media ari	itmética A	gaete			15	4,3	133,4	0,82
GC13	461073	3084428	Agüimes	4	8	3,7	70	0,43
GC14	459177	3082697	Agüimes	34	11	3,7	96	0,59
GC15	461500	3082500	Agüimes	58	7	3,7	61	0,37
GC16	457500	3082500	Agüimes	64	11	3,7	96	0,59
GC17	461538	3082443	Agüimes	88	8	3,7	70	0,43
GC18	457909	3082948	Agüimes	109	10	3,7	87	0,53
GC19	453970	3084885	Agüimes	205	9	3,7	78	0,48
GC20	455070	3088247	Agüimes	323	10	3,8	87	0,53
GC21	452477	3085225	Agüimes	401	11	3,9	96	0,59
GC22	452697	3087602	Agüimes	629	8	4,2	70	0,43
GC23	448705	3090557	Agüimes	1335	10	5,4	87	0,53
GC24	449524	3090159	Agüimes	967	12	4,7	104	0,64
GC25	451547	3087225	Agüimes	627	8	4,2	70	0,43
GC26	452500	3087500	Agüimes	573	8	4,1	70	0,43
GC27	458367	3085326	Agüimes	74	8	3,7	70	0,43
GC28	462195	3083388	Agüimes	8	4	3,7	35	0,21

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
Media ari	tmética A	güimes			9	4,0	77,8	0,48
GC29	427122	3096085	Artenara	157	40	3,7	348	2,13
GC30	430465	3096581	Artenara	290	40	3,8	348	2,13
GC31	427766	3095596	Artenara	351	22	3,9	191	1,17
GC32	427500	3097500	Artenara	500	21	4,0	183	1,12
GC33	431896	3096872	Artenara	588	26	4,1	226	1,39
GC34	432500	3097500	Artenara	724	13	4,3	113	0,69
GC35	437500	3097500	Artenara	835	28	4,5	244	1,49
GC36	433565	3098730	Artenara	953	14	4,7	122	0,75
GC37	433393	3098837	Artenara	955	12	4,7	104	0,64
GC38	434340	3100342	Artenara	1121	24	5,0	209	1,28
GC39	436811	3099490	Artenara	1260	16	5,3	139	0,85
GC40	431385	3095878	Artenara	745	28	4,3	244	1,49
GC41	431695	3102514	Artenara	1267	40	5,3	348	2,13
GC42	432957	3103106	Artenara	1286	24	5,3	209	1,28
GC43	433455	3100911	Artenara	1134	24	5,0	209	1,28
GC44	434117	3102067	Artenara	902	19	4,6	165	1,01
GC45	436553	3099770	Artenara	1283	12	5,3	104	0,64
Media ari	tmética A	rtenara			24	4,6	206,2	1,26
GC46	450699	3113103	Arucas	76	14	3,7	122	0,75
GC47	449776	3112807	Arucas	132	16	3,7	139	0,85
GC48	447500	3112500	Arucas	146	12	3,7	104	0,64
GC49	452500	3111500	Arucas	170	10	3,7	87	0,53
GC50	447510	3112587	Arucas	213	11	3,8	96	0,59
GC51	450665	3110186	Arucas	261	10	3,8	87	0,53
GC52	447567	3108628	Arucas	365	19	3,9	165	1,01
GC53	448738	3111134	Arucas	393	16	3,9	139	0,85
GC54	447500	3106900	Arucas	547	19	4,1	165	1,01
GC55	447465	3106876	Arucas	580	24	4,1	204	1,25
GC56	447469	3106868	Arucas	523	20	4,0	174	1,07
GC57	449418	3112255	Arucas	182	16	3,7	139	0,85
Media ari	tmética A	rucas			16	3,8	135,2	0,83
GC58	444570	3107642	Firgas	620	10	4,1	87	0,53
GC59	444569	3107637	Firgas	622	10	4,1	87	0,53
GC60	446341	3106742	Firgas	673	13	4,2	113	0,69
Media ari	tmética F	irgas			11	4,2	95,7	0,59
GC61	434767	3114224	Gáldar	34	12	3,7	104	0,64
GC62	432500	3115500	Gáldar	43	12	3,7	104	0,64
GC63	431727	3112201	Gáldar	45	10	3,7	87	0,53
GC64	432525	3114725	Gáldar	60	11	3,7	96	0,59
GC65	431816	3109348	Gáldar	113	8	3,7	70	0,43
GC66	434005	3110724	Gáldar	160	16	3,7	139	0,85
GC67	432500	3111500	Gáldar	170	9	3,7	78	0,48
GC68	432329	3114271	Gáldar	186	8	3,7	70	0,43

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
GC69	437031	3111502	Gáldar	307	22	3,8	191	1,17
GC70	437200	3111500	Gáldar	309	26	3,8	226	1,39
GC71	436193	3110226	Gáldar	410	12	3,9	104	0,64
GC72	437199	3108626	Gáldar	700	16	4,3	139	0,85
GC73	437141	3108672	Gáldar	701	12	4,3	104	0,64
GC74	437400	3107500	Gáldar	764	8	4,3	70	0,43
GC75	437089	3107620	Gáldar	777	15	4,4	126	0,77
GC76	436560	3105404	Gáldar	936	10	4,6	87	0,53
GC77	436826	3105382	Gáldar	1004	12	4,8	104	0,64
GC78	437240	3102584	Gáldar	1199	11	5,1	96	0,59
GC79	437500	3102500	Gáldar	1199	12	5,1	104	0,64
GC80	438653	3100042	Gáldar	1435	20	5,7	174	1,07
GC81	438947	3100897	Gáldar	1488	4	5,8	35	0,21
GC82	435742	3112925	Gáldar	83	10	3,7	87	0,53
GC83	437205	3103107	Gáldar	1054	10	4,8	87	0,53
GC84	439005	3101136	Gáldar	1574	10	6,0	87	0,53
Media ari	tmética G	iáldar			12	4,3	107,1	0,66
GC85	437692	3116002	Guía	20	9	3,7	74	0,45
GC86	437900	3115900	Guía	23	8	3,7	65	0,40
GC87	442500	3112500	Guía	186	10	3,7	87	0,53
GC88	442325	3112533	Guía	246	12	3,8	104	0,64
GC89	439497	3111374	Guía	401	10	3,9	87	0,53
Media ari	tmética G	iuía			10	3,8	83,5	0,51
GC90	461500	3087500	Ingenio	13	8	3,7	70	0,43
GC91	461504	3087605	Ingenio	62	8	3,7	70	0,43
GC92	460312	3088315	Ingenio	70	10	3,7	87	0,53
GC93	457500	3087500	Ingenio	233	6	3,8	52	0,32
GC94	457354	3087681	Ingenio	282	10	3,8	87	0,53
GC95	448534	3091859	Ingenio	1579	6	6,0	52	0,32
GC96	452748	3089900	Ingenio	549	10	4,1	87	0,53
GC97	455554	3088624	Ingenio	423	8	3,9	70	0,43
Media ari	tmética Ir	ngenio			8	4,1	71,8	0,44
GC98	459999	3113415	Las Palmas de Gran Canaria	0	6	3,7	52	0,32
GC99	457486	3113716	Las Palmas de Gran Canaria	1	7	3,7	61	0,37
GC100	458334	3110828	Las Palmas de Gran Canaria	1	15	3,7	131	0,80
GC101	459120	3113623	Las Palmas de Gran Canaria	1	10	3,7	87	0,53
GC102	459198	3109001	Las Palmas de Gran Canaria	4	15	3,7	131	0,80
GC103	460511	3115695	Las Palmas de Gran Canaria	4	7	3,7	61	0,37
GC104	457079	3112528	Las Palmas de Gran Canaria	5	15	3,7	131	0,80
GC105	459048	3106906	Las Palmas de Gran Canaria	7	11	3,7	96	0,59
GC106	456004	3111659	Las Palmas de Gran Canaria	8	13	3,7	113	0,69
GC107	454704	3111604	Las Palmas de Gran Canaria	9	10	3,7	87	0,53
GC108	457500	3111500	Las Palmas de Gran Canaria	10	16	3,7	139	0,85

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva⁻¹
GC109	457318	3111613	Las Palmas de Gran Canaria	21	14	3,7	122	0,75
GC110	459708	3115185	Las Palmas de Gran Canaria	33	11	3,7	96	0,59
GC111	460443	3116188	Las Palmas de Gran Canaria	42	9	3,7	78	0,48
GC112	457232	3115732	Las Palmas de Gran Canaria	58	8	3,7	70	0,43
GC113	457795	3109111	Las Palmas de Gran Canaria	81	11	3,7	96	0,59
GC114	457594	3110474	Las Palmas de Gran Canaria	90	12	3,7	104	0,64
GC115	458500	3115500	Las Palmas de Gran Canaria	109	12	3,7	104	0,64
GC116	457149	3109553	Las Palmas de Gran Canaria	118	10	3,7	87	0,53
GC117	458690	3116431	Las Palmas de Gran Canaria	130	12	3,7	104	0,64
GC118	453397	3111643	Las Palmas de Gran Canaria	149	10	3,7	87	0,53
GC119	456577	3109178	Las Palmas de Gran Canaria	150	12	3,7	104	0,64
GC120	455251	3109864	Las Palmas de Gran Canaria	153	12	3,7	104	0,64
GC121	455916	3109242	Las Palmas de Gran Canaria	153	13	3,7	113	0,69
GC122	457316	3107404	Las Palmas de Gran Canaria	153	16	3,7	139	0,85
GC123	453949	3109060	Las Palmas de Gran Canaria	160	11	3,7	96	0,59
GC124	457500	3107500	Las Palmas de Gran Canaria	166	13	3,7	113	0,69
GC125	459076	3115435	Las Palmas de Gran Canaria	169	10	3,7	87	0,53
GC126	453856	3108171	Las Palmas de Gran Canaria	184	12	3,7	104	0,64
GC127	458214	3106135	Las Palmas de Gran Canaria	194	12	3,7	104	0,64
GC128	456420	3106858	Las Palmas de Gran Canaria	200	10	3,7	87	0,53
GC129	453480	3106245	Las Palmas de Gran Canaria	204	14	3,7	122	0,75
GC130	458967	3115065	Las Palmas de Gran Canaria	227	10	3,8	87	0,53
GC131	457500	3102500	Las Palmas de Gran Canaria	230	11	3,8	96	0,59
GC132	452500	3107500	Las Palmas de Gran Canaria	232	13	3,8	113	0,69
GC133	453561	3109965	Las Palmas de Gran Canaria	250	8	3,8	70	0,43
GC134	452500	3105000	Las Palmas de Gran Canaria	258	17	3,8	148	0,91
GC135	453573	3109961	Las Palmas de Gran Canaria	260	8	3,8	70	0,43
GC136	455272	3102012	Las Palmas de Gran Canaria	287	11	3,8	96	0,59
GC137	451311	3107267	Las Palmas de Gran Canaria	298	12	3,8	104	0,64
GC138	452500	3102500	Las Palmas de Gran Canaria	393	11	3,9	96	0,59
GC139	450907	3106026	Las Palmas de Gran Canaria	399	10	3,9	87	0,53
GC140	451126	3103048	Las Palmas de Gran Canaria	573	16	4,1	139	0,85
GC141	453158	3106583	Las Palmas de Gran Canaria	212	16	3,8	139	0,85
GC142	455390	3105405	Las Palmas de Gran Canaria	320	10	3,8	87	0,53
GC143	456153	3109848	Las Palmas de Gran Canaria	136	16	3,7	139	0,85
GC144	456356	3104806	Las Palmas de Gran Canaria	202	12	3,7	104	0,64
Media a	ritmética L	as Palmas	e de Gran Canaria		12	3,7	101,8	0,62
GC145	425119	3078284	Mogán	45	29	3,7	252	1,55
GC146	426380	3077840	Mogán	50	26	3,7	226	1,39
GC147	428079	3076367	Mogán	65	25	3,7	218	1,33
GC148	434192	3075920	Mogán	74	22	3,7	191	1,17
GC149	432500	3072500	Mogán	77	27	3,7	235	1,44
GC150	430844	3073677	Mogán	84	24	3,7	209	1,28
GC151	431961	3072968	Mogán	104	24	3,7	209	1,28

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva ⁻¹
GC152	427500	3077500	Mogán	173	25	3,7	218	1,33
GC153	434720	3080685	Mogán	188	22	3,7	191	1,17
GC154	427500	3082500	Mogán	228	20	3,8	174	1,07
GC155	432500	3077500	Mogán	291	19	3,8	165	1,01
GC156	427500	3087500	Mogán	347	17	3,8	148	0,91
GC157	432500	3082500	Mogán	737	15	4,3	131	0,80
GC158	432500	3087500	Mogán	963	22	4,7	191	1,17
GC159	432345	3088762	Mogán	972	22	4,7	191	1,17
GC160	432337	3088758	Mogán	1023	23	4,8	200	1,23
GC161	426470	3079491	Mogán	76	21	3,7	183	1,12
GC162	426763	3084903	Mogán	176	10	3,7	87	0,53
GC163	428549	3088806	Mogán	459	28	4,0	244	1,49
GC164	431612	3073448	Mogán	74	27	3,7	235	1,44
GC165	433309	3084290	Mogán	487	24	4,0	209	1,28
GC166	433384	3079217	Mogán	544	16	4,0	139	0,85
GC167	434523	3076635	Mogán	84	22	3,7	191	1,17
Media ari	itmética N	logán			22	3,9	192,9	1,18
GC168	442944	3111774	Моуа	363	21	3,9	183	1,12
GC169	442630	3108896	Моуа	492	12	4,0	104	0,64
GC170	442700	3107600	Моуа	650	12	4,2	104	0,64
GC171	442649	3107626	Моуа	714	12	4,3	104	0,64
GC172	441792	3105537	Моуа	835	14	4,5	122	0,75
GC173	440616	3103886	Моуа	975	13	4,7	113	0,69
GC174	439548	3103814	Моуа	1112	10	5,0	87	0,53
GC175	439890	3099877	Моуа	1651	10	6,2	87	0,53
GC176	439598	3103602	Моуа	1072	12	4,9	104	0,64
GC177	443038	3112430	Моуа	132	16	3,7	139	0,85
Media ari	tmética N	loya			13	4,5	114,8	0,70
GC178	442000	3068500	San Bartolomé de Tirajana	2	10	3,7	87	0,53
GC179	436453	3070276	San Bartolomé de Tirajana	24	26	3,7	226	1,39
GC180	449608	3074147	San Bartolomé de Tirajana	42	20	3,7	174	1,07
GC181	447880	3074361	San Bartolomé de Tirajana	44	24	3,7	209	1,28
GC182	448545	3074047	San Bartolomé de Tirajana	54	20	3,7	174	1,07
GC183	447500	3072500	San Bartolomé de Tirajana	61	18	3,7	157	0,96
GC184	449957	3075324	San Bartolomé de Tirajana	75	26	3,7	226	1,39
GC185	442500	3072500	San Bartolomé de Tirajana	99	14	3,7	122	0,75
GC186	452500	3077500	San Bartolomé de Tirajana	116	12	3,7	104	0,64
GC187	453066	3077114	San Bartolomé de Tirajana	122	18	3,7	157	0,96
GC188	437500	3072500	San Bartolomé de Tirajana	153	15	3,7	131	0,80
GC189	442500	3077500	San Bartolomé de Tirajana	169	26	3,7	226	1,39
GC190	443024	3073926	San Bartolomé de Tirajana	186	18	3,7	157	0,96
GC191	436920	3072498	San Bartolomé de Tirajana	198	18	3,7	157	0,96
GC192	452369	3079922	San Bartolomé de Tirajana	267	10	3,8	87	0,53

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
GC193	440298	3081304	San Bartolomé de Tirajana	319	27	3,8	235	1,44
GC194	440539	3081531	San Bartolomé de Tirajana	361	18	3,9	157	0,96
GC195	444273	3081580	San Bartolomé de Tirajana	391	20	3,9	174	1,07
GC196	447500	3077500	San Bartolomé de Tirajana	392	19	3,9	165	1,01
GC197	437500	3077500	San Bartolomé de Tirajana	403	18	3,9	157	0,96
GC198	440065	3082593	San Bartolomé de Tirajana	482	25	4,0	218	1,33
GC199	439654	3079195	San Bartolomé de Tirajana	487	21	4,0	183	1,12
GC200	439490	3085126	San Bartolomé de Tirajana	578	28	4,1	244	1,49
GC201	445000	3087500	San Bartolomé de Tirajana	678	26	4,2	226	1,39
GC202	442500	3082500	San Bartolomé de Tirajana	768	30	4,4	261	1,60
GC203	437500	3087500	San Bartolomé de Tirajana	900	26	4,6	226	1,39
GC204	437500	3082500	San Bartolomé de Tirajana	907	7	4,6	61	0,37
GC205	443919	3087297	San Bartolomé de Tirajana	913	21	4,6	183	1,12
GC206	442500	3090000	San Bartolomé de Tirajana	1023	14	4,8	122	0,75
GC207	442500	3087500	San Bartolomé de Tirajana	1130	21	5,0	183	1,12
GC208	441702	3090293	San Bartolomé de Tirajana	1171	16	5,1	139	0,85
GC209	436816	3086432	San Bartolomé de Tirajana	942	20	4,6	174	1,07
GC210	438600	3089496	San Bartolomé de Tirajana	1192	20	5,1	174	1,07
GC211	440172	3069537	San Bartolomé de Tirajana	30	16	3,7	139	0,85
GC212	451851	3079889	San Bartolomé de Tirajana	250	12	3,8	104	0,64
GC213	455150	3076420	San Bartolomé de Tirajana	35	14	3,7	122	0,75
Media ari	tmética S	an Bartolo	mé de Tirajana		19	4,0	167,7	1,03
GC214	444934	3104014	San Mateo	776	14	4,4	122	0,75
GC215	447100	3097500	San Mateo	941	10	4,6	87	0,53
GC216	447659	3096558	San Mateo	960	13	4,7	113	0,69
GC217	447072	3098558	San Mateo	991	8	4,7	70	0,43
GC218	448108	3097467	San Mateo	1010	10	4,8	87	0,53
GC219	442473	3097408	San Mateo	1196	13	5,1	113	0,69
GC220	442600	3097400	San Mateo	1219	19	5,2	165	1,01
GC221	442485	3097393	San Mateo	1260	12	5,3	100	0,61
GC222	441460	3097216	San Mateo	1573	12	6,0	104	0,64
GC223	443000	3095000	San Mateo	1702	9	6,4	78	0,48
GC224	442982	3094815	San Mateo	1719	10	6,4	87	0,53
GC225	445500	3092500	San Mateo	1769	11	6,6	96	0,59
GC226	443013	3094819	San Mateo	1776	9	6,6	78	0,48
GC227	444075	3093262	San Mateo	1915	12	7,0	104	0,64
GC228	445146	3092677	San Mateo	1923	11	7,0	96	0,59
Media ari	tmética S	an Mateo			12	5,6	100,1	0,61
GC229	422500	3097500	San Nicolás de Tolentino	62	11	3,7	96	0,59
GC230	419500	3087500	San Nicolás de Tolentino	187	8	3,7	65	0,40
GC231	423500	3092500	San Nicolás de Tolentino	273	11	3,8	96	0,59
GC232	423500	3087500	San Nicolás de Tolentino	390	6	3,9	48	0,29
GC233	427500	3092500	San Nicolás de Tolentino	915	23	4,6	200	1,23
GC234	419793	3097209	San Nicolás de Tolentino	24	12	3,7	104	0,64

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva⁻¹
GC235	420314	3088717	San Nicolás de Tolentino	170	7	3,7	61	0,37
GC236	420614	3095723	San Nicolás de Tolentino	195	10	3,7	87	0,53
GC237	423665	3085990	San Nicolás de Tolentino	247	6	3,8	52	0,32
GC238	423675	3097646	San Nicolás de Tolentino	103	18	3,7	157	0,96
GC239	424342	3100492	San Nicolás de Tolentino	542	18	4,0	157	0,96
GC240	424861	3095522	San Nicolás de Tolentino	90	25	3,7	218	1,33
GC241	425583	3095936	San Nicolás de Tolentino	147	40	3,7	348	2,13
GC242	426342	3089132	San Nicolás de Tolentino	660	7	4,2	61	0,37
Media ar	itmética S	an Nicolás	de Tolentino		14	3,9	124,9	0,77
GC243	453804	3100649	Santa Brígida	519	12	4,0	104	0,64
GC244	450049	3099036	Santa Brígida	663	12	4,2	104	0,64
GC245	451120	3099602	Santa Brígida	751	12	4,3	104	0,64
Media ar	itmética S	anta Brígid	a		12	4,2	104,4	0,64
GC246	457200	3077800	Santa Lucía	35	16	3,7	139	0,85
GC247	457473	3077949	Santa Lucía	71	15	3,7	131	0,80
GC248	456132	3081686	Santa Lucía	95	16	3,7	139	0,85
GC249	454884	3079866	Santa Lucía	125	16	3,7	139	0,85
GC250	454158	3082222	Santa Lucía	206	8	3,7	65	0,40
GC251	452500	3080000	Santa Lucía	233	9	3,8	78	0,48
GC252	450720	3083788	Santa Lucía	300	10	3,8	87	0,53
GC253	452500	3082500	Santa Lucía	361	7	3,9	61	0,37
GC254	446667	3084885	Santa Lucía	384	8	3,9	70	0,43
GC255	447500	3085000	Santa Lucía	501	14	4,0	122	0,75
GC256	450000	3082500	Santa Lucía	511	20	4,0	174	1,07
GC257	449151	3083701	Santa Lucía	562	9	4,1	78	0,48
GC258	449151	3083710	Santa Lucía	562	9	4,1	78	0,48
GC259	447500	3082500	Santa Lucía	717	25	4,3	218	1,33
GC260	447500	3087500	Santa Lucía	774	9	4,4	78	0,48
Media ar	tmética S	antaLucía			13	3,9	110,5	0,68
GC261	442080	3093014	Tejeda	636	14	4,2	122	0,75
GC262	439017	3097770	Tejeda	1010	19	4,8	165	1,01
GC263	437438	3091175	Tejeda	1073	40	4,9	348	2,13
GC264	438724	3096004	Tejeda	1085	27	4,9	235	1,44
GC265	432500	3092500	Tejeda	1155	40	5,0	348	2,13
GC266	437000	3092800	Tejeda	1156	17	5,0	148	0,91
GC267	440811	3096119	Tejeda	1157	18	5,0	157	0,96
GC268	437823	3096186	Tejeda	1215	9	5,2	78	0,48
GC269	438302	3092000	Tejeda	1219	40	5,2	348	2,13
GC270	435080	3091967	Tejeda	1235	19	5,2	165	1,01
GC271	440000	3092500	Tejeda	1285	25	5,3	218	1,33
GC272	437242	3096282	Tejeda	1306	13	5,4	113	0,69
GC273	439002	3095021	Tejeda	1323	38	5,4	331	2,03
GC274	437823	3093352	Tejeda	1334	12	5,4	104	0,64

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva ⁻¹
GC275	441496	3092842	Tejeda	1635	24	6,2	209	1,28
GC276	442042	3093020	Tejeda	1684	12	6,3	104	0,64
GC277	442117	3094528	Tejeda	1689	10	6,3	87	0,53
GC278	442700	3092900	Tejeda	1716	9	6,4	78	0,48
GC279	434581	3093944	Tejeda	1076	11	4,9	96	0,59
GC280	437767	3096192	Tejeda	1181	12	5,1	104	0,64
GC281	440630	3097181	Tejeda	1344	12	5,5	104	0,64
GC282	442514	3093878	Tejeda	1691	10	6,3	87	0,53
Media ari	tmética T	ejeda			20	5,4	170,4	1,05
GC283	462000	3092500	Telde	43	6	3,7	52	0,32
GC284	461913	3097802	Telde	44	12	3,7	104	0,64
GC285	461500	3097500	Telde	53	10	3,7	87	0,53
GC286	461815	3097677	Telde	91	11	3,7	96	0,59
GC287	462001	3092669	Telde	97	8	3,7	70	0,43
GC288	459163	3098749	Telde	104	18	3,7	157	0,96
GC289	457812	3100220	Telde	170	12	3,7	104	0,64
GC290	457500	3097500	Telde	214	12	3,8	104	0,64
GC291	457244	3097598	Telde	301	16	3,8	139	0,85
GC292	457869	3092672	Telde	327	8	3,8	65	0,40
GC293	457500	3092500	Telde	346	11	3,8	96	0,59
GC294	455751	3096904	Telde	373	10	3,9	87	0,53
GC295	453347	3093218	Telde	750	10	4,3	87	0,53
GC296	452500	3092500	Telde	823	9	4,4	78	0,48
GC297	451667	3093020	Telde	943	8	4,6	70	0,43
GC298	453293	3091444	Telde	766	7	4,3	61	0,37
GC299	457772	3100219	Telde	174	12	3,7	104	0,64
GC300	458396	3091792	Telde	217	12	3,8	104	0,64
GC301	459189	3093442	Telde	213	11	3,8	96	0,59
Media ari	tmética T	elde			11	3,9	92,7	0,57
GC302	448776	3105228	Teror	522	14	4,0	122	0,75
GC303	447300	3102600	Teror	757	11	4,3	96	0,59
GC304	447526	3101254	Teror	761	12	4,3	104	0,64
Media ari	tmética T	eror			12	4,2	107,3	0,66
GC305	442120	3102561	Valleseco	919	12	4,6	104	0,64
GC306	442400	3102600	Valleseco	982	13	4,7	113	0,69
GC307	443029	3101158	Valleseco	1130	14	5,0	122	0,75
GC308	442112	3100015	Valleseco	1328	10	5,4	87	0,53
GC309	441053	3100500	Valleseco	1395	7	5,6	61	0,37
GC310	440836	3097931	Valleseco	1430	25	5,7	218	1,33
GC311	441315	3098480	Valleseco	1532	12	5,9	104	0,64
GC312	440333	3099683	Valleseco	1581	10	6,0	87	0,53
Media ari	tmética V	alleseco			13	5,4	112,0	0.69
GC313	453997	3095057	Valsequillo	403	12	3,9	104	0,64
GC314	452500	3097500	Valsequillo	456	14	4,0	122	0,75

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva⁻¹
GC315	451421	3096734	Valsequillo	541	15	4,0	131	0,80
GC316	451330	3097648	Valsequillo	551	13	4,1	113	0,69
GC317	451709	3097282	Valsequillo	560	40	4,1	348	2,13
GC318	451149	3094680	Valsequillo	675	10	4,2	87	0,53
GC319	447500	3092500	Valsequillo	1486	10	5,8	83	0,51
GC320	447644	3096549	Valsequillo	972	14	4,7	122	0,75
Media ari	tmética V	/alsequillo			16	4,3	138,7	0,85
Media a	ritmética	Gran Cana	ria		14,9	4,2	129,0	0,79
Máximo					40,0	7,0	348,0	2,13
Mínimo					4	3,7	35,0	0,21
Desviac	ión estái	ndar			7,15	0,77	62,3	0,38

6.2. Fuerteventura

Tabla A6.2 Puntos de medida con la altitud (m), , tasa exposición (μ R/h) fondo (μ R/h), dosis (nGyh⁻¹) y dosis equivalente (mSva⁻¹) de la isla de Fuerteventura.

