

PALOMARES: DESDE EL ACCIDENTE AL PLAN DE RESTAURACIÓN



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	5
2	EL ACCIDENTE Y SUS CONSECUENCIAS	6
2.1	CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y DISPERSIVA	13
3	ACUERDOS ESPAÑA-ESTADOS UNIDOS	17
3.1	ACUERDO OTERO-HALL (1966-1996)	17
3.2	APLICACIÓN DE LA DISPOSICIÓN (1997-2009)	18
3.3	PROYECTO DE ANEXO I (15/09/1997- 9/03/2005)	18
3.4	PROYECTO DE ANEXO II (9/03/2006- 10/09/2007)	19
3.5	PROYECTO DE ANEXO III (10/09/2007 – 30/09/2009)	19
4	PROYECTO INDALO. PROGRAMAS DE VIGILANCIA	21
4.1	EVOLUCIÓN	22
5	MAPA RADIOLÓGICO TRIDIMENSIONAL	24
5.1	CRITERIOS DE RESTRICCIÓN DE USO DE SUELOS	25
5.2	PLAN DE MEDIDAS	26
5.2.1	MEDIDAS DINÁMICAS	28
5.2.2	MEDIDAS ESTÁTICAS	29
5.2.3	EVALUACIÓN POR GEORRADAR DEL SUBSUELO	30
5.2.4	ANÁLISIS DE MUESTRAS INALTERADAS POR ESPECTROMETRÍA GAMMA.	34
5.2.5	Pu/Am EN MUESTRAS DE SUELO	35
5.2.6	SONDEOS	35
5.3	RESULTADOS	36
5.3.1	CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA EXTENSIVA DEL SUELO SUPERFICIAL	36
5.3.2	CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DETALLADA DEL SUELO SUPERFICIAL (ZONAS 2, 2-BIS, 3 Y 6)	37
5.3.3	ALCANCE DE LA CONTAMINACIÓN EN LAS ZONAS 2, 2-BIS, 3 Y 6	48
5.3.4	ESTUDIOS GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	53
5.3.5	DETERMINACIÓN DE Pu/Am	55
5.4	MODELO TRIDIMENSIONAL	58
5.5	REGISTRO DE RESULTADOS	62
6	REVISIÓN INTERNACIONAL ENTRE PARES OIEA-CIEMAT	63
7	MISIÓN DE VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL ARTÍCULO 35 DEL TRATADO DE EURATOM	64
8	PLAN DE REHABILITACIÓN DE PALOMARES .PROPUESTA PRELIMINAR	67
9	SITUACIÓN ACTUAL	68

9.1	ADECUACIÓN Y AUDITORÍA INTERNA DEL LABORATORIO DE MEDIDAS	68
9.2	EVALUACIÓN DE PESTICIDAS, METALES PESADOS E HIDROCARBUROS	69
9.3	REGISTROS HISTÓRICOS: PERSONALES Y AMBIENTALES	69
9.4	MODELO DE DISPERSIÓN METEOROLÓGICA	69
9.5	PLAN DE VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL	69
9.6	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES	70
10	CONCLUSIONES	71
11	REFERENCIAS	72
12	GLOSARIO	84

1 INTRODUCCIÓN

En la mañana del 17 de enero de 1966, [53] [78], [86], se produjo sobre Palomares (pedanía del municipio de Cuevas del Almanzora en la provincia de Almería), la colisión accidental de dos aeronaves (bombardero B-52 y avión nodriza KC-135) pertenecientes a las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de América, durante una operación rutinaria de repostaje en vuelo.

Ambas aeronaves quedaron completamente destruidas y sus restos (91t) (Figura 1) se extendieron sobre cientos de hectáreas en el litoral y el mar de la zona, entre ellos cuatro bombas termonucleares que transportaba el bombardero.

Al impactar fuertemente con el suelo dos de las bombas, se produjo la deflagración de parte de su explosivo químico y se diseminó una buena parte de los 9 kg de combustible nuclear fisionable, en forma de óxidos de Pu, U y Am fundamentalmente.

Inmediatamente después del accidente, las Fuerzas Armadas Norteamericanas identificaron la zona más afectada por la contaminación radiactiva y se iniciaron unos trabajos de remedio sobre el suelo superficial y las cosechas.

Las operaciones de recuperación y limpieza de las armas caídas supusieron que miembros de las fuerzas armadas de Estados Unidos, ayudados por personal del ejército y la guardia civil de España, retiraran la tierra contaminada de 25.000 m² de suelo y restos vegetales.

La contaminación radiactiva producida en Palomares, como consecuencia del accidente aéreo de 1966, suscitó una gran atención internacional ya que supuso la liberación de Plutonio en el medio ambiente.

El área afectada a raíz de este accidente se sitúa en el término municipal de Palomares que forma parte del Municipio de Cuevas del Almanzora y que se extiende por el término municipal de Vera, Almería.

Desde entonces el CIEMAT (antes Junta de Energía Nuclear), ha venido efectuando una supervisión continua tanto de la población como del medioambiente de toda la zona afectada por el accidente. Esta vigilancia se ha venido realizando mediante un acuerdo, suscrito con el Gobierno de EE UU en 1966 que finalizó en 2009 y que financiaba parte de estas actividades. A partir de esa fecha las operaciones de supervisión se realizan únicamente con la financiación del CIEMAT, incluyendo tanto los recursos humanos como los medios materiales y las aportaciones económicas directas necesarias para ello.

Desde que se realizaron las tareas de remediación que siguieron al accidente, la situación socioeconómica del área afectada por el mismo ha sufrido un profundo cambio. Hasta la mitad de los años 1990 se llevaron a cabo una serie de actuaciones dirigidas a introducir la agricultura intensiva de regadío, construyéndose en la cabecera del valle donde impactó la bomba nº 2 (8,5 ha) dos grandes balsas que abastecen de agua para riego las parcelas cercanas. En este mismo valle,

fueron construidas varias terrazas para cultivo, lo que implicó importantes movimientos de tierra. De la misma forma, en la zona de impacto de la bomba nº 3 se adaptaron los terrenos para un mejor aprovechamiento agrícola (0,5 ha). También ha variado notablemente el estatus de otras áreas afectadas, que han pasado de estar clasificadas como terrenos rústicos, con y sin uso agrícola, a urbanizables.

En vista de la nueva situación, en continua y creciente expansión, con un desarrollo agrícola de alta tecnificación y con una demanda turística cada vez más elevada, se ha realizado una reevaluación del inventario de contaminación residual remanente tras el accidente, ya que este nuevo escenario podría llegar a traducirse en un cambio en la exposición radiológica de la población. Por ello, el CIEMAT, durante los años 1998-2002, realizó diferentes gestiones encaminadas a la expropiación forzosa de 10 ha de terreno y a la restricción preventiva de su uso.

Con el informe favorable del CSN, organismo competente en la protección radiológica y seguridad nuclear en España, que indicó los criterios de restricción de uso de los terrenos afectados [1] el Consejo de Ministros aprobó en 2004, el “Plan de Investigación Energética y Medioambiental en Materia de Vigilancia Radiológica en los terrenos de Palomares que requieren una especial vigilancia radiológica ambiental” (PIEM-VR) para cuyo desarrollo fue preciso, en septiembre de 2007 y como consecuencia de los análisis realizados por el CIEMAT, ocupar 30 ha adicionales, por lo que la zona de estudio ocupa actualmente una superficie total de 40 ha.

Esta monografía pretende resumir las actividades llevadas a cabo primero, por la JEN y luego por el CIEMAT, desde 1966 hasta la actualidad, plantear las actividades que actualmente están en marcha para intentar conseguir la restauración de los terrenos que aún se encuentran afectados, 46 años después del accidente.

Este documento describe el accidente y sus consecuencias, los acuerdos establecidos entre los gobiernos de España y los EE.UU. de América para paliar los efectos del accidente, los programas de vigilancia establecidos y su evolución temporal, la caracterización radiológica de la zona realizada por el CIEMAT, las revisiones llevadas a cabo por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Europea y, por último, el Plan Preliminar de rehabilitación de la zona.

2 EL ACCIDENTE Y SUS CONSECUENCIAS

De las cuatro bombas, caídas en la zona como consecuencia del accidente, la primera (W-1) se halló la noche del 17 de enero, en el lecho seco del río Almanzora, al este de Palomares y aproximadamente a 300 m de la costa. El lugar se denominó como “punto de impacto 1”. El paracaídas primario se encontró abierto y por tanto el arma sin haber sufrido daño, designándose como bomba número 1.

La bomba número 2 (W-2), cayó en un pequeño valle detrás del cementerio, aproximadamente a 1,7 km. al oeste del núcleo urbano, designándose el lugar como “punto de impacto 2”. Su paracaídas no funcionó por lo que la velocidad estimada de

caída fue de 118 m.s^{-1} , ocasionando el impacto un cráter de 6,6 m de diámetro y 2 m de profundidad.

Se produjo la detonación del explosivo convencional, fuego y la dispersión del material en forma de aerosol. Se localizó alrededor de las 9:30 h del 18 de enero con una parte del soporte de la bomba acoplado.

La bomba número 3 (W-3) cayó en una pequeña cañada en el límite este de Palomares designada como “punto de impacto 3”; en un lugar muy próximo a algunas viviendas. Fue localizada alrededor de las 10:30 h del 18 de enero. Su paracaídas de $4,88 \text{ m}^2$ se había desplegado, pero resultó dañado por lo que se calcula que cayó a una velocidad de 59 m.s^{-1} . El impacto produjo un cráter de 6 m de diámetro y 1 m de profundidad. Se cree que explotó alrededor del 10% del explosivo químico.

Como consecuencia de esta situación no se produjo ningún herido entre en los habitantes de Palomares. Sin embargo para las bombas 2 y 3, y como consecuencia del impacto con el suelo y de la explosión convencional, se produjo la fragmentación seguida de la oxidación del material de Uranio y Plutonio que constituían el material fisionable, se diseminó buena parte de los 9 kg del mismo en forma de óxidos de Pu, U y Am fundamentalmente.

El aerosol ocasionado por el impacto y fuego de la bomba 2 se dispersó a través de un pequeño valle, en ese momento sin cultivar.

La bomba número 4, cayó en el mar Mediterráneo. Fue localizada y recuperada intacta, el 7 de abril, 80 días después de la colisión, aproximadamente a 8 km de la costa, sin daños apreciables ni consecuencias radiológicas. Su paracaídas había funcionado correctamente [5]

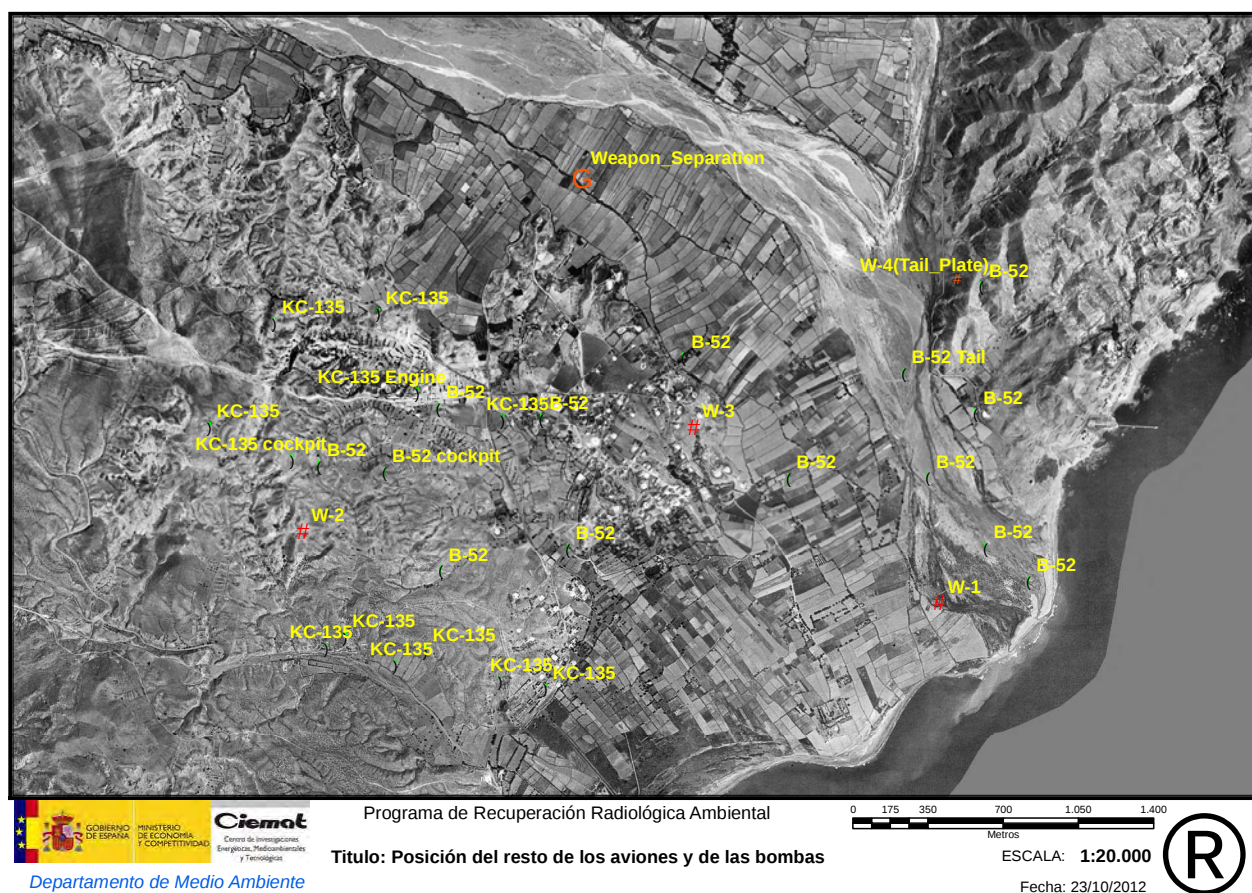


Figura 1: Posición de los restos del fuselaje de los aviones y bombas sobre un plano de 1956.

Inmediatamente después del accidente, las Fuerzas Armadas Norteamericanas identificaron la zona más afectada por la contaminación radiactiva, denominada 'Línea Cero' (Figura 2). Comprendía unas 220 ha desde Puerto Blanco (donde se encontró la bomba nº 2) hasta las laderas de Sierra Almagrera situadas junto al río Almanzora, donde cesó la búsqueda, ya que era una zona de difícil acceso deshabitada, y sin uso en aquella fecha.

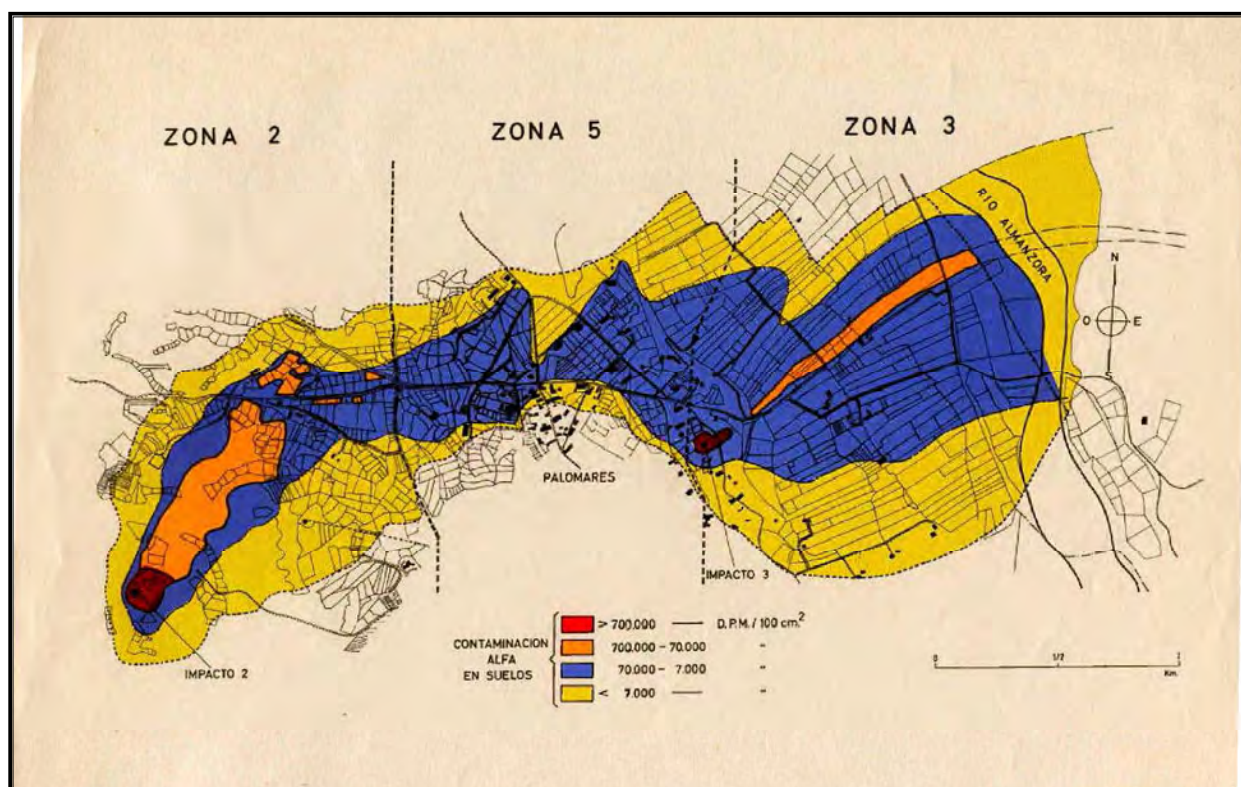


Figura 2: Plano que delimita la Línea Cero.

Seguidamente se iniciaron los trabajos de remediación sobre el suelo superficial y las cosechas. Trabajaron más de 740 personas, de las cuales 600 pertenecían a las Fuerzas Aéreas Americanas y se emplearon casi 100 vehículos, más de 20 máquinas pesadas y 33 navíos [6]



Figura 3: Detalle del B-52 y retirada de chatarra.

Los criterios de los niveles de contaminación de referencia fueron acordados con los técnicos de la Junta de Energía Nuclear (JEN), actual CIEMAT.



Figura 4. Labores de remedio del material superficial.

Las operaciones de limpieza y recuperación de las armas caídas supusieron que miembros de las fuerzas armadas de Estados Unidos, ayudados por personal del ejército y la guardia civil de España, retiraran la tierra contaminada de 25.000 m² de suelo junto con los restos vegetales. (Figuras 3 y 4).

Las operaciones costaron al ejército estadounidense 80 millones de dólares de la época, retirando en 4.810 bidones, 1.400 t de tierra y restos vegetales que fueron transportados por mar a los EEUU, donde quedaron depositados definitivamente en el centro de reprocesamiento de materiales nucleares Savannah River Facility, en Aiken (Carolina del Sur EEUU) el 8 de abril de 1966. (Figura 5).

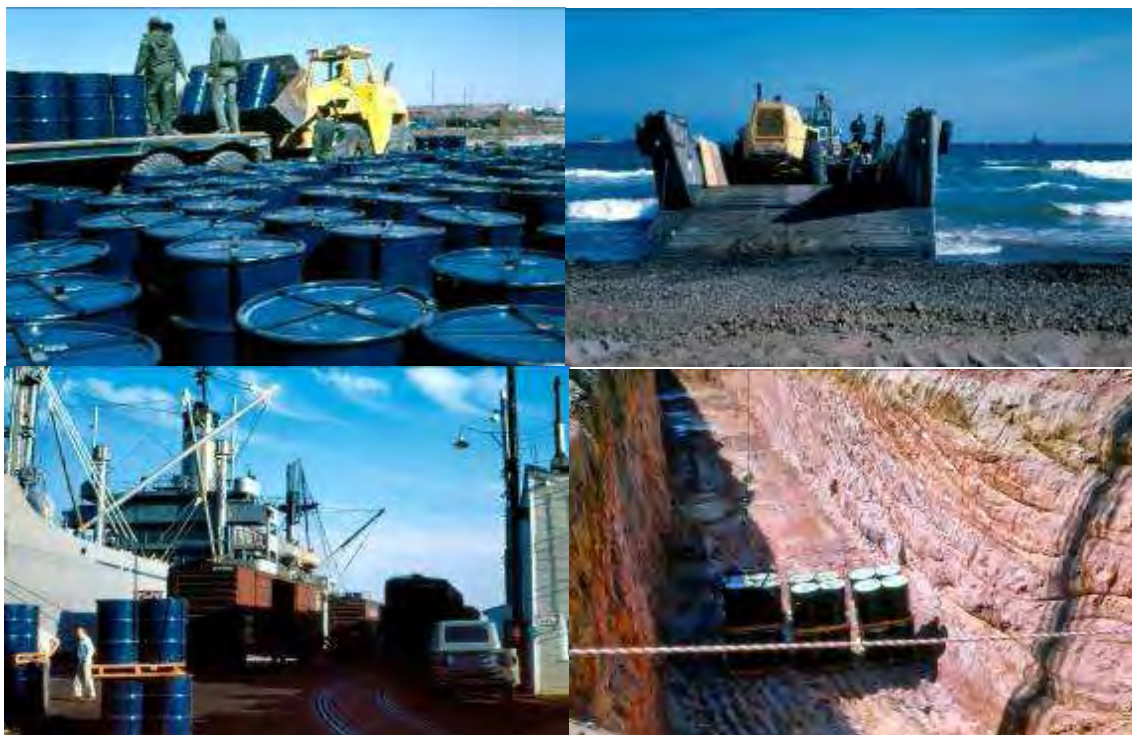


Figura 5: Retirada y almacenamiento definitivo en Savannah River

Finalizada esta intervención, ese mismo año se establecieron acuerdos entre el Departamento de Energía de los EE.UU. (DOE) y la JEN, dando comienzo el “Proyecto Indalo” cuyo objetivo era el seguimiento de la población potencialmente afectada y el análisis de la actividad residual de suelo, fauna y flora. La competencia de este Programa de Vigilancia, recayó inicialmente en la antigua JEN y más tarde en el CIEMAT, organismo científico de referencia en España en investigación en protección radiológica, que ha venido efectuando una supervisión continua de las personas y del medioambiente en toda la zona. Los acuerdos suscritos con el Gobierno de EE UU finalizaron en 2009. A partir de esta fecha las operaciones de supervisión citadas se realizan únicamente con el soporte económico del CIEMAT.

Desde su inicio, el Programa de Vigilancia ha consistido en la revisión del estado de salud y el control de la posible contaminación interna de aproximadamente 150 personas al año. En total 1.077 personas han sido controladas y se han realizado 5.029 exámenes médicos y de dosimetría interna por bioeliminación (análisis de la orina excretada en 24 h) [7][8][9][10]. Los resultados de los exámenes médicos (informados a cada persona examinada) no han mostrado ningún resultado que haga sospechar una morbilidad específicamente inducida por las radiaciones ionizantes [11].

En cuanto a la seguridad de los productos agrícolas de Palomares, desde 1967 se han controlado más de 9.500 muestras y se han realizado más de 12.500 análisis. La estimación de dosis anual por ingestión, para el periodo 1995-2010, es de ($0,006 \text{ mSv.año}^{-1}$), muy inferior al límite de dosis para el público (1 mSv.año^{-1}) establecido [12].

Durante los veinte años posteriores al accidente (1966-1986), a la vista de los resultados de la vigilancia radiológica llevada a cabo en Palomares y dada la escasa actividad agrícola y urbanística de la zona, no se consideró necesario adoptar medidas adicionales a las incluidas en el plan de vigilancia establecido.

En 1988, una vez creado el CSN y convertida la JEN en el actual CIEMAT, ambos organismos pidieron sendos informes jurídicos sobre sus respectivas competencias en relación con el accidente de Palomares acordándose, las siguientes responsabilidades:

CIEMAT:

1. Ejecución de los programas de vigilancia.
2. Evaluación de la situación radiológica.
3. Remisión de información periódicamente al CSN.

CSN:

1. Establecimiento de los criterios radiológicos.
2. Remisión de información sobre el resultado de los programas de vigilancia al Congreso y al Senado.

La explotación de las áreas afectadas había consistido durante muchos años en el cultivo esporádico en régimen de secano, con muy escasa producción. Esta actividad sufrió una importante transformación a finales de los años 80 como consecuencia de la construcción de dos balsas de almacenaje de agua para el riego en la cabecera del valle donde impactó la bomba nº 2 (8,5 ha). Esta construcción supuso importantes movimientos de tierras. La obra para la primera balsa se inició el 2 de abril de 1986 y se terminó en septiembre del mismo año. La segunda se inició el 18 de febrero de 1988 y se terminó el 15 de junio del mismo año. Las capacidades fueron de 151.600 m³ y 347.000 m³ respectivamente.

Igualmente en la zona de impacto de la bomba nº 3 se adaptaron los terrenos para un mejor aprovechamiento agrícola (0,5 ha).

En vista de la evolución del sector agrícola en la zona y las nuevas actividades socioeconómicas [13][15], se realizó una reevaluación del término fuente remanente, al considerarse que esta nueva situación podría llegar a suponer un cambio en la exposición radiológica de la población. Entre 1998 y 2002 se gestionó la expropiación forzosa de 10 ha y se restringió su uso de forma preventiva.