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva⁻¹
FT1	607500	3128400	Antigua	0	8	3,7	69,6	0,43
FT2	609000	3134000	Antigua	34	5	3,7	43,5	0,27
FT3	609000	3144000	Antigua	41	7	3,7	60,9	0,37
FT4	608500	3138500	Antigua	54	5	3,7	43,5	0,27
FT5	603000	3138500	Antigua	159	8	3,7	69,6	0,43
FT6	598000	3139000	Antigua	190	9	3,7	78,3	0,48
FT7	599000	3144000	Antigua	231	10	3,8	87,0	0,53
FT8	593000	3140000	Antigua	367	12	3,9	104,4	0,64
FT9	593600	3144200	Antigua	594	13	4,1	113,1	0,69
FT10	594792	3139050	Antigua	293	12	3,8	104,4	0,64
FT11	600143	3143806	Antigua	206	10	3,7	87,0	0,53
FT12	604000	3129000	Antigua	120	11	3,7	95,7	0,59
FT13	604000	3134000	Antigua	74	5	3,7	43,5	0,27
FT14	604000	3144000	Antigua	170	9	3,7	78,3	0,48
FT15	604271	3139275	Antigua	116	9	3,7	78,3	0,48
FT16	604345	3134683	Antigua	68	8	3,7	69,6	0,43
FT17	604371	3134713	Antigua	68	9	3,7	78,3	0,48
FT18	606919	3142821	Antigua	91	9	3,7	78,3	0,48
FT19	609456	3137874	Antigua	12	9	3,7	78,3	0,48
Media a	ritmética /	Antigua			8,8	3,7	76,9	0,47
FT20	587300	3148800	Betancuria	94	5	3,7	43,5	0,27
FT21	586000	3140000	Betancuria	126	7	3,7	60,9	0,37
FT22	590800	3141000	Betancuria	288	17	3,8	147,9	0,91
FT23	593000	3149000	Betancuria	292	5	3,8	43,5	0,27

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
FT24	589000	3144000	Betancuria	398	11	3,9	95,7	0,59
FT25	588800	3139500	Betancuria	433	40	3,9	348,0	2,13
FT26	589000	3139300	Betancuria	495	10	4,0	87,0	0,53
FT27	584244	3141924	Betancuria	43	10	3,7	87,0	0,53
FT28	588607	3139598	Betancuria	396	30	3,9	261,0	1,60
FT29	588947	3140385	Betancuria	328	14	3,8	121,8	0,75
FT30	592155	3143689	Betancuria	357	15	3,9	130,5	0,80
Media ar	ritmética l	Betancuria			14,9	3,8	129,7	0,80
FT31	605300	3180400	La Oliva	0	7	3,7	60,9	0,37
FT32	596600	3175000	La Oliva	3	4,5	3,7	39,2	0,24
FT33	609500	3180850	La Oliva	9	9	3,7	78,3	0,48
FT34	597200	3175400	La Oliva	15	3	3,7	26,1	0,16
FT35	602000	3178900	La Oliva	15	7	3,7	60,9	0,37
FT36	597800	3174600	La Oliva	21	11	3,7	95,7	0,59
FT37	612000	3174000	La Oliva	34	4	3,7	34,8	0,21
FT38	596000	3169000	La Oliva	40	6	3,7	52,2	0,32
FT39	606200	3179000	La Oliva	41	7	3,7	60,9	0,37
FT40	596000	3164000	La Oliva	55	9	3,7	78,3	0,48
FT41	612500	3164000	La Oliva	58	5	3,7	43,5	0,27
FT42	602500	3172500	La Oliva	67	5	3,7	43,5	0,27
FT43	602000	3174400	La Oliva	69	7	3,7	60,9	0,37
FT44	608000	3178500	la Oliva	80	7	3,7	60,9	0,37
FT45	612500	3170300	La Oliva	96	9	3,7	78,3	0,48
FT46	607000	3174000	La Oliva	97	9	3,7	78,3	0,48
FT47	601000	3170800	La Oliva	108	5	3,7	43,5	0,27
FT48	603600	3171000	La Oliva	110	5	3,7	43,5	0,27
FT49	600000	3173200	La Oliva	118	7	3,7	60,9	0,37
FT50	602500	3170000	La Oliva	129	6,5	3,7	56,6	0,35
FT51	598500	3159500	La Oliva	155	11	3,7	95,7	0,59
FT52	602500	3169000	La Oliva	159	5	3,7	43,5	0,27
FT53	601000	3164000	La Oliva	160	9	3,7	78,3	0,48
FT54	607000	3169000	La Oliva	201	9	3,7	78,3	0,48
FT55	606000	3164000	La Oliva	230	8	3,8	69,6	0,43
FT56	599485	3163222	La Oliva	320	28	3,8	243,6	1,49
FT57	599590	3163237	La Oliva	320	30	3,8	261,0	1,60
FT58	600000	3163500	La Oliva	321	40	3,8	348,0	2,13
FT59	594435	3162892	La Oliva	15	9	3,7	78,3	0,48
FT60	600465	3163181	La Oliva	175	20	3,7	174,0	1,07
FT61	600468	3163192	La Oliva	175	20	3,7	174,0	1,07
FT62	600664	3163490	La Oliva	175	22	3,7	191,4	1,17
FT63	602590	3172547	La Oliva	76	6	3,7	52,2	0,32
FT64	602836	3168425	la Oliva	170	8	3,7	69,6	0,43
FT65	603739	3177910	La Oliva	42	10	3,7	87,0	0,53
FT66	604000	3170000	La Oliva	151	7	3,7	60,9	0,37

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
FT67	605473	3172749	la Oliva	87	9	3,7	78,3	0,48
FT68	605644	3164396	La Oliva	223	10	3,8	87,0	0,53
FT69	608046	3163428	La Oliva	363	11	3,9	95,7	0,59
FT70	613558	3161720	la Oliva	25	8	3,7	69,6	0,43
Media ar	itmética L	.a Oliva			10,3	3,7	89,8	0,55
FT71	570500	3107500	Pájara	0	7	3,7	60,9	0,37
FT72	561000	3109800	Pájara	3	4	3,7	21,8	0,13
FT73	584500	3118300	Pájara	11	6,5	3,7	56,6	0,35
FT74	550100	3107000	Pájara	12	5	3,7	43,5	0,27
FT75	563500	3103200	Pájara	27	7	3,7	60,9	0,37
FT76	552200	3106800	Pájara	37	7	3,7	60,9	0,37
FT77	569400	3107700	Pájara	42	11	3,7	95,7	0,59
FT78	575000	3116000	Pájara	59	4	3,7	26,1	0,16
FT79	561000	3104500	Pájara	68	7	3,7	60,9	0,37
FT80	581000	3118000	Pájara	76	6	3,7	52,2	0,32
FT81	579000	3124000	Pájara	106	7	3,7	60,9	0,37
FT82	552500	3107800	Pájara	120	20	3,7	174,0	1,07
FT83	567000	3106500	Pájara	131	9	3,7	78,3	0,48
FT84	572000	3111000	Pájara	131	4	3,7	26,1	0,16
FT85	561800	3108800	Pájara	150	9	3,7	78,3	0,48
FT86	584000	3134000	Pájara	174	6	3,7	52,2	0,32
FT87	556000	3106800	Pájara	195	5	3,7	43,5	0,27
FT88	584000	3139900	Pájara	198	5	3,7	43,5	0,27
FT89	572000	3115000	Pájara	205	4	3,7	26,1	0,16
FT90	559000	3107900	Pájara	214	10	3,8	87,0	0,53
FT91	587500	3136800	Pájara	233	8	3,8	69,6	0,43
FT92	566000	3106000	Pájara	268	4	3,8	34,8	0,21
FT93	564000	3105200	Pájara	275	5	3,8	43,5	0,27
FT94	566000	3111000	Pájara	279	8	3,8	69,6	0,43
FT95	580000	3129000	Pájara	305	7	3,8	60,9	0,37
FT96	589300	3135200	Pájara	334	16	3,8	139,2	0,85
FT97	588000	3138500	Pájara	343	13	3,8	113,1	0,69
FT98	589000	3133500	Pájara	390	9	3,9	78,3	0,48
FT99	549819	3105762	Pájara	8	6	3,7	52,2	0,32
FT100	551858	3106366	Pájara	16	6	3,7	52,2	0,32
FT101	557952	3108070	Pájara	124	6	3,7	52,2	0,32
FT102	560841	3104259	Pájara	64	7	3,7	60,9	0,37
FT103	560846	3104259	Pájara	64	7	3,7	60,9	0,37
FT104	560952	3108787	Pájara	70	8	3,7	69,6	0,43
FT105	563971	3103102	Pájara	43	8	3,7	69,6	0,43
FT106	567735	3105604	Pájara	58	8	3,7	69,6	0,43
FT107	570334	3108708	Pájara	41	7	3,7	60,9	0,37
FT108	573497	3113778	Pájara	66	4	3,7	34,8	0,21

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva⁻¹
FT109	575093	3115819	Pájara	59	4	3,7	34,8	0,21
FT110	577635	3121120	Pájara	46	8	3,7	69,6	0,43
FT111	582575	3130558	Pájara	327	10	3,8	87,0	0,53
FT112	583828	3135199	Pájara	143	9	3,7	78,3	0,48
FT113	584339	3135218	Pájara	154	8	3,7	69,6	0,43
FT114	588052	3138949	Pájara	361	12	3,9	104,4	0,64
Media ar	ritmética l	Pájara			10,3	3,7	89,8	0,40
FT115	613000	3159000	Puerto del Rosario	25	7	3,7	60,9	0,37
FT116	611000	3154000	Puerto del Rosario	65	7	3,7	60,9	0,37
FT117	593000	3159000	Puerto del Rosario	88	5	3,7	43,5	0,27
FT118	590000	3152500	Puerto del Rosario	89	7	3,7	60,9	0,37
FT119	596000	3154000	Puerto del Rosario	167	8	3,7	69,6	0,43
FT120	606000	3154000	Puerto del Rosario	231	6	3,8	52,2	0,32
FT121	598000	3149000	Puerto del Rosario	264	11	3,8	95,7	0,59
FT122	608000	3159000	Puerto del Rosario	288	7	3,8	60,9	0,37
FT123	603000	3149000	Puerto del Rosario	343	12	3,8	104,4	0,64
FT124	603200	3159000	Puerto del Rosario	354	11	3,9	95,7	0,59
FT125	601000	3154000	Puerto del Rosario	373	7	3,9	60,9	0,37
FT126	593865	3150431	Puerto del Rosario	266	7	3,8	60,9	0,37
FT127	594523	3148714	Puerto del Rosario	247	8	3,8	69,6	0,43
FT128	595002	3156394	Puerto del Rosario	122	10	3,7	87,0	0,53
FT129	599792	3151177	Puerto del Rosario	264	8	3,8	69,6	0,43
FT130	602552	3159388	Puerto del Rosario	363	14	3,9	121,8	0,75
FT131	608613	3154908	Puerto del Rosario	210	8	3,7	69,6	0,43
FT132	609792	3155044	Puerto del Rosario	126	8	3,7	69,6	0,43
FT133	611120	3153998	Puerto del Rosario	60	7	3,7	60,9	0,37
Media ar	ritmética l	Puerto del	Rosario		8,3	3,8	72,3	0,44
FT134	594700	3120500	Tuineje	11	8	3,7	69,6	0,43
FT135	595000	3127000	Tuineje	59	7	3,7	60,9	0,37
FT136	599500	3124600	Tuineje	59	9	3,7	78,3	0,48
FT137	594000	3124000	Tuineje	60	7	3,7	60,9	0,37
FT138	589200	3123500	Tuineje	65	9	3,7	78,3	0,48
FT139	588500	3119500	Tuineje	76	7	3,7	60,9	0,37
FT140	599800	3129000	Tuineje	88	9	3,7	78,3	0,48
FT141	584000	3144000	Tuineje	111	7	3,7	60,9	0,37
FT142	604000	3124000	Tuineje	112	7	3,7	60,9	0,37
FT143	594000	3129500	Tuineje	119	7	3,7	60,9	0,37
FT144	598200	3132850	Tuineje	125	9	3,7	78,3	0,48
FT145	599200	3132850	Tuineje	125	9	3,7	78,3	0,48
FT146	597200	3133200	Tuineje	139	10	3,7	87,0	0,53
FT147	598000	3133450	Tuineje	140	10	3,7	87,0	0,53
FT148	584000	3124000	Tuineje	144	7	3,7	60,9	0,37
FT149	588000	3120500	Tuineje	144	11	3,7	95,7	0,59
FT150	597000	3134000	Tuineje	156	4	3,7	34,8	0,21

Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva ⁻¹
FT151	599000	3134000	Tuineje	164	9	3,7	78,3	0,48
FT152	597500	3133600	Tuineje	166	11	3,7	95,7	0,59
FT153	589000	3129000	Tuineje	173	7	3,7	60,9	0,37
FT154	594000	3134000	Tuineje	183	7	3,7	60,9	0,37
FT155	594500	3136000	Tuineje	224	5	3,8	43,5	0,27
FT156	583500	3129000	Tuineje	344	6	3,8	52,2	0,32
FT157	587410	3122004	Tuineje	145	9	3,7	78,3	0,48
FT158	588750	3130047	Tuineje	195	10	3,7	87,0	0,53
FT159	588765	3130041	Tuineje	193	10	3,7	87,0	0,53
FT160	589636	3129417	Tuineje	170	8	3,7	69,6	0,43
FT161	597366	3126394	Tuineje	40	9	3,7	78,3	0,48
Media a	ritmética 🏾	Fuineje			8,1	3,7	70,8	0,43
Media a	ritmética l	Fuerteventu	ıra		9,1	3,7	78,8	0,48
Máximo					40	4,1	348	2,13
Mínimo					4	3,7	21,8	0,13
Desviac	ión estáno	dar			5,47	0,05	44,03	0,27

6.3. Lanzarote

Tabla A6.3 Puntos de medida con la altitud (m), , tasa exposición (μ R/h) fondo (μ R/h), dosis (nGyh⁻¹) y dosis equivalente (mSva⁻¹) de la isla de Lanzarote

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva⁻¹
LZ1	642242	3204449	Arrecife	18	4	3,7	34,8	0,21
LZ2	642296	3207957	Arrecife	67	10	3,7	87,0	0,53
Media aritmética Arrecife					7	3,7	60,9	0,37
LZ3	650833	3233308	Haría	17	7	3,7	60,9	0,37
LZ4	641740	3221556	Haría	69	6	3,7	52,2	0,32
LZ5	647556	3223113	Haría	119	8,3	3,7	72,2	0,44
LZ6	618218	3194936	Haría	126	6,7	3,7	58,3	0,36
LZ7	648746	3229052	Haría	292	7,3	3,8	63,5	0,39
LZ8	645407	3226206	Haría	301	8,3	3,8	72,2	0,44
LZ9	647700	3232554	Haría	468	9	4,0	78,3	0,48
LZ10	643833	3212231	Haría	147	9	3,7	78,3	0,48
LZ11	644610	3221508	Haría	558	12	4,1	104,4	0,64
LZ12	644630	3221496	Haría	556	12	4,1	104,4	0,64
LZ13	647081	3225238	Haría	287	10	3,8	87,0	0,53
LZ14	647083	3225248	Haría	289	10	3,8	87,0	0,53
LZ15	647437	3231374	Haría	407	10	3,9	87,0	0,53
LZ16	647438	3231322	Haría	405	10	3,9	87,0	0,53
LZ17	649627	3219044	Haría	47	5	3,7	43,5	0,27
LZ18	649660	3218935	Haría	50	5	3,7	43,5	0,27

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva⁻¹
LZ19	650240	3232345	Haría	38	8	3,7	69,6	0,43
LZ20	651374	3232818	Haría	6	6	3,7	52,2	0,32
LZ21	651389	3232914	Haría	2	4	3,7	34,8	0,21
LZ22	651408	3232871	Haría	3	6,0	3,7	52,2	0,32
Media aritr	nética Haría				8,0	3,8	69,4	0,43
LZ23	637478	3205050	San Bartolomé	66	6	3,7	52,2	0,32
LZ24	633678	3205993	San Bartolomé	256	8	3,8	69,6	0,43
LZ25	635305	3209631	San Bartolomé	288	9	3,8	78,3	0,48
LZ26	630977	3210478	San Bartolomé	315	4	3,8	34,8	0,21
LZ27	632728	3208516	San Bartolomé	303	10	3,8	87,0	0,53
LZ28	632743	3207939	San Bartolomé	311	10	3,8	87,0	0,53
LZ29	636408	3204539	San Bartolomé	39	6	3,7	52,2	0,32
LZ30	636419	3204483	San Bartolomé	37	6	3,7	52,2	0,32
Media aritr	nética San B	artolomé			7,4	3,8	64,2	0,39
LZ31	646312	3209493	Teguise	37	9,1	3,7	79,2	0,49
LZ32	637016	3222287	Teguise	51	5	3,7	43,5	0,27
LZ33	648957	3217047	Teguise	69	7,8	3,7	67,9	0,42
LZ34	638201	3220306	Teguise	80	4	3,7	34,8	0,21
LZ35	637970	3216576	Teguise	130	5	3,7	43,5	0,27
LZ36	643022	3211423	Teguise	154	9	3,7	78,3	0,48
LZ37	636679	3214229	Teguise	188	5	3,7	43,5	0,27
LZ38	643908	3213285	Teguise	188	9,5	3,7	82,7	0,51
LZ39	647452	3213437	Teguise	188	6,1	3,7	53,1	0,33
LZ40	639463	3209639	Teguise	204	8	3,7	69,6	0,43
LZ41	649116	3211812	Teguise	290	5,7	3,8	49,6	0,30
LZ42	641621	3217244	Teguise	325	7,7	3,8	67,0	0,41
LZ43	644408	3218212	Teguise	354	8	3,9	69,6	0,43
LZ44	643491	3221058	Teguise	593	8,2	4,1	71,3	0,44
LZ45	632925	3220534	Teguise	58	5	3,7	43,5	0,27
LZ46	633032	3215600	Teguise	207	6	3,7	52,2	0,32
LZ47	633169	3217697	Teguise	135	4	3,7	34,8	0,21
LZ48	633170	3217693	Teguise	135	4	3,7	34,8	0,21
LZ49	633670	3219886	Teguise	93	4,0	3,7	34,8	0,21
LZ50	633757	3211496	Teguise	276	11	3,8	95,7	0,59
LZ51	635782	3211174	Teguise	245	6	3,8	52,2	0,32
LZ52	636926	3219706	Teguise	83	5	3,7	43,5	0,27
LZ53	637471	3219453	Teguise	714	5	4,3	43,5	0,27
LZ54	639518	3209507	Teguise	190	9	3,7	78,3	0,48
LZ55	639527	3209508	Teguise	191	9	3,7	78,3	0,48
LZ56	639641	3215790	Teguise	292	8	3,8	69,6	0,43
LZ57	640394	3212969	Teguise	206	9	3,7	78,3	0,48
LZ58	641116	3215800	Teguise	345	8,0	3,8	69,6	0,43
LZ59	641190	3218342	Teguise	316	12	3,8	104,4	0,64
LZ60	641740	3221556	Teguise	65	6,8	3,7	59,2	0,36

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva⁻¹		
LZ61	642266	3210845	Teguise	158	8,0	3,7	69,6	0,43		
LZ62	642326	3207896	Teguise	60	10	3,7	87,0	0,53		
LZ63	643956	3212303	Teguise	145	9	3,7	78,3	0,48		
LZ64	644794	3219295	Teguise	442	6,0	3,9	52,2	0,32		
LZ65	648025	3209860	Teguise	16	12	3,7	104,4	0,64		
Media aritmo	ética Teguise				7,3	3,8	63,4	0,39		
LZ66	626574	3201314	Tías	104	8	3,7	69,6	0,43		
LZ67	628877	3202406	Tías	177	8,3	3,7	72,2	0,44		
LZ68	626085	3203993	Tías	378	8	3,9	69,6	0,43		
LZ69	629354	3205314	Tías	318	9	3,8	78,3	0,48		
LZ70	631252	3200759	Tías	35	8	3,7	69,6	0,43		
LZ71	632239	3200549	Tías	15	6,0	3,7	52,2	0,32		
Media aritn	nética Tías				7,9	3,7	68,6	0,42		
LZ72	629720	3219656	Tinajo	54	10,3	3,7	89,6	0,55		
LZ73	627332	3214460	Tinajo	230	8	3,8	69,6	0,43		
LZ74	623589	3210267	Tinajo	307	6,2	3,8	53,9	0,33		
LZ75	630616	3208925	Tinajo	315	5	3,8	43,5	0,27		
LZ76	627456	3207139	Tinajo	341	7,8	3,8	67,9	0,42		
LZ77	621382	3209308	Tinajo	353	7	3,9	60,9	0,37		
LZ78	619682	3208665	Tinajo	250	6	3,8	52,2	0,32		
LZ79	619682	3208672	Tinajo	252	6	3,8	52,2	0,32		
LZ80	620645	3209418	Tinajo	304	6	3,8	52,2	0,32		
LZ81	621678	3208434	Tinajo	360	4	3,9	34,8	0,21		
LZ82	621738	3208492	Tinajo	358	6	3,9	52,2	0,32		
LZ83	621756	3208468	Tinajo	361	6	3,9	52,2	0,32		
LZ84	622339	3208703	Tinajo	447	6	3,9	52,2	0,32		
LZ85	624216	3215134	Tinajo	134	8	3,7	69,6	0,43		
LZ86	624237	3215136	Tinajo	132	6	3,7	52,2	0,32		
LZ87	625526	3215517	Tinajo	174	8	3,7	69,6	0,43		
LZ88	627693	3213599	Tinajo	261	6,0	3,8	52,2	0,32		
LZ89	627909	3216228	Tinajo	195	8	3,7	69,6	0,43		
LZ90	627992	3213236	Tinajo	282	8	3,8	69,6	0,43		
LZ91	628914	3220228	Tinajo	21	7	3,7	60,9	0,37		
LZ92	628915	3220219	Tinajo	19	7	3,7	60,9	0,37		
Media aritmética Tinajo					6,8	3,8	59,0	0,36		
LZ93	618277	3191450	Yaiza	30	6	3,7	52,2	0,32		
LZ94	613898	3194275	Yaiza	37	8	3,7	69,6	0,43		
LZ95	613969	3197935	Yaiza	41	10	3,7	87,0	0,53		
LZ96	623300	3198979	Yaiza	72	7	3,7	60,9	0,37		
LZ97	615565	3206085	Yaiza	84	7	3,7	60,9	0,37		
LZ98	611552	3195688	Yaiza	85	6	3,7	52,2	0,32		
LZ99	616443	3200194	Yaiza	149	8	3,7	69,6	0,43		
LZ100	616558	3199952	Yaiza	179	8	3,7	69,6	0,43		
Punto	х итм	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh ⁻¹	mSva⁻¹		
------------	------------	---------	-----------	---------	------	-------	--------------------	--------	--	--
LZ101	622227	3203819	Yaiza	227	4,9	3,8	42,6	0,26		
LZ102	619006	3198677	Yaiza	414	6	3,9	52,2	0,32		
LZ103	610878	3193699	Yaiza	23	8	3,7	69,6	0,43		
LZ104	610884	3193677	Yaiza	22	8	3,7	69,6	0,43		
LZ105	612273	3194321	Yaiza	79	8	3,7	69,6	0,43		
LZ106	612286	3194316	Yaiza	17	8	3,7	69,6	0,43		
LZ107	615696	3206067	yaiza	89	6	3,7	52,2	0,32		
LZ108	616134	3200425	Yaiza	108	8	3,7	69,6	0,43		
LZ109	617351	3194391	Yaiza	43	8	3,7	69,6	0,43		
LZ110	617407	3194408	Yaiza	45	8	3,7	69,6	0,43		
LZ111	618141	3197584	Yaiza	181	5,0	3,7	43,5	0,27		
LZ112	620157	3200053	Yaiza	305	9	3,8	78,3	0,48		
LZ113	620473	3204117	Yaiza	175	6	3,7	52,2	0,32		
LZ114	620564	3208055	Yaiza	275	5	3,8	43,5	0,27		
LZ115	620777	3200064	Yaiza	348	9	3,8	78,3	0,48		
LZ116	623789	3198686	Yaiza	21	6,0	3,7	52,2	0,32		
LZ117	623832	3200972	Yaiza	151	8	3,7	69,6	0,43		
LZ118	626089	3203992	Yaiza	386	8	3,9	69,6	0,43		
LZ119	650249	3232367	Yaiza	37	8	3,7	69,6	0,43		
Media arit	mética Yai	za			6,8	3,8	59,0	0,36		
Media arit	mética Lan	zarote			7,3	3,8	63,9	0,39		
Máximo					12	4,3	104	0,64		
Mínimo					4	3,7	34,8	0,21		
Desviació	n estándar				1,91	0,10	16,65	0,10		