Las actuaciones del PIEM-VR, a desarrollar por el CIEMAT en los terrenos de Palomares (Almería) se declararon de interés general, lo que llevó implícita la declaración de utilidad pública a los efectos previstos en la Ley de Expropiación Forzosa.

En septiembre de 2007 y como consecuencia de los análisis realizados por el CIEMAT [17], se decidió ocupar 30 ha adicionales, por lo que la zona de estudio ocupa actualmente una superficie total de 40 ha (Figura 6).

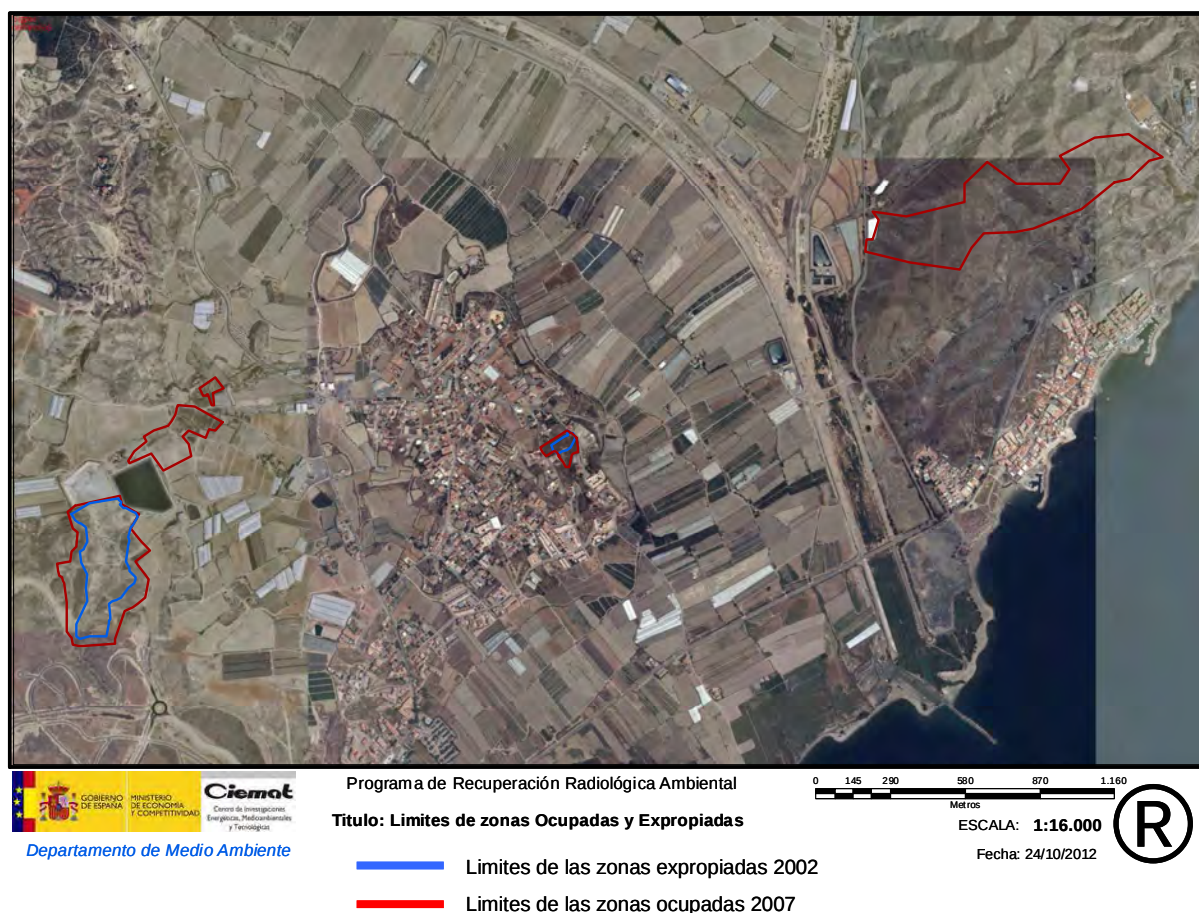


Figura 6: Delimitación de las zonas expropiadas en 2002 y ocupadas en 2007.

2.1 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA Y DISPERSIVA

Como consecuencia de la explosión que se registró a continuación de la colisión de los dos aviones, se produjo la dispersión de los restos del accidente en su caída a tierra. Las bombas, las piezas de los aviones y material incendiado cayeron a tierra distribuyéndose en el suelo según una combinación de su dirección inicial modificada por la explosión y por las condiciones meteorológicas del momento, particularmente la dirección e intensidad del viento.

Para determinar cuáles eran exactamente las condiciones meteorológicas del día 17 de enero de 1966, a las 10 horas locales, en el área de Palomares, se realizaron simulaciones meteorológicas con el Modelo de predicción atmosférica a corto plazo MM5 [18] y con modelo de dispersión Calmet-Calpuff .

El Modelo MM5 resuelve las ecuaciones dinámicas de la atmósfera mediante métodos numéricos y con una resolución mayor que los modelos Globales. Este modelo corresponde a la quinta generación del NCAR/Penn State Mesoscale Model, utilizado como herramienta por el NCAR y PSU, a partir de 1990.

Este modelo es capaz de realizar análisis de alta resolución, en los que se pueden apreciar los efectos locales debidos a la orografía y propiedades del suelo, como por ejemplo: brisas de mar y tierra, vientos de ladera y vientos de valle.

Para la obtención del campo de vientos en esta área se consideraron 5 dominios anidados. La representación de estos 5 dominios anidados se encuentra en la Figura 7. El dominio 5 corresponde a un área de 50 km x 50 km, resolución de 1 km y se encuentra centrado en la zona 2. Los datos meteorológicos utilizados para este estudio han sido obtenidos de la base de datos del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) concretamente los ERA-40.

El campo de vientos resultante de esta simulación desde las 8 a las 11 horas UTC se encuentra representado en la Figura 8.

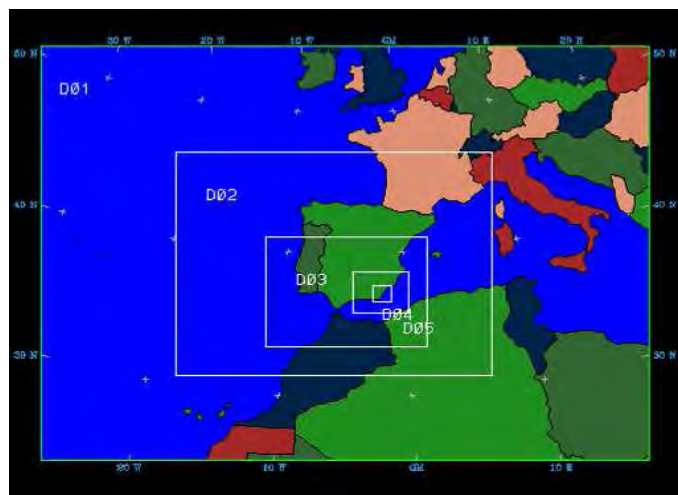


Figura 7: Selección de los 5 dominios anidados.

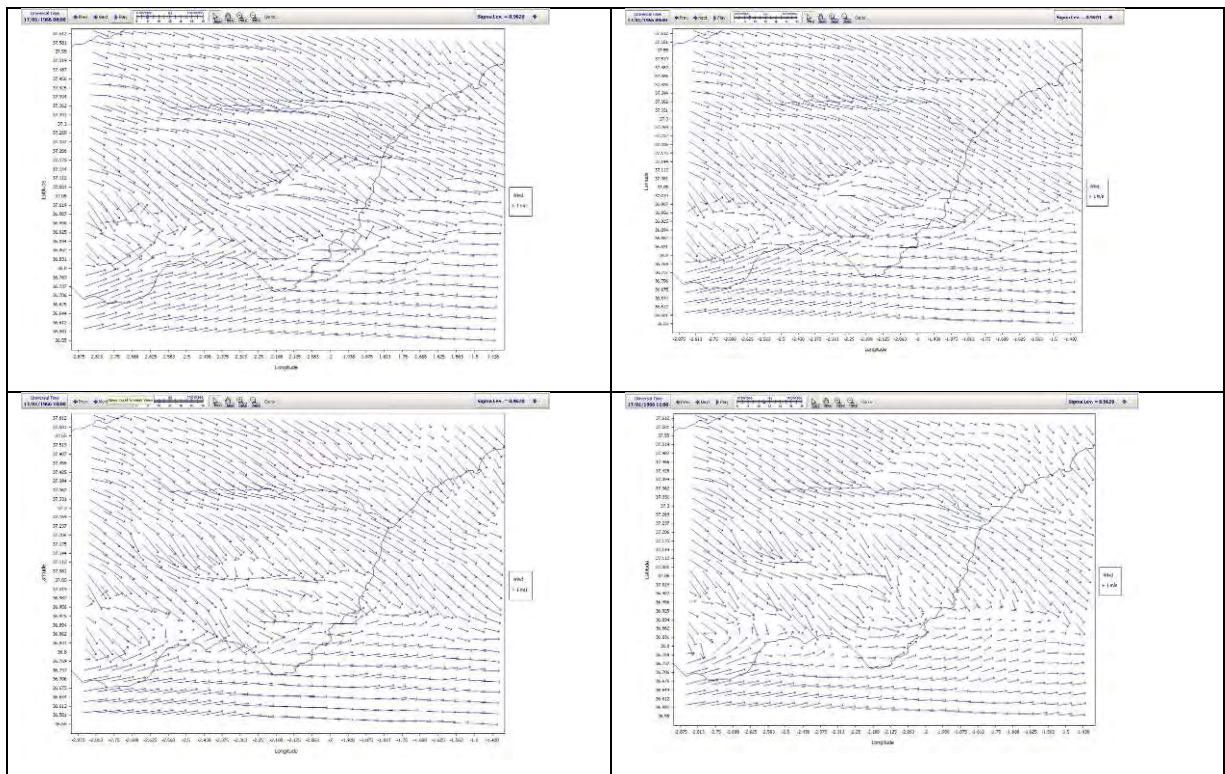


Figura 8: Representación del campo de vientos en el Dominio 5 desde la 8 a las 11 horas UTC

Para determinar la distribución espacial y temporal de las partículas emitidas en la Zona 2 como consecuencia del impacto y explosión de la bomba 2, se realizaron simulaciones con el modelo Calmet-Calpuff aprobado por la EPA (US Environmental Protection Agency).

Las simulaciones se realizaron siguiendo dos supuestos; en el primer caso una emisión puntual (Figura 9) y en el segundo una emisión lineal, (Figura 10). Los resultados obtenidos de ambas simulaciones mostraron que en ambos supuestos, el día 17 de enero de 1966 a las 10 horas UTC, caracterizado por vientos de moderados a fuertes y procedentes del Noroeste, el material particulado menor de 10 micras se dispersó hacia el Sudeste. En consecuencia las emisiones de material particulado resultado de la explosión de la bomba en la zona 2 no alcanzarían la zona 6.

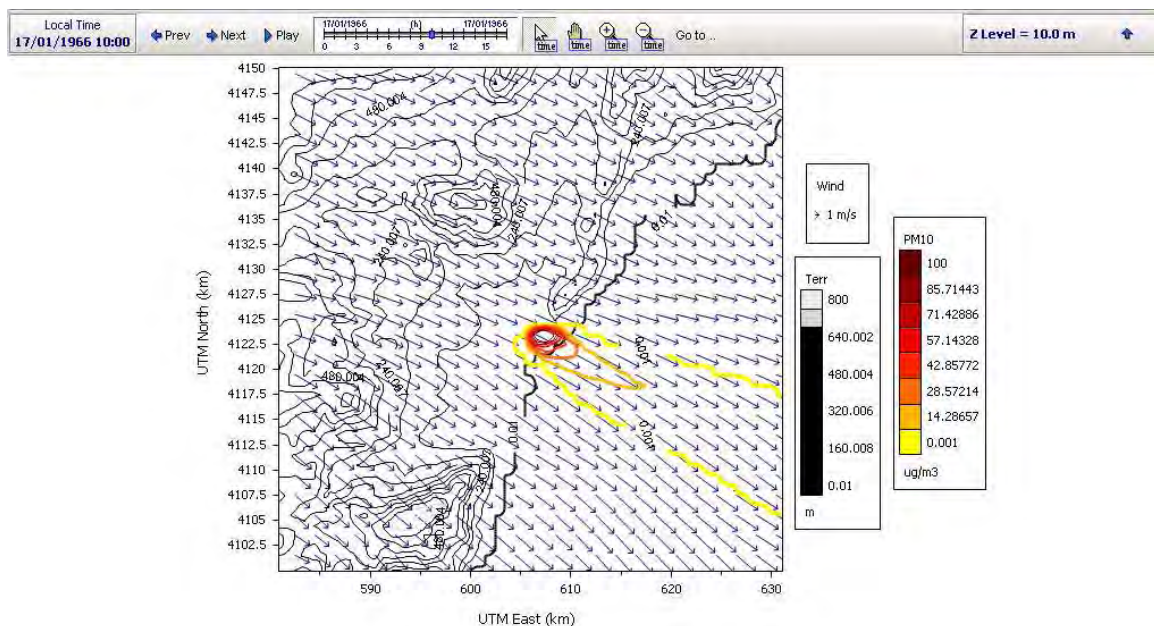


Figura 9: Distribución espacial del material particulado emitido en la zona de impacto 2 y considerando un foco puntual.

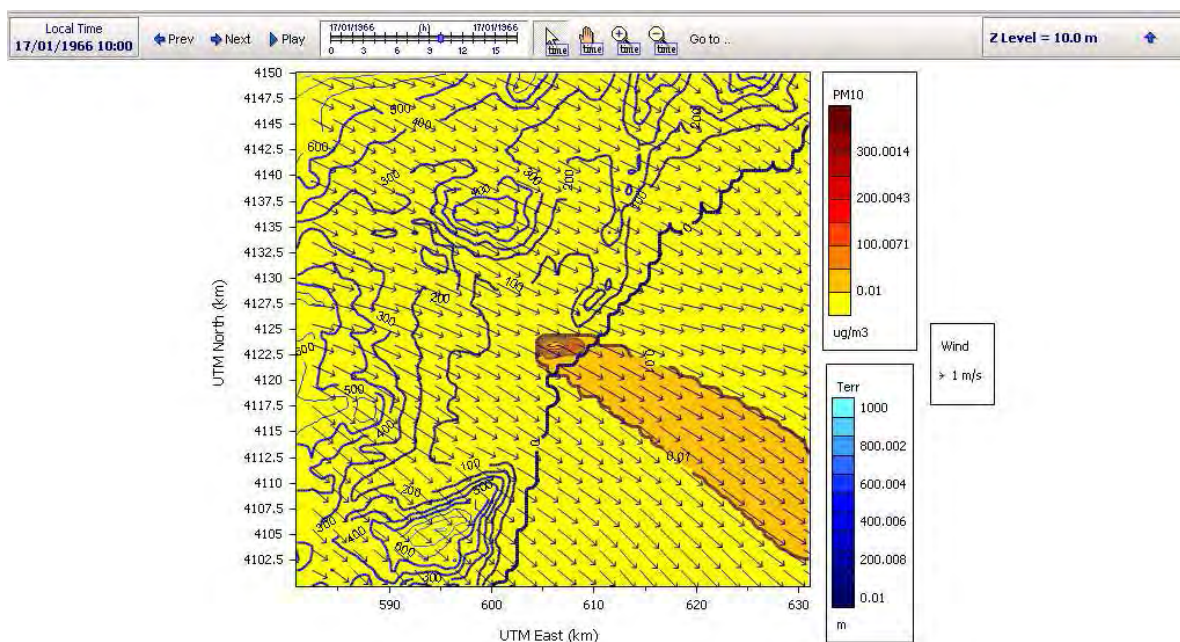


Figura 10: Distribución espacial del material particulado emitido en la zona de impacto 2 y considerando un foco lineal.

La distribución de las zonas contaminadas por el accidente, particularmente en lo que se refiere a la bomba número 2, no se corresponde con lo que se habría obtenido de ser el penacho de su explosión desde tierra el causante de la dispersión de contaminantes.

De acuerdo con los anteriores mapas de vientos y considerando la dirección de desplazamiento de los aviones y la distribución de las localizaciones donde se hallaron los objetos, las zonas contaminadas se adaptan mejor al supuesto de que la

contaminación se extendió mientras caían los restos incendiados, creando una banda de suelo más o menos paralela a la costa, que explicaría entre otras cosas la contaminación hallada en la Sierra Almagrera (zona 6).

3 ACUERDOS ESPAÑA-ESTADOS UNIDOS

La financiación y el marco de colaboración con Estados Unidos han variado a lo largo de los años, aunque la relación con los diferentes interlocutores norteamericanos siempre ha sido de cooperación científica.

Tras una primera limpieza efectuada en 1966, el gobierno de España y el de EEUU han venido colaborando en el seguimiento médico y dosimétrico de los habitantes de la zona y en la evolución de los niveles de contaminación residual en el ambiente.

El 25 de febrero de 1966, aproximadamente un mes después del accidente de Palomares, se firmó el Acuerdo Otero-Hall [19] y desde entonces hasta 2009, se han mantenido acuerdos con los Estados Unidos con los siguientes hitos.

3.1 ACUERDO OTERO-HALL (1966-1996)

TEXTO:

“De acuerdo con nuestro Convenio de Cooperación entre España y los Estados Unidos, relativo a los usos civiles de la energía atómica, deseo proponerle ampliemos nuestra colaboración en los campos de la Sanidad y la Seguridad. En consecuencia, en nombre de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos de América y de acuerdo con los pertinentes artículos de nuestro Acuerdo de Cooperación de 16 de agosto de 1957 y enmienda posterior, le sugiero investigar diversos aspectos relativos a la Sanidad y Seguridad de materiales fisiónables cuando éstos quedan libres en un área agrícola-rural.

Tan pronto como sea posible se iniciarán las investigaciones en colaboración en relación con el comportamiento fisiológico y ecológico del óxido de plutonio en una zona rural previamente contaminada y que haya sido descontaminada mediante los procedimientos y los límites de descontaminación mutuamente acordados. En detalle las investigaciones se referirán a los puntos que están indicados en el Anexo que acompaña a esta carta”.

3.2 APLICACIÓN DE LA DISPOSICIÓN (1997-2009)

TEXTO:

“Deseando continuar con los avances científicos-tecnológicos alcanzados en el seguimiento radiológico de los materiales fisionables liberados en el accidente de Palomares y considerando los beneficios que para la Humanidad aportaría el aumento del conocimiento científico de los efectos de la radiación sobre la salud y el medio ambiente y reconociendo, asimismo, que el Acuerdo de Cooperación Científica entre los Gobiernos de Estados Unidos de América y España, firmado el 10 de junio de 1994, suministraba un marco para la cooperación en estas áreas” [19]

El objetivo era establecer un marco de cooperación científica y tecnológica para el desarrollo de estudios radiológicos sobre la contaminación radiológica resultante de la liberación accidental de material fisionable en Palomares, y podrían incluir el seguimiento y la validación científica de las consecuencias de esta liberación sobre la salud y el medio ambiente”.

FORMAS DE COOPERACIÓN:

- a) Intercambio de información y de datos sobre actividades científicas y técnicas.
- b) Intercambios de científicos, ingenieros y otros especialistas.
- c) Visitas breves de los miembros de la dirección.
- d) Organización y participación en seminarios, mesas redondas y paneles de estudio.
- e) Intercambio y suministro de muestras, materiales, instrumentos y componentes para experimentos, ensayos y evaluación.
- f) Ejecución de estudios conjuntos. Otras formas de cooperación acordadas entre las partes.

3.3 PROYECTO DE ANEXO I (15/09/1997- 9/03/2005)

FORMAS DE COOPERACIÓN:

- a) Colaboración científica e intercambios de experiencia tecnológica y datos.
- b) Vigilancia medioambiental implicando control continuo y ejercicios de validaciones cruzadas de los niveles de plutonio y americio en suelo, aire, agua, vegetación y animales domésticos. Con énfasis especial en los riesgos asociados a la resuspensión y la reevaluación de la presencia de plutonio y americio en: (a) aradas hasta 30 cm en 1966; (b) áreas nuevas cultivadas y (c) áreas no limpiadas en el 17 de enero de 1966.

- c) Evaluación de la exposición a contaminación interna particularmente de los trabajadores agrarios mediante bioensayos para determinar Plutonio y Americio.
- d) Vigilancia médica periódica de la población de Palomares

3.4 PROYECTO DE ANEXO II (9/03/2006- 10/09/2007)

TEXTO:

“La realización de un estudio radiológico en tres dimensiones y un control final de las zonas afectadas en, y cerca de, las zonas de impacto de Palomares” [156].

COMPROMISOS:

- 1 - Participación en los gastos, principalmente personal y equipos.
- 2 - La asistencia del Lawrence Livermore National Laboratory/Water y del Environmental Program en la planificación, diseño y ejecución del programa de control.
- 3 - Acceso a los mapas de la región de Palomares vía satélite.
- 4 - Preparación de informes.
- 5 - Preparación de recomendaciones para establecer una estrategia general de limpieza.

3.5 PROYECTO DE ANEXO III (10/09/2007 – 30/09/2009)

En 2007 se firmó un acuerdo entre el CIEMAT y el DOE para realizar un mapa detallado de la contaminación existente, superficial y en profundidad [157].

OBLIGACIONES DE LAS PARTES:

- A) Colaboración científica e intercambios de experiencia tecnológica y datos.
- B) Vigilancia medioambiental implicando control continuo y ejercicios de validaciones cruzadas de los niveles de Plutonio y Americio en suelo, aire, agua, vegetación, animales domésticos, con énfasis especial en los riesgos asociados a la resuspensión y la reevaluación de la presencia de Plutonio y Americio.
- C) Evaluación de la exposición a contaminación interna por bioensayos de plutonio y americio.
- D) Vigilancia médica periódica de la población de Palomares.
- E) Cooperación para la finalización de un mapa tridimensional y el control final de las zonas afectadas en, y cerca de, las zonas del impacto de Palomares, identificadas como Zonas 2 y 3, así como la nueva Zona 6. El tiempo estimado sería aproximadamente de dos años.

En el caso de que se considere la necesidad de proceder a una limpieza inmediatamente posterior, el CIEMAT preparará las recomendaciones necesarias para alcanzar el objetivo de una limpieza total y final de la zona, tanto de superficie como subterránea.

Seis meses antes de la finalización de los trabajos, el DOE ayudará al CIEMAT a contactar con los representantes adecuados, con respecto a esas recomendaciones, del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

DESARROLLO Y SEGUIMIENTO:

Los trabajos se llevaron a cabo en colaboración y con cofinanciación del DOE. Los resultados del mapa radiológico tridimensional fueron presentados por el CIEMAT en el DOE en Washington en noviembre de 2008.

El 7 de julio de 2010, se celebró en el Departamento de Estado en Washington, una reunión de carácter informativo entre delegaciones de ambos países para conocer la situación de Palomares y la posición del Gobierno español en esta cuestión.

Esta reunión fue decisiva, ya que por primera vez, trascendía del ámbito puramente técnico del DOE, en el que había estado hasta ese momento, el problema de Palomares. Se involucraron los Departamentos de Defensa americano y el Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación español y se fijó también por primera vez, la posición española de forma clara y articulada, planteando, en particular, que la única solución definitiva posible es la retirada del suelo contaminado por parte de los EEUU.

Tras la reunión de Washington, se produjo un intercambio de notas que condujo a la celebración de un nuevo encuentro, del 22 al 25 de febrero de 2011, entre una delegación española y un equipo inter-agencias de los EEUU, en Madrid y Palomares, con el objetivo de continuar la discusión sobre el proceso de finalización del PRP.

Los miembros de ambas delegaciones visitaron los terrenos afectados, mantuvieron discusiones técnicas sobre el Plan de Rehabilitación de Palomares (PRP), ofrecieron orientación, asesoramiento y compartieron conocimientos, experiencias, buenas prácticas y lecciones aprendidas. Todo ello basado en sus experiencias en operaciones de rehabilitación medioambiental y buscando las vías de aplicación óptimas para concluir el PRP.

El 22 de marzo de 2011, el DOE remitió un documento de aportaciones técnicas al PRP, de acuerdo con el primer punto de la posición española.

El CIEMAT incorporó y envió al DOE, 25 de octubre de 2011, las contestaciones técnicas relativas a dichas aportaciones en la versión existente del PRP y se está a la espera de la contestación por las autoridades norteamericanas.

Tras diversos contactos a nivel diplomático, el tema se encuentra actualmente en manos del Consejo de Seguridad Nacional de los Estados Unidos y de sus máximas autoridades, pendientes de una respuesta a la posición española.

4 PROYECTO INDALO. PROGRAMAS DE VIGILANCIA

Desde 1966, el alcance los programas de vigilancia, aportaron mucha información, sobre la situación de Palomares, tanto desde el punto de vista ambiental como de la salud de la población [43][45][48][49][90][102][117][121][122][123][128]. Han seguido el esquema siguiente:

- 1 - **Seguimiento dosimétrico y sanitario del público:** Incluye reconocimientos médicos a un número aproximado de 150 personas al año y recogida de muestras de orina, de 24 h, sobre las que se realizan determinaciones radioquímicas del contenido de $^{239+240}\text{Pu}$ y ^{241}Am .
- 2 - **Programa de vigilancia radiológica ambiental:** con un alcance variable en función de los resultados obtenidos y situaciones presentadas, tanto en el tipo de muestras, lugares y frecuencias de su recogida, como en la extensión de la zona. También han variado los tipos de análisis realizados, analizándose inicialmente la concentración de actividad alfa total e incorporándose posteriormente determinaciones radioquímicas del contenido de $^{239+240}\text{Pu}$ y ^{241}Am .

El Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental contempla el control de los siguientes indicadores:

SUELOS:

El control radiológico rutinario de suelos formó parte del «Programa de Vigilancia Radiológica de Palomares» hasta el año 2007.

AEROSOLES:

El control de los aerosoles [91][95][99][124][125][127], se realiza mediante tres estaciones de muestreo continuo de aire con equipos de alto flujo, que se mantienen en continuo en dos de las estaciones y con interrupciones o cambios en la otra. La localización de dichas estaciones [14] responde a los niveles de inhalación representativos de las zonas urbanas y rurales (prácticas agrícolas).

VEGETACIÓN:

Incluye tanto vegetación silvestre como cultivada, realizándose análisis de diferentes partes de la planta (comestibles y otras) o tras diferentes procesos (lavado, pelado, etc.) para evaluar la distribución de la contaminación y su potencial incidencia sobre la población. El tipo y número de muestras de cultivos a obtener responde a criterios de representatividad en cuanto a nivel de producción y consumo. La localización de los puntos de muestreo puede variar en función del área cultivada en cada época, aunque siempre se atiende prioritariamente a aquellas zonas con posible influencia de contaminación aérea. La frecuencia de muestreo depende de la época de recogida de las cosechas principales (generalmente, primavera y otoño) y del número de las mismas por año.

PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL:

Incluye, de manera más esporádica que el resto, muestras de leche de cabra y vaca y ocasionalmente carne de oveja, cabra o gasterópodos por sus características como bioindicadores [126].

Adicionalmente, se han realizado estudios para evaluar la transferencia al medio marino de la contaminación dispersada por el accidente. Se realizaron medidas de plutonio básicamente en sedimentos pero también en agua y biota, peces y crustáceos [165].

4.1 EVOLUCIÓN

En octubre de 2001 el CSN tuvo noticia que se estaban produciendo cambios en la zona de Palomares que podían conducir a una utilización extensiva e intensiva de los suelos, dando lugar a movimientos de terrenos radiológicamente contaminados. Los últimos estudios realizados ponían de manifiesto además que la contaminación residual era superior a la estimada inicialmente.

Ante esta situación, el CSN realizó una evaluación detallada de toda la información disponible sobre la situación radiológica de Palomares. Se definieron unos criterios radiológicos a fin de determinar la necesidad de controlar o restringir el uso de los terrenos afectados, teniendo en cuenta la normativa de protección radiológica y la práctica internacional.

Los criterios, que se exponen en el apartado siguiente, tienen como objetivo último que el impacto radiológico a la población no supere una dosis media anual de 1 mSv como consecuencia de la exposición a la contaminación remanente.

Como resultado de la aplicación de estos criterios, se recomendó establecer restricciones de uso en determinadas zonas (Figura 6) y desarrollar un plan especial para la caracterización precisa de la situación radiológica y su posible restauración.

Con fecha 4 de diciembre de 2003, el CIEMAT remitió al CSN el documento *“Plan de investigación a desarrollar por el CIEMAT en los terrenos de Palomares que requieren una especial vigilancia radiológica ambiental”* (PIEM-VR), solicitando informe favorable del CSN. El plan propuesto tenía en cuenta los criterios radiológicos definidos por el CSN.

El CSN, en su reunión de 10 de diciembre de 2003, informó favorablemente el Plan de investigación propuesto por el CIEMAT para la vigilancia radiológica en el área de Palomares.

Posteriormente, la Ley 62/2003, de 30 de diciembre de 2003, de medidas fiscales, administrativas y de orden social, para la consecución de los objetivos de política económica de la Ley de presupuestos generales del Estado para el año 2004,

incluyó, en el artículo 130, disposiciones relativas a un Plan de Investigación Energética y Medioambiental en Materia de Vigilancia Radiológica.

Este artículo requería que, en el plazo de seis meses, el Gobierno aprobase un Plan de Investigación Energética y Medioambiental a llevar a cabo por el CIEMAT en los terrenos que se consideraban objeto de especial vigilancia radiológica ambiental en la zona de Palomares. El Plan debía ser previamente informado por el CSN, las actuaciones correspondientes se declaraban de interés general y llevaban implícita la declaración de utilidad pública a los efectos previstos en la Ley de Expropiación Forzosa.

Con fecha 15 de marzo de 2004, el CIEMAT remitió al Secretario General de Política Científica del Ministerio de Ciencia y Tecnología, el Plan a acometer en los terrenos considerados de especial vigilancia radiológica ambiental, en consonancia con lo dispuesto en el artículo 130 de la Ley 62/2003 citado, indicando expresamente que dicho Plan había sido previamente informado favorablemente por el CSN en su reunión de 10 de diciembre de 2003. El Gobierno lo aprobó el 17 de diciembre de 2004.

Durante el año 2005 se desarrolló el procedimiento de expropiación de los terrenos afectados y en 2006 el CIEMAT ocupó las fincas expropiadas, iniciando el Plan de Investigación con la caracterización radiológica superficial y en profundidad.



Figura 11: Detalle del Vallado en Zonas 6, 2 y 3

El CIEMAT, considerando la información radiológica obtenida de esta caracterización, la reactivación de los sectores agrícolas y urbanísticos y las actividades necesarias para la ejecución del Plan de Investigación, presentó una propuesta complementaria de ocupación temporal de algunas zonas limítrofes a las ya expropiadas, que fue informada favorablemente por el CSN el 2 de julio de 2007.

Una vez expropiados los terrenos y autorizada la ocupación de los restantes, el CIEMAT delimitó con una valla todos ellos (Figura 11) para impedir el acceso y colocó unos carteles informativos.

A partir de los resultados de la caracterización radiológica, el CSN remitió un escrito al CIEMAT indicándole que notificará a las autoridades competentes en ordenación del territorio las zonas en las que aplican las restricciones de uso y su localización geográfica exacta, al objeto de que se tuvieran en cuenta en la planificación territorial de su competencia.

En marzo de 2009, el CIEMAT editó un informe [4] con los resultados de la caracterización radiológica actualizada, la identificación de los terrenos afectados con valores superiores a los criterios de restricción de uso y la evaluación del volumen de tierras contaminadas. Este informe se remitió al CSN y al DOE.

El CSN realizó un análisis del informe final de caracterización radiológica concluido, solicitando al CIEMAT la elaboración de un Plan específico para la Restauración de la zona afectada, incluyendo los objetivos finales de restauración. El CIEMAT presentó en 2010 al CSN, el Proyecto Preliminar de Rehabilitación con las líneas generales para retirar la contaminación radiactiva de los suelos de Palomares, siendo apreciado favorablemente con el correspondiente condicionado.

5 MAPA RADIOLÓGICO TRIDIMENSIONAL

El PIEM-VR, a desarrollar por el CIEMAT, tenía como objetivo fundamental evaluar el término fuente residual en las zonas afectadas para así poder establecer el inventario radiológico actual y su representación en tres dimensiones (3D) [21] permitiendo una correcta selección de las posibles estrategias de recuperación ambiental. Esta tarea es responsabilidad de la Unidad de Recuperación de Terrenos Radiológicamente Contaminados URTRC (actualmente RERA), adscrita al Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT.

Para llevar a cabo el Mapa Radiológico Tridimensional, se aplicó el “Manual de Protección Radiológica para el Plan de Investigación Energética y Medioambiental en Materia de Vigilancia Radiológica en Palomares” [96] aceptado por el CSN.

Como consecuencia de los resultados obtenidos en la caracterización de suelo superficial extensiva en 660 ha, (recorridos a pie sobre una malla de 25x25 m y detallada en 40 ha, con recorridos a pie sobre una malla de 1x1 m el 28 de septiembre de 2007), el Consejo de Ministros aprobó, tras el informe favorable del CSN, de 2 de julio de 2007, una ampliación del alcance de PIEM-VR a 30 ha pertenecientes a las fincas colindantes de las ya expropiadas en las Zonas 2 y 3 y a

los terrenos afectados en Sierra Almagrera (Zona 6). Los progresos alcanzados en cada semestre fueron puntualmente reportados al CSN.

Los resultados finales obtenidos en la caracterización radiológica tridimensional (3D) de los suelos de Palomares, concluyen con la estimación del volumen de tierras afectado en función de los criterios establecidos de restricción de uso de los terrenos

5.1 CRITERIOS DE RESTRICCIÓN DE USO DE SUELOS

Considerando la normativa de protección radiológica internacional aplicada a la recuperación de terrenos contaminados, el CSN estableció en 2003 y ratificó en 2007 y 2008 los siguientes criterios para determinar las restricciones de uso de los terrenos de Palomares [144]:

- Restricción total para las actividades en los terrenos que supongan un nivel de dosis residual igual o superior a 5 mSv.a⁻¹. La concentración derivada de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu de esta dosis es 25 Bq.g⁻¹.
- Restricción parcial y realización de estudios adicionales para las actividades que puedan dar lugar a una dosis residual igual o superior a 1 mSv.a⁻¹. La concentración derivada de ²³⁹⁺²⁴⁰Pu de esta dosis es 5 Bq.g⁻¹.

Estos criterios pueden expresarse [77] en términos de la concentración de ²⁴¹Am asumiendo como aproximadamente constantes las relaciones isotópicas, actualizadas mediante el análisis de muestras de suelo.

$$f(^{241}\text{Am}) = \frac{A(^{241}\text{Am})}{A(^{239+240}\text{Pu})} \quad f(^{241}\text{Pu}) = \frac{A(^{241}\text{Pu})}{A(^{239+240}\text{Pu})} \quad f(^{238}\text{Pu}) = \frac{A(^{238}\text{Pu})}{A(^{239+240}\text{Pu})}$$

$$\frac{A(^{241}\text{Am})}{CR(^{241}\text{Am})} + \frac{A(^{239+240}\text{Pu})}{CR(^{239+240}\text{Pu})} + \frac{A(^{238}\text{Pu})}{CR(^{238}\text{Pu})} + \frac{A(^{241}\text{Pu})}{CR(^{241}\text{Pu})} \leq 1 \quad [1]$$

Los valores de “f” (Relación isotópica con el ²⁴¹Am (2008)) y CR (Criterio de restricción parcial y total) para cada radionucleido se muestran en la Tabla 1.

Radionucleido (t _{1/2} año)	f	CR uso parcial (Bq.g ⁻¹)	CR uso total (Bq.g ⁻¹)
²³⁹ Pu(24.110)+ ²⁴⁰ Pu (6.569)	4	5	25
²⁴¹ Am (432,2)	1	5	25
²⁴¹ Pu (14,4)	3	500	2.500
²³⁸ Pu (87,5)	0,1	5	25

Tabla 1: Radionucleidos presentes en los suelos.

Introduciendo los valores de la Tabla 1 en [1] se obtienen los criterios de restricción de uso en términos de la concentración de ²⁴¹Am considerando la presencia conjunta de los isótopos de Plutonio y Americio en el término fuente:

- **RESTRICCIÓN TOTAL** para las actividades en los terrenos que supongan un nivel de dosis residual igual o superior a 5 mSv.a⁻¹. La concentración derivada de ²⁴¹Am de esta dosis es 5 Bq.g⁻¹, considerando la presencia conjunta de isótopos de americio y plutonio en las relaciones de la Tabla 1.
- **RESTRICCIÓN PARCIAL Y REALIZACION DE ESTUDIOS ADICIONALES** para las actividades en los terrenos que supongan un nivel de dosis residual igual o superior a 1 mSv.a⁻¹. La concentración derivada de ²⁴¹Am de esta dosis es 1 Bq.g⁻¹, considerando la presencia conjunta de isótopos de americio y plutonio en las relaciones de la Tabla 1.

Estos criterios para el uso de los terrenos han sido utilizados para la visualización de los resultados de las caracterizaciones radiológicas de suelo superficial según el siguiente código de colores:

- **VERDE** (Sin restricción): Concentración de ²⁴¹Am en los primeros 15 cm de suelo es inferior a 1 Bq.g⁻¹.
- **AMARILLO** (Restricción parcial): Concentración de ²⁴¹Am en los primeros 15 cm de suelo está en el rango 1-5 Bq.g⁻¹.
- **ROJO** (Restricción total): Concentración de ²⁴¹Am en los primeros 15 cm de suelo es superior a 5 Bq.g⁻¹.

5.2 PLAN DE MEDIDAS

El término fuente esperable en la actualidad con implicaciones radiológicas debido al accidente¹ se compone de isótopos de Plutonio (²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu y ²⁴¹Pu) y

¹ No se dispone de información fiable sobre la presencia de U en las bombas ni de su enriquecimiento en ²³⁵U. Sin embargo, debido a que la actividad específica de este isótopo es 5 órdenes de magnitud inferior, la concentración de actividad esperable de ²³⁵U es mucho menor y también lo será su impacto radiológico.

Americio (^{241}Am) [130][131]. Dado que el ^{241}Pu es un emisor beta y que el resto de isótopos de Plutonio y Americio [77] son emisores alfa y de Rayos-X de baja energía (< 20 keV), sus determinaciones requieren métodos radioquímicos, espectrometrías alfa y beta prolongadas y costosas. Sin embargo, el ^{241}Am también emite fotones de 59,5 keV en probabilidad apreciable (36 %) que son detectables en tiempo real con instrumentación específica. Los resultados preliminares en las muestras de suelos analizadas en el PIEM-VR [130] mostraron la relación aproximadamente constante entre los isótopos $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am} \approx 5$, por lo que se pudieron emplear las medidas de concentraciones de ^{241}Am como vector para determinar el inventario completo del término fuente.

Para ello la RERA ha desarrollado una técnica de medida de dicha relación basada en la espectrometría gamma de fotones de baja energía que, tras ser validada frente a métodos radioquímicos de cuatro laboratorios colaboradores independientes, proporcionó una relación $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am} \approx 4$.

En el año 2006 la RERA elaboró una propuesta para la caracterización detallada del contenido de ^{241}Am en suelo superficial (primeros 15 cm) que ha permitido actualizar la información radiológica del área de Palomares en el plazo de un año. El plan de medidas incluyó la realización de medidas dinámicas (barridos) y estáticas, así como la toma de muestras inalteradas de suelo superficial y su análisis por espectrometría gamma.

La propuesta de la caracterización radiológica del suelo superficial de Palomares se planteó en dos etapas:

CARACTERIZACIÓN EXTENSIVA:

Comprendió aproximadamente 660 ha del área global de Palomares y Villaricos, incluyendo las 230 ha que fueron definidas como la 'Línea Cero de contaminación inicial' por los Estados Unidos en 1966. Se desarrolló mediante recorridos a pie sobre una malla de 25 x 25 m, y puso de manifiesto la existencia de contaminación en 20 ha situadas en las proximidades de los puntos de impacto de las bombas nº 2 y 3 (zonas 2 y 3), en unas parcelas al Norte de la zona 2, separadas de ésta por las balsas de riego (Zona 2-bis) y en una franja de 20 ha en Sierra Almagrera (Zona 6).

CARACTERIZACIÓN DETALLADA:

Comprendió 40 ha de las zonas 2, 2-bis, 3 y 6 identificadas como afectadas en la caracterización extensiva. Se desarrolló mediante recorridos a pie sobre una malla de 1 x 1 m en las zonas 2 y 3, en tanto que en la zona 6 se efectuaron los recorridos que fueron accesibles debido a las dificultades que presenta su orografía.

La determinación de la profundidad de la contaminación se efectuó mediante el análisis de muestras inalteradas de tierras provenientes tanto de las muestras de suelo superficial (0-15 cm) como de los testigos de sondeos practicados en las zonas 2, 2-bis, 3 y 6 con profundidades comprendidas entre 0 y 6 m.

A partir de las muestras inalteradas de suelo superficial y de testigos de los sondeos, se prepararon y midieron muestras delgadas que permitieron la determinación de la

relación $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ mediante espectrometría gamma de baja energía (LEPS), método no destructivo y alternativo a los métodos radioquímicos habituales y que aumenta considerablemente la capacidad del proceso de muestras.

5.2.1 MEDIDAS DINÁMICAS

Las medidas dinámicas o barridos fueron efectuados con el sistema DINARAD, diseñado por la RERA que se compone de los siguientes elementos:

- Detector FIDLER específicamente diseñado para la detección de fotones de baja energía (<80 keV) típicos de transuránidos como Am y Pu.
- Electrónicas digitales portátiles de última generación que permiten la alimentación y control de los detectores vía USB.
- Sistema de posicionamiento geográfico por satélite GSBAS con precisión submétrica en tiempo real, modelo SF-2050 de NavCom con suscripción al servicio Starfire®.
- Ordenador personal portátil.
- Programa de espectrometría gamma Genie 2000 para la configuración de detectores, adquisición de datos y su análisis.
- Programa DINARAD desarrollado por la RERA, que permite la adquisición y registro conjuntos de las medidas radiológicas y geográficas en tiempo real.

Los detectores se montaron en un soporte regulable en altura y los componentes se dispusieron en una mochila de modo que fueran portados por una sola persona o en un carro especialmente adaptado para las medidas en grandes áreas (Figura 12).



Figura 12: Equipo DINARAD, portátil y montado en carrito.

El detector FIDLER se configuró y calibró para evaluar la concentración de actividad de ^{241}Am en los primeros 15 cm de suelo, asumiendo una concentración homogénea en dicho espesor.

Los barridos se efectuaron recorriendo a pie los terrenos a estudiar manteniendo los detectores a menos de 10 cm del suelo, avanzando con una velocidad aproximada de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. En estas condiciones, la Concentración de Actividad Mínima Detectable (CAMD) de ^{241}Am en los primeros 15 cm de suelo es de $0,2\text{--}0,3 \text{ Bq.g}^{-1}$.

La incertidumbre típica en la posición geográfica en cada punto de medida fue inferior a 0,5 m.

La separación entre líneas paralelas recorridas fue de 25 m en la caracterización extensiva y de 1 m en la detallada. Si bien en este caso la separación era mayor cuando la orografía no permitía un mejor acceso (laderas, barrancos, cumbreras, etc).

Los resultados obtenidos se registraron automáticamente y en tiempo real en un ordenador portátil. Posteriormente se examinaron diariamente para controlar su calidad y se almacenaron en bases de datos compatibles con sistemas de información geográfica (SIG) para su tratamiento posterior junto a los siguientes datos, para cada medida efectuada:

- Fecha y hora.
- Coordenadas UTM en datum WGS 84 y altitud.
- Concentración de actividad ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .
- Incertidumbre de la concentración de actividad ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .
- CAMD ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .

5.2.2 MEDIDAS ESTÁTICAS

Las medidas estáticas se efectuaron como parte de la caracterización detallada y una vez concluidas las medidas dinámicas. En función de esos resultados previos, se seleccionaron los puntos donde se efectuaron estas medidas, que en cada punto consistieron en:

- Medida durante 60 s de la tasa de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ en contacto y a 1 m del terreno. Se empleó un monitor de tasa de dosis Atomtex 1123 (detector de plástico de centelleo equivalente a tejido), cuya respuesta con la energía para fotones de 60 keV es igual a 1.
- Adquisición de un espectro gamma con un detector FIDLER durante 300 s, lo que permite reducir la CAMD de ^{241}Am en un factor 10 respecto a las medidas dinámicas ($0,01 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Toma de muestras inalteradas de suelo correspondientes a las profundidades 0-5; 5-10 y 10-15 cm.
- Posición geográfica con el sistema GSBAS.

Los resultados se registraron automáticamente y en tiempo real en un ordenador portátil con la ayuda del programa ESTARAD desarrollado por la RERA. Posteriormente se examinaron diariamente para controlar su calidad y se almacenaron en bases de datos compatibles con sistemas de información geográfica (SIG) para su tratamiento posterior con la siguiente información para cada medida efectuada:

- Fecha y hora UTC.
- Coordenadas UTM en datum WGS 84 y altitud.
- Tasas de dosis ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) en contacto y a 1 m de altura.
- Concentración de actividad ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .
- Incertidumbre de la concentración de actividad ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .
- CAMD ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) de ^{241}Am .
- Identificación de las muestras inalteradas de suelo.

5.2.3 EVALUACIÓN POR GEORRADAR DEL SUBSUELO

Durante las operaciones de restauración que se realizaron después del accidente de 1966, se seleccionó una zona próxima al cráter de la bomba 2 para depositar, en trincheras las tierras y los cultivos con lecturas >7.000 cpm y < 60.000 cpm.

Estas trincheras de $764 \rightarrow 1.000$ m³ de capacidad, se construyeron como zanja rectangular de 30 m de longitud, por 10 m de ancho y de $3 \rightarrow 5$ de profundidad.

No se disponía de información precisa sobre sus ubicaciones exactas ni de su contenido, por lo que se evaluó su localización mediante GEORRADAR que permitía conocer la posición y su contenido sin necesidad de afectar el suelo.

El sistema GEORRADAR (GPR) (Figura 13) está basado en la propagación de las ondas electromagnéticas en el suelo localizando y cuantificando cambios en sus características eléctricas y magnéticas.



Figura 13: Detalle del equipo GEORRADAR y Radagrama.

La resolución, próxima a los centímetros, es más alta en la proyección de la imagen del subsuelo que cualquier método geofísico, bajo condiciones apropiadas. La profundidad varía: < 1 m $\rightarrow$ 5,4 m dependiendo de las características de los materiales.

Cuanto mayor es la frecuencia de la antena empleada, mejor es la resolución, y menor la profundidad de penetración. El compromiso entre ambos parámetros es difícil y por eso se emplean al mismo tiempo varias antenas de diversos rangos de frecuencia.

La inspección se realiza mediante radagramas longitudinales y perpendiculares con 1 m de separación, para localizar las estructuras generales y efectuar posteriormente cuadrículas con antena de alta definición (900 MHz) en las anomalías magnéticas asociables a fosas de la tipología buscada.

El GEORRADAR no es específicamente un detector de metales, pero es altamente sensible a los objetos metálicos que estén situados bajo su radio de acción debido a la diferencia de constante dieléctrica entre los elementos “geológicos” del subsuelo y las partículas metálicas. Si un objeto metálico se encuentra bajo la antena del radar, construye un reflector muy potente que apantalla el resto de la información útil por lo que es práctica normalizada efectuar previamente a los radagramas un somero reconocimiento del terreno mediante detectores de metales superficiales, y de esta manera retirar esos elementos conflictivos.

El detector de metales fue empleado preferentemente en la zona 3 debido al hallazgo en el pasado de objetos metálicos que se identificaron como fragmentos de la bomba número 3. (Figura 14). Las inspecciones revelaron una decena de puntos en la zona 3 con presencia de objetos metálicos con algún mínimo cambio en los recuentos de los FIDLER o en la tasa de dosis. Las inspecciones en la zona 2 no han sido sistemáticas y sólo se han detectado algunos objetos de manera muy esporádica y que no mostraban anomalías radiológicas por lo que se atribuyeron a restos de maquinaria agrícola.



Figura 14: Detalle de un fragmento localizado en la Zona 3.

Las inspecciones se hicieron con un equipo GEORRADAR GSSI SIR-3000 con antenas de 400 y 900 MHz para el reconocimiento de los terrenos que permiten caracterizar profundidades de hasta 10 m [133]. Las medidas no indicaron anomalías reseñables en el subsuelo de la zona 3.