6.4. La Graciosa

Punto	X UTM	Y UTM	Municipio	Altitud	Tasa	Fondo	nGyh⁻¹	mSva ⁻¹
LGR1	647277	3238334	Teguise	31	5	3,7	43,5	0,27
LGR2	646828	3239786	Teguise	8	4	3,7	34,8	0,21
LGR3	644838	3238278	Teguise	35	4	3,7	34,8	0,21
LGR4	644638	3236635	Teguise	51	7	3,7	60,9	0,37
LGR5	642512	3233262	Teguise	22	4	3,7	72,2	0,21
LGR6	642399	3233136	Teguise	17	4	3,7	34,8	0,21
LGR7	645312	3433850	Teguise	0	4	3,7	34,8	0,21
Media aritr	nética La (Graciosa			7,3	3,7	39,7	0,24
Máximo					7	3,7	72,2	0,64
Mínimo					4	3,7	34,8	0,21
Desviaciór	n estándar			1,1	0,10	9,86	0,06	



6.5. Hoja de campo

Apéndice 7

Tablas concentración de radionúclidos

7.1. Gran Canaria

Tabla A7.1 Puntos muestras de tierra, y concentraciones de radionúclidos (Bq/kg) de las mismas, de la isla de Gran Canaria

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[226Ra] Bq/kg	[228Ra] Bq/kg	[228Th] Bq/kg	[232Th] Bq/kg	[40K] Bq/kg	[137Cs] Bq/kg
TGC1	442596	3097427	20,8±1,3	33,5±2,2	27,2±1,7	29,6±2	224±14	10,4±0,6
TGC2	426290	3096346	67,5±4,0	136,0±8,0	116,0±7,0	124,7±7,5	1134±67	Nd
TGC3	438999	3095015	52,7±3,1	77,3±4,7	67,8±4,1	71,9±4,4	1318±77	Nd
TGC4	426290	3096346	71,6±4,2	136,0±8,0	122,0±7,0	128,1±7,5	1162±69	Nd
TGC5	420760	3089057	10,9±0,7	15,5±1,1	14,6±1,0	15±1,1	353±21	0,8±0,1
TGC6	461506	3087634	16,9±1,0	25,6±1,7	20,6±1,3	22,4±1,5	455±27	6,9±0,4
TGC7	457258	3097622	33,4±2,0	56,7±3,4	48,8±2,9	52,1±3,2	744±44	1,6±0,1
TGC8	441555	3068682	14,2±0,9	12,4±0,9	9,0±0,6	10±0,8	176±11	Nd
TGC9	427809	3087238	19,7±1,2	17,1±1,2	16,7±1,1	16,9±1,2	406±25	2,9±0,2
TGC10	433242	3077418	34,9±2,1	83,6±5,1	68,7±4,2	74,7±4,7	1191±71	2,7±0,2
TGC11	433365	3080714	30,2±1,8	82,0±5,0	75,0±4,5	78,1±4,8	1033±61	3,2±0,2
TGC12	442328	3112529	35,9±2,2	51,3±3,3	39,5±2,5	43,8±2,9	568±35	2,7±0,2
TGC13	462003	3092665	21,7±1,4	27,3±1,9	23,2±1,6	24,9±1,8	492±30	5,8±0,4
TGC14	432773	3107439	6,9±0,5	15,6±1,1	12,9±0,9	14±1	348±21	1,4±0,1
TGC15	447468	3106878	33,5±2,0	24,5±1,7	62,5±3,8	30,8±2,8	605±36	0,3±0,0
TGC16	426269	3096166	43,0±3,0	64,0±4,0	60,0±4,0	62±4	235±15	5,3±0,4
TGC17	442943	3111773	10,5±0,7	89,0±6,0	77,0±5,0	81,9±5,5	1010±60	2,7±0,2
TGC18	452400	3111643	15,7±1,0	42,0±3,0	34,6±2,2	37,2±2,6	920±60	ND
TGC19	427770	3095603	20,2±1,3	60,0±4,0	48,0±3,0	52,3±3,5	980±60	1,5±0,1
TGC20	445144	3092675	46,0±3,0	58,0±4,0	53,0±3,0	54,8±3,5	72±6	ND
TGC21	447513	3112583	19,9±1,3	45,0±3,0	33,4±2,2	37,5±2,6	149±11	ND
TGC22	424414	3087448	11,3±0,7	11,9±1,0	10,0±0,8	10,7±0,9	250±16	6,5±0,4
TGC23	433076	3082312	28,5±1,7	39,0±3,0	35,3±2,2	36,6±2,6	690±40	3,8±0,3
TGC24	439544	3103813	23,7±1,5	34,0±3,0	30,5±2,1	31,7±2,6	199±14	1,4±0,2
TGC25	457315	3107403	20,4±1,2	57,0±4,0	32,0±2,0	37±3	344±21	15,2±0,9
TGC26	422864	3097317	21,8±1,4	62,0±4,0	47,0±3,0	52,4±3,5	970±60	5,2±0,4
TGC27	448534	3091862	24,7±1,6	30,8±2,2	25,7±1,8	27,7±2	126±10	4,8±0,4
TGC28	427537	3101022	31,2±2,0	13,9±1,5	11,4±1,1	12,3±1,3	207±15	ND
TGC29	443009	3094823	26,9±1,7	46,0±3,0	40,0±3,0	43±3	131±10	30,8±1,9
TGC30	442129	3075319	38,6±2,4	90,0±6,0	72,0±4,0	77,5±5	1350±80	ND
TGC31	451113	3075312	24,7±1,6	85,0±5,0	70,0±4,0	75,9±4,5	1220±70	ND
TGC32	437029	3111503	21,5±1,4	93,0±6,0	74,0±5,0	81,8±5,5	870±50	ND
TGC33	450164	3074497	16,2±1,1	53,0±4,0	43,0±3,0	46,6±3,5	900±50	1,8±0,2
TGC34	457872	3092668	21,5±1,9	21,5±1,9	17,3±1,4	18,8±1,7	328±22	1,7±0,2
TGC35	444320	3081607	43,4±3,7	61,0±4,3	60,0±4,3	60,5±4,3	1192±51	6,5±0,7

	Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[226Ra] Bq/kg	[228Ra] Bq/kg	[228Th] Bq/kg	[232Th] Bq/kg	[40K] Bq/kg	[137Cs] Bq/kg
	TGC36	427993	3086519	22,4±2,2	20,3±2,1	22,7±2,1	21,5±2,1	398±19	ND
	TGC37	431466	3086535	71,8±3,4	94,3±5,0	87,0±4,8	90,5±4,9	1795±77	ND
	TGC38	433939	3088706	88,4±7,3	97,5±6,5	95,5±6,5	96,5±6,6	1153±50	2,4±0,3
	TGC39	439997	3092213	51,8±4,4	69,2±4,8	62,2±4,6	65,6±4,7	945±42	2,2±0,1
	TGC40	446325	3106723	61,8±5,2	66,8±5,0	70,8±5,2	68,7±5,1	243±16	2,5±0,6
	TGC41	453423	3080738	27,5±1,5	29,0±2,0	29,1±1,9	29±2	536±24	11,2±0,5
	TGC42	446778	3084091	34,5±1,8	56,8±3,2	56,8±3,3	56,8±3,3	1378±59	1,8±0,5
	TGC43	437540	3074141	24,0±1,6	27,3±2,4	24,4±2,2	25,7±2,4	296±16	ND
	TGC44	455134	3101334	19.1±1.3	18.4±1.8	17.9±1.6	18.1±1.8	363±18	ND
	TGC45	455631	3105449	25.7±1.9	35.3±3.1	37.3±3.0	36.3±3.1	559±27	ND
	TGC46	455405	3105376	27.0±1.9	37.8±3.0	36.1±2.9	36.9±3	521±25	1.8±0.6
	TGC47	455438	3105142	30.5±2.1	39.6±3.1	36.6±2.9	±ND	550±26	2.6±0.6
	TGC48	455082	3105003	30.6+2.2	38.8+3.3	32.6+2.9	35.2+3.1	538+26	3.7+0.6
	TGC49	455586	3106105	30.6±2.0	44.5±3.2	44.6±3.1	44.5±3.2	628±29	0,1 <u>=</u> 0,0 ND
	TGC50	458422	3116442	32,1+1.9	36.7+2.7	39,2+2,6	38+2.7	864+38	ND
	TGC29A	442983	3094824	19.7+1.2	48.2+2.4	46.1+2.5	47.2+2.5	146+9	3.7+0.4
	TGC29F	442931	3094828	23 8+1 8	45 6+3 0	43 2+3 0	44 4+3	238+15	5 4+0 7
	TGC29B	443001	3094810	25,9±1,0	44 6+3 3	44 1+3 0	44 3+3 2	91+12	0,4±0,7 1 9+0 6
	TGC29C	443022	3094819	20,0±1,0 22 1+1 7	49 0+3 3	40 2+2 7	43,0±0,2	90+12	25 5+1 3
	TGC29D	442948	3094788	18 5+1 8	46 0+3 4	38 3+2 9	41 6+3 2	141+14	19 5+1 2
	TGC55	440776	3112807	33 0+1 8	40,0±0,4	67 <i>4</i> +3 7	64 8+3 6	700+32	ND
	TGC56	1/18738	311113/	45 0±2 1	50 0±2 0	52 6±2 0	51 7±2 0	530±24	0.8+0.3
	TGC57	4407567	3108628	40,0±2,1 30 /±1 0	50,5±2,5	54 3±3 0	53 3±2 0	6/1±24	0,0±0,3
	TCC59	447307	3106742	55,4±1,5	64 5±2 2	54,5±3,0	64 7±2 5	126+10	2 0+0 5
	TCC50	440341	3100742	50.2±2.9	50 6±2 6	60 0+2 5	50 8+2 6	201+16	2,9±0,5
	TGC60	443034	2101159	40.2±2.0	24 2±2 2	00,0±3,3	25 7±2 2	231±10	3,4±0,4
	TGC61	443029	3101150	$40,2\pm2,0$	$34,3\pm2,3$	$37,1\pm2,3$	$33,7\pm2,3$	230±13	3,5±0,4 4 2±0 4
	TCCG2	441000	2100200	23,0±1,3	29,1±1,9	27,0±1,0	20,3±1,0	110±0	4,2±0,4
	TGC62	430947	3000683	24,3±1,3	20,1±1,7	22,0±1,0	21,111,7	443±20 24±2	5 2±0 4
	TCC64	440333	2007216	$27,3\pm1,0$ 28.4±1.0	$41,3\pm2,3$	57,7±2,4	52 0±2,5	24±3 100±11	0,3±0,4
	TGC65	441400	2007021	50,4±1,9	17 6±2 0	47 5±2,9	JZ,9±2,9	571±26	
	TGC66	440030	3097931	36.5±1.5	41,0±2,9	47,3±2,0	47,5±2,0	028+40	
	TCC67	440011	2006004	50,5±1,5	41,4±2,2	41,9±2,3	41,0±2,3	920±40	
	TGC68	430724	3096004	52 8±2 4	74,0±3,3	09,0±3,0	72,3±3,3	1243±32	
	TCC60	430724	2002252	17 2 2 2 2	00,2±2,0	$31,9\pm2,0$	$32,0\pm 2,0$	070±30	1,0±0,0
	TGC09	43/023	3093352	47,3±2,2	31,0±2,1	32,0±2,1	31,9±2,1	304±10	
	TGC70	441490	2004520	39,3±2,7	49,1±2,0	40,0±2,9	49±2,9	116+0	17,0±1,0
	TGC72	442117	3094320	37,9±1,9	00,0±2,0	49,5±2,0	00,1±2,0	110±9 220±12	17,3±0,9
	TGC72	450049	3099030	$30, 1 \pm 1, 9$	40,0±2,0	40,9±2,0	47,7±2,0	229±12	27.05
	TGC73	400004	3100049	31,0±1,7	33,2±2,3	33,9±2,2	33,0±2,3	272±14	3,7±0,5
	TGC74	400272	2002012	51,2±1,0	22,0±1,0	22,1±1,0	ZZ,3±1,7	429±20	3,0±0,3
		440210	3096970	51,2±2,0	53,2±3,3	46,5±3,0	50,0±3,2	407±24	0,1±0,7
		442320	3093669	53,0±2,4	53,6±2,9	53,3±2,9	53,5±2,9	000±27	2,0±0,2
		439905	3092693	$47,0\pm2,4$	$57,0\pm3,4$	54,0±3,3	00,0±0,4	10/±13	47,4±2,1
		40070	3000247	29,0±1,5	33,4±2,2	34,9±2,1	34, 1±2,2	307±15	0,0±0,0
	TO000	448705	3090557	30,3±1,7	40,8±2,6	30,9±2,4	30,7±2,0	000.40	
		453970	3084885	∠∪,5±1,5	20,5±2,3	∠1,0±2,1	20,3±2,2	∠09±13	16,9±0,9
	16081	446667	3084885	18,8±1,3	24,6±2,1	∠ɔ,/±1,9	25,2±2	101±11	8,5±0,6
	TGC82	453369	3096233	29,9±1,4	48,0±2,2	44,9±2,4	46,5±2,4	804±34	ND
	TGC83	461073	3084428	18,3±1,1	19,0±1,6	20,1±1,4	19,6±1,6	2/6±14	
	IGC84	459177	3082697	22,8±1,3	27,2±1,9	26,9±1,8	27,1±1,9	569±25	5,9±0,5
	IGC85	454884	3079866	34,4±1,7	49,6±2,6	49,1±2,7	49,4±2,7	919±39	2,4±0,2
	IGC86	436453	3070276	32,0±1,7	74,6±3,6	69,3±3,6	71,9±3,7	1057±45	1,2±0,2
	16687	434720	3080685	34 ()+1 7	48 8+2 8	46 ()+2 6	47 3+27	997+43	16+05

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[226Ra] Bq/kg	[228Ra] Bq/kg	[228Th] Bq/kg	[232Th] Bq/kg	[40K] Bq/kg	[137Cs] Bq/kg
TGC88	434192	3075920	47,1±2,2	61,5±3,0	56,6±3,0	59±3,1	1065±45	1,6±0,4
TGC89	430844	3073677	38,7±1,9	50,2±2,9	54,3±3,0	52,2 ± 3	1053±45	21,6±1,1
TGC90	428079	3076367	42,3±1,9	53,1±2,7	55,8±2,9	54,4±2,9	994±42	ND
TGC91	426380	3077840	42,3±2,0	57,9±2,9	55,4±2,9	56,7±3	1064±44	ND
TGC92	425119	3078284	36,9±1,8	55,8±2,9	55,5±3,0	55,6±3	1042±44	1,4±0,4
TGC93	440298	3081304	34,1±1,8	61,7±3,2	63,9±3,4	62,7±3,3	1235±52	5,0±0,5
TGC94	439654	3079195	67,5±2,9	70,9±3,4	73,0±3,7	71,9±3,6	1087±46	5,4±0,5
TGC95	450720	3083788	19,9±1,2	17,2±1,5	17,1±1,4	17,2±1,5	239±12	1,2±0,4
TGC96	459163	3098749	33,0±1,9	59,6±3,3	59,5±3,3	59,5±3,4	646±29	1,9±0,5
TGC97	451330	3097648	33,3±1,8	39,0±2,6	39,7±2,5	39,4±2,6	353±18	3,4±0,5
TGC98	451149	3094680	32,8±1,7	35,2±2,4	36,2±2,3	35,8±2,4	328±16	ND
TGC99	453997	3095057	17,5±1,3	21,9±1,9	22,2±1,8	22,1±1,9	346±17	ND
TGC100	450665	3110186	26,7±1,5	37,6±2,3	39,8±2,4	38,7±2,4	336±16	3,7±0,4
TGC101	434767	3114224	52,4±2,6	57,4±3,4	51,1±3,1	54±3,3	488±24	ND
TGC102	432525	3114725	28,3±1,6	31,5±2,3	30,2±2,0	30,8±2,2	498±23	2,4±0,3
TGC103	435103	3105232	36,3±1,9	26,4±2,1	26,3±1,9	26,4±2	584±26	1,4±0,4
TGC104	432892	3107555	55,1±2,5	44,7±2,7	43,1±2,5	43,8±2,6	477±22	3,2±0,5
TGC105	431816	3109348	4,9±0,8	5,5±1,3	5,6±1,0	5,6±1,2	97±7	ND
TGC106	436193	3110226	21,4±1,2	32,2±2,4	33,6±2,2	33±2,3	281±15	28,2±1,3
TGC107	437199	3108626	68,2±3,1	79,7±4,0	74,0±4,0	76,8±4,1	105±10	ND
TGC108	436826	3105382	29,0±1,5	35,5±2,1	32,2±2,0	33,7±2,1	118±8	6,0±0,5
TGC109	440616	3103886	35,5±1,9	46,3±2,9	51,7±3,0	48,9±3	120±10	18,5±1,0
TGC110	442630	3108896	49,7±2,4	54,2±3,1	56,0±3,2	55,1±3,2	126±10	5,0±0,6
TGC111	451709	3097282	82,3±3,6	148,1±6,5	145,3±7,1	146,8±6,8	958±41	ND
TGC112	451311	3107267	33,7±1,7	39,6±2,5	39,9±2,5	39,8±2,5	507±24	11,1±0,7
TGC113	450907	3106026	45,2±2,2	45,1±2,7	49,0±2,8	46,9±2,8	212±12	4,7±0,5
TGC114	448776	3105228	71,5±3,3	70,9±4,0	73,0±4,1	72±4,1	99±11	3,0±0,6
TGC115	438653	3100042	50,5±2,5	56,1±3,3	56,2±3,3	56,2±3,3	470±23	14,0±0,9
TGC116	436811	3099490	43,7±2,1	61,3±3,2	61,1±3,3	61,2±3,3	234±13	59,3±2,5
TGC117	434340	3100342	46,0±2,2	45,0±2,6	44,0±2,5	44,5±2,6	300±15	ND
TGC118	433073	3103439	76,2±3,4	93,6±4,5	96,0±4,9	94,7±4,7	1191±51	ND
TGC119	431540	3104156	35,7±2,1	57,3±3,4	58,1±3,4	57,7±3,5	859±38	99,1±4,1
TGC120	431444	3101967	53,0±2,4	98,6±4,6	104,9±5,2	101,4±5	1053±45	1,4±0,5
TGC121	433565	3098730	57,5±2,8	48,8±3,3	52,9±3,2	50,9±3,3	200±14	13,0±0,8
TGC122	431896	3096872	89,0±3,8	88,2±4,0	89,5±4,5	88,8±4,3	955±41	1,7±0,2
TGC123	430465	3096581	83,8±3,6	75,8±3,6	71,2±3,6	73,5±3,7	1086±46	0,7±0,2
TGC124	427122	3096085	71,0±3,1	62,0±3,2	61,1±3,2	61,5±3,2	806±35	3,0±0,5
TGC125	449608	3074147	36,0±1,8	53,6±2,8	54,4±2,9	54±2,9	755±33	1,4±0,3
TGC126	449957	3075324	41,3±1,9	77,4±3,7	77,7±3,9	77,5±3,8	829±36	0,5±0,3
TGC127	447880	3074361	36,0±1,7	54,0±2,8	53,0±2,8	53,5±2,8	1009±43	2,1±0,4
TGC128	439490	3085126	38,6±1,9	85,8±4,1	88,9±4,5	87,2±4,3	1182±50	5,0±0,5
TGC129	440065	3082593	32,2±1,7	85,3±4,1	85,6±4,3	85,4±4,2	1117±48	ND
TGC130	457171	3111558	20,3±1,1	27,0±1,6	25,4±1,5	26,2±1,6	503±22	ND
TGC131	447550	3073503	47,8±2,2	60,7±3,1	61,8±3,3	61,2±3,2	722±32	ND
TGC132	440241	3072836	36,8±1,8	60,3±3,0	56,7±3,0	58,5±3	927±40	ND
TGC133	444009	3103398	16,8±1,5	25,6±2,3	23,6±2,1	24,5±2,2	86±10	11,5±0,8
TGC134	451126	3103048	50,1±2,4	70,2±3,4	65,1±3,6	67,7±3,5	416±20	11,8±0,7
TGC135	451120	3099602	61,5±2,9	64,8±3,5	63,2 ± 3,5	64±3,5	216±13	8,4±0,5
TGC136	461505	3087604	18,5±1,4	25,5±2,4	23,1±2,0	24±2,3	514±25	9,8±0,7
TGC137	453573	3109961	23,6±1,9	22,6±2,8	21,5±2,3	21,9±2,6	445±23	7,9±0,8
TGC138	457812	3100220	27,2±1,7	26,7±2,4	30,4±2,2	28,7±2,4	495±24	4,4±0,6