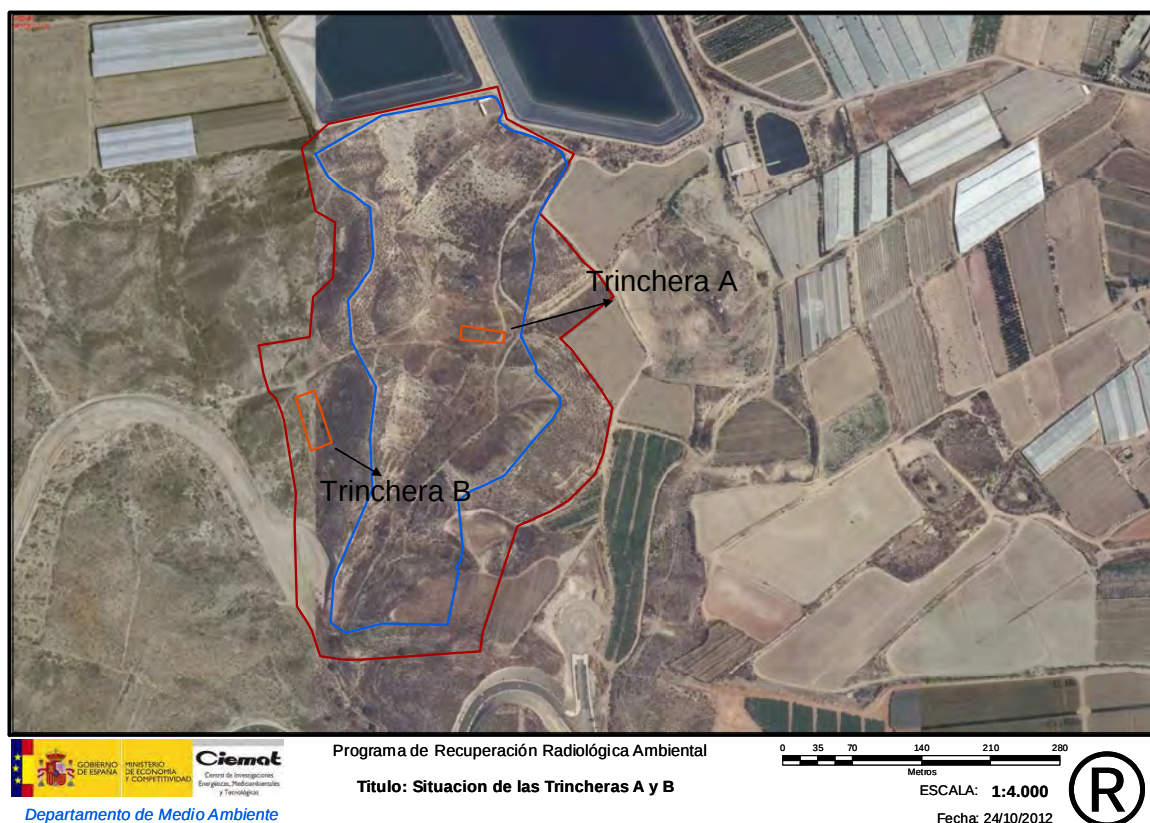


Figura 15: Situación de las trincheras A y B

La inspección por GEORRADAR del subsuelo de la zona 2 ha permitido localizar las posibles ubicaciones de dos trincheras (Figura 15) que fueron utilizadas en la remediación del 1966 y que podrían contener diversos materiales, desde vegetales hasta pequeños objetos metálicos, con distintos grados de contaminación con las siguientes características:

- Trinchera A (Figura 16): Situada en la zona media de los terrenos expropiados y vallados de la zona 2, de 400 m² de sección y unos 2,5 m de profundidad media, lo que supone un volumen aproximado de 1.000 m³.

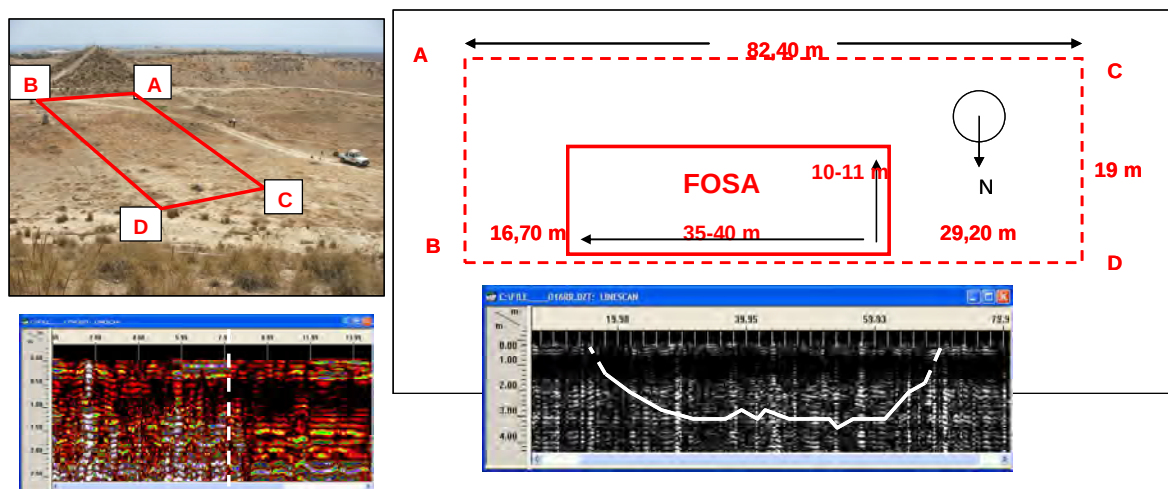


Figura 16: Detalle de la trinchera A y radagrama.

- Trinchera B (Figura 17): Situada al Oeste del vallado de la zona 2, de 1.000 m² de sección y con profundidad variable desde 5 m de profundidad media hasta la superficie (construcción en rampa), que supone un volumen aproximado de 3.000 m³.

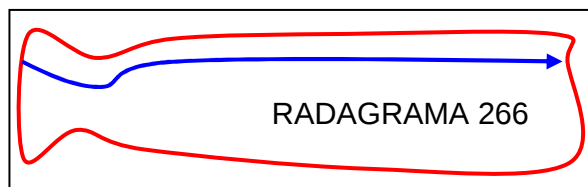
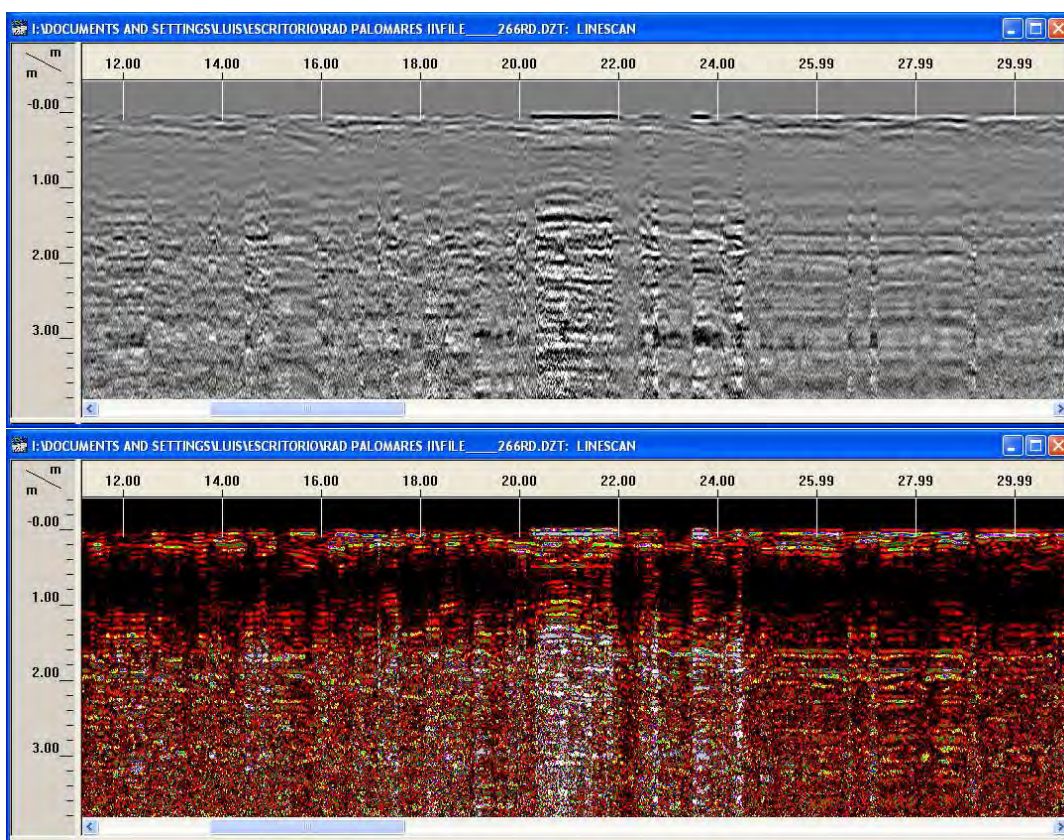


Figura 17: Detalle de la Trinchera B y radagrama.

5.2.4 ANÁLISIS DE MUESTRAS INALTERADAS POR ESPECTROMETRÍA GAMMA

La geometría de las muestras consiste en un anillo cilíndrico de acero inoxidable de dimensiones interiores: 50 mm de altura por 51 mm de diámetro, con una capacidad nominal de $100,0 \pm 0,5$ ml. Cada anillo tiene troquelado verticalmente en su exterior, un número de identificación y que permite distinguir la parte superior (S) e inferior (I) de la muestra. En todo caso, se puede distinguir la parte I de cada anillo porque es la que está biselada. Los anillos disponen de tapas de polietileno que permiten cerrar el recipiente una vez tomada la muestra.

Cada anillo con sus tapas se taró individualmente antes de la recogida de las muestras. Tras limpiar cuidadosamente su exterior, las muestras recogidas fueron pesadas y recubiertas con un film plástico que precintó la muestra y evitó la posible pérdida de material.

Las muestras se midieron en las instalaciones del CIEMAT en Palomares mediante un cambiador de muestras diseñado específicamente para esta tarea, que dispone de dos detectores de centelleo FIDLER que se enfrentan a cada una de las tapas de las muestras, permitiendo la medida simultánea de (S) e (I).

Tras el análisis de cada muestra, se guardaron automáticamente los siguientes resultados en una base de datos:

- Identificación, compuesta por la fecha de la toma y el número troquelado en el anillo.
- Fecha de la medida FIDLER.
- Peso neto con precisión 0,1 g (g).
- Actividad total de ^{241}Am para cada detector en S e I ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Error de la Actividad total de ^{241}Am para cada detector en S e I ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).
- Actividad Mínima Detectable (AMD) de ^{241}Am para cada detector en S e I ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$).

Aproximadamente el 30% de las muestras inalteradas fueron enviadas a las instalaciones del CIEMAT-Madrid mediante una empresa autorizada para transportes ADR [29]. En el CIEMAT dichas muestras fueron medidas con detectores de Ge de alta pureza con objeto de validar las medidas efectuadas con el cambiador FIDLER en Palomares. Para ello se desarrolló un método de calibración que aseguró una excelente correlación entre las determinaciones con el sistema FIDLER y con los detectores de Ge y que considera las peculiaridades de las muestras analizadas, en particular la distribución de la actividad en cada recipiente, la densidad aparente de la muestra y su composición.

5.2.5 Pu/Am EN MUESTRAS DE SUELO

La RERA desarrolló una técnica basada en la espectrometría de fotones baja energía (LEPS) que permitió la determinación directa de relación $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ en muestras delgadas de 2-3 g. Si bien la técnica exige una mínima preparación de la muestra (tamizado, extensión y fijación al soporte) el método es más rápido, económico y sencillo que las alternativas usuales basadas en análisis mediante espectrometría alfa. El método es “no destructivo”, por lo que una vez finalizada la medida mediante LEPS, se puede analizar la misma muestra mediante otras técnicas. El método permitió analizar un número de muestras muy elevado, lo que facilitó la adecuada caracterización de los terrenos afectados por el accidente de Palomares.

Con objeto de validar las técnicas propuestas y desarrolladas por la RERA en muestras reales de suelos de Palomares con otras técnicas, a finales de 2007 se establecieron convenios de colaboración con los siguientes laboratorios:

- Laboratorio de Física Nuclear Aplicada de la Universidad de Sevilla.
- Laboratorio de Medidas de Baja Actividad de la Universidad del País Vasco.
- Laboratorio de Análisis Radiológico Ambiental del Instituto Tecnológico de La Marañosa. (Ministerio de Defensa).
- Laboratorio de Residuos de Media y Baja Actividad del CIEMAT.

Las técnicas que emplearon estos laboratorios fueron:

- Espectrometría alfa (^{241}Am , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$).
- Espectrometría beta (^{241}Pu).
- Espectrometría gamma-LEPS (^{241}Am).
- Espectrometría de masas ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$).

La Concentración de Actividad Mínima Detectable (CAMD) de cada técnica de medida es inferior a $0,01 \text{ Bq.g}^{-1}$ para cada radionucleido. Los aspectos operativos como el transporte ADR de las muestras, el tipo de análisis a realizar y el envío de información se realizaron bajo un protocolo común acordado por todos los participantes. Además aproximadamente cada tres meses se mantuvieron reuniones de coordinación en el CIEMAT.

5.2.6 SONDEOS

Con objeto de estimar la profundidad de la contaminación se diseñó una campaña de sondeos en las Zonas 2, 2-bis, 3 y 6.

El número de sondeos y su ubicación se determinó con un diseño de muestreo aleatorio a juicio de experto, por el cual se aumenta la densidad de muestras en las zonas donde se dispone de información o se tiene un interés particular pero la

ubicación de los puntos en dichas áreas es aleatoria. Así se examinaron los resultados de las caracterizaciones de suelo superficial y los datos obtenidos mediante GEORADAR, por lo que se practicó un mayor número de sondeos en los alrededores de las posibles trincheras. En función de las condiciones del terreno y de su accesibilidad se emplearon las siguientes técnicas de perforación:

En cada uno de los testigos recuperados se realizó un control radiológico con un equipo Mini-FIDLER Modelo MS-6020 específicamente diseñado para la detección de fotones de baja energía (< 80 keV), obteniéndose así un perfil radiológico de cada testigo. Seguidamente se señalaron los puntos de interés y mediante el corte de los testigos se obtuvieron muestras inalteradas de suelo en la geometría compatible con los sistemas de medida por espectrometría gamma.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA EXTENSIVA DEL SUELO SUPERFICIAL

Las medidas de campo fueron efectuadas con la asistencia técnica de ENUSA Industrias Avanzadas desde noviembre de 2006 hasta febrero de 2007 [134].

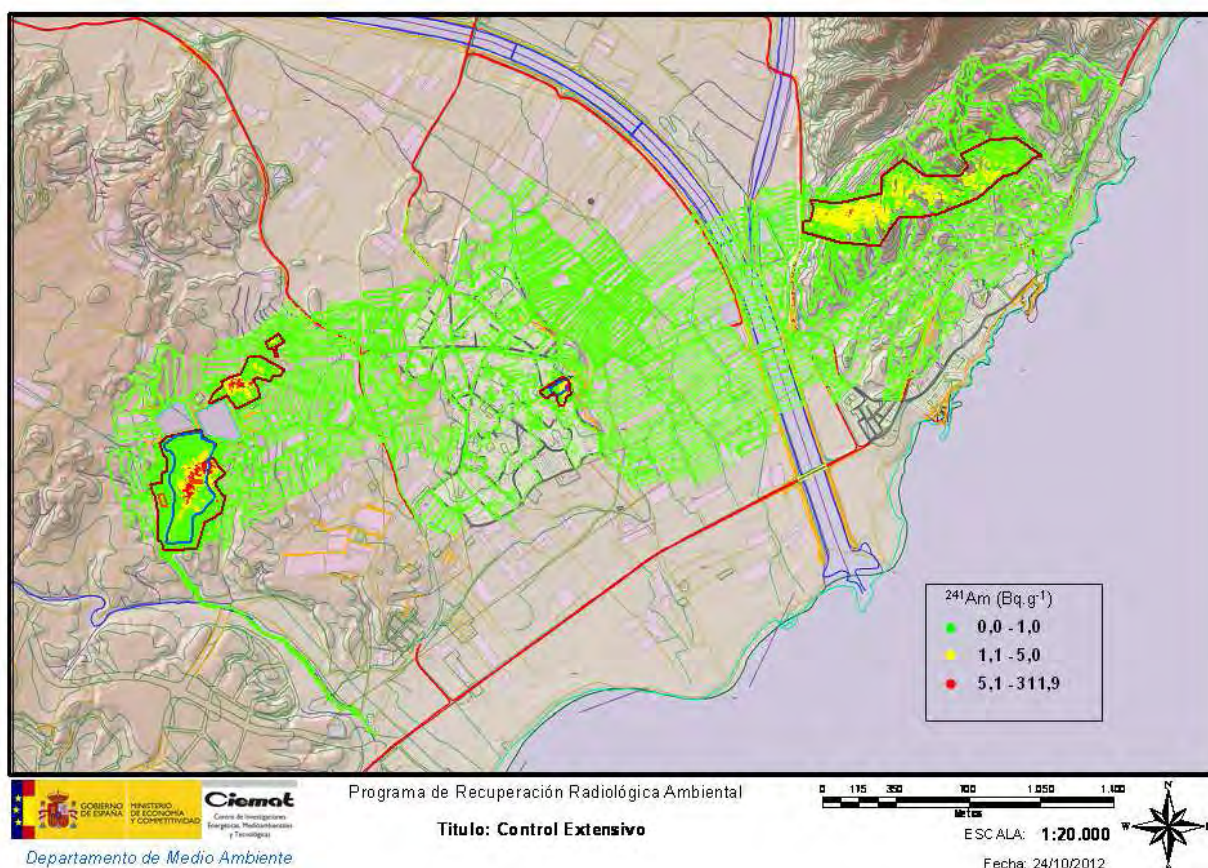


Figura 18: Resultados de la caracterización radiológica extensiva del suelo superficial (primeros 15 cm) en Palomares.

Sobre una red aproximada de 25 x 25 m, se recorrieron a pie más de 430 km lineales en una superficie aproximada de 660 ha de la pedanía de Palomares y poblaciones limítrofes. Como resultado de estas medidas se obtuvieron más de 63.000 registros de la concentración de actividad de ^{241}Am en los primeros 15 cm de suelo (Figura 18).

Los resultados de la caracterización extensiva confirman la presencia en suelo superficial, de concentraciones de transuránidos superiores a los criterios de restricción de uso en las proximidades de los puntos de impacto de las bombas 2 y 3, y en una franja que se extiende en Sierra Almagrera (zona 6).

5.3.2 CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DETALLADA DEL SUELO SUPERFICIAL (ZONAS 2, 2-BIS, 3 Y 6)

Las medidas experimentales fueron efectuadas desde mayo de 2007 hasta febrero de 2008 [135], se completaron con una campaña de medidas en octubre de 2008.

Se recorrieron a pie más de 500 km lineales en una superficie aproximada de 40 ha tanto en el interior de los terrenos vallados en las Zonas 2, 2-bis y 3, como en los terrenos colindantes identificados durante la caracterización superficial extensiva en dichas zonas y en Sierra Almagrera (Zona 6). En los terrenos donde fue posible, las medidas se efectuaron en mallas de 1x1 m, en tanto que en los terrenos de más difícil acceso se efectuaron recorridos lo más contiguos posible. Se obtuvieron más de 262.000 registros de concentración de actividad de ^{241}Am en los primeros 15 cm de suelo. (Figura 19, Figura 20 ,Figura 21).