Muestra	Coorden	adas UTM	[226Ra]	[228Ra]	[228Th]	[232Th]	[40K]	[137Cs]
	X	Y	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
TGC139	442982	3094815	32,4±1,9	41,8±3,0	41,0±2,8	41,3±2,9	35±10	9,6±0,7
TGC140	444075	3093262	26,6±2,0	43,6±3,3	34,4±2,7	38,1±3,1	128±13	11,3±0,9
TGC141	447526	3101254	44,8±2,4	60,7±3,7	56,3±3,4	58,3±3,6	112±12	1,1±0,6
TGC142	447072	3098558	31,7±2,1	38,5±3,1	34,2±2,7	36±3	97±13	10,4±0,8
TGC143	442473	3097408	37,8±2,3	43,1±3,4	39,4±3,0	41±3,2	384±21	6,6±0,8
TGC144	441315	3098480	42,8±2,6	48,7±3,7	44,0±3,4	46,1±3,6	200±17	6,9±0,7
TGC145	439890	3099877	35,5±2,3	30,6±3,5	35,0±3,1	33±3,3	174±16	27,5±1,4
TGC146	442112	3100015	40,2±2,3	46,7±3,3	36,4±2,8	40,6±3,1	184±15	14,1±0,9
TGC147	444570	3107642	39,6±2,5	58,5±4,3	63,6±4,0	61,2±4,2	1006±46	10,6±1,0
TGC148	431619	3104005	37,5±2,3	60,0±4,0	55,5±3,6	57,4±3,9	967±44	9,2±0,9
TGC149	433393	3098837	38,8±2,2	52,8±3,5	49,6±3,2	51±3,4	220±15	5,9±0,4
TGC150	432816	3107607	46,7±2,2	42,2±2,7	39,1±2,5	40,6±2,6	366±18	1,8±0,4
TGC151	431727	3112201	35,5±1,9	44,2±2,9	43,9±2,8	44±2,9	333±18	3,8±0,4
TGC152	439497	3111374	25,9±1,8	25,1±2,8	25,1±2,2	25,1±2,5	398±21	6,4±0,7
TGC153	437141	3108672	75,3±3,8	73,3±5,0	67,8±4,2	70,1±4,6	364±22	5,6±0,8
TGC154	436560	3105404	38,0±2,2	41,1±3,6	39,5±3,4	40,22±3,6	150±15	7,9±0,8
TGC155	441792	3105537	68,7±3,6	62,1±4,0	60,2±4,2	61,2±4,2	245±18	4,5±0,7
TGC156	447659	3096558	40,8±2,3	50,6±3,3	45,4±3,1	47,87±3,3	273±17	4,5±0,4
TGC157	442080	3093014	45,3±2,7	47,4±3,9	43,9±3,4	45,43±3,7	109±15	24,7±1,4
TGC158	437438	3091175	74,3±3,7	70,3±4,7	73,1±4,0	71,93±4,4	1068±48	70,5±3,2
TGC159	432345	3088762	67,8±3,3	81,0±4,4	79,5±4,5	80,26±4,5	1204±53	12,9±1,1
TGC160	436920	3072498	21,9±1,7	48,5±3,3	46,0±2,9	47,1±3,1	554±26	
TGC161	448545	3074047	37,1±2,1	51,8±3,2	54,0±3,3	52,87±3,3	927±41	1,4±0,4
TGC162	456132	3081686	38,3±2,3	46,6±3,1	44,8±3,0	45,69±3,1	859±38	2,1±0,6
TGC163	460312	3088315	28,4±1,8	25,9±2,8	27,5±2,7	26,72±2,8	674±32	6,0±0,8
TGC164	449151	3083701	34,3±2,1	37,1±2,9	38,1±3,0	37,58±3	234±15	1,9±0,6
TGC165	441702	3090293	32,4±2,0	41,3±2,7	46,1±3,1	43,4±3	345±18	15,3±1,0
TGC166	461913	3097802	39,0±2,4	29,7±2,9	31,2±2,9	30,48±2,9	632±30	2,8±0,5
TGC167	455751	3096904	32,0±1,8	31,8±2,3	36,6±2,7	33,73±2,5	388±20	
TGC168	451421	3096734	56,7±2,9	71,5±4,0	66,2±3,8	68,77±4	485±24	
TGC169	443024	3073926	27,1±1,8	52,4±3,3	54,4±3,3	53,37±3,4	726±33	
TGC170	444273	3081580	36,8±2,3	55,4±3,3	52,4±3,3	53,91±3,4	848±38	9,9±0,9
TGC171	443919	3087297	31,3±2,0	53,4±3,3	53,8±3,5	53,55±3,4	1266±55	8,4±0,8
TGC172	440539	3081531	28,9±1,8	52,5±2,7	53,1±3,3	52,76±3	839±37	
			[226Ra]	[228Ra]	[228Th]	[232Th]	[40K]	[137Cs]
			Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
Media			36,9±2,1	50,3±3,1	48±2,9	48,9±3,1	556±28	8,1±0,6
Máximo			89,0±7,3	148,1±8	145,34±7,1	146,8±7,5	1795±80	99,1±4,1
Mínimo			4,9±0,5	5,54±0,9	5,61±0,6	5,6±0,8	24±3	0,3±0,0
Desv E			16,9±0,9	23,8±1,2	22,5±1,1	22,9±1,1	384±17	12,6±0,5



Figura A7-1 Estadísticos radionúclidos isla de Gran Canaria

7.2. Fuerteventura

Tabla A7.2 Puntos muestras de tierra, y concentraciones de radionúclidos (Bq/kg) de las mismas, de la isla de Fuerteventura.

Muestra	Coorden	adas UTM	[²²⁶ Ra] Ba/ka	[²²⁸ Ra] Ba/ka	[²²⁸ Th] Ba/ka	[²³² Th] Ba//ka	[⁴⁰ K] Ba/ka	[¹³⁷ Cs] Ba/ka
	^	I	Бү/ку	Бү/ку	БЧ/КУ	БЧ/КУ	Бү/ку	Бү/ку
TET1	552040	3106017	9.2+0.7	4 2+0 0	5 /+0 7	1 0+0 8	101-0	3 2+0 3
TET2	597001	2129/01	9.2±0.7	4.2 ± 0.9	3.4 ± 0.7	4.9±0.0	520±20	5.2±0.5
TET2	600951	2164040	10±1	23.0±1.0	20±1.4	21.4±1.0	530±30	7.5 ± 0.5
TETA	5000001 500600	2141007	22.7±1.4	200,19	10.4±1.3	2011.0	500±40	2.01±0.22
	574042	3141907	0/±0	300±18	205±10	200.4±17	040±40	2.82±0.23
TETE	500120	2122011	11.3±0.0	4.7±0.7	4±0.5	4.2±0.0	90±7	1.1±0.11
	509129	3123911	13.4±0.9	10.1±1.4	14.0±1.1	10.1±1.3	420±30	3.34 ± 0.20
	500000	3124000	11.3 ± 0.0	10.5±1.5	10.4±1.2	10.4±1.3	417±21	2.01±0.22
	200992	3129014	20.2±1.3	29.9±2.2	22.3±1.0	24.9±1.9	600±40	0.79±0.1
	503606	3126979	22.1±1.4	33.2±2.3	22.1±1.5	20.4±1.9	000±40	9.4±0.6
IFI10	593966	3129959	10.5±0.7	1.9±0.5	2.1±0.4	2±0.5	43±4	1.29±0.12
TETAO	593788	3134018	24.6±1.6	36±3	28.1±1.9	30.4±2.5	820±50	12.1±0.8
IF112	583513	3143814	16.4±1.1	22.9±1.8	16.8±1.3	18.9±1.6	410±30	5.1±0.4
TFT13	600415	3144290	30.9±1.9	38±3	33.3±2.2	34.9±2.6	840±50	16.8±1.1
TFT14	593286	3149096	10.5±0.7	12.6±1.2	11±0.9	11.6±1.1	300±19	13.4±0.9
TFT15	608960	3149043	13.1±0.9	15.7±1.3	13±1	14±1.2	450±30	6.1±0.4
TFT16	600996	3154036	15.2±1	24.4±1.8	20.2±1.4	21.8±1.6	570±30	6.5±0.4
TFT17	560601	3104389	10.8±0.8	18.8±1.5	15.9±1.2	17±1.4	374±24	3.4±0.3
TFT18	571484	3111337	7.4±0.5	2±0.5	2.2±0.4	2.1±0.5	34±4	1.99±0.16
TFT19	612670	3158686	15.8±1	26.4±1.9	20.7±1.4	22.7±1.7	480±30	
TFT20	606860	3174079	31.5±2	40±3	34.5±2.3	36.5±2.7	790±50	1.77±0.17
TFT21	601383	3178978	9.7±0.7	11.9±1.2	11.2±1	11.5±1.1	344±22	2.58±0.23
TFT22	610745	3151175	17±1.1	17.1±1.4	14.2±1.1	15.3±1.3	410±30	
TFT23	589129	3151194	15.2±1	19.5±1.6	14.9±1.1	16.4±1.4	378±24	4.5±0.3
TFT24	599592	3163226	48±3	77±5	64±4	69.1±4.5	1180±70	
TFT25	597055	3172291	11.8±0.8	16.7±1.4	14.9±1.1	15.6±1.3	351±22	1.16±0.13
TFT26	614146	3170052	23±1.5	32.8±2.3	29.8±2	31.1±2.2	820±50	
TFT27	609908	3137169	15.1±1	29.5±2.1	23.3±1.6	25.6±1.9	680±40	2.7±0.3
TFT28	607256	3155051	21.1±1.3	33.2±2.3	26.9±1.8	29.3±2.1	660±40	
TFT29	599485	3163222	102.41±8.33	116.6±7.34	15.41±1.64	113.6±7.4	1175±50	
TFT30	582067	3140245	142.86±11.5	111.3±7.15	39.31±2.49	109±7.2	283±15	
TFT31	612904	3177440	14.14±1.05	4.1±1.31	110.6±7.4	3.7±1.2	87±7	
TFT32	592625	3146304	13.16±1.42	16.77±2.25	106.7±7.2	17.2±2.1	439±22	
TFT33	595498	3146640	21.8±1.56	40.7±2.73	3.52±1.05	37.3±2.6	713±32	3.87±0.64
TFT34	592421	3146395	40.69±2.22	39.16±2.82	17.44±1.94	38.8±2.8	810±36	6.18±0.74
TFT35	610266	3137633	36.44±2.12	30.84±2.7	34.61±2.42	31.4±2.6	534±26	10.13±0.78
TFT36	609844	3136895	26.9±1.42	30.64±1.99	38.52±2.64	29.7±1.9	623±27	3.96±0.42
TFT37	594792	3134050	40.28±2.07	47.44±3.05	31.87±2.48	46.4±3	826±37	5.95±0.67
TFT38	588635	3139598	26.45±1.78	24.17±2.44	28.95±1.8	23.8±2.3	540±26	
TFT39	588635	3139598	62.89±2.96	77.67±4.13	45.57±2.76	76.1±4.1	974±43	1.96±0.27
TFT40	599792	3151177	31.78±1.82	42.23±2.89	23.56±2.12	39.3±2.8	755±34	ND±ND
TFT41	599485	3163222	48.95±2.41	83.98±4.24	74.51±4.07	79.2±4.2	1156±50	2.24±0.51
TFT42	599488	3163228	59.55±5.77	77.54±4.07	37±2.56	78.3±4.2	1214±52	4.14±0.63
TFT43	613558	3161720	26.16±1.78	19.11±2.24	74.96±4.03	18.1±2.2	456±23	
TFT44	560846	3104259	17.74±1.39	14.8±1.93	79.17±4.24	18.4±1.9	362±18	1.35±0.46

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[²²⁶ Ra] Bg/kg	[²²⁸ Ra] Bg/kg	[²²⁸ Th] Bg/kg	[²³² Th] Bg/kg	[⁴⁰K] Bq/kq	[¹³⁷ Cs] Bg/kg
	EE70E2	2102070	16 10 1 2	22.07.1.94	17.00.1.00	22.4.4.9	422.20	1 2 0 44
1F145 TET46	507955	3100070	10.19±1.2	22.97±1.04	17.30 ± 1.90	22.1±1.0	422±20	1.3±0.44
TET47	575002	3103702	0.03 ± 0.72	3.44±0.90	21.30 ± 1.03	2.9±0.9	ZIŦĴ	1.1±0.25
1F147 TET40	575095	3113019	10.29±1.1	27 44 . 2 94	21.33±1.7	20 2 . 2 7	055.20	E 42+0 65
1F140 TET40	605644	3103420	29.11±1.77	37.41±2.01	2.03±0.77	30.3 ± 2.7	000±30	5.43±0.05
TET50	504425	2162002	23.04±1.0	24.21±2.22		20.112.1	160.00	1 95 0 54
TET51	602720	3102092	21.01 ± 1.40	20.40±2.20	39.09 ± 2.37	20.0±2.2	402±22	1.63 ± 0.54
TET52	605473	3172740	29.40±1.74	7 56+1 59	22.31±1.00	7 2+1 5	127±0	9.75±0.09
1F132 TET52	505002	3172749	13.00 ± 1.13	7.00±1.00	20.02±1.97	7.0±1.0	702.22	0.40±0.55
TF155	595002	3150394	20.0±1.79	31.20 ± 2.00	7 21 1 25	32.9±2.0	102±33	1 91 0 27
1F134 TET55	093000 609613	3150431	10.72±1.30	23.03 ± 2.1	19 /2+1 91	20.9±2	400±22	1.01±0.37
TETEE	600142	3134900	10.27±1.30	23.03±2.2	10.43±1.01	20.0±2.1	311±24	10 45 .0 92
TET57	500143	3143000	20.39±1.07	30.93±2.72	31.10±2.32	31.1±2.0	101±32	10.45±0.62
1F137 TET50	592150	3143090	19.20±1.21	32.20±2.22	20.02 ± 1.00	20.9±2.1	000±24	4.4±0.47
1F156	570242	3133199	10.43±1.39	24.25±2.19	23.04±1.94	23.9±2.1	400±22	10.01.0.70
16159	570343	3108790	18±1.22	18±0.91	17.06±1.61	17.8±1.3	294±15	13.21±0.72
TF160	573497	3113778	10.74±0.95	1.74 ± 0.41	2.76±1.05	1.9±0.8	81±7	1.17±0.29
1F161 TETCO	577635	3121120	16.33±1.1	21.37±1	18.58±1.47	20.5±1.3	406±19	1.25±0.4
1F162	582575	3130558	21.59±1.34	20.99±1.96	19.79±1.72	20.3±1.9	415±20	19.19±0.98
1F163	584339	3135218	19.64±1.35	21.09±1.98	21±1.83	21±2	372±18	5.34±0.53
1F164	588052	3138949	24.39±1.43	28.5±2.12	28.22±1.98	28.4±2.1	578±26	
1F165	588947	3140385	27.36±1.51	32.25±2.19	32.62±2.15	32.4±2.2	643±29	14.38±0.8
1F166	606918	3142823	24.67±1.52	25.97±2.12	25.7±2.06	25.8±2.1	490±23	3.25±0.47
1F167	604271	3139275	28.26±1.55	23.53±1.99	24.17±1.57	23.9±1.8	525±24	5.3±0.46
1F168	604371	3134714	22.04±1.54	16.91±2.12	18.05±1.85	17.6±2	410±20	15.85±0.92
1F169	597366	3126394	23.5±1.39	24.07±1.94	22.72±1.78	23.3±1.9	391±19	12.26±0.69
1F170	589636	3129417	17.2±1.24	14.38±1.76	14.19±1.56	14.3±1.7	261±14	3.12±0.44
	588750	3130047	27.65±1.54	29.71±2.14	25.83±1.93	27.6±2.1	546±25	
1F172	602552	3159388	31.44±1.79	38.41±2.7	40.94±2.67	39.7±2.7	675±31	
1F173	600465	3163181	39.19±1.96	57.39±3.11	54.17±3.06	55.8±3.1	859±38	4.93±0.55
	602590	3172547	16.1±1.28	4.05±1.5	3.39±1.23	3.7±1.4	92±9	0.00.0.40
1F175	602836	3168425	23.47±1.49	19.55±2.07	18.31±1.69	18.8±1.9	422±21	3.22±0.48
1F176	609792	3155044	26.35±1.76	28.53±2.64	23.5±2.29	25.7±2.5	532±26	2.11±0.63
	587410	3122004	17.14±1.17	18.51±1.72	18.67±1.61	18.6±1.7	430±20	
	567735	3105604	19.4±1.47	26.19±2.26	22.69±2.08	24.3±2.2	469±23	28.76±1.36
1F179	563971	3103102	31.58±1.69	19.24±1.93	21.36±1.81	20.4±1.9	392±19	16.69±0.86
1F180	599590	3163237	102,41±8,33	116,61±7,34	110,56±7,4	113,6±7,4	1175±50	
1F181 TFT00	588607	3139598	79,87±3,43	99,66±4,58	93,34±4,69	96,6±4,7	1101±47	
1F182	605175	3133509	24,52±1,59	21,57±2,19	21,42±1,87	21,5±2,1	401±20	
1F183	587605	3128904	27,25±1,35	22,85±2,05	26,21±1,98	24,6±2,1	536±25	
	596517	31/1452	5,57±0,82	1,48±1,11	1,54±1,01	1,5±1,1	13±6	
1F185	610568	3179559	9,6±0,66	ND±ND	ND±ND	ND±ND	22±6	
11186	614095	3174282	9,24±0,89	ND±ND	ND±ND	ND±ND	26±6	
1F187	613786	3157067	12,93±0,96	13,32±1,52	13,41±1,3	13,4±1,5	421±19	
11188	5960/1	3120934	10,16±0,93	9,87±1,49	9,91±1,27	9,9±1,4	∠80±14	
11189	5/6/91	3115805	11,27±0,93				84±8	
11190	5/1212	3108155	8,74±0,88	5,98±1,27	5,1±1,02	5,4±1,2	09±1	
11191	503/13	3102852	$0,4\pm1,14$					
1F192	594533	3148838	0,40±0,88	1,9±1,46	0,/1±1,10	0,0±1,4		
11193	597080	3153378	12,94±0,95	13,08±1,33	13,11±1,22	13,1±1,3	2/4±13	0.70/0.00
11194	593508	3155901	10,48±1,65	42,95±3,73	44,8±3,29	44±3,6	831±39	2,79±0,33
11195	594559	3153966	12,6±0,87	11,68±1,22	12,48±1,09	12,1±1,2	297±14	

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[²²⁶ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Th] Bq/kg	[²³² Th] Bq/kg	[⁴⁰K] Bq/kg	[¹³⁷ Cs] Bq/kg
TFT96	560778	3109857	7,24±0,8	4,88±1,3	2,15±1,02	3,2±1,2	72±7	6,89±0,51
TFT97	588036	3119475	12±1,2	8,5±1,63	10,33±1,51	9,5±1,6	161±11	
TFT98	583138	3128705	22,04±1,6	11,95±2,04	14,93±1,86	13,6±2	278±18	1,64±0,39
TFT99	599719	3124946	19,41±1,18	17,17±1,61	15,27±1,44	16,1±1,6	352±17	
TFT100	597846	3149130	24,53±1,82	28,59±2,73	30,3±2,37	29,6±2,6	482±24	
TFT101	602872	3150048	36,07±1,99	38,49±2,77	36,5±2,47	37,4±2,7	720±33	1,8±0,66
TFT102	607118	3168956	36,74±2,02	36,19±2,89	37,03±2,61	36,7±2,8	679±31	
TFT103	607896	3159137	30,18±1,86	28,58±2,59	26,36±2,2	27,3±2,4	671±31	6,05±0,57
TFT104	580926	3118244	23,27±1,49	23,69±2,12	24,55±1,87	24,2±2	452±21	1,44±0,51
TFT105	584425	3118231	20,72±1,45	17,95±2,01	20,03±1,79	19,1±1,9	373±19	8,12±0,69
TFT106	593174	3139961	25,2±1,53	24,6±2,12	23,11±1,92	23,8±2,1	499±23	
			[²²⁶ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Th] Bq/kg	[²³² Th] Bq/kg	[⁴⁰ K] Bq/kg	[¹³⁷ Cs] Bq/kg
Media Máximo Mínimo			25±1,7 142,86±11,54 5,57±0,5 20.0:1.5	31±2,4 300±18 1,48±0,41	28,8±2,1 265±0,7 1,54±0,4	29,7±2,3 280,4±0,8 1,5±0,5	494 ±25 1214±9 13±4	6±0,5 28,76±0,3 0,79±0,1



Figura A7-2 Estadísticos radionúclidos isla de Fuerteventura

7.3. Lanzarote

Tabla A7.2 Puntos muestras de tierra, y concentraciones de radionúclidos (Bq/kg) de las mismas, de la isla de Lanzarote

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[²²⁶ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Th] Bq/kg	[²³² Th] Bq/kg	[⁴⁰ K] Bq/kg	[¹³⁷ Cs] Bq/kg
TLZ1	635305	3209632	25.3±1.6	25.6±1.9	19.9±1.4	21.91±1.7	460±30	2.83±0.24
TLZ2	637060	3222302	11.8±0.8	8.1±0.8	7.9±0.7	7.99±0.8	193±13	3.2±0.3
TLZ3	613970	3197934	20±1.3	37±3	30.9±2	32.78±2.5	820±50	ND
TLZ4	647564	3222919	11.5±0.8	34.5±2.4	30.4±2	32.08±2.2	810±50	ND
TLZ5	643413	3221097	21.1±1.4	31±2.3	27.3±1.9	28.8±2.1	580±40	3.4±0.3
TLZ6	616434	3200197	25±1.6	30.7±2.2	28.6±1.9	29.5±2.1	730±50	2.9±0.3
TLZ7	618277	3191450	21.1±1.3	10.5±1	11.6±0.9	11.11±1	167±12	ND
TLZ8	615565	3206083	15.1±1	14.1±0.3	11.4±0.9	13.83±0.6	282±14	3.5±0.3
TLZ9	645406	3226212	20.1±1.3	21.9±1.3	19.7±1.4	20.88±1.4	440±30	8.8±0.6
TLZ10	644638	3236635	14.8±1	23.7±1.9	17.7±1.4	19.81±1.7	590±40	1.48±0.16
TLZ11	629722	3219656	40±3	46±3	40±3	43±3	880±50	11.2±0.8
TLZ12	623307	3198989	23.8±1.4	18.2±1.3	12.9±0.9	14.62±1.1	399±24	3.28±0.22
TLZ13	619012	3198726	20.4±1.3	27.4±2	21.5±1.5	23.62±1.8	610±40	2.21±0.2
TLZ14	635782	3211174	21.7±1.4	23.9±1.8	23.1±1.6	23.45±1.7	520±30	7.9±0.6
TLZ15	641190	3218342	21.6±1.4	43±3	32.3±2.2	36.04±2.6	940±60	ND
TLZ16	635782	3211174	18.41±1.26	11.1±1.57	12±1.39	11.6±1.5	195±11	1.74±0.38
TLZ17	641190	3218342	24.27±1.72	36.58±2.65	37.13±2.61	36.86±2.7	832±37	7.64±0.72
TLZ18	623832	3200972	20.73±1.31	20.66±1.92	16.27±1.53	17.98±1.8	323±16	8.38±0.62
TLZ19	615696	3206067	16.58±1.38	13.73±2.09	11.71±1.69	12.51±1.9	254±15	4.77±0.63
TLZ20	636926	3219706	13.57±1.03	10.4±1.52	12.32±1.27	11.53±1.4	149±9	1.36±0.42
TLZ21	643833	3212231	19.85±1.3	26.03±2.14	24.38±1.82	25.07±2	545±25	4.23±0.53
TLZ22	636419	3204483	16.9±1.12	12.55±1.46	10.57±1.26	11.42±1.4	251±13	1.92±0.4
TLZ23	642326	3207896	28.6±1.54	24.05±2	24.59±1.83	24.34±2	463±21	6.02±0.52
TLZ24	627909	3216228	21.57±1.55	20.45±2.41	24.26±2.17	22.55±2.3	457±23	3.09±0.61
TLZ25	621678	3208434	13.4±1.17	7.5±1.72	8.77±1.48	8.23±1.6	145±10	5.76±0.57
TLZ26	650249	3232367	21.91±1.4	23.17±2.12	26.02±2	24.68±2.1	398±19	3.1±0.03
TLZ27	628915	3220219	20.1±1.17	18.09±1.61	18.76±1.47	18.46±1.6	314±15	16.86±0.83
TLZ28	620564	3208055	11.53±1.19	8.37±1.58	9.39±1.6	8.87±1.6	196±12	14.52±0.85
TLZ29	625526	3215517	17.24±1.28	14.14±1.96	15.41±1.64	14.89±1.8	402±20	ND
TLZ30	644610	3221508	32.91±1.82	39.27±2.59	39.31±2.49	39.29±2.6	593±27	4.97±0.37
TLZ31	621988	3208992	13.88±1.25	13.75±1.75	11.88±1.5	12.67±1.7	167±11	17.05±0.93
TLZ32	634508	3219861	11.23±1.18	10.35±1.79	11.64±1.54	11.09±1.7	371±18	9.37±0.67
TLZ33	632728	3208516	22.7±1.38	18.89±1.96	20.34±1.59	19.76±1.8	362±18	6.26±0.58
TLZ34	651389	3232914	ND	ND	ND	ND	34±6	ND
TLZ35	629990	3217463	15.39±1.17	6.42±1.59	6.51±1.24	6.48±1.5	145±10	2.6±0.49
TLZ36	619723	3208230	11.79±1.08	6.49±1.64	7.52±1.35	7.1±1.5	189±12	4.53±0.54
TLZ37	631264	3207465	26.56±1.51	26.39±2.15	24.49±1.9	25.32±2.1	512±24	2.65±0.52
TLZ38	647438	3231322	25.18±1.66	32.56±2.64	27.78±2.16	29.7±2.4	649±30	11.32±0.81
TLZ39	649627	3219044	14.9±1.07	7±1.33	7.08±1.1	7.05±1.3	120±9	3.46±0.44
TLZ40	629354	3205314	21.7±1.44	16.95±1.88	18.05±1.67	17.56±1.8	313±16	9.84±0.72
TLZ41	639518	3209507	23.02±1.34	24.08±1.93	21.02±1.67	22.33±1.8	416±19	9.74±0.58
TLZ42	651374	3232818	21.58±1.26	19.74±1.74	17.94±1.48	18.7±1.7	280±14	2.66±0.36
TLZ43	621381	3209294	21.37±1.33	14.4±1.72	16.39±1.42	15.58±1.6	261±14	ND
TI 744	626089	3203992	16 98+1 04	19 19+1 47	15 32+1 22	16 9+1 4	342+16	1 39+0 32

Muestra	Coorden X	adas UTM Y	[²²⁶ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Th] Bq/kg	[²³² Th] Bq/kg	[⁴⁰K] Bq/kg	[¹³⁷ Cs] Bq/kg
TLZ45	620777	3200064	18,24±1,04	17,14±1,38	20,5±1,41	18,8±1,4	389±17	4,3±0,36
TLZ46	610878	3193699	21,87±1,17	12,9±1,2	12,61±1,04	12,7±1,2	557±24	ND±ND
TLZ47	617407	3194408	16,87±0,96	13,91±1,26	15,63±1,19	±ND	374±17	ND±ND
TLZ48	647083	3225248	20,2±1,13	18,09±1,54	19,51±1,44	18,8±1,5	393±18	5,09±0,44
TLZ49	624216	3215134	17,13±0,94	15,94±1,23	14,97±1,12	15,4±1,2	293±13	6,03±0,39
TLZ50	612286	3194316	22,55±1,23	19,32±1,49	20,87±1,5	20,1±1,5	366±17	17,03±0,84
TLZ51	620645	3209418	20,49±1,14	19,47±1,51	19,62±1,41	19,6±1,5	317±15	14,21±0,71
TLZ52	619682	3208672	11,95±0,82	6,62±1,03	6,8±0,89	6,7±1	153±8	7,95±0,45
TLZ53	621756	3208468	12,08±0,98	8,8±1,43	8,16±1,21	8,4±1,4	157±9	12,63±0,67
TLZ54	622339	3208703	13,75±1,08	13,27±1,61	9,53±1,3	11±1,5	205±12	16,67±0,87
TLZ55	644794	3219295	11,63±1,58	17,78±2,54	21,73±2,23	20,01±2,4	425±22	ND±ND
TLZ56	632239	3200549	24,22±1,63	22,29±1,97	24,11±2,15	23,12±2,1	467±22	1,71±0,5
TLZ57	633670	3219886	13,79±1,16	19,08±1,4	20,27±1,12	19,81±1,3	55±8	1,66±0,42
TLZ58	651408	3232871	22,99±1,89	20,05±2,52	19,07±2,01	19,45±2,3	232	13,35±0,94
TLZ59	642266	3210845	25,27±1,94	30,59±2,97	25,42±2,54	27,6±2,8	576	ND±ND
TLZ60	627693	3213599	25,25±1,54	27,4±2,25	29,18±2,26	28,29±2,3	608	1,51±0,6
				[²²⁸ Ra] Bq/kg	[²²⁸ Th] Bq/kg	[²³² Th] Bq/kg	[⁴⁰ K] Bq/kg	[¹³⁷ Cs] Bq/kg
Media Máximo Mínimo Desv E			19.5±1.3 40±3.0 11.2±0.8 5.6±0.3	19.7±1.8 46±3.0 6.4±0.3 9.8±0.5	18.5±1.6 40±3.0 6.4±0.3 9.8±0.5	18.9±1.7 43.0±3.0 6.5±0.6 8.9±0.5	394±22 940±60 34±6 214±13	6.7±0.5 17.1±0.9 4.7±0.2



Figura A7-3 Estadísticos radionúclidos isla de Lanzarote

Apéndice 8

Tablas de concentración de radio equivalente, dosis, dosis equivalente e índices de riesgo

8.1. Gran Canaria

Tabla A8.1 Radio equivalente (Bq/kg), dosis(nGy/h), dosis equivalente (mSv/a),índice de riesgo y los cocientes de las concentraciones de ²³²Th, ²²⁶Ra y ⁴⁰K, ²²⁶Ra de la isla de Gran Canaria.

Muestra	x	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	I Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TGC1	442596	3097427	80,4±5,2	36,8±2,4	0,23	0,2	1,4	10,8
TGC2	426290	3096346	333,1±19,9	153,8±9,2	0,94	0,9	1,9	16,8
TGC3	438999	3095015	257±15,3	122,7±7,3	0,75	0,7	1,4	25
TGC4	426290	3096346	344,3±20,2	158,9±9,3	0,97	0,9	1,8	16,2
TGC5	420760	3089057	59,5±3,9	28,8±1,9	0,18	0,2	1,4	32,4
TGC6	461506	3087634	84±5,2	40,3±2,5	0,25	0,2	1,3	26,9
TGC7	457258	3097622	165,2±10	77,9±4,7	0,48	0,5	1,6	22,3
TGC8	441555	3068682	42,1±2,9	19,9±1,4	0,12	0,1	0,7	12,4
TGC9	427809	3087238	75,1±4,8	36,2±2,3	0,22	0,2	0,9	20,6
TGC10	433242	3077418	233,4±14,3	110,9±6,8	0,68	0,6	2,1	34,1
TGC11	433365	3080714	221,4±13,4	104,2±6,3	0,64	0,6	2,6	34,2
TGC12	442328	3112529	142,3±9	66,7±4,2	0,41	0,4	1,2	15,8
TGC13	462003	3092665	95,2±6,3	45,6±3	0,28	0,3	1,2	22,7
TGC14	432773	3107439	53,7±3,5	26,2±1,7	0,16	0,2	2	50,4
TGC15	447468	3106878	124,1±8,8	59,3±4,1	0,36	0,3	0,9	18,1
TGC16	426269	3096166	149,8±9,9	67,1±4,4	0,41	0,4	1,4	5,5
TGC17	442943	3111773	205,4±13,2	96,4±6,1	0,59	0,6	7,8	96,2
TGC18	452400	3111643	139,7±9,3	68,1±4,5	0,42	0,4	2,4	58,6
TGC19	427770	3095603	170,4±10,9	81,8±5,2	0,5	0,5	2,6	48,5
TGC20	445144	3092675	129,9±8,5	57,4±3,8	0,35	0,4	1,2	1,6
TGC21	447513	3112583	85±5,9	38,1±2,6	0,23	0,2	1,9	7,5
TGC22	424414	3087448	45,9±3,2	22,1±1,5	0,14	0,1	1	22,1
TGC23	433076	3082312	134±8,5	64±4	0,39	0,4	1,3	24,2
TGC24	439544	3103813	84,4±6,3	38,4±2,8	0,24	0,2	1,3	8,4
TGC25	457315	3107403	99,8±7,1	46,1±3,2	0,28	0,3	1,8	16,9
TGC26	422864	3097317	171,4±11	82,2±5,3	0,5	0,5	2,4	44,5
TGC27	448534	3091862	74±5,2	33,4±2,4	0,2	0,2	1,1	5,1

Muestra	х	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	I Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TGC28	427537	3101022	64,7±5	30,5±2,3	0,19	0,2	0,4	6,6
TGC29	443009	3094823	98,5±6,8	43,9±3	0,27	0,3	1,6	4,9
TGC30	442129	3075319	253,4±15,7	120,9±7,5	0,74	0,7	2	35
TGC31	451113	3075312	227,2±13,4	108,1±6,4	0,66	0,6	3,1	49,4
TGC32	437029	3111503	205,5±13,1	95,6±6,1	0,59	0,6	3,8	40,5
TGC33	450164	3074497	152,1±10	73,2±4,7	0,45	0,4	2,9	55,6
TGC34	457872	3092668	73,6±6	35±2,8	0,21	0,2	0,9	15,3
TGC35	444320	3081607	221,7±13,8	106,3±6,4	0,65	0,6	1,4	27,5
TGC36	427993	3086519	83,8±6,7	39,9±3,1	0,24	0,2	1	17,8
TGC37	431466	3086535	339,4±16,3	162,7±7,7	1	0,9	1,3	25
TGC38	433939	3088706	315,2±20,5	147,2±9,4	0,9	0,9	1,1	13
TGC39	439997	3092213	218,4±14,4	103±6,6	0,63	0,6	1,3	18,3
TGC40	446325	3106723	178,8±13,8	80,2±6,2	0,49	0,5	1,1	3,9
TGC41	453423	3080738	110,2±6,2	52,5±2,9	0,32	0,3	1,1	19,5
TGC42	446778	3084091	221,8±11,1	107,7±5,3	0,66	0,6	1,7	40
TGC43	437540	3074141	83,6±6,3	39±2,9	0,24	0,2	1,1	12,3
TGC44	455134	3101334	73±5,2	34,9±2,4	0,21	0,2	1	19
TGC45	455631	3105449	120,7±8,5	57,1±3,9	0,35	0,3	1,4	21,7
TGC46	455405	3105376	119,9±8,1	56,5±3,7	0,35	0,3	1,4	19,3
TGC47	455438	3105142	ND±ND	ND±ND	ND	ND	ND	ND
TGC48	455082	3105003	122,4±8,6	57,8±4	0,35	0,3	1,2	17,6
TGC49	455586	3106105	142,6±8,8	67,2±4,1	0,41	0,4	1,5	20,5
TGC50	458422	3116442	153±8,7	73,8±4,1	0,45	0,4	1,2	26,9
TGC29A	442983	3094824	98,4±5,5	43,7±2,4	0,27	0,3	2,4	7,4
TGC29E	442931	3094828	105,6±7,2	47,7±3,3	0,29	0,3	1,9	10
TGC29B	443001	3094810	96,3±7,4	42,5±3,3	0,26	0,3	1,7	3,5
TGC29C	443022	3094819	91,6±7,1	40,4±3,2	0,25	0,3	2	4,1
TGC29D	442948	3094788	88,8±7,5	39,5±3,4	0,24	0,2	2,3	7,6
TGC55	449776	3112807	180,3±9,4	84±4,3	0,52	0,5	2	21,5
TGC56	448738	3111134	160,4±8,1	74,5±3,7	0,46	0,4	1,2	12
TGC57	447567	3108628	165±8,2	77,1±3,8	0,47	0,5	1,4	16,3
TGC58	446341	3106742	169,6±8,7	75,5±3,9	0,46	0,5	1	2
TGC59	444934	3104014	167,1±9,2	75,6±4,1	0,46	0,5	1	4,9
TGC60	443029	3101158	109,5±6,3	50±2,8	0,31	0,3	0,9	5,9
TGC61	441053	3100500	73,2±4,5	32,9±2	0,2	0,2	1,2	5
TGC62	438947	3100897	88,6±5,3	42,4±2,5	0,26	0,2	0,9	18,3
TGC63	440333	3099683	86,3±5,4	37,8±2,4	0,23	0,2	1,4	0,9
TGC64	441460	3097216	128,6±6,8	57,6±3,1	0,35	0,4	1,4	5
TGC65	440836	3097931	164,7±8,5	76,9±3,9	0,47	0,4	0,9	10,8
TGC66	440811	3096119	167,4±7,9	80,7±3,8	0,49	0,5	1,1	25,5
TGC67	438724	3096004	267,8±11,9	127,2±5,6	0,78	0,7	1,1	18,1
TGC68	438724	3096004	181,1±8,7	84,8±4,1	0,52	0,5	1	12,6
TGC69	437823	3093352	122,5±6,6	57,1±3	0,35	0,3	0,7	8,1

Muestra	x	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	l Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TGC70	441496	3092842	188,5±9,5	89±4,4	0,55	0,5	0,8	12,9
TGC71	442117	3094528	118,4±6,6	52,6±2,9	0,32	0,3	1,3	3,1
TGC72	450049	3099036	123,9±6,5	55,9±2,9	0,34	0,3	1,3	6
TGC73	453804	3100649	100,8±6,1	46,3±2,8	0,28	0,3	1,1	8,6
TGC74	455272	3102012	96,1±5,6	45,8±2,6	0,28	0,3	0,7	13,8
TGC75	448218	3098970	161,1±9	74,5±4,1	0,46	0,4	1	9,5
TGC76	442320	3093889	176,1±8,6	82,1±4	0,5	0,5	1	11,4
TGC77	439905	3092893	141,2±8,2	63,2±3,7	0,39	0,4	1,2	4
TGC78	455070	3088247	102±5,8	47,1±2,7	0,29	0,3	1,2	10,4
TGC79	448705	3090557	94,4±6,2	42,1±2,8	0,26	0,3	1,3	3,8
TGC80	453970	3084885	74,2±5,6	34,1±2,5	0,21	0,2	1,3	10,2
TGC81	446667	3084885	67,3±5	30,6±2,3	0,19	0,2	1,3	8,6
TGC82	453369	3096233	158,3±7,5	75,4±3,5	0,46	0,4	1,6	26,9
TGC83	461073	3084428	67,6±4,5	31,8±2,1	0,19	0,2	1,1	15,1
TGC84	459177	3082697	105,3±6	50,6±2,8	0,31	0,3	1,2	25
TGC85	454884	3079866	175,8±8,6	84±4	0,52	0,5	1,4	26,8
TGC86	436453	3070276	216,2±10,4	102,3±4,9	0,63	0,6	2,3	33
TGC87	434720	3080685	178,4±8,9	85,9±4,2	0,53	0,5	1,4	29,3
TGC88	434192	3075920	213,4±10	101,8±4,7	0,62	0,6	1,3	22,6
TGC89	430844	3073677	194,4±9,7	93,3±4,6	0,57	0,5	1,4	27,2
TGC90	428079	3076367	196,6±9,3	93,8±4,4	0,58	0,5	1,3	23,5
TGC91	426380	3077840	205,3±9,6	98,2±4,6	0,6	0,6	1,3	25,2
TGC92	425119	3078284	196,6±9,5	94,1±4,5	0,58	0,5	1,5	28,3
TGC93	440298	3081304	218,9±10,5	105,1±5	0,64	0,6	1,8	36,2
TGC94	439654	3079195	254±11,6	119,9±5,5	0,74	0,7	1,1	16,1
TGC95	450720	3083788	62,8±4,3	29,5±2	0,18	0,2	0,9	12
TGC96	459163	3098749	167,8±9	78,1±4,1	0,48	0,5	1,8	19,6
TGC97	451330	3097648	116,8±6,9	53,9±3,2	0,33	0,3	1,2	10,6
TGC98	451149	3094680	109,2±6,4	50,4±2,9	0,31	0,3	1,1	10
TGC99	453997	3095057	75,8±5,3	35,9±2,4	0,22	0,2	1,3	19,8
TGC100	450665	3110186	107,9±6,2	49,7±2,8	0,3	0,3	1,5	12,6
TGC101	434767	3114224	167,2±9,2	77,2±4,2	0,47	0,5	1	9,3
TGC102	432525	3114725	110,7±6,5	52,4±3	0,32	0,3	1,1	17,6
TGC103	435103	3105232	119±6,7	57±3,1	0,35	0,3	0,7	16,1
TGC104	432892	3107555	154,5±7,9	71,8±3,7	0,44	0,4	0,8	8,7
TGC105	431816	3109348	20,4±3	9,7±1,4	0,06	0,1	1,2	19,9
TGC106	436193	3110226	90,2±5,6	41,5±2,5	0,25	0,2	1,5	13,1
TGC107	437199	3108626	186,1±9,7	82,3±4,3	0,5	0,5	1,1	1,5
TGC108	436826	3105382	86,3±5,1	38,7±2,3	0,24	0,2	1,2	4,1
TGC109	440616	3103886	114,7±7	50,9±3,1	0,31	0,3	1,4	3,4
TGC110	442630	3108896	138,2±7,7	61,5±3,4	0,38	0,4	1,1	2,5
TGC111	451709	3097282	365,9±16,5	166,6±7,5	1,02	1	1,8	11,7

Muestra	х	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	I Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TGC112	451311	3107267	129,6±7,2	60,7±3,3	0,37	0,4	1,2	15,1
TGC113	450907	3106026	128,6±7,1	58,1±3,2	0,36	0,4	1	4,7
TGC114	448776	3105228	182±10	80,6±4,5	0,49	0,5	1	1,4
TGC115	438653	3100042	167±9	76,9±4,1	0,47	0,5	1,1	9,3
TGC116	436811	3099490	149,2±7,9	66,9±3,5	0,41	0,4	1,4	5,4
TGC117	434340	3100342	132,8±7,1	60,7±3,2	0,37	0,4	1	6,5
TGC118	433073	3103439	303,4±14	142,1±6,5	0,87	0,8	1,2	15,6
TGC119	431540	3104156	184,3±10	87,2±4,7	0,53	0,5	1,6	24,1
TGC120	431444	3101967	279,1±13	129,6±6	0,79	0,8	1,9	19,9
TGC121	433565	3098730	145,6±8,6	65,6±3,9	0,4	0,4	0,9	3,5
TGC122	431896	3096872	289,5±13,1	134,6±6,1	0,83	0,8	1	10,7
TGC123	430465	3096581	272,5±12,4	128,4±5,8	0,79	0,7	0,9	13
TGC124	427122	3096085	221±10,3	103,5±4,8	0,63	0,6	0,9	11,4
TGC125	449608	3074147	171,4±8,5	80,7±4	0,49	0,5	1,5	21
TGC126	449957	3075324	216±10,1	100,5±4,7	0,62	0,6	1,9	20,1
TGC127	447880	3074361	190,2±9	91±4,3	0,56	0,5	1,5	28
TGC128	439490	3085126	254,4±11,9	119,8±5,6	0,73	0,7	2,3	30,6
TGC129	440065	3082593	240,4±11,4	113,1±5,3	0,69	0,7	2,7	34,7
TGC130	457171	3111558	96,5±5,1	46,2±2,4	0,28	0,3	1,3	24,8
TGC131	447550	3073503	190,9±9,3	89,1±4,3	0,55	0,5	1,3	15,1
TGC132	440241	3072836	191,9±9,2	91±4,3	0,56	0,5	1,6	25,2
TGC133	444009	3103398	58,4±5,4	26,1±2,4	0,16	0,2	1,5	5,1
TGC134	451126	3103048	178,9±9	81,4±4,1	0,5	0,5	1,4	8,3
TGC135	451120	3099602	169,6±8,9	76,1±4	0,47	0,5	1	3,5
TGC136	461505	3087604	92,4±6,6	44,5±3,1	0,27	0,3	1,3	27,8
TGC137	453573	3109961	89,2±7,3	42,7±3,4	0,26	0,2	0,9	18,9
TGC138	457812	3100220	106,4±7	50,6±3,2	0,31	0,3	1,1	18,2
TGC139	442982	3094815	94,2±6,9	41,4±3,1	0,25	0,3	1,3	1,1
TGC140	444075	3093262	91±7,4	40,7±3,3	0,25	0,3	1,4	4,8
TGC141	447526	3101254	136,8±8,4	60,6±3,8	0,37	0,4	1,3	2,5
TGC142	447072	3098558	90,6±7,4	40,4±3,3	0,25	0,2	1,1	3,1
TGC143	442473	3097408	126±8,5	58,3±3,9	0,36	0,3	1,1	10,2
TGC144	441315	3098480	124,1±9	56±4,1	0,34	0,3	1,1	4,7
TGC145	439890	3099877	96,1±8,3	43,6±3,7	0,27	0,3	0,9	4,9
TGC146	442112	3100015	112,4±7,9	50,8±3,6	0,31	0,3	1	4,6
TGC147	444570	3107642	204,6±12	97,2±5,6	0,6	0,6	1,5	25,4
TGC148	431619	3104005	194±11,2	92,3±5,2	0,57	0,5	1,5	25,8
TGC149	433393	3098837	128,7±8,2	57,9±3,7	0,36	0,4	1,3	5,7
TGC150	432816	3107607	132,9±7,3	61,4±3,4	0,38	0,4	0,9	7,8
TGC151	431727	3112201	124,1±7,5	56,9±3,4	0,35	0,3	1,2	9,4
TGC152	439497	3111374	92,5±7	43,7±3,2	0,27	0,5	1	1
TGC153	437141	3108672	201,6±13,3	91,4±6	0,56	0,8	0,9	0,9
TGC154	436560	3105404	107,1±8,5	48,1±3,8	0,29	0,5	1,2	1,1

Muestra	x	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	l Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TGC155	441792	3105537	175,1±10,9	78,9±4,9	0,48	0,7	1,0	0,9
TGC156	447659	3096558	130,2±8,3	59,1±3,8	0,36	0,6	1,0	1,2
TGC157	442080	3093014	118,7±9,1	52,9±4,1	0,32	0,5	1,2	1
TGC158	437438	3091175	259,4±13,7	122,3±6,4	0,75	1	2,1	1
TGC159	432345	3088762	275,3±13,8	130±6,4	0,8	1	1,4	1,2
TGC160	436920	3072498	131,9±8,2	61,7±3,8	0,38	0,6	1,2	2,2
TGC161	448545	3074047	184,1±10	87,7±4,7	0,54	0,7	0,9	1,4
TGC162	456132	3081686	169,8±9,6	81,1±4,5	0,5	0,7	1,1	1,2
TGC163	460312	3088315	118,5±8,3	57,4±3,9	0,35	0,6	1,3	0,9
TGC164	449151	3083701	106±7,6	48,3±3,4	0,3	0,5	0,8	1,1
TGC165	441702	3090293	121±7,6	55,6±3,5	0,34	0,5	1,0	1,3
TGC166	461913	3097802	131,3±8,8	62,8±4,1	0,39	0,6	1,3	0,8
TGC167	455751	3096904	110,1±7	51,3±3,2	0,31	0,5	0,8	1,1
TGC168	451421	3096734	192,4±10,4	88±4,7	0,54	0,7	1,0	1,2
TGC169	443024	3073926	159,4±9,2	75±4,3	0,46	0,7	2,0	2
TGC170	444273	3081580	179,2±10,1	84,9±4,7	0,52	0,7	1,5	1,5
TGC171	443919	3087297	205,4±11,1	99,6±5,3	0,61	0,8	1,7	1,7
TGC172	440539	3081531	168,9±8,9	80,2±4,2	0,49	0,7	1,8	1,8
			[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef		[²³² Th]	[⁴⁰ K]
			Bq/kg	nGy/h	mSv/a	l Riesgo	[²²⁶ Ra]	[²²⁶ Ra]
Media			149,7±8,6	69,8±4	0,4±0	0,4	1,4	17,9
Máximo			365,9±20,5	166,6±9,4	1,02±0,06	1	7,8	96,2
Mínimo			20,4±2,9	9,7±1,4	0,06±0,01	0,1	0,4	0,9
Desv E			67,2±3,2	31,8±1,5	0,2±0	0,2	0,8	13,4

8.2. Fuerteventura

Tabla A8.2 Radio equivalente (Bq/kg), dosis(nGy/h), dosis equivalente (mSv/a),índice de riesgo y los cocientes de las concentraciones de ²³²Th, ²²⁶Ra y ⁴⁰K, ²²⁶Ra de la isla de Fuerteventura

Muestra	x	Y	[Ra	a _{eq}] Do	sis Dosi	s Ef I Riesg	o [²³ [²²	² Th]/ ²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TFT1		552040	3106917	24+2.5	11.4+1.2	0.07+0.01	0.06	0.5	11.0
TFT2		587901	3138491	87,4±5,6	42,4±2,7	0,26±0,02	0,24	1,3	33,1
TFT3		600851	3164049	96±6,8	46,8±3,3	0,29±0,02	0,26	0,9	25,6
TFT4		582628	3141907	537,3±32,4	236,2±14,2	1,45±0,09	1,45	3,2	7,4
TFT5		574943	3115716	24,2±2,2	11,5±1	0,07±0,01	0,07	0,4	8,0
TFT6		589129	3123911	68,8±5,1	33,4±2,5	0,2±0,02	0,19	1,2	31,3
TFT7		604000	3124000	67,1±4,3	32,6±2	0,2±0,01	0,18	1,4	36,3