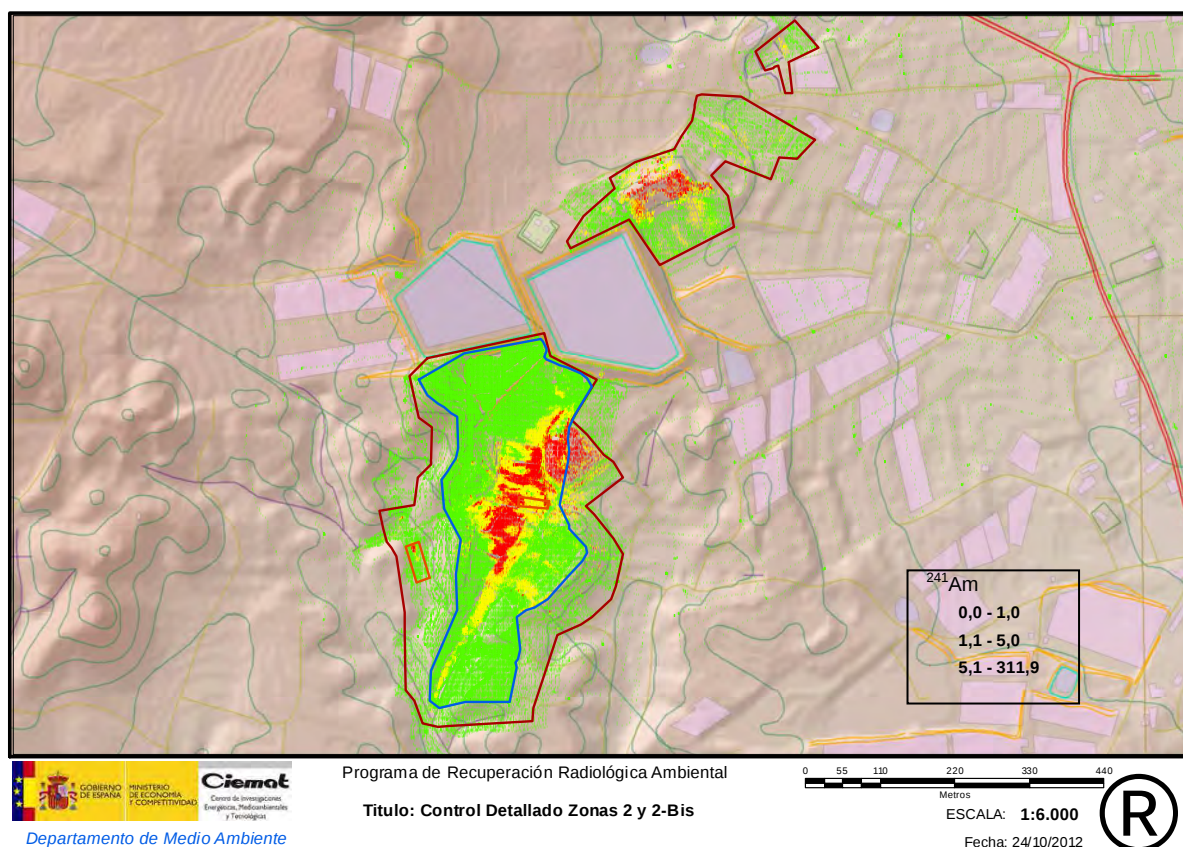


Figura 19: Medidas dinámicas adquiridas cada 2 s en zonas 2 y 2 bis

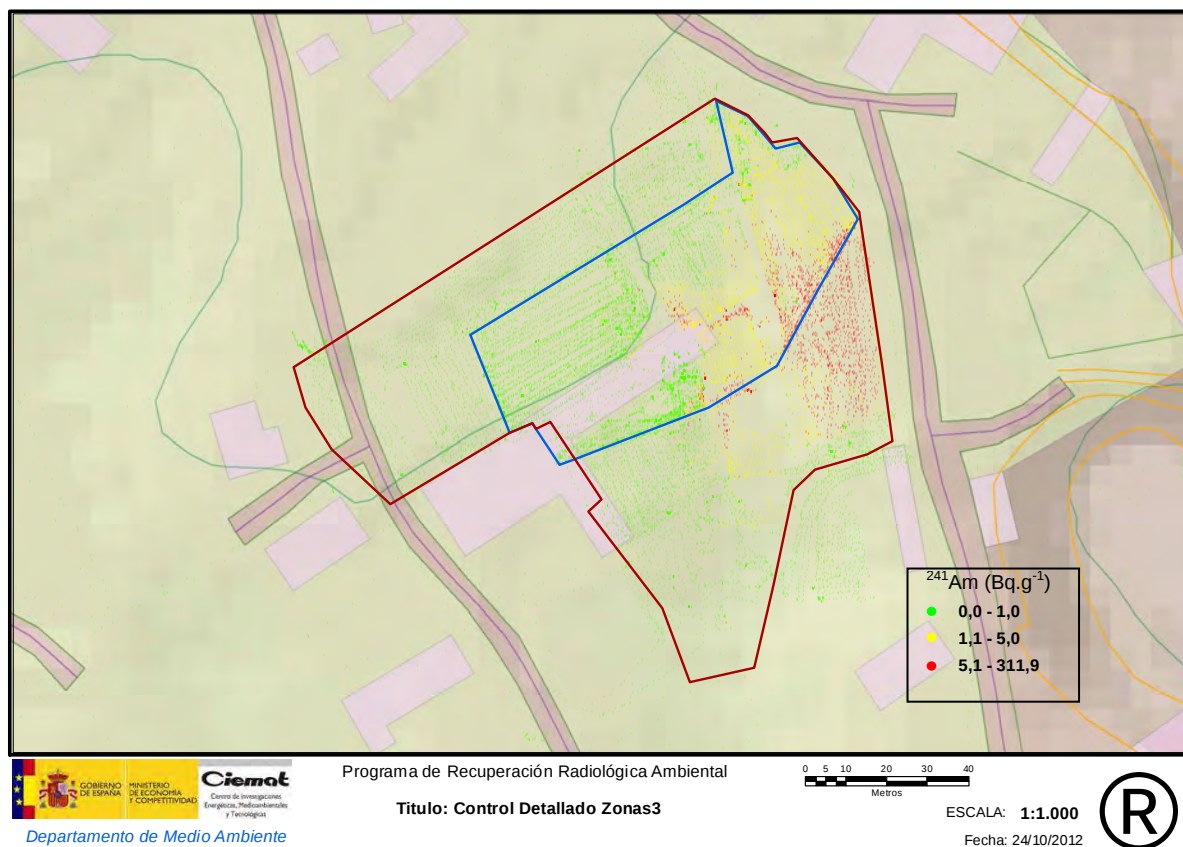


Figura 20: Medidas dinámicas adquiridas cada 2 s en zona 3

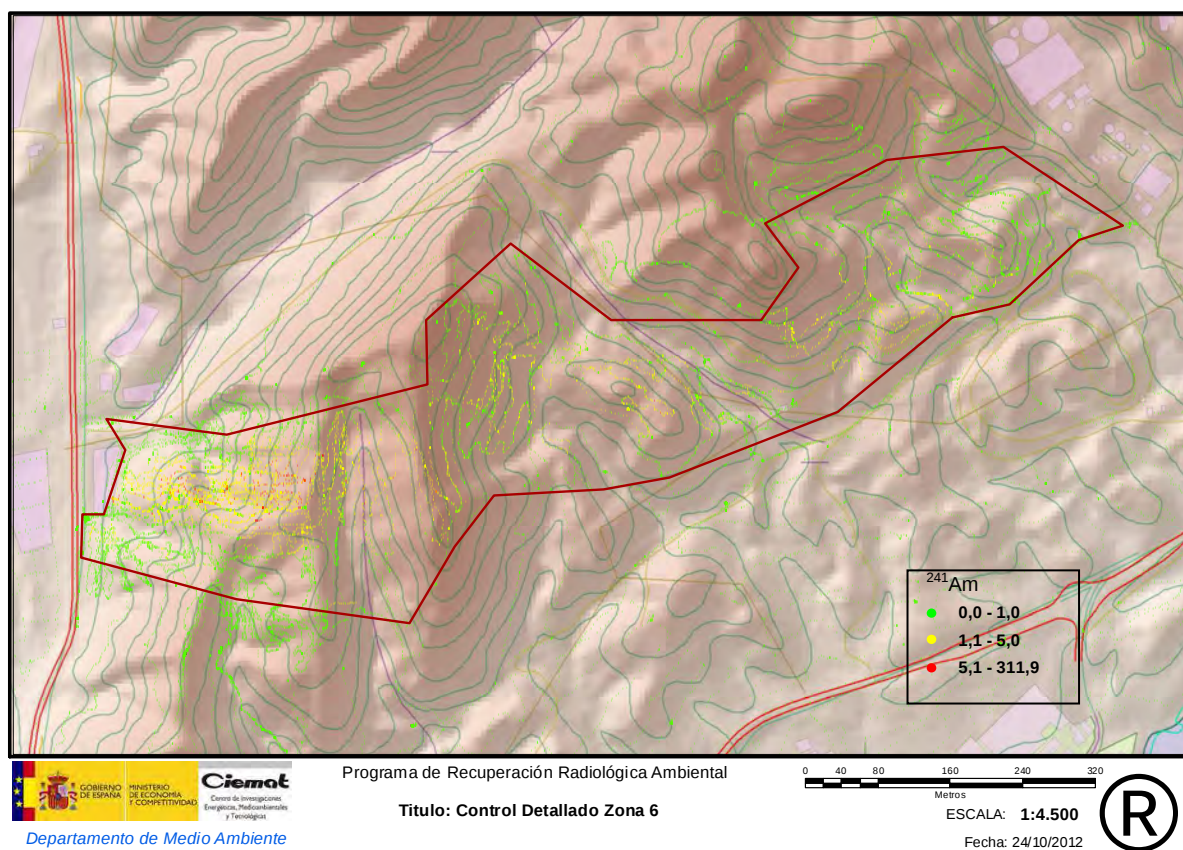
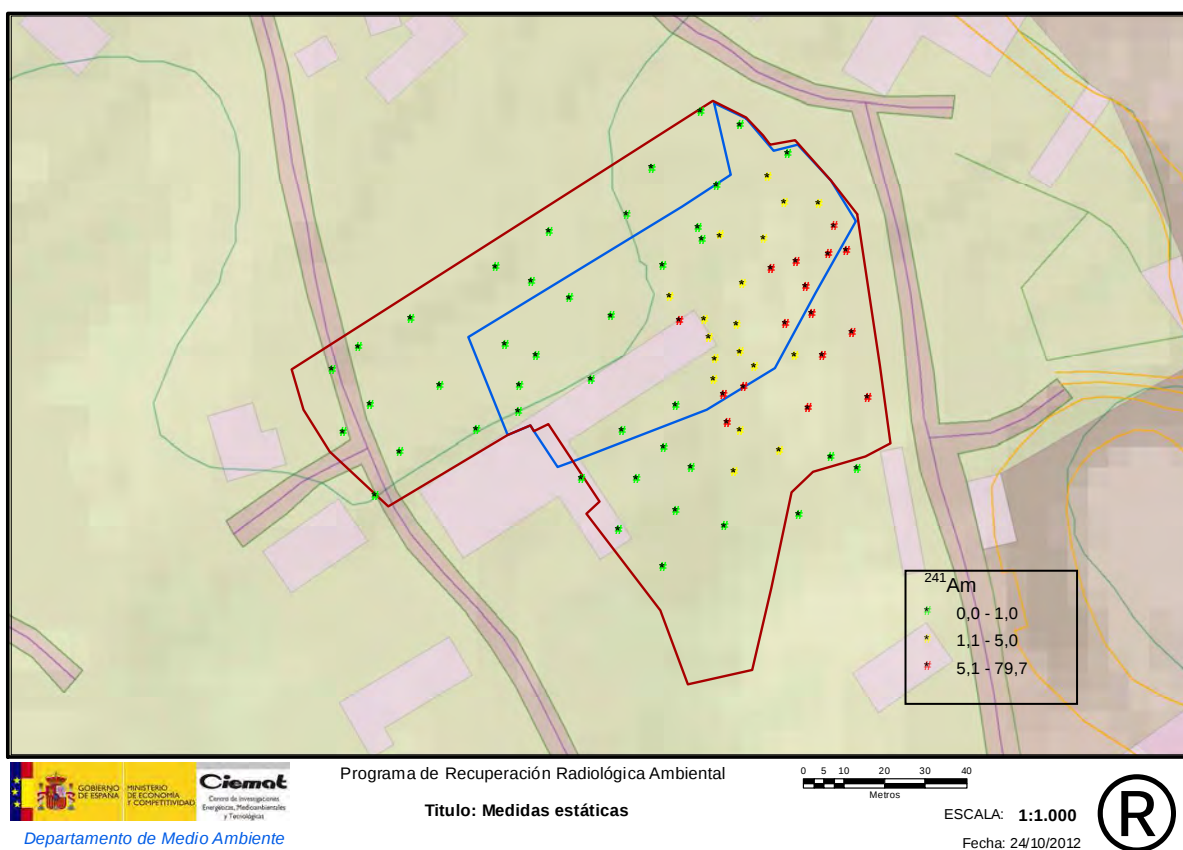
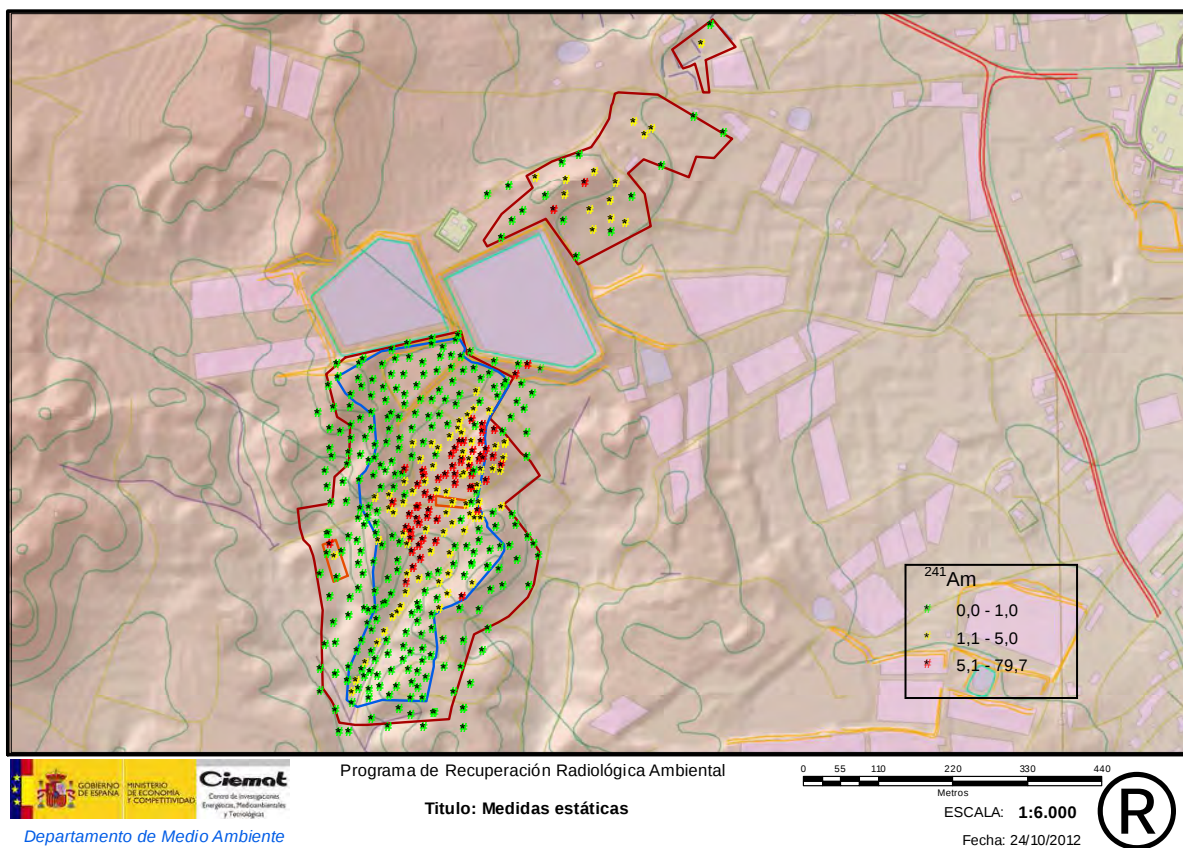


Figura 21: Medidas dinámicas adquiridas cada 2 s en zona 6.

Concluidas las medidas dinámicas, en 619 puntos de las zonas 2, 2-bis, 3 y 6 se efectuaron medidas estáticas de tasa de dosis y adquisición de espectros gamma durante 300 s con detectores FIDLER. (Figura 22, Figura 23, Figura 24).



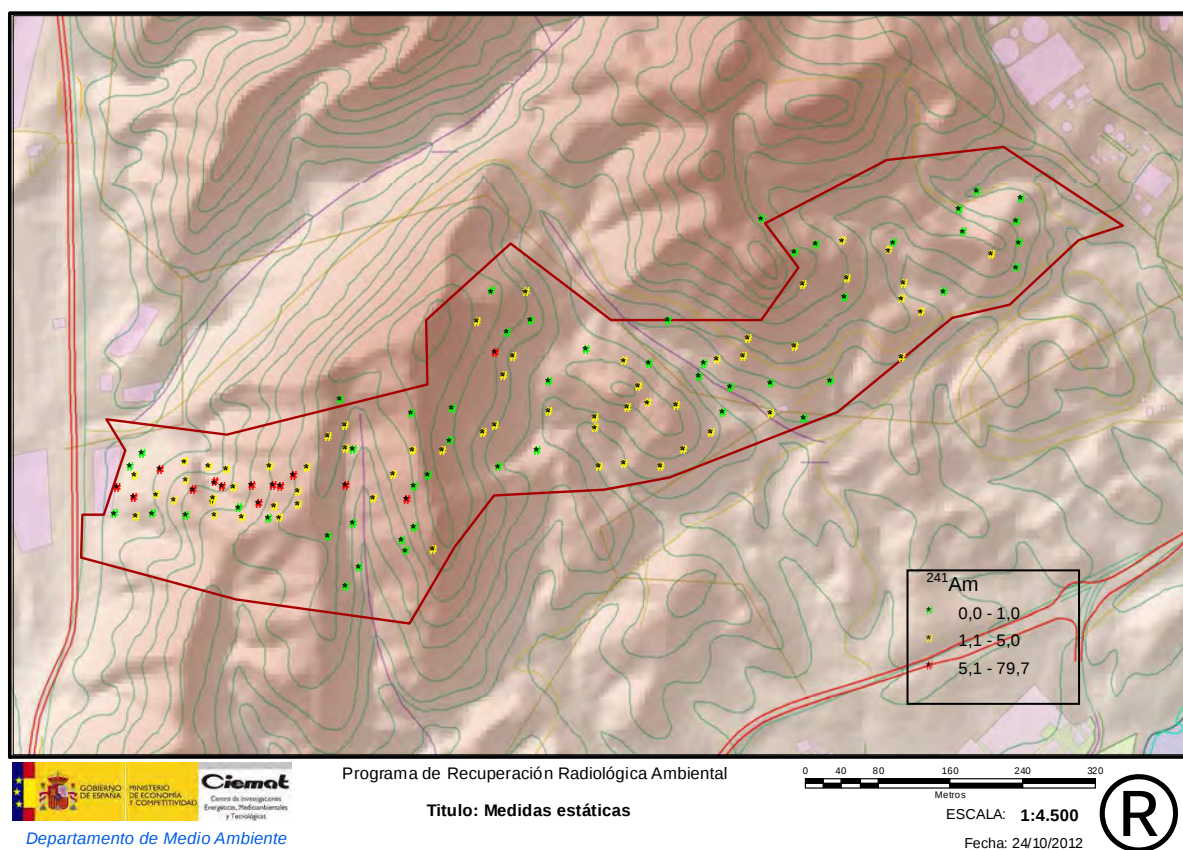


Figura 24: Resultado de las medidas estáticas de 300 s en la zona 6.

Además, en dichos puntos se recogieron muestras inalteradas de suelo correspondientes a las profundidades 0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm, totalizando 1.848 muestras (Figura 25, Figura 26 y Figura 27).

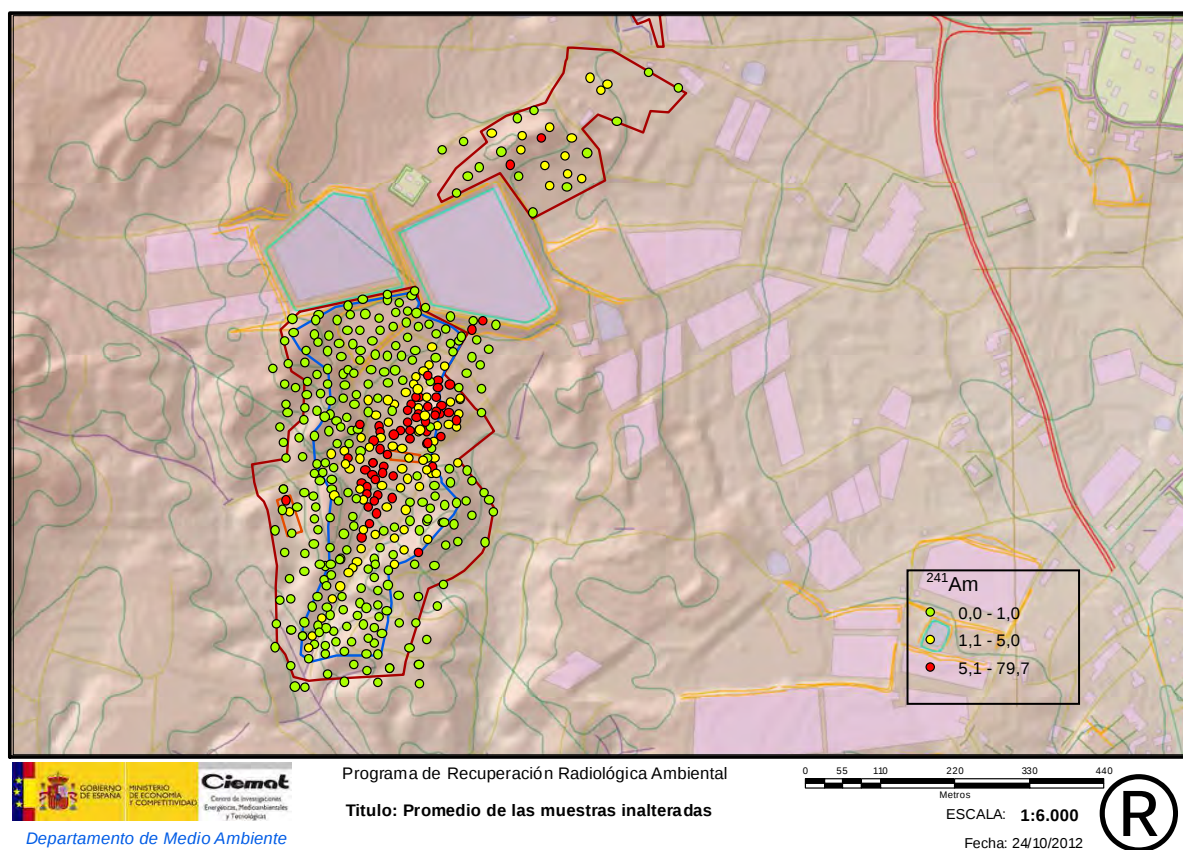


Figura 25: Promedio de las muestras inalteradas a 5,10 y 15 cm tomadas en las zonas 2 y 2 bis.

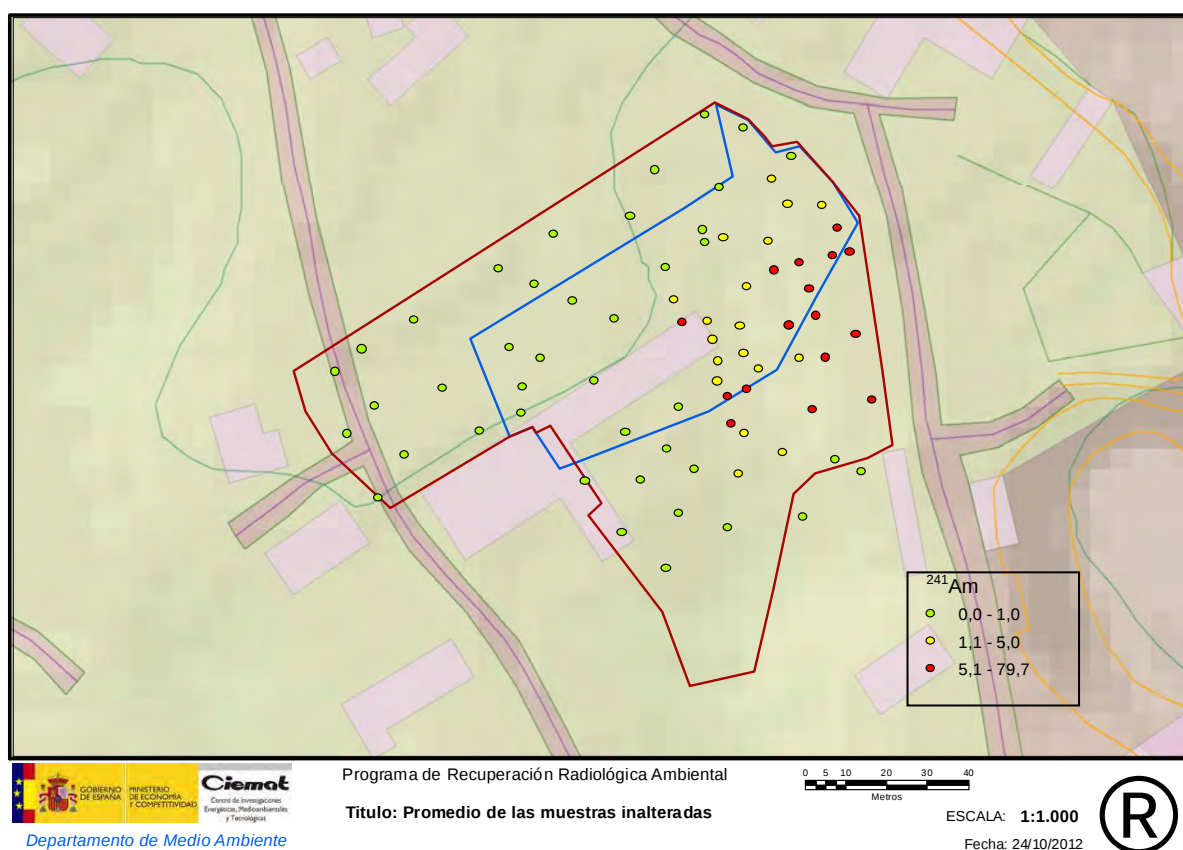


Figura 26: Promedio de las muestras inalteradas a 5,10 y 15 cm tomadas en la zona 3.

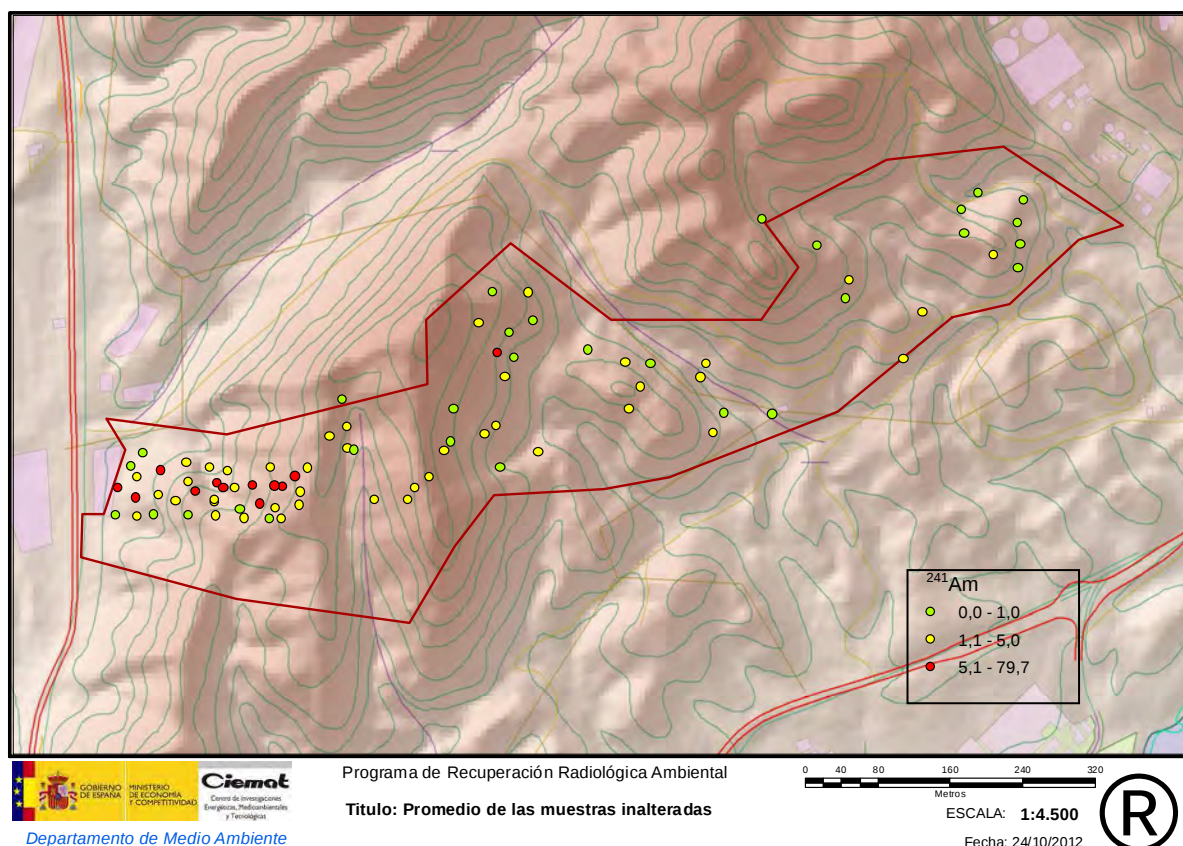


Figura 27: Promedio de las muestras inalteradas a 5,10 y 15 cm tomadas en la zona 6

Las muestras inalteradas de suelo superficial fueron acondicionadas para su medida en Palomares en un cambiador de muestras tipo revolver con dos FIDLER asociados y que ha proporcionado más de 3.600 espectros. Con objeto de validar estas medidas, 642 muestras (35%) fueron transportadas al CIEMAT-Madrid por una empresa autorizada para transportes ADR. Estas muestras fueron medidas en la instalación IR-15 'Laboratorio de caracterización de residuos y materiales radiactivos' mediante espectrometría gamma, empleando en esta ocasión detectores de Ge de alta pureza (HP Ge) contenidos en blindaje de bajo fondo.

La complejidad de estas medidas, debida a la autoabsorción, requirió el desarrollo de un protocolo de medida específico y la fabricación de fuentes radiactivas específicas para la calibración de la geometría. El protocolo proporcionó una excelente correlación entre las medidas del cambiador FIDLER en Palomares y las efectuadas con detectores de Ge en blindajes de bajo fondo en CIEMAT-Madrid.

Con objeto de determinar la distribución de la actividad en los primeros 15 cm del suelo, las muestras inalteradas correspondientes a varias localizaciones, se muestrearon en una geometría conocida y con menor autoabsorción (cápsulas Petri de 6 mm de espesor) que luego fueron medidas por espectrometría gamma en los detectores de IR-15. (Figura 28).