	[²²⁶ Ra]
TFT8 588992 3129014 102±7,1 49,4±3,4 0,3±0,02 0,28 1,2	29,7
TFT9 603808 3128979 108,5±7,2 52,7±3,5 0,32±0,02 0,29 1,2	29,4
TFT10 593966 3129959 16,7±1,7 7,9±0,8 0,05±0 0,05 0,2	4,1
TFT11 593788 3134018 131,2±9 63,9±4,3 0,39±0,03 0,35 1,2	33,3
TFT12 583513 3143814 75±5,7 36,1±2,7 0,22±0,02 0,20 1,2	25,0
TFT13 600415 3144290 145,5±9,5 70,4±4,5 0,43±0,03 0,39 1,1	27,2
TFT14 593286 3149096 50,2±3,7 24,4±1,8 0,15±0,01 0,14 1,1	28,6
TFT15 608960 3149043 67,8±4,9 33,3±2,4 0,2±0,01 0,18 1,1	34,4
TFT16 600996 3154036 90,3±5,6 44±2,7 0,27±0,02 0,24 1,4	37,5
TFT17 560601 3104389 63,9±4,7 30,9±2,2 0,19±0,01 0,17 1,6	34,6
TFT18 571484 3111337 13±1,5 6,1±0,7 0,04±0 0,04 0,3	4,6
TFT19 612670 3158686 85,2±5,7 41±2,7 0,25±0,02 0,23 1,4	30,4
TFT20 606860 3174079 144,5±9,7 69,5±4,6 0,43±0,03 0,39 1,2	25,1
TFT21 601383 3178978 52,6±4 25,8±1,9 0,16±0,01 0,14 1,2	35,5
TFT22 610745 3151175 70,4±5,3 34,2±2,5 0,21±0,02 0,19 0,9	24,1
TFT23 589129 3151194 67,8±4,9 32,7±2,3 0,2±0,01 0,18 1,1	24,9
TFT24 599592 3163226 237,7±14,8 113,1±7 0,69±0,04 0,64 1,4	24,6
TFT25 597055 3172291 61,1±4,4 29,5±2,1 0,18±0,01 0,17 1,3	29,8
TFT26 614146 3170052 130.6±8.5 63.6±4.1 0.39±0.03 0.35 1.4	35,7
TFT27 609908 3137169 104.1±6.8 50.8±3.3 0.31±0.02 0.28 1.7	45.0
TFT28 607256 3155051 113.8±7.4 55±3.5 0.34±0.02 0.31 1.4	31.3
TFT29 599485 3163222 355.3+22.8 164.9±10.4 1.01±0.06 0.96 1.1	11.5
TFT30 582067 3140245 320.5±23 143.6±10.3 0.88±0.06 0.87 0.8	2.0
TFT31 612904 3177440 26.1±3.3 12.4±1.5 0.08±0.01 0.07 0.3	6.2
TFT32 592625 3146304 71.6±6.1 34.8±2.8 0.21±0.02 0.19 1.3	33.4
TET33 595498 3146640 130+7.7 62.3+3.6 0.38+0.02 0.35 1.7	32.7
TET34 592421 3146395 158.5+9 76+4.2 0.47+0.03 0.43 1.0	19.9
TET35 610266 3137633 122 5+7 8 58 1+3 6 0.36+0.02 0.33 0.9	14,7
TET36 609844 3136895 117 3+6 2 56 3+2 9 0 35+0 02 0 32 1 1	23.2
TET37 594792 3134050 170 2+9 2 81 1+4 3 0.5+0.03 0.46 1.2	20,5
TET38 588635 3139598 102 1+7 1 49 1+3 3 0.3+0.02 0.28 0.9	20.4
TET39 588635 3139598 246 7+12 1 115 6+5 6 0 71+0 03 0 67 1 2	15.5
TET40 599792 3151177 146 1+8 4 69 9+3 9 0 43+0 02 0 39 1 2	23.8
TET41 599485 3163222 251 2+12 3 118 7+5 7 0 73+0 03 0 68 1 6	23,6
TETA2 599488 3163228 265+15.8 125.4+7.4 0.77+0.05 0.72 1.3	20,0
TET43 613558 3161720 87 2+6 7 42+3 1 0 26+0 02 0 24 0 7	17.4
TET44 560846 3104259 71 9 \pm 5 34 4 \pm 2 5 0 21 \pm 0 02 0 19 1 0	20.4
TET 45 557053 3108070 80 $3+5$ 3 38 $4+2$ 5 0 $24+0.02$ 0 22 1 4	26,4
TET46 549819 3105762 14 3+2 4 6 6+1 1 0 04+0 01 0 04 0 3	25
TET47 575003 3115810	2,0
TET48 608046 3163428 149 7+8 6 72 2+4 0 44+0 02 0 40 1 3	29.4
TET49 605644 3164396 99 9+6 5 48 1+3 1 0 29+0 02 0 27 0 9	20,4
TET50 594435 3162892 94 1+6 3 44 8+2 9 0 27+0 02 0 25 1 2	20,3
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	21,4
TET52 605473 3172749 36 9+4 17 5+1 8 0 11+0 01 0 10 0 5	25,1
TET53 595002 3156304 126 7+8 3 61+3 0 0 37±0.02 0.24 1.2	0,0 27 ∕I
$TET54 = 503865 3150334 81 0 \pm 5 0 30 4 \pm 2 8 0 34 \pm 0 32 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 $	27,4 27 /
	21,4
TET56 600143 31/3806 12/ 317 0 6012 7 0 2710 02 0.24 1.2	01,4 07 0
TETET 502156 2142600 101 4 6 4 49 5 2 9 0 2 0 0 0 0 7 4 5	21,9 27 5
TET58 = 583828 - 3125100 - 98546 - 42,402 - 0,2600 - 0,24 - 42,5 - 0,5000 - 0,24 - 4,2 - 0,5000 - 0,24 - 4,2 - 0,50000 - 0,5000 - 0,50000 - 0,5000 - 0,5000 - 0,5000 - 0,50000 - 0,50	21,0 05.0
TET50 570343 3108700 66 1 ± 4 2 31 3 ± 2 0 10 ± 0.01	20,0 16 3

Muestra	x	Y	[R	a _{eq}] Do	sis Dosi:	s Ef I Rie	sgo [²³² Th]/ ²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TFT60		573497	3113778	19,7±2,6	9,5±1,2	0,06±0,01	0,05	0,2	7,5
TFT61		577635	3121120	76,9±4,4	36,9±2,1	0,23±0,01	0,21	1,3	24,9
TFT62		582575	3130558	82,6±5,6	39,5±2,6	0,24±0,02	0,22	0,9	19,2
TFT63		584339	3135218	78,3±5,6	37,3±2,6	0,23±0,02	0,21	1,1	18,9
TFT64		588052	3138949	109,5±6,4	52,5±3	0,32±0,02	0,30	1,2	23,7
TFT65		588947	3140385	123,2±6,9	59±3,2	0,36±0,02	0,33	1,2	23,5
TFT66		606918	3142823	99,3±6,3	47,4±2,9	0,29±0,02	0,27	1,1	19,9
TFT67		604271	3139275	102,9±6	49,4±2,8	0,3±0,02	0,28	0,9	18,6
TFT68		604371	3134714	78,8±5,9	37,9±2,8	0,23±0,02	0,21	0,8	18,6
TFT69		597366	3126394	86,9±5,6	41,2±2,6	0,25±0,02	0,23	1,0	16,6
TFT70		589636	3129417	57,7±4,7	27,5±2,2	0,17±0,01	0,16	0,8	15,2
TFT71		588750	3130047	109,2±6,5	52,2±3	0,32±0,02	0,29	1,0	19,8
TFT72		602552	3159388	140,2±8	66,7±3,8	0,41±0,02	0,38	1,3	21,5
TFT73		600465	3163181	185,1±9,3	87,6±4,4	0,54±0,03	0,50	1,4	21,9
TFT74		602590	3172547	28,5±4	13,5±1,8	0,08±0,01	0,08	0,2	5,7
TFT75		602836	3168425	82.8±5.8	39,8±2,7	0,24±0,02	0,22	0,8	18.0
TFT76		609792	3155044	104,1±7,3	49,9±3,4	0,31±0,02	0,28	1,0	20,2
TFT77		587410	3122004	76.8±5.1	37.1±2.4	0.23±0.01	0.21	1.1	25.1
TFT78		567735	3105604	90.3±6.4	43.2±3	0.26±0.02	0.24	1.3	24.2
TFT79		563971	3103102	90.9±5.9	43.3±2.7	0.27±0.02	0.25	0.7	12.4
TFT80		599590	3163237	355.3±22.8	164.9±10.4	1.01±0.06	0.96	1.1	11.5
TFT81		588607	3139598	302.8+13.8	141.2+6.4	0.87+0.04	0.82	1.2	13.8
TFT82		605175	3133509	86.1+6.1	41+2.8	0.25+0.02	0.23	0.9	16,4
TFT83		587605	3128904	103 7+6 3	49 8+2 9	0.31+0.02	0.28	0,9	19.7
TFT84		596517	3171452	8.7+2.9	4+1.3	0.02+0.01	0.02	0.3	2.3
TFT85		610568	3179559	0,1 ==,0	,0	0,0220,01	ND	ND	2.3
TFT86		614095	3174282				ND	ND	2.8
TFT87		613786	3157067	64 5+4 6	31 6+2 1	0 19+0 01	0.17	1.0	32.6
TET88		596071	3120934	45 9+4	22 3+1 9	0,13±0,01	0,17	1,0	27.6
TET89		576791	3115805	43,9±4		0,14±0,01	0,12 ND		75
TET00		571212	2109155	21 8+2 1	10.2+1.4		0.06	0.6	7,5
		562712	2102952		10,2±1,4	0,00±0,01	0,00	0,0	7,9 ND
TET02		504522	21/2022						
TET02		507020	2152279		100±100		0.14	10	21.2
TETOA		502509	3155001	127 4±0 8	23,3±1,0	$0,10\pm0,01$	0,14	1,0	Z1,Z
1F194 TET05		504550	3153066	137,4±9,0	25.5 ± 1.7	0,41±0,03	0,37	4,2	79,5
		594559	2100957	52,0±3,7	20,0±1,7	$0,10\pm0,01$	0,14	1,0	23,0
TF196		500776	3109657	17,4±3,1	0,3±1,4	$0,05\pm0,01$	0,05	0,4	9,9
TF197		500030	3119475	30±4,3	10±2	$0,11\pm0,01$	0,10	0,8	13,4
TF198		583138	3128705	62,9±5,8	30±2,7	0,18±0,02	0,17	0,6	12,6
		599/19	3124946	09,5±4,8	33,4±2,2	0,2±0,01	0,19	0,8	18,1
		597846	3149130	104±/,4	49,3±3,4	0,3±0,02	0,28	1,2	19,7
11101		602872	3150048	145±8,4	69,3±3,9	0,42±0,02	0,39	1,0	20,0
IFI102		60/118	3168956	141,5±8,4	67,5±3,9	0,41±0,02	0,38	1,0	18,5
TFT103		607896	3159137	120,9±7,7	58,4±3,6	0,36±0,02	0,33	0,9	22,2
TFT104		580926	3118244	92,7±6	44,2±2,8	0,27±0,02	0,25	1,0	19,4
TFT105		584425	3118231	76,8±5,6	36,7±2,6	0,23±0,02	0,21	0,9	18,0
TFT106		593174	3139961	97,7±6,3	46,8±2,9	0,29±0,02	0,26	0,9	19,8

Muestra	х	Y	[Ra _{eq}]	Dosi	s Dosi	s Ef I Ries	sgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
			407		54.0.00				
Media			107,8	3±7,1	51,2±3,3	0,3±0	0,3	1,1	21,4
Máximo)		537,3	3±2,5	236,2±1,2	1,45±0,09	1,5	4,2	79,3
Mínimo)		8,7:	±1,5	4±0,7	0,02±0	0,01	0,2	2,0
Desv E			80,9	±4,6	36,8±2,1	0,2±0	0,2	0,4	10,8

8.3. Lanzarote

Tabla A8.3 Radio equivalente(Bq/kg), dosis(nGy/h), dosis equivalente (mSv/a),índice de riesgo y los cocientes de las concentraciones de ²³²Th, ²²⁶Ra y ⁴⁰K, ²²⁶Ra de la isla de Lanzarote

Muestra	X	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	l Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁰ K]/ [²²⁶ Ra]
TLZ1	635305	3209632	92±6,3	44,1±3	0,27±0,02	0,25	0,87	18,18
TLZ2	637060	3222302	38,1±2,9	18,3±1,4	0,11±0,01	0,1	0,68	16,36
TLZ3	613970	3197934	130±8,7	63,2±4,2	0,39±0,03	0,35	1,64	41
TLZ4	647564	3222919	119,7±7,8	58,5±3,8	0,36±0,02	0,32	2,79	70,43
TLZ5	643413	3221097	106,9±7,5	51,3±3,6	0,31±0,02	0,29	1,36	27,49
TLZ6	616434	3200197	123,4±8,5	59,8±4,1	0,37±0,03	0,33	1,18	29,2
TLZ7	618277	3191450	49,8±3,7	23,4±1,7	0,14±0,01	0,13	0,53	7,91
TLZ8	615565	3206083	56,6±2,9	27,1±1,4	0,17±0,01	0,15	0,92	18,68
TLZ9	645406	3226212	83,8±5,6	40,2±2,7	0,25±0,02	0,23	1,04	21,89
TLZ10	644638	3236635	88,6±6,5	43,4±3,2	0,27±0,02	0,24	1,34	39,86
TLZ11	629722	3219656	169,3±11,1	81,1±5,3	0,5±0,03	0,46	1,08	22
TLZ12	623307	3198989	75,4±4,8	36,5±2,3	0,22±0,01	0,2	0,61	16,76
TLZ13	619012	3198726	101,2±7	49,1±3,4	0,3±0,02	0,27	1,16	29,9
TLZ14	635782	3211174	95,3±6,1	45,9±2,9	0,28±0,02	0,26	1,08	23,96
TLZ15	641190	3218342	145,5±9,7	70,9±4,7	0,43±0,03	0,39	1,67	43,52
TLZ16	635782	3211174	50±4,3	23,6±1,9	0,14±0,01	0,14	0,63	10,59
TLZ17	641190	3218342	141±8,4	68,2±4	0,42±0,02	0,38	1,52	34,28
TLZ18	623832	3200972	71,3±5,1	33,9±2,4	0,21±0,01	0,19	0,87	15,58
TLZ19	615696	3206067	54±5,3	25,8±2,4	0,16±0,01	0,15	0,75	15,32
TLZ20	636926	3219706	41,5±3,7	19,4±1,7	0,12±0,01	0,11	0,85	10,98
TLZ21	643833	3212231	97,7±6,1	47±2,9	0,29±0,02	0,26	1,26	27,46
TLZ22	636419	3204483	52,6±4,1	25,2±1,9	0,15±0,01	0,14	0,68	14,85
TLZ23	642326	3207896	99,1±6	47,2±2,8	0,29±0,02	0,27	0,85	16,19
TLZ24	627909	3216228	89±6,6	42,6±3,1	0,26±0,02	0,24	1,05	21,19
TLZ25	621678	3208434	36,3±4,2	17,2±1,9	0,11±0,01	0,1	0,61	10,82
TLZ26	650249	3232367	87,8±5,9	41,6±2,7	0,26±0,02	0,24	1,13	18,17
TLZ27	628915	3220219	70,7±4,6	33,5±2,1	0,21±0,01	0,19	0,92	15,62
TLZ28	620564	3208055	39,3±4,4	18,9±2	0,12±0,01	0,11	0,77	17
TLZ29	625526	3215517	69,5±5,4	33,7±2,5	0,21±0,02	0,19	0,86	23,32
TLZ30	644610	3221508	134,8±7,6	63,7±3,5	0,39±0,02	0,36	1,19	18,02
TLZ31	621988	3208992	44,9±4,5	21±2,1	0,13±0,01	0,12	0,91	12,03
TLZ32	634508	3219861	55,7±5	27,4±2,3	0,17±0,01	0,15	0,99	33,04
TLZ33	632728	3208516	78,8±5,3	37,5±2,5	0,23±0,02	0,21	0,87	15,95
TLZ34	651389	3232914						
TLZ35	629990	3217463	35,8±4,1	17,1±1,9	0,1±0,01	0,1	0,42	9,42
TLZ36	619723	3208230	36,5±4,1	17,6±1,9	0,11±0,01	0,1	0,6	16,03
TLZ37	631264	3207465	102,2±6,4	48,9±3	0,3±0,02	0,28	0,95	19,28
TLZ38	647438	3231322	117,6±7,4	56,6±3,5	0,35±0,02	0,32	1,18	25,77

							_222	-40
Muestra	X	Y	[Ra _{eq}]	Dosis	Dosis Ef	l Riesgo	[²³² Th]/ [²²⁶ Ra]	[⁴⁵ K]/ [²²⁶ Ra]
TLZ39	649627	3219044	34,2±3,6	16,1±1,7	0,1±0,01	0,09	0,47	8,05
TLZ40	629354	3205314	70,9±5,2	33,7±2,4	0,21±0,01	0,19	0,81	14,42
TLZ41	639518	3209507	87±5,4	41,5±2,5	0,25±0,02	0,23	0,97	18,07
TLZ42	651374	3232818	69,9±4,8	32,9±2,2	0,2±0,01	0,19	0,87	12,97
TLZ43	621381	3209294	63,8±4,7	30,2±2,2	0,19±0,01	0,17	0,73	12,21
TLZ44	626089	3203992	67,5±4,3	32,3±2	0,2±0,01	0,18	1	20,14
TLZ45	620777	3200064	75,1±4,4	36±2	0,22±0,01	0,2	1,03	21,33
TLZ46	610878	3193699	83±4,7	41±2,3	0,25±0,01	0,22	0,58	25,47
TLZ47	617407	3194408	66,9±4,10	32,8±2,0	0,20±0,01	0,18	0,88	25,89
TLZ48	647083	3225248	77,4±4,7	37,1±2,2	0,23±0,01	0,21	0,9	19,5
TLZ49	624216	3215134	61,7±3,7	29,4±1,7	0,18±0,01	0,17	0,9	17,1
TLZ50	612286	3194316	79,5±4,7	37,8±2,2	0,23±0,01	0,21	0,9	16,2
TLZ51	620645	3209418	72,9±4,4	34,5±2,1	0,21±0,01	0,20	1,0	15,5
TLZ52	619682	3208672	33,3±2,9	15,9±1,3	0,1±0,01	0,09	0,6	12,8
TLZ53	621756	3208468	36,2±3,7	17,2±1,7	0,11±0,01	0,10	0,7	13,0
TLZ54	622339	3208703	45,3±4,1	21,5±1,9	0,13±0,01	0,12	0,8	14,9
TLZ55	644794	3219295	73±6,7	35,2±3,1	0,22±0,02	0,20	1,7	36,5
TLZ56	632239	3200549	93,2±6,3	44,6±2,9	0,27±0,02	0,25	1,0	19,3
TLZ57	633670	3219886	46,4±3,6	20,6±1,7	0,13±0,01	0,13	1,4	4,0
TLZ58	651408	3232871	68,7±6,3	32±2,9	0,2±0,02	0,19	0,9	10,1
TLZ59	642266	3210845	109,1±8,1	52,4±3,8	0,32±0,02	0,29	1,1	22,8
TLZ60	627693	3213599	112,5±7	54,1±3,3	0,33±0,02	0,30	1,1	24,1
				Desis		L Dieses	[²³² Th]	[⁴⁰ K]
			[Ka _{eq}]	Dosis	DOSIS ET	i kiesgo	[²²⁶ Ra]	[²²⁶ Ra]
			Bq/kg	nGy/h	mSv/a		[]	
Media			77.7+5.4	37.3+2.6	0.2+0	0.2	1	20.6
Máximo			169.3+11.1	81.1+5.3	0.5+0.03	0.46	2.79	70.43
Mínimo			33.3±2.9	15.9±1.3	0.1±0.01	0.09	0.42	7.91
Desv E			32,6±1,8	15,8±0,9	0,1±0	0,1	0,4	10,7



Figura A7-2 Estadísticos radio equivalente en Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote

Bibliografía

ABBAS, K., SIMONELLI, F., D'ALBERTI, F., FORTE, M. & STROOSNIJDER, M. 2002. Reliability of two calculation codes for efficiency calibrations of HPGe detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 56, 703-709.

ABE, S., FUJITAKA, K. & FUJIMOTO, K. 1980. Natural radiation in Japan. *Natural radiation environment III*, 2, 1034-1048.

ACKERS, J., DEN BOER, J., DE JONG, P. & WOLSCHRIJN, R. 1985a. Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in the Netherlands. *Science of The Total Environment,* 45, 151-156.

ACKERS, J. G., DEN BOER, J. F., DE JONG, P. & WOLSCHRIJN, R. A. 1985b. Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in The Netherlands. *Science of The Total Environment*, 45, 151-156.

ADAMS, J. A. S. & COLS Physics and Chemistry of the Earth, Pergamon Press.

AHMED, N. K. 2005. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. *J Environ Radioact*, 83, 91-99.

AKKAYA, G., KAYNAK, G., KAHRAMAN, A. & GURLER, O. 2012. The investigation of radionuclide distributions in soil samples collected from Bursa, Turkey. *Radiat Prot Dosimetry*, 152, 376-383.

ALI, M., IQBAL, S., WASIM, M., ARIF, M. & SAIF, F. 2013. Soil radioactivity levels and radiological risk assessment in the highlands of Hunza, Pakistan. *Radiat Prot Dosimetry*, 153, 390-399.

ALONSO, H., ENRÍQUEZ, B., RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., TEJERA, A., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2011a. Medidas de los niveles de radón en edificios de la Universiad de Las Palmas de Gran Canaria. *XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física celebrada en Santander del 19 al 23 de septiembre de 2011*.

ALONSO, H., RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., GIL, J. M., FLORIDO, R., RODRÍGUEZ, R., SANCHO, P. & MARTEL, P. 2010a. Preliminary results of radon level in dwellings and public buildings of Las Palmas de Gran Canaria, Canary Island. Spain. Geological Aspects of radon Radon Risk Mappings. *Czech Geological Survey & radón v.o.s Praga (2010)*, 15-20.

ALONSO, H., RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R., FLORIDO, R. & MARTEL, P. 2010b. Determination of the radon potential for volcanic materials of the Gran Canaria Island. Geological Aspects of Radon Risk Mappings. *Czech Geological Survey & radón v.o.s Praga* (2010), 7-14.

ALONSO, H., RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., LÓPEZ-COTO, I., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R., FLORIDO, R., SANCHO, P. & MARTEL, P. 2011b. Análisis del potencial de emanación de radón de rocas volcánicas de la Isla de Gran Canaria *XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física celebrada en Santander del 19 al 23 de septiembre de 2011*.

ALONSO, H., RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., TEJERA, A., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2012. Mapping radon Gas concentration in soils in Fuerteventura Island. Geological Aspects of radon Radon Risk Mappings. *Czech Geological Survey & radón v.o.s Praga (2012)*, 13-17.

AMERAL, E. M., ALVES, J. G. & CARREIRO, J. V. 1992. Doses to the Portuguese Population due to Natural Gamma Radiation. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 541-543.

AMRANI, D. & TAHTAT, M. 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 54, 687-689.

ANAGNOSTAKIS, M. J., HINIS, E. P., SIMOPOULOS, S. E. & ANGELOPOULOS, M. G. 1996. Natural radioactivity mapping of Greek surface soils. *Environment International*, 22, Supplement 1, 3-8.

ANGUITA, F. & HERNÁN, F. 1999. El origen de la Islas Canarias: Un modelo de síntesis. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 7 (3), 254-261.

ARAMBURU, X. O. & BISBAL, J. J. 1996. *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos*, Univ. Politèc. de Catalunya.

ARNALDS, O., CUTSHALL, N. H. & NIELSEN, G. A. 1989. Cesium-137 in Montana soils. *Health Phys*, 57, 955-958.

ARNEDO, M. A., ALONSO, H., RUBIANO, J. G., TEJERA, A., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2012. Mapping radon Gas concentration in soils in Lanzarote Island. Geological Aspects of radon Radon Risk Mappings. *Czech Geological Survey & radón v.o.s Praga (2012)*, 19-23.

ARNEDO, M. A., RUBIANO, J. G., ALONSO, H., LOZANO, R., BOLÍVAR, J. P., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2011a. Distribución de radioisótopos naturales en la isla de Gran Canaria. *XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física celebrada en Santander del 19 al 23 de septiembre de 2011*.

ARNEDO, M. A., RUBIANO, J. G., TEJERA, A., ALONSO, H., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2011b. La radiactividad de la arena de las playas de Las Palmas de Gran Canaria. *XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física celebrada en Santander del 19 al 23 de septiembre de 2011*.

ARNEDO, M. A., TEJERA, A., RUBIANO, J. G., ALONSO, H., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2013. Natural radioactivity measurements of beach sands in Gran Canaria, Canary Islands (Spain). *Radiat Prot Dosimetry*, 156, 75-86.

ARVELA, H., HYVÖNEN, H., LEMMELÄ, H. & CASTRÉN, O. 1995. Indoor and Outdoor Gamma Radiation in Finland. *Radiat Prot Dosimetry*, 59, 25-32.

BADHAN, K. & MEHRA, R. 2012. Primordial radioactivity (238U, 232Th and 40K) measurements for soils of Ludhiana district of Punjab, India. *Radiat Prot Dosimetry*, 152, 29-32.

BAEZA, A., ALONSO, A. & HERAS, M. C. 2003. Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad. *Colección Informes Técnicos 11.2003* Serie Vigilancia Radiológica Ambiental Procedimiento 1.2.

BAEZA, A., DEL RÍO, L., MIRÓ, C., NAVARRO, E. & PANIAGUA, J. 1991. Radiological impact of the chernobyl nuclear power plant accident on two regions of Spain–Extremadura and Valencia. *Low-Level Measurements of Man-Made Radionuclides in the Environment, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore*, 416-424.

BAEZA, A., DEL RIO, M., MIRÓ, C. & PANIAGUA, J. M. 1992. Natural Radioactivity in Soils of the Province of Cáceres (Spain). *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 261-263.

BAEZA, A., HERNÁNDEZ, S., GUILLÉN, F. J., MORENO, G., MANJÓN, J. L. & PASCUAL, R. 2004. Radiocaesium and natural gamma emitters in mushrooms collected in Spain. *Science of The Total Environment*, 318, 59-71.

BAEZA, A., PANIAGUA, J., SUÁREZ, E. & FERNÁNDEZ, J. 1997. Determination of the dose rate from external irradiation. Geological considerations in sampling optimization. *J Environ Radioact,* 34, 9-27.

BALONOV, M. I. 2007. The Chernobyl Forum: major findings and recommendations. *J Environ Radioact*, 96, 6-12.

BECK, H. L., DECAMPO, J. & GOGOLAK, C. 1972. In situ Ge(Li) and NaI(TI) Gamma-Ray Spectrometry, *Health and Safety Laboratory U. S. Atomic Energy Commission New York* HASL-258.

BENKRID, M., MEBHAH, D., DJEFFAL, S. & ALLALOU, A. 1992. Environmental Gamma Radiation Monitoring by Means of TLD and Ionisation Chamber. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 77-80. BERETKA, J. & MATTHEW, P. J. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Phys*, 48, 87-95.

BLAGOEVA, R. & ZIKOVSKY, L. 1995. Geographic and vertical distribution of Cs-137 in soils in Canada. *J Environ Radioact*, 27, 269-274.

BLANCO, P., TOMÉ, F. V. & LOZANO, J. 2005. Fractionation of natural radionuclides in soils from a uranium mineralized area in the south-west of Spain. *J Environ Radioact*, 79, 315-330.

BOHLING, G. 2005. Introduction to Geostatistics and Variogram Analysis. *Kansas Geological Survey C&PE*, 940 : http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Variograms.pdf.

BOLÍVAR, J., GARCÍA-TENORIO, R. & MAS, J. 1998. Radioactivity of Phosphogypsum in South-West of Spain. *Radiat Prot Dosimetry*, 76, 185-189.

BOLIVAR, J., GARCIA-TENORIO, R. & VACA, F. 2000. Radioecological study of an estuarine system located in the south of Spain. *Water Research*, 34, 2941-2950.

BOLIVAR RAYA, J. P. 1995. Aplicaciones de la espectrometría gamma y alfa al estudio del impacto radiactivo producido por industrias no nucleares. Director Manuel García León, Rafael García-Tenorio García-Balmaseda Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad de Sevilla.

BOUVILLE, A. & LOWDER, W. 1988. Human population exposure to cosmic radiation. *Radiat Prot Dosimetry*, 24, 293-299.

BREIMEISTER, J. 1997. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. LANL Rep., LA-12.

BROWNE, E. & FIRESTONE, R. B. 1986. Table of Radioactive Isotopes. John Wiley and Sons.

BUNZL, K. & KRACKE, W. 1988. Cumulative deposition of 137Cs, 238Pu, 239+ 240Pu and 241Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG). *J Environ Radioact*, 8, 1-14.

CANAS, J. A., CARRACEDO, J. C., DAY, S. J., GUILLOU, H., PÉREZ TORRADO, F. J. & RODRÍGUEZ-BADIOLA, E. 1998. Origen y evolución del volcanismo de las Islas Canarias. Museo de la Ciencia y el Cosmos.

CANBERRA 2002. Genie-2000 Basic Spectroscopy Software Version 2.1.

CARDINALE, A., CORTELLESSA, G., GERA, F., ILARI, O., LEMBO, G., ADAMS, J. A. S., LOWDER, W. M. & GESELL, T. F. 1972. Distribution in the Italian population of the absorbed dose

due to the natural background radiation. *Proceedings of the Second International Symposium on the Natural Radiation Environment* 421-440

CARRACEDO, J. C. 1994. The Canary Islands: An example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60, 225-241.

CARRACEDO, J. C. 2011. Geología de Canarias (Origen evolución, edad y volcanismo). Ed. Rueda

CARRACEDO, J. C., PÉREZ TORRADO, F., ANCOCHEA, E., MECO, J., HERNÁN, F., CUBAS, C. R., CASILLAS, R., RODRÍGUEZ-BADIOLA, E. & AHIJADO, A. Cenozoic volcanism II: the Canary Islands. 2002. The Geological Society London.

CARRACEDO, J. C. & RODRÍGUEZ-BADIOLA, E. 1993. Evolución geológica y magmática de la isla de Lanzarote (Islas Canarias). *Revista de la Academia Canaria de Ciencias.* 4, 25-58

CLARKE, P., COOPER, M. & MARTIN, L. 1993. Environmental radioactivity surveillance in Australia. Results for 1992. ARL Technical report.

CLOUVAS, A., XANTHOS, S. & ANTONOPOULOS-DOMIS, M. 2001. Extended Survey of Indoor and Outdoor Terrestrial Gamma Radiation in Greek Urban Areas by In situ Gamma Spectrometry with Portable Ge Detector. *Radiat Prot Dosimetry*, 94, 233-245.

COMMISSION, E. 1999. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. *Radiation Protection*, 112, 16.

COMPTON, A. H. 1923. A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements. *Physical Review*, 21, 483-502.

COX, M. E. & FANKHAUSER, B. L. 1984. Distribution of fallout cesium-137 in Hawaii. *Health Phys*, 46, 65-71.

CSN 1998. Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes. *Colección otros documentos.* Consejo de Seguridad Nuclear. 84-87275-76-1

CSN 2001. Proyecto MARNA, mapa 1:1.000.000 de radiación gamma natural. *In:* MADRID., C. D. S. N. (ed.).

CSN 2013. El mapa predictivo de exposición al radón en España. *Colección Informes Técnicos,* 38.2013.

CURRIE, L. A. 1968. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry*, 40, 586-593.

CHILÈS, J. & DELFINER, P. 1999. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty Wiley. New York.

CHIOZZI, P., DE FELICE, P., FAZIO, A., PASQUALE, V. & VERDOYA, M. 2000a. Laboratory application of NaI(TI) γ-ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics. *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 127-132.

CHIOZZI, P., PASQUALE, V. & VERDOYA, M. 1998. Ground radiometric survey of U, Th and K on the Lipari Island, Italy. *Journal of applied geophysics*, 38, 209-217.

CHIOZZI, P., PASQUALE, V., VERDOYA, M. & DE FELICE, P. 2000b. Practical applicability of field γ-ray scintillation spectrometry in geophysical surveys. *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 215-220.

CHIOZZI, P., PASQUALE, V., VERDOYA, M. & MINATO, S. 2001. Natural gamma-radiation in the Aeolian volcanic arc. *Applied Radiation and Isotopes*, 55, 737-744.

CHONG, C. & AHMAD, G. 1982. Gamma activity of some building materials in West Malaysia. *Health Phys*, 43, 272.

CHU, T. C., WENG, P. S. & LIN, Y. M. 1989. Changes in per capita and collective dose equivalent due to natural radiation in Taiwan (1950-1983). *Health Phys*, 56, 201-217.

DE CORT, M. 1998. Atlas of Caesium Deposition on Europe After the Chernobyl Accident: Atlas Zagriazneniia Evropy Tseziem Posle Chernobyl'skoĭ Avarii, Office for Official Publications of the European Communities.

DE LA NUEZ, J., QUESADA, M. & ALONSO, J. 1998. Los volcanes de los islotes al norte de Lanzarote. *Tahiche*.

DEBERTIN, K. & GROSSWENDT, B. 1982. Efficiency calibration of semiconductor detectors by primary standard sources and Monte Carlo calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 203, 343-352.

DEBERTIN, K. & R.G., H. 1988a. Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. *Elsevier North-Holland*.

DEBERTIN, K. & R.G., H. 1988b. Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. *North Holland, Amsterdam.*

DEL ESTADO, B. O. 2003. Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *BOE*, 45, 7228-45.

DELFINER, P. 2009. Geostatistics: modeling spatial uncertainty, Wiley. com.

DELGADO GUARDADO.-RÚBRICA J.L., 1991 Valores de la exposición a la radiación natural medidos en diferentes puntos de la República Mexicana *Comisión nacional de seguridad nuclear y salvaguardias* Mexico..

DES INNERN, D. B. B. 1978. Die Strahlenexposition von aussen in der Bundesrepublik Deutschland durch natürliche radioaktive Stoffe im Freien und in Wohnungen: unter Berücksichtigung des Einflusses von Baustoffen; Bericht über ein vom Bundesminister des Innern gefördertes Forschungvorhaben, Bundesminister des Innern.

DEWORM, J. P., SLEGERS, W., GILLARD, J., FLEMAL, J. M. & CULST, J. P. 1988. Survey of the Natural Radiation of Belgium Territory as Determined by Different Methods. *Radiat Prot Dosimetry*, 24, 347-351.

DHAWAL, S. J., PHADATARE, M. R., THORAT, N. D., KULKARNI, G. S. & PAWAR, S. H. 2013. Natural radioactivity study in soil samples of South Konkan, Maharashtra, India. *Radiat Prot Dosimetry* 157(2):225-33.

DONOGHUE, E., TROLL, V. R., HARRIS, C., O'HALLORAN, A., WALTER, T. R. & PÉREZ TORRADO, F. J. 2008. Low-temperature hydrothermal alteration of intra-caldera tuffs, Miocene Tejeda caldera, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research,* 176, 551-564.

DORESTE, L., MARTEL, P., RUBIANO, J. G. & GUERRA, A. G. 1998. Radiación gamma natural en Gran Canaria. *Radioprotección, Sociedad Española de Protección Radiológica, ISSN 1133-1747,* 19, 163-171.

DRAGANIĆ, I. G., DRAGANIĆ, Z. D. & ADLOFF, J. P. 1993. Radiation and radioactivity on earth and beyond, CRC press.

DRAGOVIĆ, S., JANKOVIĆ, L. & ONJIA, A. 2006. Assessment of gamma dose rates from terrestrial exposure in Serbia and Montenegro. *Radiat Prot Dosimetry*, 121, 297-302.

DUBOIS, G. & BOSSEW, P. 2003. Chernobyl ¹³⁷Cs deposition in Austria: analysis of the spatial correlation of the deposition levels. *J Environ Radioact*, 65, 29-45.

DUQUE, R. & ELVIRA, B. 1998. Radón en viviendas de las Islas Canarias Occidentales. Distribución geográfica y dosimetría. Director: José Fernández de Armas. Universidad de La Laguna Departamento de Medicina Física y Farmacológica (España)

DURAN, E. B., VERA, C. M. D. & CRUZ, F. M. D. L. 1991. Outdoor exposure to natural radiation in the Philippines. *Philippine Nuclear Research Institute Quezon Cuty*.

ECKERMAN, K. F. & RYMAN, J. C. 1993. External exposure to radionuclides in air, water, and soil. *Federal guidance report*, 12, 222.

EISENBUD , M. 1987. Environmental radioactivity from natural and military sources. *Academic Press, New York, USA,* 3, 3^a edicion 152.

EISENBUD, M. & GESELL, T. F. 1997. Environmental Radioactivity from Natural, Industrial & Military Sources: From Natural, Industrial and Military Sources, Academic press.

ELEJALDE, C., HERRANZ, M., ROMERO, F. & LEGARDA, F. 1996. Correlations between soil parameters and radionuclide contents in samples from Biscay (Spain). *Water, Air, and Soil Pollution,* 89, 23-31.

ENNOW, K. & SIGURĐUR 1982. *Natural radiation in Iceland and the Faroe Islands*, Statens Institut for Strålehygiejne.

EROĞLU, H. & KABADAYI, Ö. 2013. NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS IN LAKE SEDIMENT SAMPLES. *Radiat Prot Dosimetry*.

ESPINOSA, G., GOLZARRI, J., GAMBOA, I. & JACOBSON, I. 1986. Natural radioactivity in Mexican building material by SSNTD. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 12, 767-770.

EUROPEA, C. 1998. Directiva 98/83/CE del Consejo, 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 330, 32-54.

EUROPEAS, C. D. L. C. 1990. Recomendación de la Comisión de 21-2-1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. *90/143/Euratom*, 2628.

FARAI, I. & ADEMOLA, J. 2005. Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria. *J Environ Radioact*, 79, 119-125.

FARAI, I. & JIBIRI, N. 2000. Baseline studies of terrestrial outdoor gamma dose rate levels in Nigeria. *Radiat Prot Dosimetry*, 88, 247-254.

FERNÁNDEZ DE ALDECOA, J., ROBAYNA, B., ALLENDE, A., POFFIJN, A. & HERNANDEZ DE ARMAS, J. 1992. Natural radiation in tenerife (Canary Islands). *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 545-548.

FERNÁNDEZ DE ALDECOA, J. C. 2000. Radiación natural en el aire y suelos de las Islas Canarias Occidentales. Director: José Fernández de Armas. Universidad de La Laguna Departamento de Medicina Física y Farmacológica (España)

FIRESTONE, R. B. 1996. Table of Isotopes. John Wiley and Sons, eighth edition, 1.

FLOREK, M., MASARIK, J., SZARKA, I., NIKODEMOVA, D. & HRABOVCOVA, H. 1996. Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude. *Radiat Prot Dosimetry*, 67, 187-192.

FÚSTER, J. 1968. *Geología y volcanología de las Islas Canarias: Lanzarote*, Inst." Lucas Mallada". Instituto "Lucas Mallada", C.S.I.C.,Madrid, 177 pp.

FUSTER, J., CENDRERO, A. & GASTESI, P. Geologia y Volcanologia de las Islas Canarias: Fuerteventura. Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid, 1968. 239 pp. 4. *Munoz M., de Ignacio C., Sagredo J.*

FÚSTER, J., IBARROLA, E. & LOPEZ RUIZ, J. 1966. Estudio volcanológico y petrológico de las isletas de Lanzarote (Islas Canarias). *Estudios geológicos,* 22, 185-200.

GALLARDO, A. 2006. Geostadística. Revista Ecosistemas, 15.

GARCÍA-TALAVERA, M., GARCÍA-PÉREZ, A., REY, C. & RAMOS, L. 2013. Mapping radon-prone areas using γ-radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection*, 33, 605.

GASCÓ, C., ANTÓN, M., DELFANTI, R., GONZÁLEZ, A., MERAL, J. & PAPUCCI, C. 2002. Variation of the activity concentrations and fluxes of natural (210Po, 210Pb) and anthropogenic (239,240 Pu, 137Cs) radionuclides in the Strait of Gibraltar (Spain). *J Environ Radioact,* 62, 241-262.

GILMORE, G. & HEMINGWAY, J. D. 1995. Practical gamma-ray spectrometry, Wiley Chichester.

GOLDHAGEN, P. 2000. Overview of aircraft radiation exposure and recent ER-2 measurements. *Health Phys*, 79, 526-544.

GONZÁLEZ-CHORNET, G. & GONZÁLEZ-LABAJO, J. 2004. Natural radioactivity in beach sands from Doñana national park and mazagón (Spain). *Radiat Prot Dosimetry*, 112, 307-310.

GONZALEZ-LABAJO, J., BOLÍVAR, J. & GARCÍA-TENORIO, R. 2001. Natural radioactivity in waters and sediments from a Spanish mining river. *Radiation Physics and Chemistry*, 61, 643-644.

GRAFCAN 2013. http://visor.grafcan.es/visorweb/ Consulta (mayo 2013)

GRASTY, R., CARSON, J., CHARBONNEAU, B. & HOLMAN, P. 1984. *Natural background radiation in Canada*, Geological Survey of Canada.

GREEN, B., HUGHES, J., LOMAS, P. & JANSSENS, A. 1992. Natural radiation atlas of Europe. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 491-493.

GREEN, B., LOMAS, P., BRADLEY, E. & WRIXON, A. 1989. Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain (NRPB-R191). *London: HM Stationery Office*.

GREENFIELD, M., DOMONDON, A., TSUCHIYA, S. & TOMIYAMA, M. 2003. Monitoring precipitation rates using γ rays from adsorbed radon progeny as tracers. *Journal of applied physics*, 93, 5733-5741.

HAINING, R. 1993. Spatial data analysis in the social and environmental sciences, Cambridge University Press.

HAMILTON, E. 1971. The relative radioactivity of building materials. *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 32, 398-403.

HERBST, W. 1968. Investigations of environmental radiation and its variability. *In: Adam JAS, Lowder WM (eds) Natural radiation environment. University of Chicago Press, Chicago,* pp 781–796

HERNÁNDEZ, F., HERNANDEZ DE ARMAS, J., CATALÁN, A., FERNANDEZ DE ALDECOA, J. & KARLSSON, L. 2005. Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulate samples in an oceanic island. *Atmospheric Environment*, 39, 4057-4066.

HERNANDEZ, F., HERNANDEZ DE ARMAS, J., CATALAN, A., FERNANDEZ DE ALDECOA, J. & LANDERAS, M. 2004. Activity concentrations and mean annual effective dose of foodstuffs on the island of Tenerife, Spain. *Radiat Prot Dosimetry*, 111, 205-210.

HERRANZ, M., JIMÉNEZ, R., NAVARRO, E., PAYERAS, J. & PINILLA, J. L. 2003. Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial. *Colección Informes Técnicos del CSN Serie Vigilancia Radiológica Ambiental* 11.2003.

HEUSSER, G. 1995. Low-Radioactivity Background Techniques. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 45, 543-590.

HEWAMANNA, R., SUMITHRARACHCHI, C., MAHAWATTE, P., NANAYAKKARA, H. & RATNAYAKE, H. 2001. Natural radioactivity and gamma dose from Sri Lankan clay bricks used in building construction. *Applied Radiation and Isotopes*, 54, 365-369.

HUFFERT, A., MECK, R. & MILLER, K. 1994. Background as a residual radioactivity criterion for decommissioning. *USNRC, Draft NUREG-1501,* 1.

HUH, C.-A. & SU, C.-C. 2004. Distribution of fallout radionuclides ⁷Be,¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu) in soils of Taiwan. *J Environ Radioact*, 77, 87-100.

I.N.E. 2009. Canarias en cifras 2007-2008. *Instituto Nacional de Estadística Gobierno de Canarias*. http://www.gobiernodecanarias.org/istac/temas_estadisticos/

I.N.E. 2013. Instituto Nacional de Estadística http://www.ine.es/inebmenu/mnu_padron.htm

IACOB, O. & BOTEZATU, E. Population exposure to natural radiation sources in Romania. Papers 6a33 in Proceeding of the 11th IRPA International Congress, Madrid, 2004. 23-28.

IAEA 1987. Preparation and Certification of IAEA Gamma Spectrometry Reference Materials, RGU-1, RGT-1 and RGK- 1. *International Atomic Energy Agency. Report-IAEA/RL/148*.

IAEA 1988. Geochemical Exploration for Uranium. Technical Reports Series , Viena, 284. .

IAEA 1989. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. *Technical Report Series* Nº. 295.

IAEA 1990. TECDOC-566 The use of gamma ray data to define the natural radiation enviroment.

ICRP 1991. *Recommendations of the International Commission Radiological Protection*, Elsevier Science Health Science Division.

ISAKSSON, M., ERLANDSSON, B. & LINDERSON, M.-L. 2000. Calculations of the deposition of ¹³⁷Cs from nuclear bomb tests and from the Chernobyl accident over the province of Skåne in the southern part of Sweden based on precipitation. *J Environ Radioact,* 49, 97-112.

ISAKSSON, M., ERLANDSSON, B. & MATTSSON, S. 2001. A 10-year study of the ¹³⁷Cs distribution in soil and a comparison of Cs soil inventory with precipitation-determined deposition. *J Environ Radioact*, 55, 47-59.

ISTAC 2013. Canarias en cifras 2012. *Instituto Nacional de Estadística Gobierno de Canarias.* Consejería de Economía y Hacienda-Gobierno de Canarias.

JULIUS, H. W. & VAN DONGEN, R. 1985. Radiation doses to the population in the Netherlands, due to external natural sources. *Science of The Total Environment*, 45, 449-458.

KARLSSON, L., HERNANDEZ, F., RODRIGUEZ, S., LOPEZ-PEREZ, M., HERNANDEZ-ARMAS, J., ALONSO-PEREZ, S. & CUEVAS, E. 2008. Using ¹³⁷Cs and ⁴⁰K to identify natural Saharan dust contributions to PM10 concentrations and air quality impairment in the Canary Islands. *Atmospheric Environment*, 42, 7034-7042.

KATHREN, R. L. 1986. Radioactivity in the environment sources, distribution and surveillance. *Harwoord Academic Publisher New York*.
KAYE, J. H., BRAUER, F. P., CONNALLY, R. E. & RIECK, H. G. 1972. Background reductions obtained with gamma detectors by use of massive cosmic-ray shielding. *Nuclear Instruments and Methods*, 100, 333-348.

KING, C.-Y. & MINISSALE, A. 1994. Seasonal variability of soil-gas radon concentration in central California. *Radiation Measurements*, 23, 683-692.

KISS, J., DE JONG, E. & MARTZ, L. 1988. The distribution of fallout cesium-137 in southern Saskatchewan, Canada. *Journal of environmental quality*, 17, 445-452.

KNOLL, G. F. 2010. Radiation detection and measurement, Wiley New York.

KOPERSKI, J. 1984. Exposure of Urban Populations to Natural Gamma Background in Poland. *Radiat Prot Dosimetry*, 8, 163-171.

KOVÁCS, T., SZEILER, G., FÁBIÁN, F., KARDOS, R., GREGORIČ, A. & VAUPOTIČ, J. 2013. Systematic survey of natural radioactivity of soil in Slovenia. *J Environ Radioact*, 122, 70-78.

KRAMER, R. & DREXLER, G. 1982. On the calculation of the effective dose equivalent. *Radiat Prot Dosimetry*, 3, 13-24.

KRSTIC, D. & NIKEZIC, D. 2010. Calculation of the effective dose from natural radioactivity in soil using MCNP code. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 946-947.

LABORIE, J. M., LE PETIT, G., ABT, D. & GIRARD, M. 2000. Monte Carlo calculation of the efficiency calibration curve and coincidence-summing corrections in low-level gamma-ray spectrometry using well-type HPGe detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 57-62.

LE MAITRE, R. R. W. 2002. Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, Cambridge University Press.

LEBEDYTE, M., BUTKUS, D. & MORKŪNAS, G. 2002. Variations of the ambient dose equivalent rate in the ground level air. *J Environ Radioact*, 64, 45-57.

LEE, E., MENEZES, G. & FINCH, E. 2004. Natural radioactivity in building materials in the Republic of Ireland. *Health Phys*, 86, 378-383.

LEGARDA, F., ROMERO, L. M., HERRANZ, M., BARRERA, M., IDOETA, R., VALIÑO, F., OLONDO, C. & CARO, A. 2011. Inventory and vertical migration of ¹³⁷Cs in Spanish mainland soils. *J Environ Radioact*, 102, 589-597.

LEUNG, K. C., LAU, S. Y. & POON, C. B. 1990. Gamma radiation dose from radionuclides in Hong Kong Soil. *J Environ Radioact,* 11, 279-290.

LIBBY, W. F., ANDERSON, E. C. & ARNOLD, J. R. 1949. Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide Assay of Natural Radiocarbon. *Journal Name: Science See Saiensu; Journal* Vol: 109;227-228

LÓPEZ-PÉREZ, M., RAMOS-LÓPEZ, R., PERESTELO, N. R., DUARTE-RODRIGUEZ, X., BUSTOS, J., ALONSO-PÉREZ, S., CUEVAS, E. & HERNÁNDEZ-ARMAS, J. 2013. Arrival of radionuclides released by the Fukushima accident to Tenerife (Canary Islands). *J Environ Radioact*, 116, 180-186.

LÓPEZ, R., GARCÍA-TALAVERA, M., PARDO, R., DEBAN, L. & NALDA, J. C. 2004. Natural radiation doses to the population in a granitic region in Spain. *Radiat Prot Dosimetry*, 111, 83-88.

LOZANO, R., HERNÁNDEZ-CEBALLOS, M., ADAME, J., CASAS-RUÍZ, M., SORRIBAS, M., MIGUEL, E. S. & BOLÍVAR, J. 2011. Radioactive impact of Fukushima accident on the Iberian Peninsula: Evolution and plume previous pathway. *Environment International*, 37, 1259-1264.

LOZANO, Z., BRAVO, C., OVALLES, F., HERNÁNDEZ, R. M., MORENO, B., PIÑANGO, L. & VILLANUEVA, J. G. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro,* 16, 61-72.

MADELMONT, C., RANNOU, A. & RENOUARD, H. 1984. Sources externes: cosmique, tellurique et domestique. *Congrès sur les donneés actuelles sur la radioactivité naturelle. Monte Carlo*, 61.