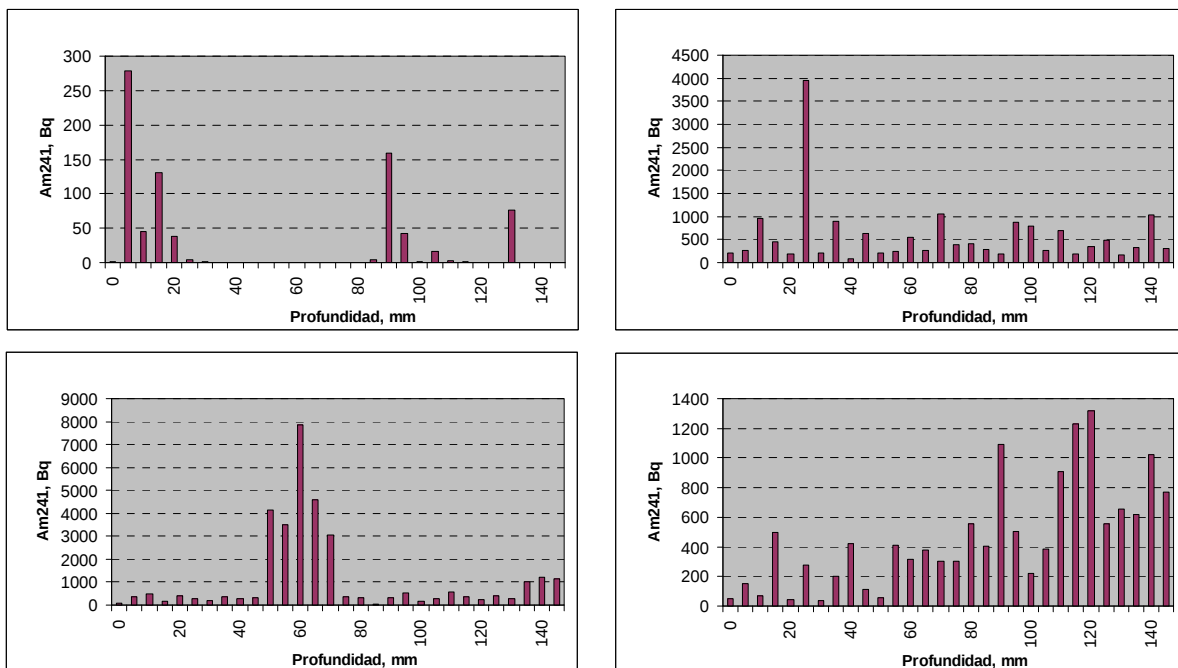


Figura 28: Ejemplos de distribuciones de la concentración de ^{241}Am con la profundidad en los primeros 15 cm de suelo.

Las Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 presentan las medidas de la tasa de dosis en contacto y a 1 m en las tres zonas.

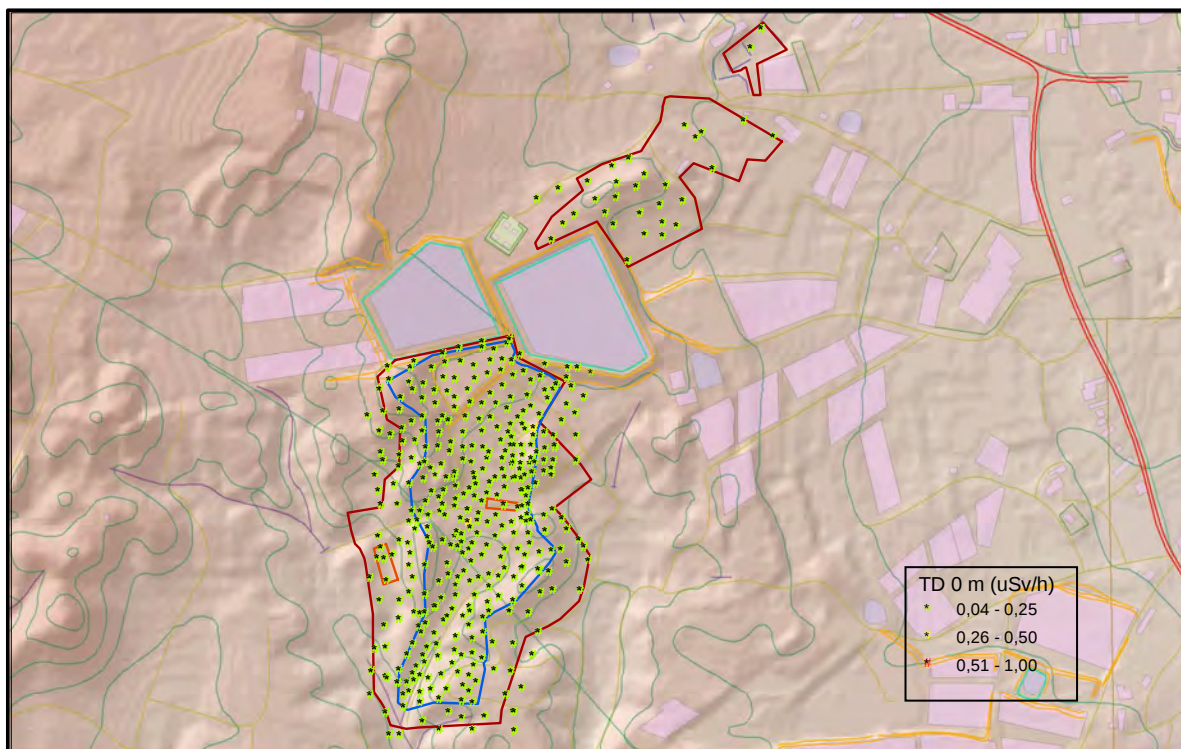
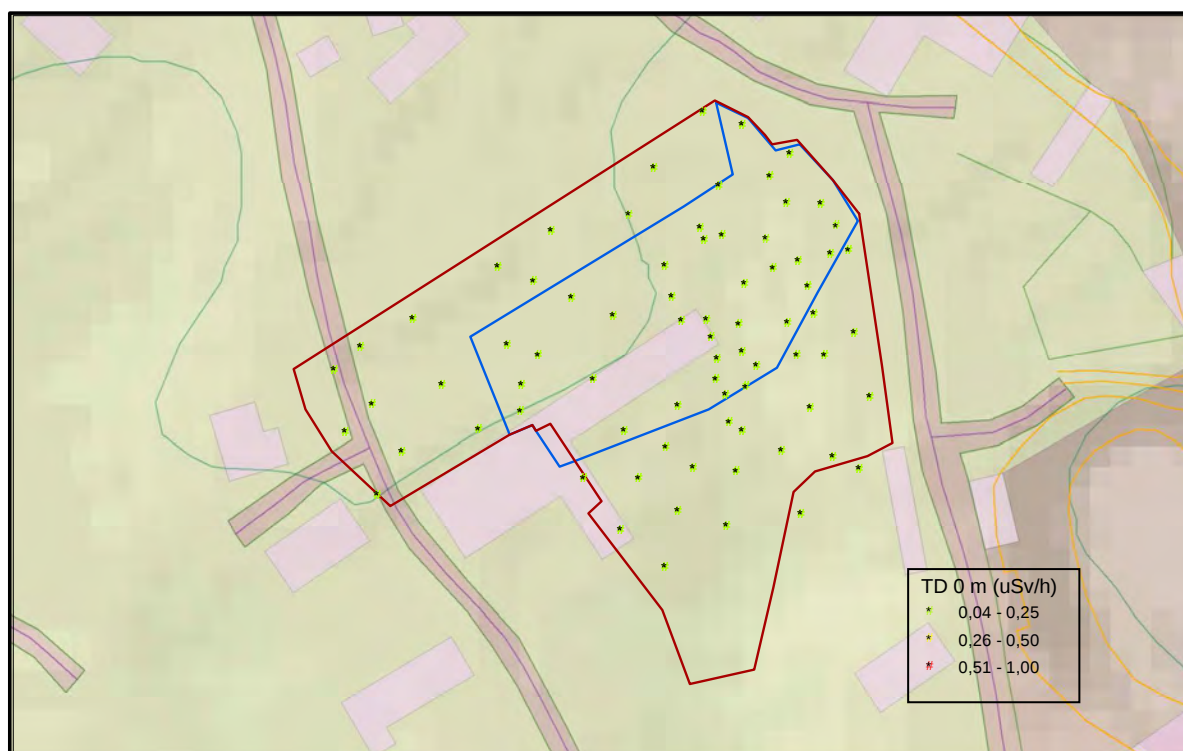


Figura 29: Tasa de dosis en $\mu\text{Sv h}^{-1}$ en contacto con el suelo en las zonas 2 y 2 bis.

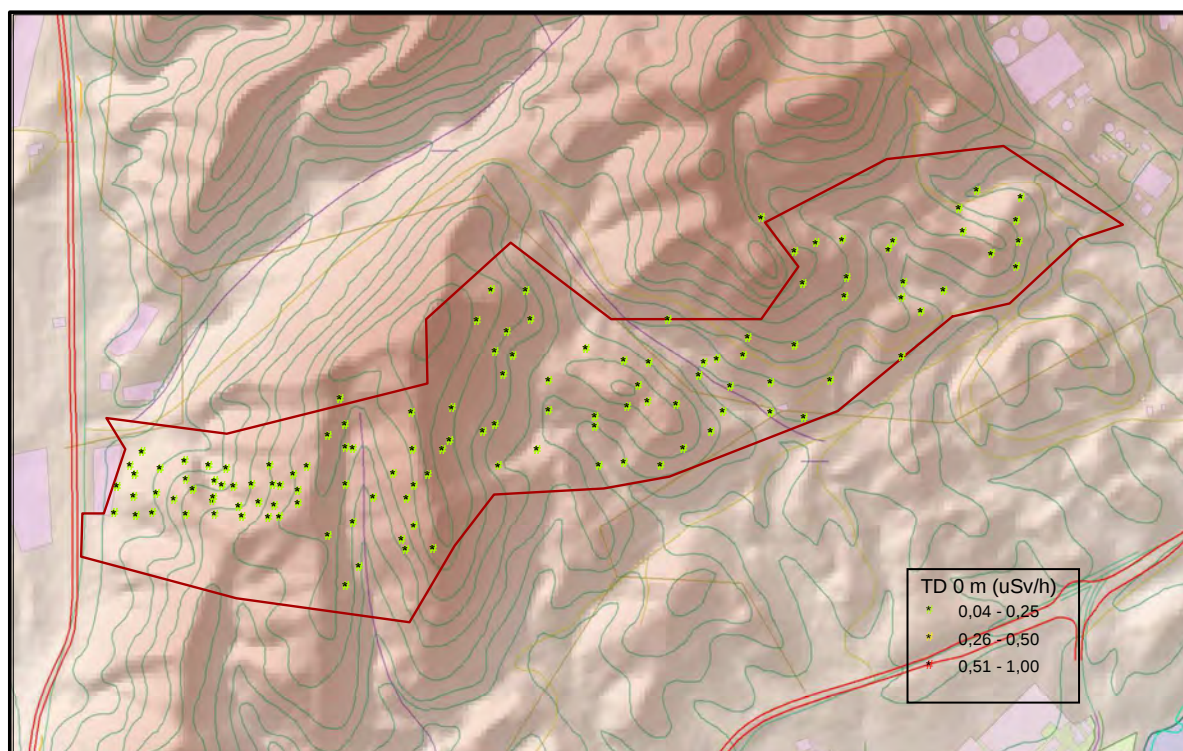





Programa de Recuperación Radiológica Ambiental
Título: Tasa de dosis en contacto
 Departamento de Medio Ambiente

0 5 10 20 30 40
 Metros
 ESCALA: 1:1.000
 Fecha: 24/10/2012

Figura 30: Tasa de dosis en μSv^{-1} en contacto con el suelo en la zona 3.

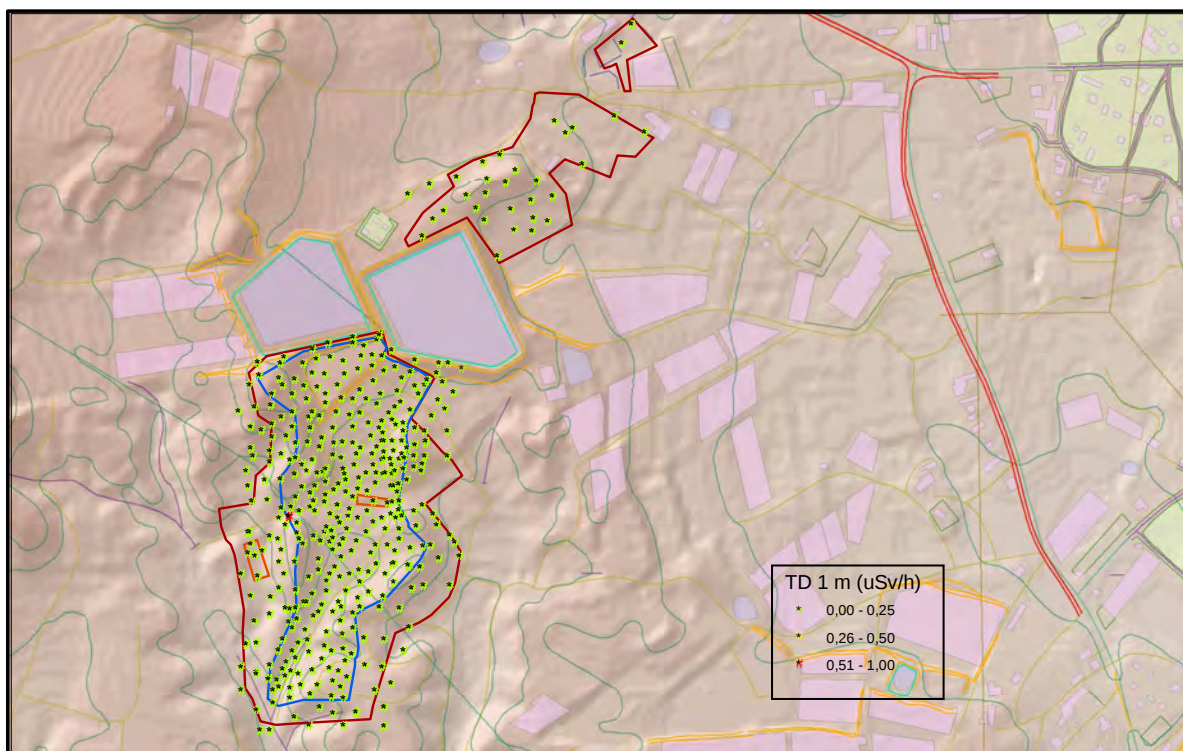





Programa de Recuperación Radiológica Ambiental
Título: Tasa de dosis en contacto
 Departamento de Medio Ambiente

0 40 80 160 240 320
 Metros
 ESCALA: 1:4.500
 Fecha: 24/10/2012

Figura 31: Tasa de dosis en μSv^{-1} en contacto con el suelo en la zona 6.



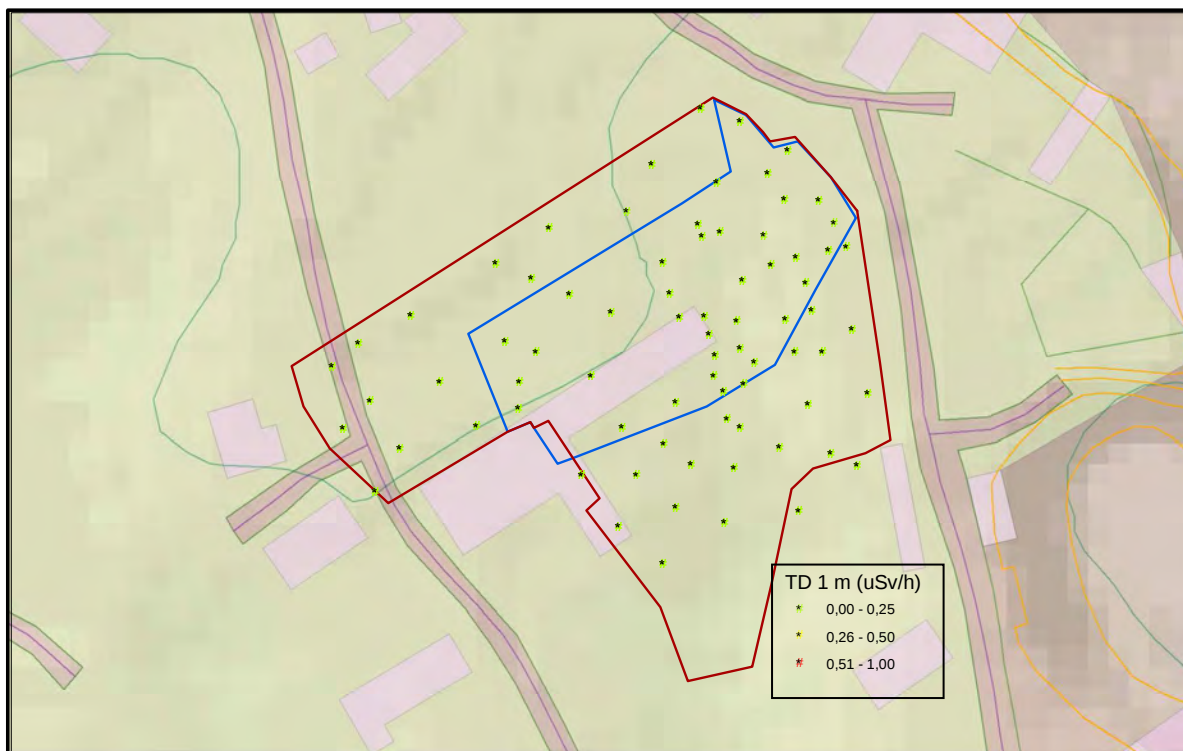
GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD
Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Departamento de Medio Ambiente

Programa de Recuperación Radiológica Ambiental
Título: Tasa de dosis a 1 m del suelo.

0 55 110 220 330 440
Metros
ESCALA: 1:6.000
Fecha: 25/10/2012



Figura 32: Tasa de dosis en $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 1 m de altura sobre el suelo en las zonas 2 y 2 bis



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD
Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Departamento de Medio Ambiente

Programa de Recuperación Radiológica Ambiental
Título: Tasa de dosis a 1 m del suelo.

0 5 10 20 30 40
Metros
ESCALA: 1:1.000
Fecha: 25/10/2012



Figura 33: Tasa de dosis en $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ a 1 m de altura sobre el suelo en la zona 3

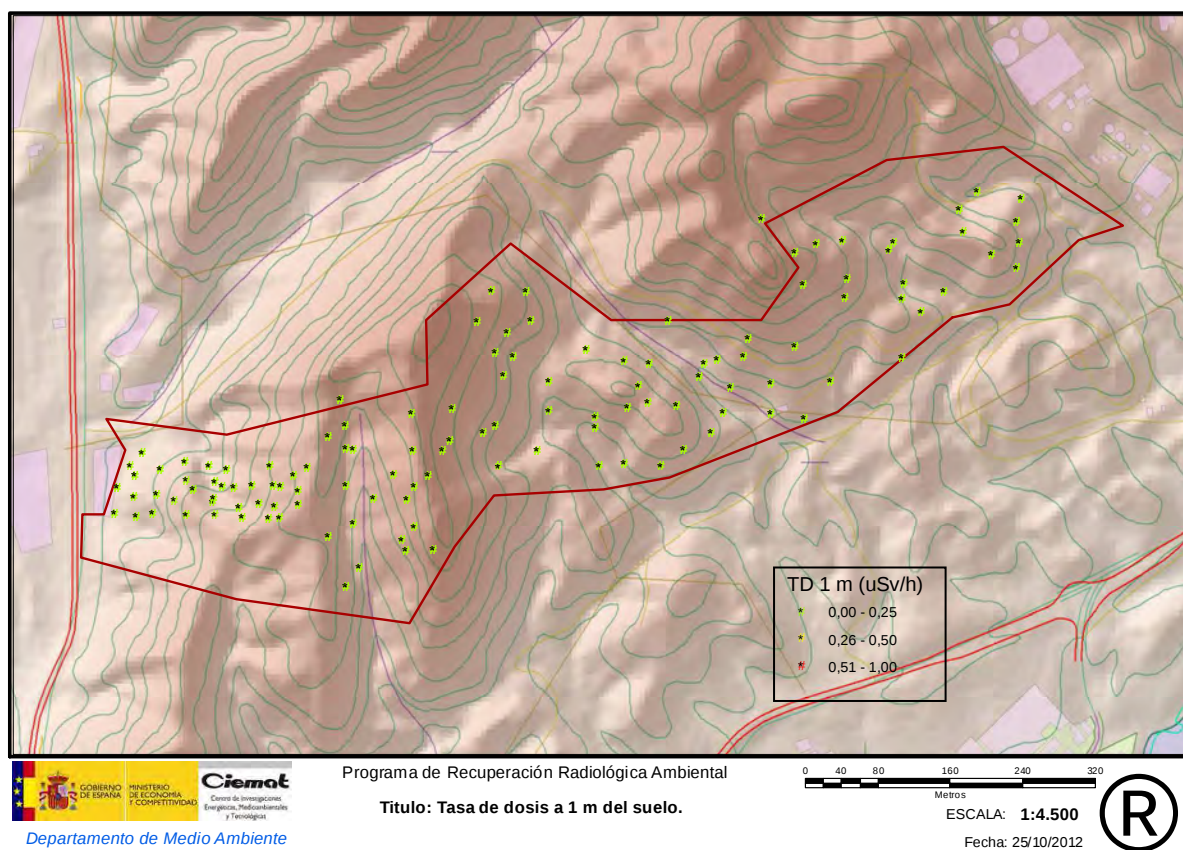


Figura 34: Tasa de dosis en $\mu\text{Sv h}^{-1}$ a 1 m de altura sobre el suelo en la zona 6

Del examen de las figuras se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1 - Se han identificado dos trincheras en la zona 2. La trinchera A se sitúa dentro del vallado y las medidas radiológicas superficiales permiten distinguirla del resto de su entorno. La B se ha localizado al oeste del vallado en este caso se obtuvieron medidas radiológicas superficiales superiores al nivel medio del entorno, lo que permitió localizar su cabecera.
- 2 - La distribución de actividad en los primeros 15 cm de suelo es muy diversa, observándose, desde suelos contaminados únicamente en los primeros cm hasta perfiles de concentración de actividad crecientes con la profundidad.
- 3 - Los resultados de las medidas dinámicas de la concentración de ^{241}Am en suelos superficiales efectuadas en periodos de tiempo muy cortos (2 ó 5 s) muestran un buen acuerdo con las medidas estáticas efectuadas en 300 s, en ambos casos con detectores FIDLER, presentando distribuciones superficiales similares. Esta coherencia también se observa con los resultados obtenidos en los análisis de muestras inalteradas de suelos.
- 4 - Los terrenos que presentan concentraciones de ^{241}Am que superan alguno de los criterios de restricción de uso se encuentran en su mayor parte en los terrenos expropiados en las zonas 2 y 3 (10 ha). Aunque se confirma que la contaminación se extiende a unas 10 ha de las fincas colindantes y a una franja de 20 ha en Sierra Almagrera (zona 6).

- 5 - Ningún valor de la tasa de dosis a 1 m fue superior a $0,25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ y sólo tres valores de la tasa de dosis en contacto (en la zona 2) fueron superiores, siendo el valor máximo registrado $0,33 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Estos resultados confirman que el riego de irradiación externa en Palomares es insignificante incluso en las áreas que presentan concentraciones importantes de transuránidos en el suelo superficial [136].

5.3.3 ALCANCE DE LA CONTAMINACIÓN EN LAS ZONAS 2, 2-BIS, 3 y 6

Los trabajos de realización de los sondeos, control radiológico y obtención de las muestras fueron efectuados desde febrero hasta junio de 2008 [137] y en una campaña adicional en noviembre de 2008.

En total se efectuaron 321 sondeos con profundidades entre 0,5 y 6 m en las zonas 2, 2-bis (incluyendo el perímetro de la balsa este), 3 (incluyendo el interior del edificio construido sobre material de relleno en el punto de impacto) y 6 (Figura 35, Figura 36 y Figura 37).