MAHOU, E. S. & AMIGOT, J. A. F. 1996. El proyecto MARNA, Mapa de radiación gamma natural. *Revista de la Sociedad Nuclear Española*, 153, 7.

MALANCA, A., PESSINA, V. & DALLARA, G. 1993. Assessment of the natural radioactivity in the Brazilian state of Rio Grande do Norte. *Health Phys*, 65, 298-302.

MANGAS, J., TORRADO, F. J. P., MARTÍN, A. & REGUILON, R. 1996. Minerales de tierras raras en las carbonatitas del Complejo Basal de Fuerteventura (Islas Canarias). *Geogaceta*, 20, 1511-1513.

MARISCOTTI, M. A. 1967. A method for automatic identification of peaks in the presence of background and its application to spectrum analysis. *Nuclear Instruments and Methods*, 50, 309-320.

MARKKANEN, M. 1995. Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity *STUK-B-STO 32, Helsinki*.

MARTIN-LUIS, C., QUESADA, M., EFF-DARWICH, A., DE LA NUEZ, J., COELLO, J., AHIJADO, A., CASILLAS, R. & SOLER, V. 2002. A new strategy to measure radon in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands). *Environmental Geology*, 43, 72-78.

MARTIN, M. 1999. Variacion espacio-temporal del nivel de emisión de radón en una zona volcánica activa: *Tenerife (Islas Canarias)*. Ph. D. dissertation, 270 pp., Univ. of La Laguna, Laguna, Spain.

MARTINEZ-AGUIRRE, A. & GARCÍA-LEÓN, M. 1994. Natural radioactivity in the Guadalquivir river at the South of Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 178, 337-350.

MATHERON, G. 1963. Principles of geostatistics. Economic geology, 58, 1246-1266.

MCAULAY, I. & COLGAN, P. 1980. gamma-Ray background radiation measurement in Ireland. *Health Phys*, 39, 821.

MEASUREMENTS, E. R. 1976. NCRP Report No. 50. Washington DC.

MILLER, K. M. 1992. Measurements of External Radiation in United States Dwellings. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 535-539.

MITCHELL, P. I., SANCHEZ-CABEZA, J. A., RYAN, T. P., MCGARRY, A. T. & VIDAL-QUATRAS, A. 1990. Preliminary estimates of cumulative caesium and plutonium deposition in the Irish terrestrial environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 138, 241-256.

MOHARRAM, B. M., SULIMAN, M. N., ZAHRAN, N. F., SHENNAWY, S. E. & EL SAYED, A. R. 2012. External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 241-248.

MOLLAH, A., AHMED, G., HUSAIN, S. & RAHMAN, M. 1986. The natural radioactivity of some building materials used in Bangladesh. *Health Phys*, 50, 849-851.

MONNA, F., VAN OORT, F., HUBERT, P., DOMINIK, J., BOLTE, J., LOIZEAU, J.-L., LABANOWSKI, J., LAMRI, J., PETIT, C. & LE ROUX, G. 2009. Modeling of< sup> 137</sup> Cs migration in soils using an 80-year soil archive: role of fertilizers and agricultural amendments. *J Environ Radioact*, 100, 9-16.

MUSTONEN, R. 1984. Natural radioactivity in and radon exhalation from Finnish building materials. *Health Phys*, 46, 1195.

NAMBI, K., BAPAT, V., DAVID, M., SUNDARAM, V., SUNTA, C. & SOMAN, S. 1986. Natural background radiation and population dose distribution in India. *Internal Report Health Physics Division, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay*.

NAVAS, A., WALLING, D., QUINE, T., MACHÍN, J., SOTO, J., DOMENECH, S. & LÓPEZ-VICENTE, M. 2007. Variability in 137Cs inventories and potential climatic and lithological controls in the central Ebro valley, Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274, 331-339. NCRP 2007. National Council on Radiation Protection and Measurements Report Shows Substantial Medical Exposure Increase1. *Radiology*.

NEDER, H., HEUSSER, G. & LAUBENSTEIN, M. 2000. Low level γ-ray germanium-spectrometer to measure very low primordial radionuclide concentrations. *Applied Radiation and Isotopes*, 53, 191-195.

NIELSEN, S. P. 1979. Terrestrial and cosmic radiation in Denmark.In Pric, Seminar on the Radiological Burden of Man from Natural Radioactivity in the Countries of the European Commnunities. París, 4-6 december 1979 CEC-report, V/2408/80, pp 101-110

NIEWIADOMSKI, T., OLSEZEWSKA-WASIOLEK, M. & WASIOLEK, P. 1985. Population Exposures Due to Current Building Technology in Krakow, Poland. *Radiat Prot Dosimetry*, 12, 293-296.

NIKL, I. & SZTANYIK, L. B. 1988. External Indoor and Outdoor Gamma Exposures in Hungary During the Period of 1983-1986. *Radiat Prot Dosimetry*, 24, 387-389.

NÚÑEZ-LAGOS, R. & VIRTO, A. 1996. Shielding and background reduction. *Applied Radiation and Isotopes*, 47, 1011-1021.

OECD 1979. Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials. *Nuclear Energy Agency, Paris, France.*

PADILLA, G., HERNÁNDEZ, P., PADRÓN, E., BARRANCOS, J., MELIÁN, G., DIONIS, S., RODRÍGUEZ, F., NOLASCO, D., CALVO, D. & HERNÁNDEZ, I. Soil gas 222Rn and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands) before and after the 2011 submarine eruption. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012. 13473.

PADILLA, G. D., HERNÁNDEZ, P. A., PADRÓN, E., BARRANCOS, J., PÉREZ, N. M., MELIÁN, G., NOLASCO, D., DIONIS, S., RODRÍGUEZ, F. & CALVO, D. 2013. Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011-2012 submarine eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.

PAPASTEFANOU, C., MANOLOPOULOU, M., CHARALAMBOUS, S. 1984. Exposure from the radioactivity in building materials. *Health Phys*, 47, 775-783.

PÉREZ-MORENO, J., SAN MIGUEL, E., BOLIVAR, J. & AGUADO, J. 2002a. A comprehensive calibration method of Ge detectors for low-level gamma-spectrometry measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,* 491, 152-162.

PÉREZ-MORENO, J. P., SAN MIGUEL, E. G., BOLÍVAR, J. P. & AGUADO, J. L. 2002b. A comprehensive calibration method of Ge detectors for low-level gamma-spectrometry

measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 491, 152-162.

PÉREZ, N. M., HERNÁNDEZ, P. A., PADRÓN, E., MELIÁN, G., MARRERO, R., PADILLA, G., BARRANCOS, J. & NOLASCO, D. 2007. Precursory subsurface 222Rn and 220Rn degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics,* 164, 2431-2448.

PINZA-MOLINA, C. 1999. Radón en viviendas de las Islas Canarias Orientales, consecuencias dosimétricas. Director: José Fernández de Armas. Universidad de La Laguna Departamento de Medicina Física y Farmacológica (España).

PINZA-MOLINA, C., ALCAIDE, J., RODRIQUES-BETHENCOURT, R. & HERNANDEZ-ARMAS, J. 1999. Radon exposures in the caves of Tenerife (Canary Islands). *Radiat Prot Dosimetry*, 82, 219-224.

PINZA, C., ARMAS, J. H. & POFFIJN, A. 1997. Radon concentration in dwellings of Lanzarote (Canary Islands). *Radiat Prot Dosimetry*, 69, 217-220.

POFFIJN, A., MARIJNS, R., VANMARCKE, H. & UYTTENHOVE, J. 1985. Results of a preliminary survey on radon in Belgium. *Science of The Total Environment*, 45, 335-342.

PUJOL, L. & ORDUÑA, R. G. D. 2008. Estudios para la meiora en la medida de espectrometría gamma en el laboratorio de radiactividad ambiental del CEDEX. Parte 1: caracterización del fondo radiactivo. *Ingeniería Civil,*, 149, 95-107.

PUJOL, L. & SANCHEZ-CABEZA, J. 2000. Natural and artificial radioactivity in surface waters of the Ebro river basin (Northeast Spain). *J Environ Radioact*, 51, 181-210.

QUINDÓS, L. S. 1995. Un gas radiactivo de origen natural en su casa. *Ed. Consejo de Seguridad Nuclear y Serv. Publicaciones de la Univ. de Cantabria.* Madrid

QUINDÓS, L. S., FERNÁNDEZ, P. L., GÓMEZ-AROZAMENA, J RÓDENAS, C., ,SAINZ C., MARTÍN-MATARRANZ, J., & ARTECHE, J.. 2003. Natural radiation exposure in the vicinity of Spanish nuclear power stations. *Health Phys*, 85, 594-598.

QUINDÓS, L. S., FERNÁNDEZ, P. L., RÓDENAS, C., GÓMEZ-AROZAMENA, J. & ARTECHE, J. 2004. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils. *J Environ Radioact*, 71, 139-145.

QUINDÓS, L. S., FERNANDEZ, P. L., RODENAS, C. & SOTO, J. 1992. Estimate of External Gamma Exposure Outdoors in Spain. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 527-529.

QUINDÓS, L. S., FERNANDEZ, P. L. & SOTO, J. 1993. Exposure to natural sources of radiation in Spain. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21, 295-298.

QUINDÓS, L. S., FERNÁNDEZ, P. L., SOTO, J., RÓDENAS, C. & GÓMEZ, J. 1994. Natural radioactivity in Spanish soils. *Health Phys*, 66, 194-200.

QUINDÓS PONCELA, L., FERNÁNDEZ, P., GÓMEZ AROZAMENA, J., SAINZ, C., FERNÁNDEZ, J., SUAREZ MAHOU, E., MARTIN MATARRANZ, J. & CASCÓN, M. 2004a. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International*, 29, 1091-1096.

QUINDÓS PONCELA, L. S., FERNÁNDEZ, P. L., GÓMEZ AROZAMENA, J., SAINZ, C., FERNÁNDEZ, J. A., SUAREZ MAHOU, E., MARTIN MATARRANZ, J. L. & CASCÓN, M. C. 2004b. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International*, 29, 1091-1096.

RANKAMA, K. & SAHAMA, T. G. 1960. Geochemistry. Univ. Chicago Press. REYNOLDS, M.A.,

RANNOU, A., MADELMONT, C. & RENOUARD, H. 1985. Survey of natural radiation in France. *Science of The Total Environment*, 45, 467-474.

REGUIGUI, N. 2006. *Gamma Ray Spectrometry Practical Information*. http://www.cnstn.rnrt.tn/afraict/NAT/gamma/html/Gamma%20Spec%20V1.pdf (noviembre 2013)

RENDU, J.-M. M. 1979. Normal and lognormal estimation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 11, 407-422.

RÓDENAS, C., GÓMEZ, J., SOTO, J. & MARAVER, F. 2008. Natural radioactivity of spring water used as spas in Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277, 625-630.

RODRÍGUEZ LOSADA, J. 1987. Un complejo de diques cónicos en la isla de La Gomera. Islas Canarias. *Estudios geológicos*, 43, 41-45.

RODRÍGUEZ LOSADA, J. 2014. Las Islas Canarias y el origen y clasificación de las rocas ígneas. http://www.gobiernodecanarias.org/geotecnia/Canarias_clasif_roc_Rguez-Losada.pdf

ROSELL, J. R., ORTEGA, X. & DIES, X. 1991. Natural and Artificial Radionuclides on the Northeast Coast of Spain. *Health Phys*, 60, 709-712.

RUBIANO, J. G. 2008. Informe final al CSN de los resultados del Convenio: Elaboración del Mapa Radiométrico de las Islas Canarias Orientales. *GIRMA-CSN-01 ULPGC (2008)*.

RUBIANO, J. G. 2012. Informe final a la ACISII del Proyecto: Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales: implicaciones radiológicas sobre la población. *PI2007/035. ULPGC (2012)*.

RUBIANO, J. G. 2013. Informe final al CSN del Proyecto: Estudio sobre la distribución de radioisótopos naturales y de radón en las Islas Canarias Orientales. *GIRMA-CSN-05 ULPGC* (2013).

RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., ALONSO, H., LOZANO, R., BOLÍVAR, J. P., GIL, J. M., RODRÍGUEZ, R. & MARTEL, P. 2011. Distribución de radioisótopos naturales en Ciudad Autónoma de Melilla. *XXXIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física celebrada en Santander del 19 al 23 de septiembre de 2011*.

RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., ALONSO, H. & MARTEL, P. 2012. Informe final al CSN. Estudio de la Radiactividad Natural en la Ciudad Autónoma de Melilla. Mapa Radiométrico. *In:* (ULPGC), G. (ed.). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., GONZÁLEZ, A., RODRÍGUEZ, R., GIL, J. M., FLORIDO, R., MARTEL, P. & MANGAS, J. 2006a. Natural gamma radiation map of Fuerteventura. *Vth Internacional Workshop Natural Radiation and Environment Valladolid*.

RUBIANO, J. G., ARNEDO, M. A., GONZÁLEZ, A., RODRÍGUEZ, R., GIL, J. M., FLORIDO, R., MARTEL, P. & MANGAS, J. 2006b. Natural gamma radiation map of Lanzarote. Vth Internacional Workshop Natural Radiation and Environment Valladolid.

SAENKO, V., IVANOV, V., TSYB, A., BOGDANOVA, T., TRONKO, M., DEMIDCHIK, Y. & YAMASHITA, S. 2011. The Chernobyl Accident and its Consequences. *Clinical Oncology*, 23, 234-243.

SAITO, K. & JACOB, P. 1995. Gamma Ray Fields in the Air Due to Sources in the Ground. *Radiat Prot Dosimetry*, 58, 29-45.

SALEH, M. A., RAMLI, A. T., ALAJERAMI, Y. & ALIYU, A. S. 2013. ASSESSMENT OF NATURAL RADIATION LEVELS AND ASSOCIATED DOSE RATES FROM SURFACE SOILS IN PONTIAN DISTRICT, JOHOR, MALAYSIA. *Journal of Ovonic Research Vol*, 9, 17-27.

SAMPER CALVETE, F. & RAMÍREZ, J. C. 1990. Geoestadística: Aplicaciones a la hidrogeología subterránea. *Centro Int. de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona*.

SANCHEZ-CABEZA, J.-A., DÍAZ-ASENCIO, M. & RUIZ-FERNÁNDEZ, A. C. 2012. Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando 210Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones. *In:* (OIEA), L..D.R.L.D.M..A..M. (ed.) Sección Editorial del OIEA ed. VIENA: ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (OIEA).

SANCHEZ-CABEZA, J.-A., GARCIA-TALAVERA, M., COSTA, E., PEÑA, V., GARCIA-ORELLANA, J., MASQUÉ, P. & NALDA, C. 2007. Regional calibration of erosion radiotracers (210Pb and 137Cs): atmospheric fluxes to soils (Northern Spain). *Environmental science* & *technology*, 41, 1324-1330.

SANTAMARTA CEREZAL, J. C., HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, L. E. & ANTONIO, R. L. J. 2011. Ingeniería geológica y geotécnica en medios volcánicos. . (Universidad de La Laguna). http://ocw.ull.es/ (28/11/2013). License: Creative Commons BY-NCSA.

SCIOCCHETTI, G., SCACCO, F., BALDASSINI, P. G., MONTE, L. & SARAO, R. 1984. Indoor Measurements of Airborne Natural Radioactivity in Italy. *Radiat Prot Dosimetry*, 7, 347-351.

SCHULLER, P., VOIGT, G., HANDL, J., ELLIES, A. & OLIVA, L. 2002. Global weapons fallout ¹³⁷Cs in soils and transfer to vegetation in south–central Chile. *J Environ Radioact,* 62, 181-193.

SED, L. J., RODRIGUEZ, O. & MORENO, R. A. 1991. Organización de la red nacional de vigilancia radiológica ambiental de la República de Cuba. *Primer Congreso Regional sobre Seguridad Radiológica y Nuclear, Buenos Aires*.

SHARAF, J. M. & HAMIDEEN, M. S. 2013. Measurement of Natural Radioactivity in Jordanian Building Materials and their Contribution to the Public Indoor Gamma Dose Rate. *Applied Radiation and Isotopes*. 80:61–66

SMITH, J., APPLEBY, P., HILTON, J. & RICHARDSON, N. 1997. Inventories and fluxes ²¹⁰Pb ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am determined from the soils of three small catchments in Cumbria, UK. *J Environ Radioact*, 37, 127-142.

SOMLAI, J., KANYÁR, B., BODNÁR, R., NÉMETH, C. & LENDVAI, Z. 1996. Radiation dose contribution from coal-slags used as structural building material. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 207, 437-443.

SORANTIN, H. & STEGER, F. 1984. Natural Radioactivity of Building Materials in Austria. *Radiat Prot Dosimetry*, 7, 59-61.

SOTO, J., GÓMEZ, J., GONZÁLEZ, A., REMONDO, J., DE TERÁN, J. D., CENDRERO, A. & ALCAIDE, J. 2002. Evolución de los deslizamientos de ladera mediante su caracterización con Cs-137. *Cuaternario y Geomorfología*, 16, 73-81.

SOTO, J. & NAVAS, A. 2008. A simple model of ¹³⁷Cs profile to estimate soil redistribution in cultivated stony soils. *Radiation Measurements*, 43, 1285-1293.

SPIER, F. W., GIBSON, J. A. & THOMSON, I. M. G. 1981. A guide to the measurement of environmental gamma-ray dose rate. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 82, 23106.

SPIERS, F. & OVERTON, T. 1962. Attenuation factors for certain tissues when the body is exposed to nearly omni-directional gamma radiation. *Physics in medicine and biology*, 7, 35.

STEINHAUSER, G., BRANDL, A. & JOHNSON, T. E. 2014. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 470–471, 800-817.

STEINHÄUSLER, F. & LETTNER, H. 1992. Radiometric Survey in Namibia. *Radiat Prot Dosimetry*, 45, 553-555.

STRANDEN, E. 1977. Population Doses from Environmental Gamma Radiation in Norway. *Health Phys*, 33, 319-323.

STUARDO, E. 1996 Natural radiation external exposures levels in chilean sub-antartic and country stations. *Radiation Protection* Practice. Proceedings of the 7th International Congress of the International Radiation Protection Association. 926-929.

SUAREZ MAHOU, E. & FERNANDEZ AMIGOT,1993 J. Use of uranium airborne survey data in the preparation of a radiometric map of Spain. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria). Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. Proceedings of a technical committee meeting held in Vienna. 9-12.

SUÁREZ MAHOU, E., FERNÁNDEZ AMIGOT, J., BAEZA ESPASA, A., MORO BENITO, M. C., GARCÍA POMAR, D., MORENO DEL POZO, J. & LANAJA DEL BUSTO, J. M. 2000. Proyecto MARNA. Mapa de Radiacion Gamma Natural. *In:* CSN (ed.) *Colección Informes Técnicos.* Madrid

SUÁREZ MAHOU, E. & FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A. 1996. El mapa de la radiactividad natural de España. *Estratos*, 10-15.

SZABÓ, Z., VÖLGYESI, P., NAGY, H. É., SZABÓ, C., KIS, Z. & CSORBA, O. 2013. Radioactivity of natural and artificial building materials – a comparative study. *Journal of Environmental Radioactivity*, 118, 64-74.

SZEGVARY, T., CONEN, F., STÖHLKER, U., DUBOIS, G., BOSSEW, P. & DE VRIES, G. 2007a. Mapping terrestrial -dose rate in Europe based on routine monitoring data. *Radiation Measurements*, 42, 1561-1572.

SZEGVARY, T., CONEN, F., STÖHLKER, U., DUBOIS, G., BOSSEW, P. & DE VRIES, G. 2007b. Mapping terrestrial γ-dose rate in Europe based on routine monitoring data. *Radiation Measurements*, 42, 1561-1572.

SZEGVARY, T., LEUENBERGER, M. & CONEN, F. 2007c. Predicting terrestrial 222 Rn flux using gamma dose rate as a proxy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 2789-2795.

TANARRO, A. 1973. Instrumentación nuclear, Ed. JEN Madrid.

TASKIN, H., KARAVUS, M., AY, P., TOPUZOGLU, A., HIDIROGLU, S. & KARAHAN, G. 2009. Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey. *J Environ Radioact*, 100, 49-53.

TEREESH, M. B., RADENKOVIC, M. B., KOVACEVIC, J. & MILJANIC, S. S. 2013. Terrestrial radioactivity of the Jabal Eghei area in southern Libya and assessment of the associated environmental risks. *Radiat Prot Dosimetry*, 153, 475-484.

THEODÓRSSON, P. 1996. Low-level counting: Past—Present—Future. *Applied Radiation and Isotopes*, 47, 827-834.

TREVISI, R., NUCCETELLI, C. & RISICA, S. 2013. Screening tools to limit the use of building materials with enhanced/elevated levels of natural radioactivity: Analysis and application of index criteria. *Construction and Building Materials*, 49, 448-454.

TSCHIRF, E. External natural radiation exposure in Austria. Proceedings of the Seminar on the Radiological Burden of Man from Natural Radioactivity in the Countries of the European Communities, Luxembourg, CEC Report, 1980. 80.

TSO, M. Y. & LI, C. 1992. Terrestrial gamma radiation dose in Hong Kong. Health Phys, 62, 77-81.

TUFAIL, M. & HAMID, T. 2007. Natural radioactivity hazards of building bricks fabricated from saline soil of two districts of Pakistan. *Journal of Radiological Protection*, 27, 481.

UNSCEAR 1977. Sources and effects of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* New York:UNSCEAR Publications 1977

UNSCEAR 1982. Ionising radiation: sources and biological effect. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* New York:UNSCEAR Publications 1982

UNSCEAR 1988. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with Annexes.New York:UNSCEAR Publications 1988

UNSCEAR 1993. Sources, effects and risks of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with Annexes*.New York:UNSCEAR Publications 1993.

UNSCEAR 2000. Sources, effects and risks of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with Annexes*.New York:UNSCEAR Publications 2000.

UNSCEAR 2013. Sources, effects and risks of ionizing radiation. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with Annexes*.New York:UNSCEAR Publications 2013

VALLÉS, I., CAMACHO, A., ORTEGA, X., SERRANO, I., BLÁZQUEZ, S. & PÉREZ, S. 2009. Natural and anthropogenic radionuclides in airborne particulate samples collected in Barcelona (Spain). *J Environ Radioact*, 100, 102-107.

VAN BEERS, W. C. & KLEIJNEN, J. P. Kriging interpolation in simulation: a survey. Simulation Conference, 2004. Proceedings of the 2004 Winter, 2004. IEEE.

VASSILEV, G. 1991. Irradiation of the population from the natural background. *Committee on the Use of Atomic Energy for Peaceful Pusposes, Sofia.*

VEIGA, R., SANCHES, N., ANJOS, R. M., MACARIO, K., BASTOS, J., IGUATEMY, M., AGUIAR, J. G., SANTOS, A. M. A., MOSQUERA, B., CARVALHO, C., BAPTISTA FILHO, M. & UMISEDO, N. K. 2006. Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. *Radiation Measurements*, 41, 189-196.

VERA, J. A. 2004a Geología de España, Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Vera (Ed.), Madrid (2004)

VERA, J. A. 2004b. *Geología de España: Maps*, Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España (IGME),, *Vera (Ed.)*, Madrid (2004).

VIDAL-CUADRAS, A. & ORTEGA, M. R. 1986. Radiactividad e interacción de la radiación con la materia. *Universidad Autónoma Barcelona*

VIÑAS, R., EFF-DARWICH, A., SOLER, V., CASTRO-ALMAZAN, J., MARTÍN-LUIS, M., COELLO, J., QUESADA, M. & DE LA NUEZ, J. 2004. Comparative analysis of continuous radon sensors in underground environments. *Environmental Geology*, 46, 1108-1117.

VIÑAS, R., EFF-DARWICH, A., SOLER, V., MARTÍN-LUIS, M. C., QUESADA, M. L. & DE LA NUEZ, J. 2007. Processing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Radiation Measurements*, 42, 101-115.

WEBSTER, R. 2000. Is soil variation random? Geoderma, 97, 149-163.

WHITE, H. E. 1972. *Modern college physics*, 6^a ed (1180 pp) Van Nostrand Reinhold Co. New York

XINWEI, L. 2005. Natural radioactivity in some building materials of Xi'an, China. *Radiation Measurements*, 40, 94-97.

ZIKOVSKY, L. & KENNEDY, G. 1992. Radioactivity of building materials available in Canada. *Health Phys*, 63, 449.

ZIQIANG, P., YIN, Y. & MINGQIANG, G. 1988. Natural Radiation and Radioactivity in China. *Radiat Prot Dosimetry*, 24, 29-38.

ZUBAIR, M., VERMA, D., AZAM, A. & ROY, S. 2013. Natural radioactivity and radiological hazard assessment of soil using gamma-ray spectrometry. *Radiat Prot Dosimetry*. 155 (4), 467–473