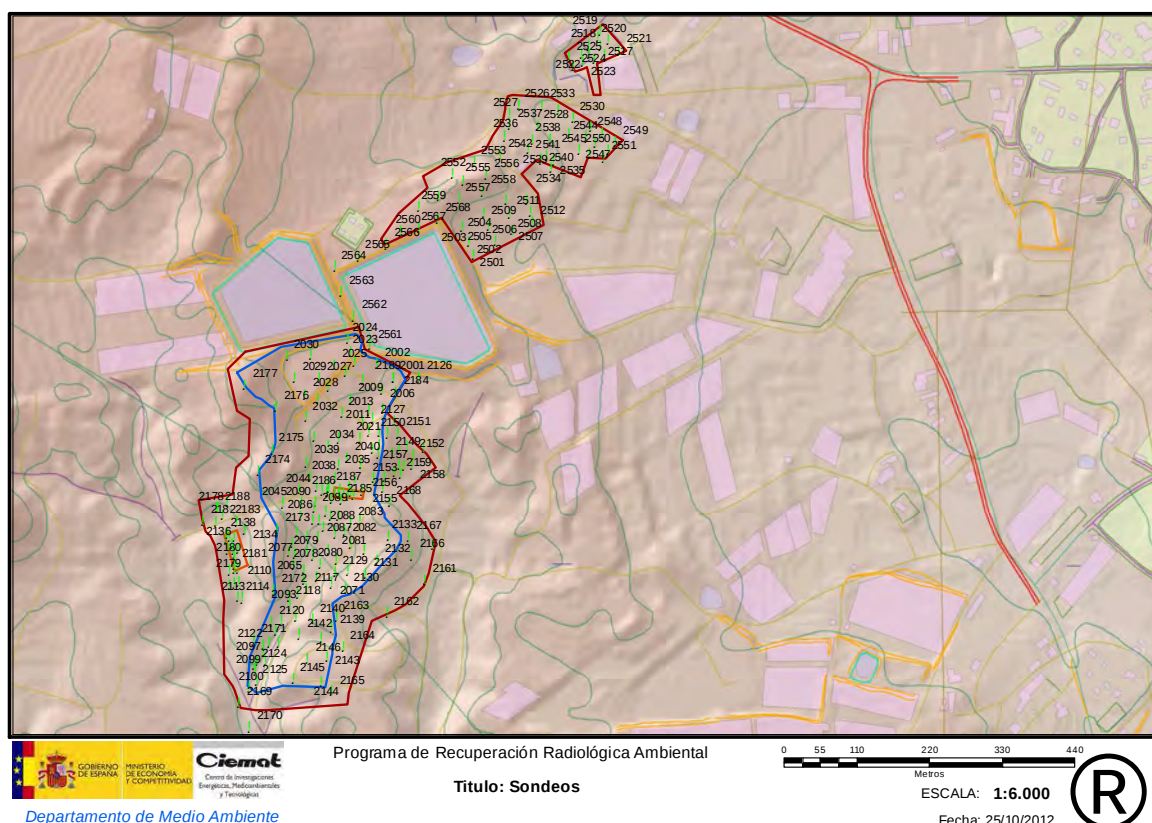


Figura 35: Localización de los sondeos realizados en las zonas 2 y 2 bis

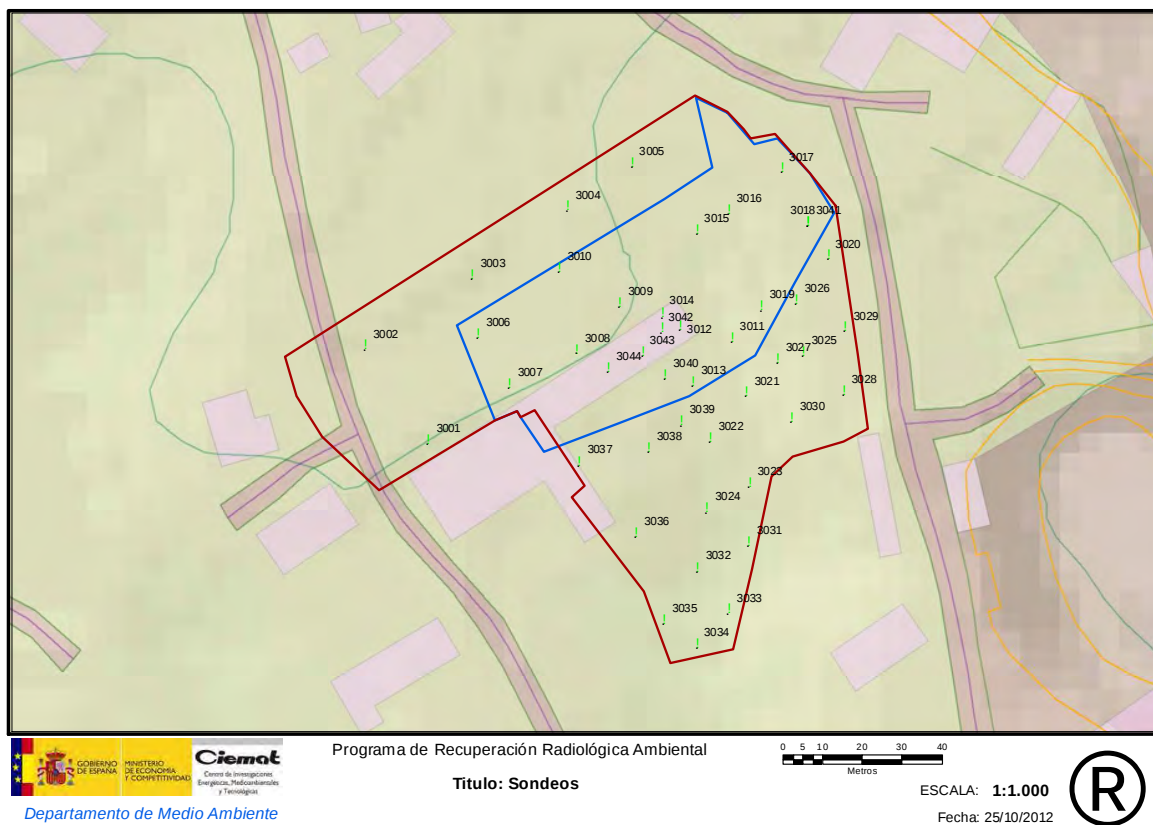


Figura 36: Localización de los sondeos realizados en la zona 3

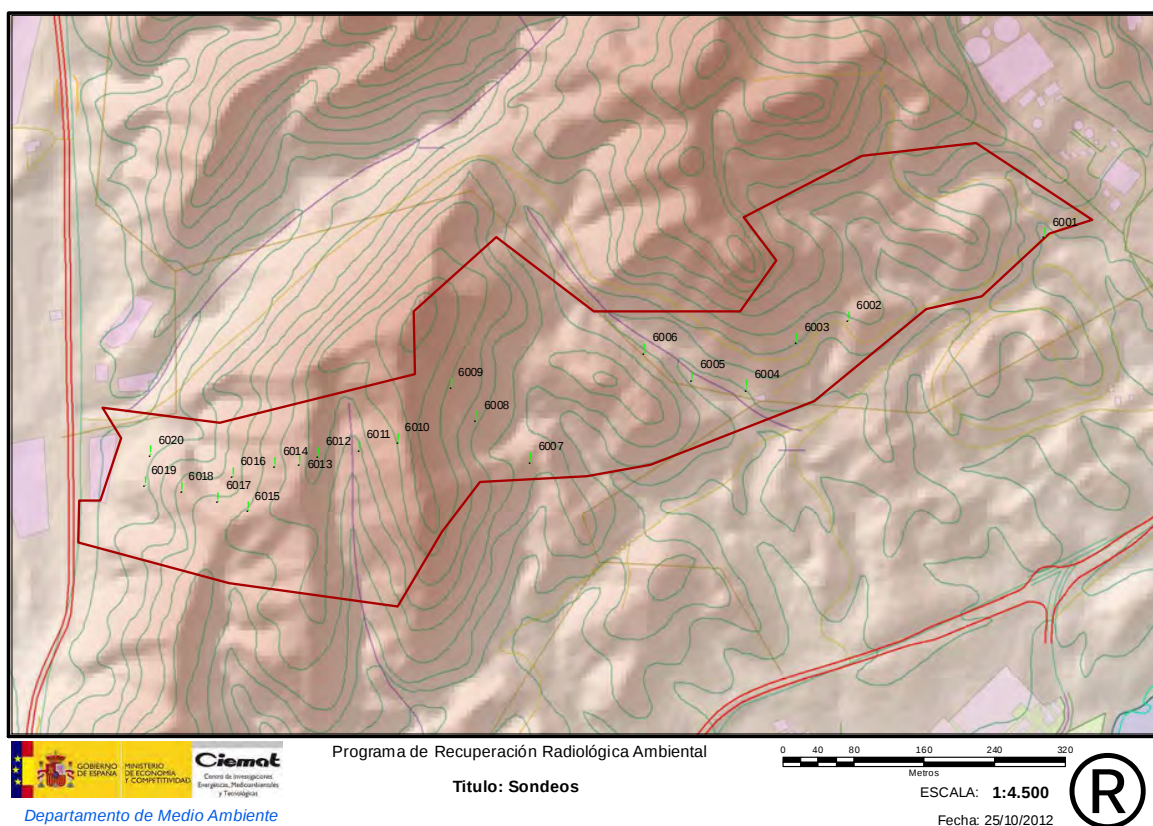


Figura 37: Localización de los sondeos realizados en las zonas 6

La mayoría de los sondeos (253) se practicaron con ayuda de un vehículo todo terreno dotado con una sonda TP30/LR para ensayos geotécnicos. En 51 de estos sondeos fue necesario emplear un penetrómetro (mide la dureza de los materiales mediante la profundidad de penetración de una aguja) dinámico portátil sobre orugas, debido a la orografía del terreno o la dificultad en los accesos (**Figura 38**). Finalmente, en la zona 6 hubo que acceder a pie a 17 puntos donde se practicaron sondeos mediante el barreno recto/helicoidal.



Figura 38: Realización de los sondeos con equipo Todo terreno y penetrómetro.

En función de los perfiles radiológicos obtenidos en cada sondeo con el equipo MiniFIDLER (en total se obtuvieron más de 7.500 registros), se seleccionaron los puntos del sondeo donde era necesario obtener mediante el corte del testigo las muestras.

En cada sondeo se obtuvieron al menos dos muestras: entre 20 y 50 cm de profundidad y en la profundidad máxima del sondeo, entre 60 cm y 6 m. Además, se extrajeron muestras en los puntos de los sondeos cuyo perfil radiológico indicaba la posible presencia de contaminación por ^{241}Am .

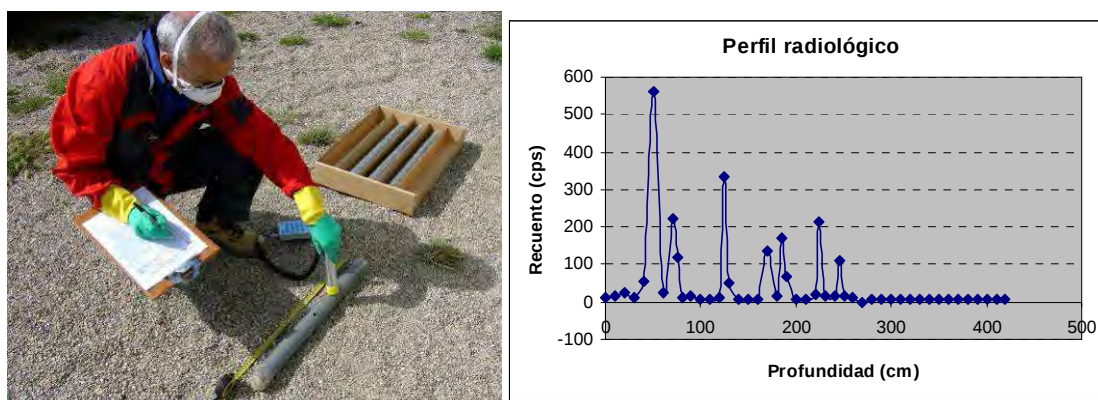


Figura 39: Realización del perfil radiológico del sondeo con equipo MiniFIDLER y resultado.

De los testigos de los sondeos se extrajeron 734 muestras que fueron transportadas al CIEMAT-Madrid para ser sometidas a los análisis por espectrometría gamma con detectores de HP Ge, obteniéndose más de 1.400 espectros.

La **Figura 40**, **Figura 41** y **Figura 42** muestran los perfiles radiológicos más significativos en los sondeos, así como los resultados de los análisis por espectrometría gamma de las muestras estriadas de los testigos. Para presentar simultáneamente los datos

de distintas profundidades en el mismo punto se han empleado círculos de distinto diámetro, correspondiendo el mayor a la muestra más superficial y el central a la muestra más profunda en dicho punto. En cada punto se ha profundizado hasta alcanzar valores inferiores al criterio de uso parcial ($<1 \text{ Bq.g}^{-1}$ de ^{241}Am), por lo que la profundidad máxima varía de un punto a otro.

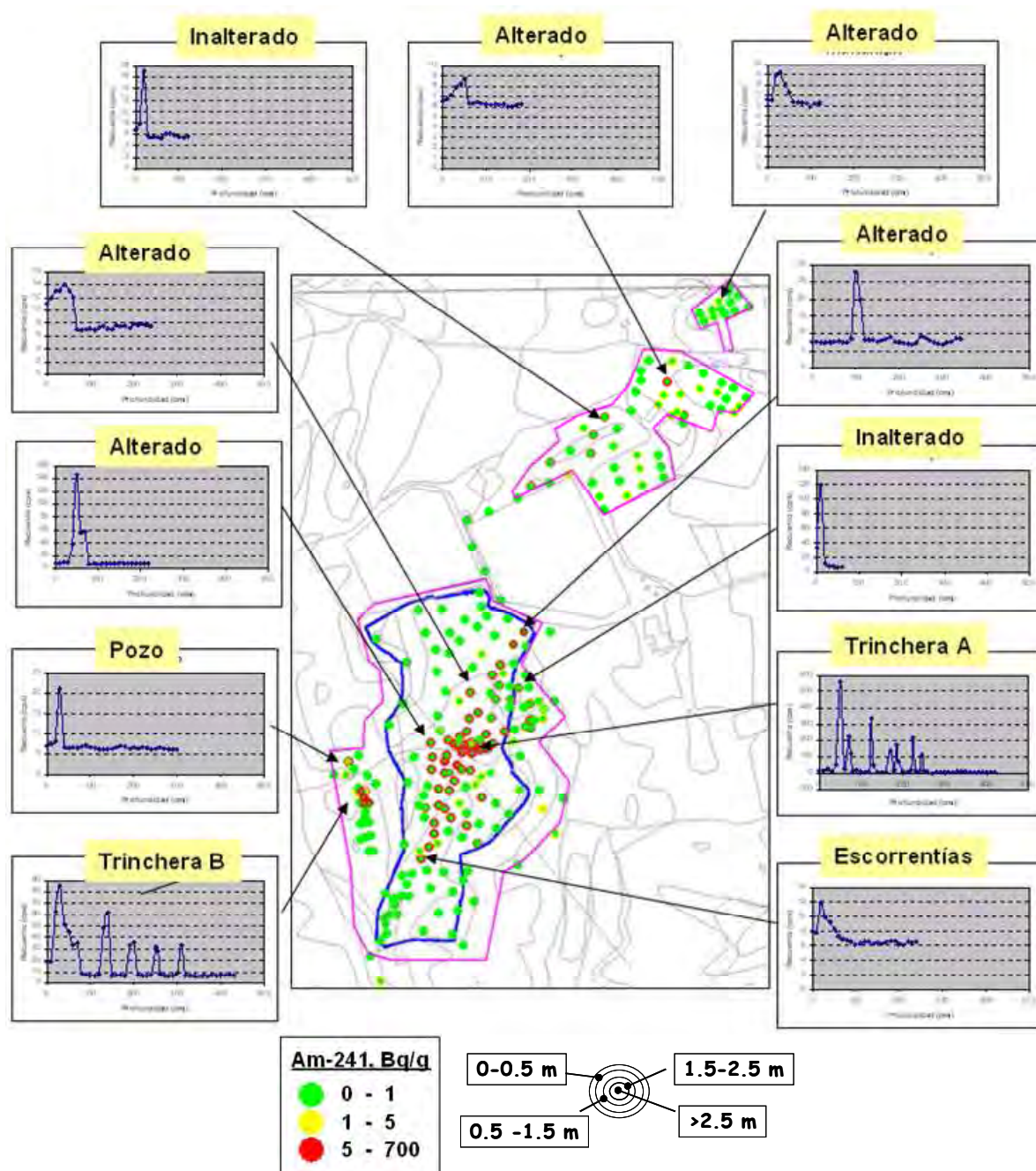


Figura 40: Perfiles radiológicos de sondeos y resultados del análisis por espectrometría gamma con detector de Ge de las muestras seleccionadas en los testigos de sondeos de las zona 2 y 2-Bis.

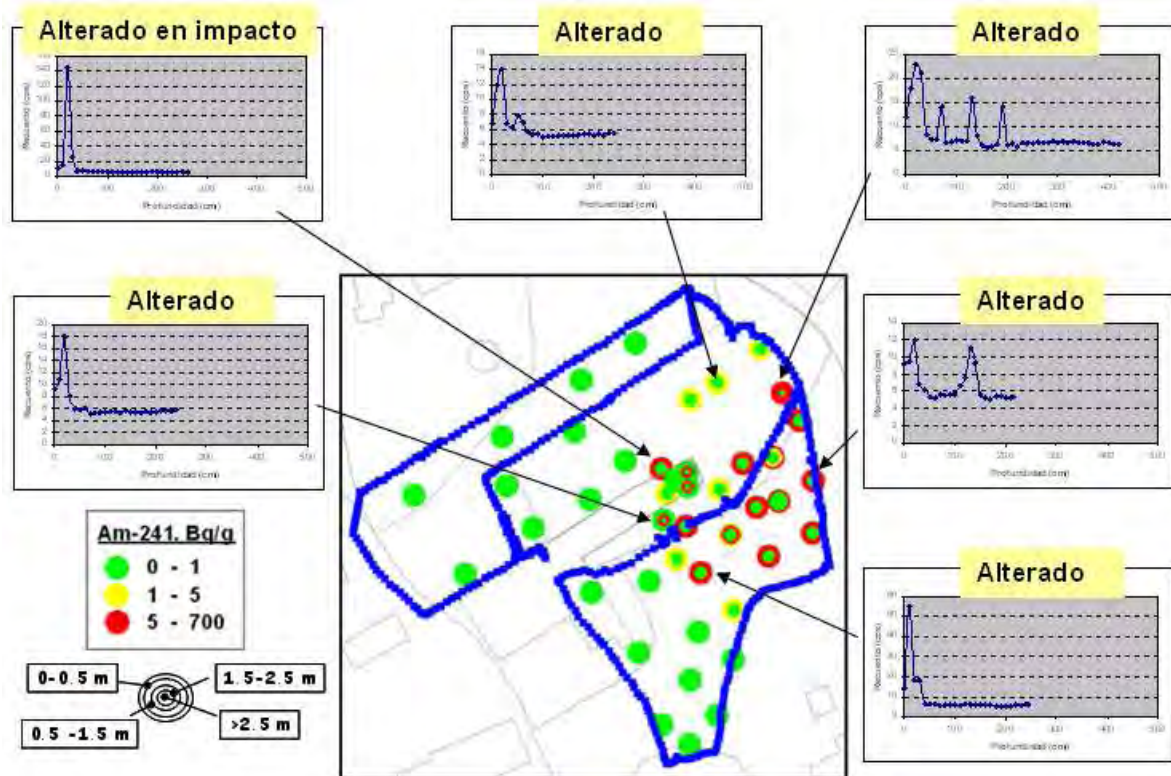


Figura 41: Perfiles radiológicos de sondeos y resultados del análisis por espectrometría gamma con detector de Ge de las muestras seleccionadas en los testigos de sondeos de la zona 3.

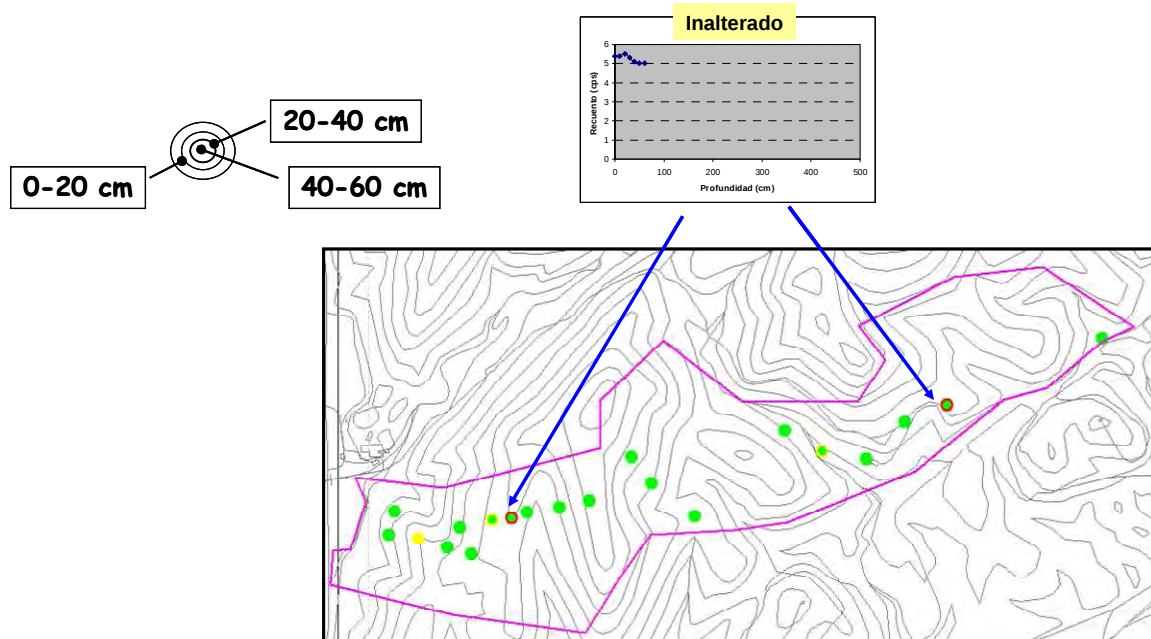


Figura 42: Perfiles radiológicos de sondeos y resultados del análisis por espectrometría gamma con detector de Ge de las muestras seleccionadas en los testigos de sondeos de la zona 6.

Del examen de las figuras se puede deducir:

- 1 - Se ha constado la presencia de contaminación en profundidad con distribuciones y niveles muy variables, dependiendo, no solo de la zona en cuestión sino del uso y alteraciones que se hayan producido en las distintas parcelas que las conforman.
- 2 - Las distribuciones observadas van desde las estrictamente superficiales en las zonas inalteradas sin ningún uso desde 1966 (toda la zona 6 y las colinas de la zona 2), hasta perfiles complejos como los observados en las trincheras de la zona 2 y que reflejan fielmente el proceso de relleno que se siguió en la remediación inicial, pasando por diversos perfiles debidos a la explotación agrícola y movimiento de tierras de las zonas 2 y 3, así como distribuciones superficiales típicas de arrastre superficial en las escorrentías de la zona 2.
- 3 - En general, en las zonas 2, 2-bis no se han observado contaminaciones profundas en áreas donde no estuvieran ya algo contaminadas en superficie. Dado que la ubicación de los sondeos se decidió de modo aleatorio, se puede concluir con alguna excepción, que en estas zonas es muy poco probable que exista contaminación en profundidad que no se haya detectado en superficie.
- 4 - Aunque en rigor, el punto anterior no se podría extender a la zona 6, por el limitado número de sondeos que se han podido practicar debido a las dificultades orográficas de la Sierra Almagrera, la realidad es que toda la zona 6 ha permanecido inalterada desde 1966 y que las contaminaciones detectadas en muestras de suelo no han superado 20 cm de profundidad. En consecuencia se puede considerar que los terrenos contaminados se limitan a los identificados en las caracterizaciones superficiales.

5.3.4 ESTUDIOS GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Se han estudiado las características geológicas e hidrogeológicas de las zonas 2, 2-bis y 3 de Palomares y su entorno [138]. Para ello, se practicaron 4 sondeos de investigación (**Figura 43**), con recuperación de testigo continua, la testificación geofísica de los sondeos y la toma de muestras de agua subterránea y análisis de laboratorio de 60 m de profundidad y 66 mm de diámetro que se indican en la figura 12 (tres en la zona 2 y una en la zona 3). Esto permitió determinar la porción del nivel freático en dichas zonas y la eventual presencia de acuíferos colgados por encima de dicho nivel. Los sondeos perforados han cortado el nivel freático a las cotas 31,87 m (G2-1), 22,85 m (G2-2), y 23,15 m (G2-3) en la zona 2, y a 3,15 m (G3-1) en la zona 3.

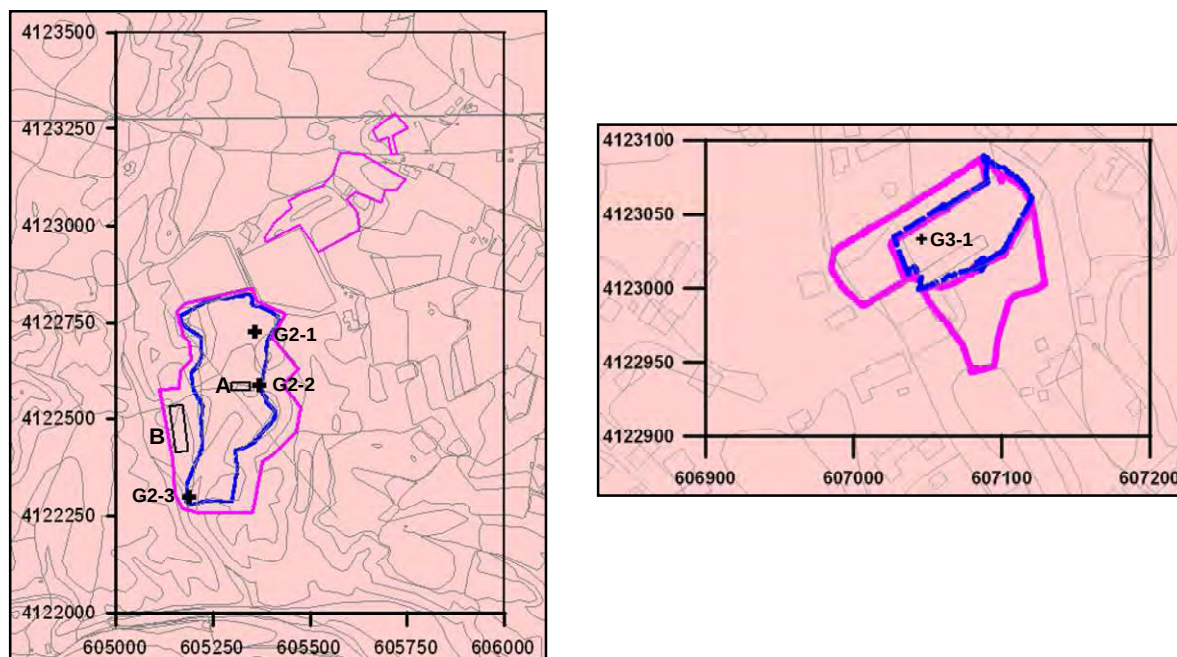


Figura 43: Situación de los sondeos practicados en las zonas 2 y 3 para el estudio hidrogeológico.

Así mismo, se ha efectuado un inventario de los pozos, sondeos y puntos de agua comprendidos desde el margen derecho del río Almanzora hasta las colinas al SE de las zonas 2 y 2-bis determinando la cota, profundidad del pozo o sondeo y la del nivel del agua, en su caso. Se han analizado las características químicas de las aguas subterráneas en estas zonas y se ha determinado el alcance de la intrusión marina.

Los sondeos fueron testificados mediante registros geofísicos de Radiación Gamma Natural (RGN), de resistividad para determinar la naturaleza litológica de las formaciones atravesadas y la precisa identificación de los niveles acuíferos que se intersectan, especialmente el nivel freático.

El estudio del inventario de puntos de agua, permite observar que de los 19 puntos de agua censados, los seis que han podido ser muestreados, tienen pH neutros o ligeramente alcalinos y salinidades de 3- 4 mg.l⁻¹, lo que impide su utilización para riego o consumo. El manantial, punto situado al oeste de la zona 2, a 24 m snm (sobre el nivel del mar), también presenta una elevada salinidad. Los puntos de agua inventariados tienen sus niveles de agua 3 m (tres de ellos) y 5 m (pozo José Alarcón) por debajo del nivel del mar, excepto el pozo Paco Larios, que tiene su nivel a 12,15 m snm.

La red fluvial está controlada por el río Almanzora, caracterizado por tener una pendiente media muy alta, pero con escasa escorrentía debido a las bajas precipitaciones. Además, desde 1977, el flujo subterráneo se encuentra retenido por la construcción de una presa y la recarga es exclusivamente por infiltración directa de la lluvia útil y los retornos de riego. La descarga se produce por bombeo y por evapotranspiración. Cuando en los acuíferos costeros las explotaciones se hacen de forma descontrolada, se produce sobreexplotación y los niveles descienden por debajo del nivel del mar, produciéndose una inversión del gradiente hidráulico que

repercute en la intrusión salina: El contacto agua dulce-salada se adentra en el continente, como ocurre en esta zona de Palomares.

Esta intrusión salina está bien documentada por los datos de calidad del agua en los sondeos. La mayoría de las muestras recogidas presentan conductividades superiores a los $2.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, límite superior de las aguas dulces, y alcanzan los $25.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en el sondeo G2-2. El sondeo G3-1, pese a estar en una zona de mayor permeabilidad, también sobrepasa los $7.000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Las condiciones hidrogeológicas de la zona estudiada son muy pobres y no permiten estudios de gran alcance incluso con un mayor número de sondeos. Los tres sondeos realizados en la zona 2 permiten estimar los gradientes hidráulicos en dicha zona. Asimismo, la escasa altura del nivel de agua en el sondeo G3-1 con respecto al nivel del mar y la condición generalizada de inversión del gradiente en el área cubierta por los puntos de agua inventariados. Estos resultados nos permiten alcanzar las siguientes conclusiones:

- 1 - El nivel freático de la zona está situado a cotas comprendidas entre los 31,87 m y los 3,15 m que arma en materiales poco permeables en la zona 2 y bastante permeables en la zona 3.
- 2 - Los gradientes hidráulicos son bajos, pero compatibles con una zona costera, lo que indica que cualquier transporte adventicio de solutos se efectuaría con lentitud. Las características arcilloso-margosas de las litologías saturadas, por debajo del nivel freático en la zona 2 aumentarían de forma considerable el tiempo de tránsito de materiales en disolución.
- 3 - Mayor interés y potencial importancia reviste la zona 3 por sus condiciones hidrogeológicas de carácter netamente acuífero, aún contando con su bajo gradiente hidráulico.

5.3.5 DETERMINACIÓN DE Pu/Am

La RERA ha completado la preparación y medida mediante LEPS de 879 muestras delgadas de tierras de Palomares provenientes de la zona 2 (339 muestras superficiales y 159 de sondeos), la zona 3 (312 muestras superficiales) y la zona 6 (87 muestras superficiales). La **Figura 44** muestra los resultados obtenidos mediante LEPS para $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$, donde se aprecia en que los valores extremos son 3,0 y 4,8 pero que la mayoría de los datos están próximos y ligeramente por debajo de 4, apreciándose pequeñas diferencias según la zona de origen de las muestras.

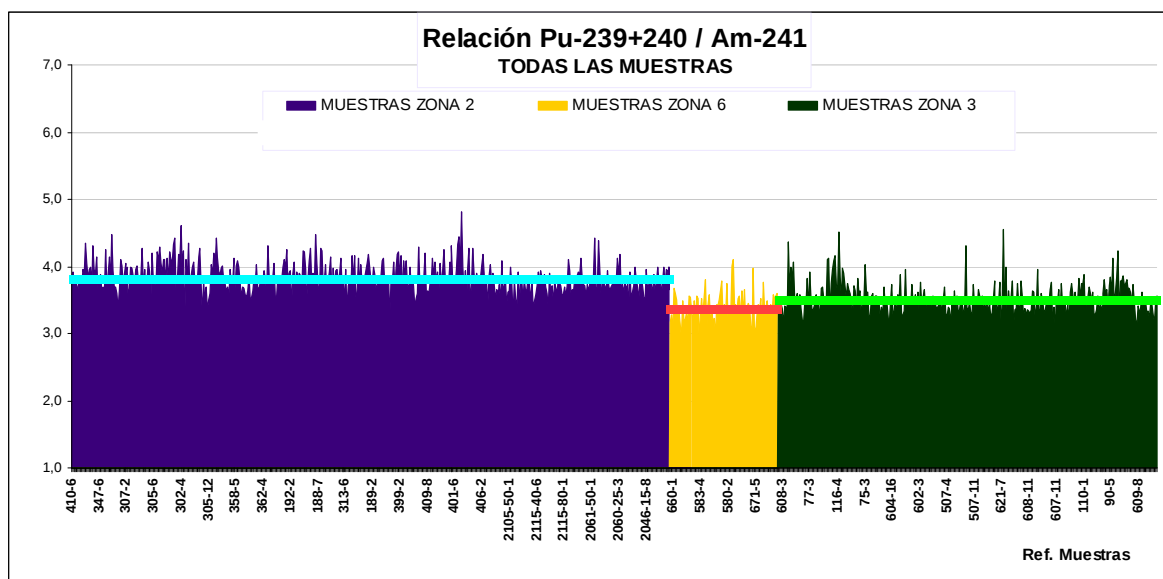


Figura 44: Resultados de la relación $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ obtenidos en el análisis mediante LEPS de las muestras delgadas de tierras de Palomares efectuados por la RERA

Para el programa de validación, a cada laboratorio colaborador se distribuyeron 75 muestras previamente preparadas y analizadas mediante LEPS por la RERA, lo que hace un total de 300 muestras empleadas en el ejercicio de validación (34% del total de muestras analizadas por LEPS).

La **Figura 45** presenta la comparación de los resultados de ^{241}Am y $^{239+240}\text{Pu}$ de cada laboratorio con los obtenidos por la RERA mediante LEPS. En ella se aprecia la buena correlación para ambos isótopos entre las determinaciones de la RERA y las de los laboratorios colaboradores, con valores del cuadrado del coeficiente de correlación r^2 superiores a 0,95 en todos los casos, excepto la medida de Plutonio en uno de los laboratorios ($r^2=0,895$). Las medidas individuales con desviaciones notables se han atribuido a diversos factores experimentales y diferencias en los procedimientos operativos de los laboratorios. Hay que mencionar que estos buenos resultados se han obtenido en rango de concentraciones desde 0 a 700 Bq.g^{-1} para ^{241}Am y desde 0 a 3.000 Bq.g^{-1} para $^{239+240}\text{Pu}$. Se concluye que las determinaciones de ^{241}Am y $^{239+240}\text{Pu}$ efectuadas mediante el análisis LEPS desarrollado por la RERA son coherentes con los obtenidos con las técnicas usuales en este tipo de determinaciones.

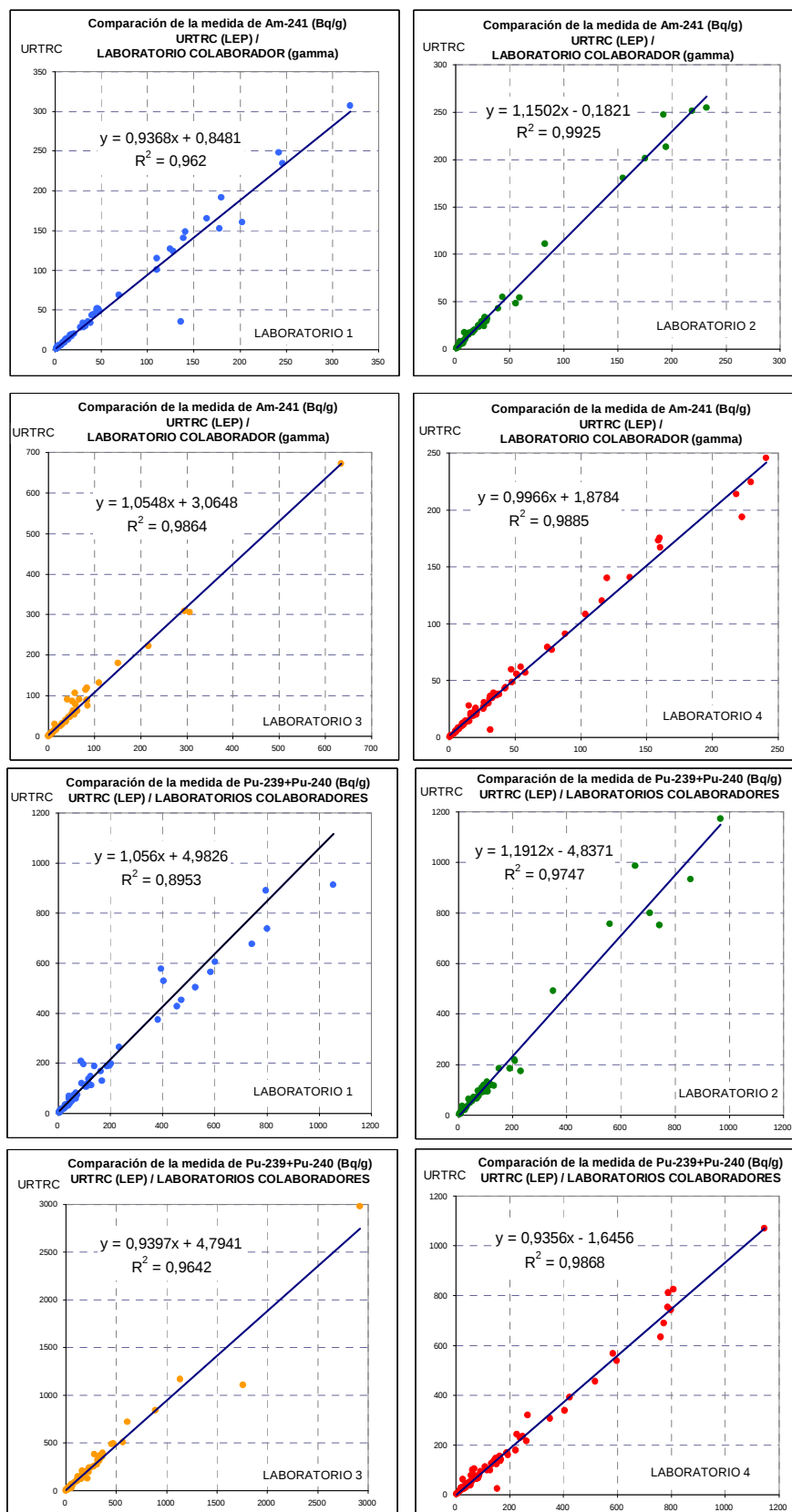


Figura 45: Comparación de las medidas de concentración de ^{241}Am y $^{239+240}\text{Pu}$ obtenidos en el análisis mediante LEPS de las muestras delgadas de tierras de Palomares efectuados por la RERA y su posterior análisis en cada uno de los cuatro laboratorios colaboradores.

La constancia relativa del valor de $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ y su independencia de otros factores como la magnitud de la actividad en la muestra permite concluir que la actividad debida a $^{239+240}\text{Pu}$ puede estimarse cuantitativamente a partir de la determinación de la actividad debida a ^{241}Am , habiéndose determinado que un valor razonablemente conservador para la relación $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}=4$ para las muestras de tierras de Palomares.

La colaboración con los laboratorios externos también ha proporcionado información actualizada sobre otras relaciones isotópicas como $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} \approx 0,02$ y $^{241}\text{Pu}/^{241}\text{Am} \approx 3$. Para completar las determinaciones se solicitó a uno de los laboratorios colaboradores que determinase por espectrometría de masas la relación atómica $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, sobre tres muestras de cada una de las zonas, resultando un valor medio de 0,0659 con una incertidumbre del 5%. Así mismo, se ha constatado que la actividad de transuránidos en las tierras analizadas se encuentra en forma de micropartículas de actividad muy variable, que mantienen las relaciones isotópicas. Este dato parece indicar que los artefactos eran homogéneos respecto a su composición isotópica y que los mecanismos de dispersión naturales o promovidos por el hombre no han separado de forma apreciable el Plutonio del Americio.

La validación demostrada del método basado en LEPS resulta de gran importancia para los objetivos del PIEM-VR, pues supone disponer de un método simple y efectivo que permite analizar un gran número de muestras con un alto grado de sistematización. La manipulación de la muestra es mínima, lo que conlleva además un bajo riesgo radiológico. El tiempo para la preparación de las muestras es mucho menor que el correspondiente a las técnicas de medida por espectrometría alfa. Además, el carácter 'no destructivo' del análisis permite procesos posteriores de verificación o comprobación mediante otras técnicas.

5.4 MODELO TRIDIMENSIONAL

Cada resultado de la caracterización radiológica se encuentra georreferenciado en un plano bidimensional con su latitud y longitud. En los datos radiológicos superficiales se ha registrado además la altitud sobre el nivel del mar, en tanto que en los sondeos se ha registrado la profundidad local del punto de medida en el testigo. Para obtener un modelo tridimensional de la situación radiológica se requiere del uso de herramientas [71] SIG que permitan realizar interpolaciones y extrapolaciones de los datos discretos, manejar bases de datos que almacenen, actualicen y recuperen la información y visualizar los modelos de manera muy eficiente.

La RERA ha elaborado un modelo tridimensional de la concentración de $^{239+240}\text{Pu}$ en las tierras de Palomares que permite tanto la visualización en diversos formatos como el análisis cuantitativo de superficies y volúmenes afectados en función de niveles de referencia del contaminante. El modelo consta de dos partes, la primera de las cuales contempla el suelo superficial hasta 15 cm y la segunda considera el subsuelo por debajo de dicho nivel hasta los 6 m de profundidad.

Para el modelo superficial, se introdujeron los más de 325.000 registros recogidos en la caracterización radiológica del suelo superficial (0-15 cm) en el programa ArcGis de ESRI [97]. Para lo cual, hubo que preparar el formato de los ficheros y emplear cartografía digital de resolución adecuada para la operación del programa en el cálculo de superficies por encima de un determinado valor de referencia. El programa dispone de varios métodos de tratamiento numérico de los datos que permite obtener áreas de valor homogéneo. La **Figura 46** presenta una imagen del modelo donde aparecen indicados los terrenos que superan los criterios de restricción de uso establecidos por el CSN y que se encuentran todas ellas en las zonas 2, 2-bis, 3 y 6.

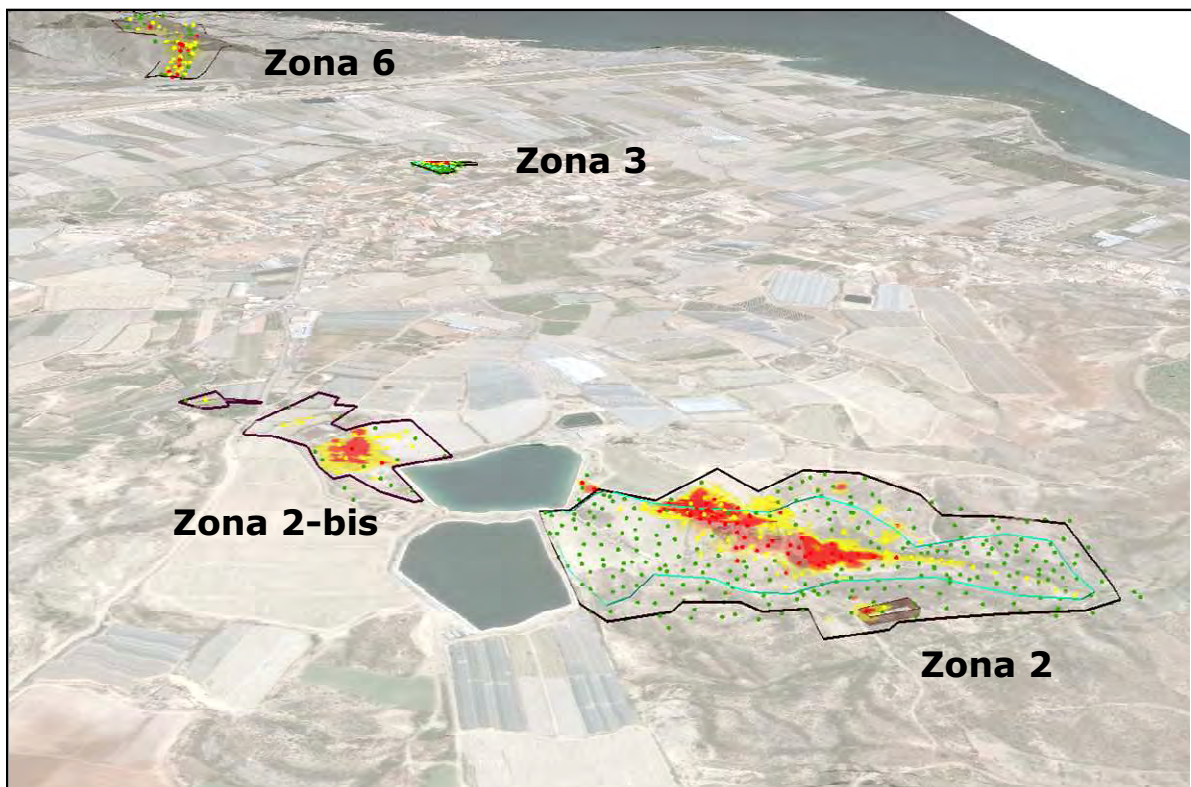


Figura 46: Perspectiva del modelo radiológico del suelo superficial en Palomares donde se muestran las áreas con valores que superan los criterios de restricción de uso parcial (en amarillo) y total (en rojo) establecidos por el CSN. Las líneas azules y negras delimitan los terrenos que entran en el alcance del PIEM-VR y su posterior ampliación.

Como se ha mencionado en la zona 6 las contaminaciones detectadas en muestras de suelo superficial y sondeos no han superado 20 cm de profundidad. En consecuencia, se puede considerar que los terrenos contaminados se limitan a los identificados en las caracterizaciones superficiales. La **Figura 47** muestra el modelo 3D obtenido con ArcGIS para la zona 6.

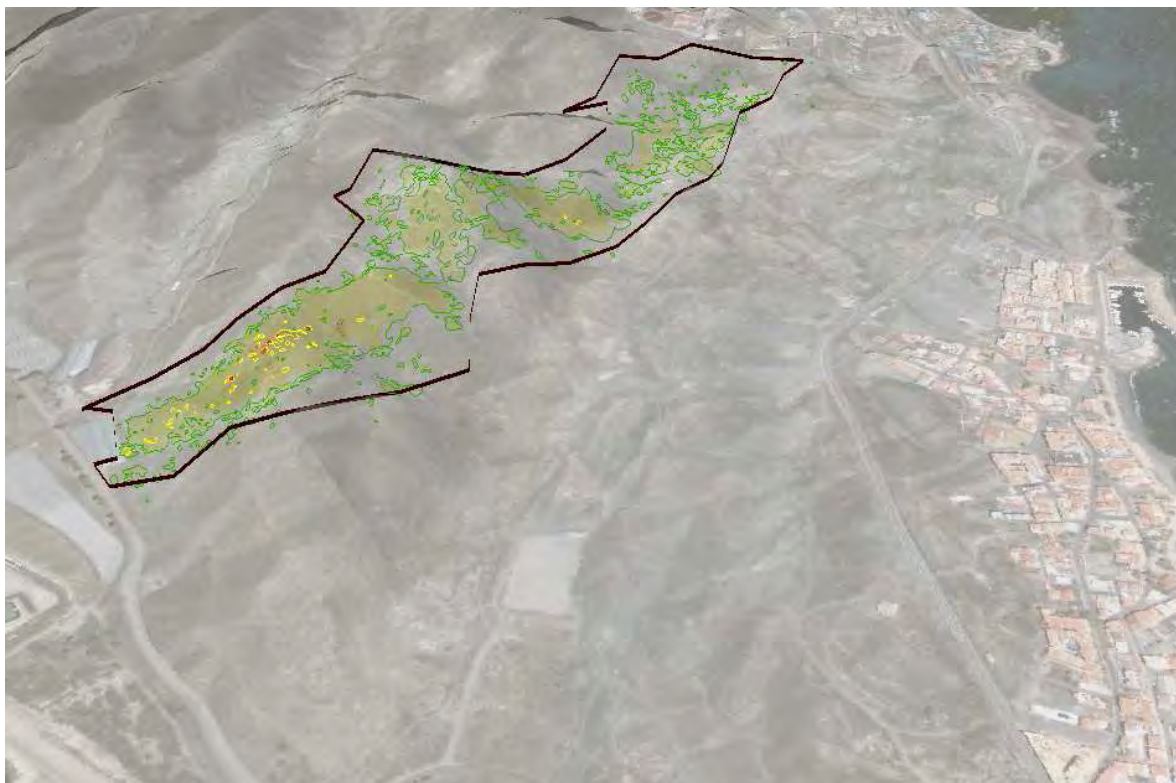


Figura 47: Modelo 3D de la zona 6, donde se asume que la distribución superficial de los contaminantes se extiende únicamente a los primeros 20 cm del suelo. Se muestran las áreas con valores que superan los criterios de restricción de uso parcial (en amarillo) y total (en rojo) .Las líneas negras delimitan los terrenos que entran en el alcance del PIEM-VR.

El modelo del subsuelo se basa en los más de 7.500 datos obtenidos con el equipo Mini-FIDLER en los perfiles radiológicos de los 321 sondeos practicados hasta profundidades entre 0,5 y 6 m. La calibración de estas medidas en términos de concentración de ^{241}Am (Bq.g^{-1}), se efectuó a partir de los resultados de los análisis por espectrometría gamma de las muestras inalteradas extraídas en los sondeos. Los datos transformados se introdujeron en el programa Environmental Visualization System (EVS) [24] que proporciona todas las herramientas de tratamiento numérico de los datos necesarios para el desarrollo de los modelos volumétricos en profundidad. El método elegido para la interpolación de los datos espaciales es el kriging [81][103][104][105][106][107][108][109][110][111][112][113][114][115], que es reconocido como el método óptimo de interpolación en geología y en predicciones geotécnicas espaciales. El kriging es esencialmente un método geoestadístico de estimación mediante el análisis local de las medias ponderadas y resulta menos arbitrario que otros métodos de interpolación, porque la ponderación del kriging se determina mediante el variograma, que representa la varianza de los valores de una variable en función de la disposición espacial de los mismos.

La Figura 48, Figura 49, Figura 50 y Figura 51 muestran algunos ejemplos de los modelos 3D obtenidos con el programa EVS donde se muestran las áreas con valores que superan los criterios de restricción de uso.

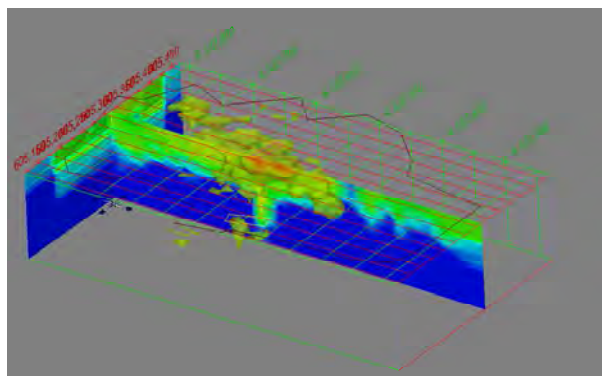
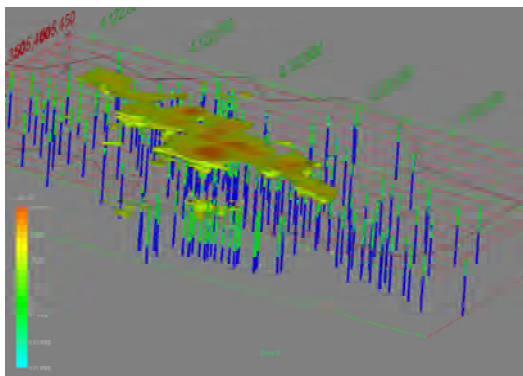


Figura 48: Modelo 3D de la zona 2 mostrando los sondeos (izquierda) y dos secciones transversales (derecha).

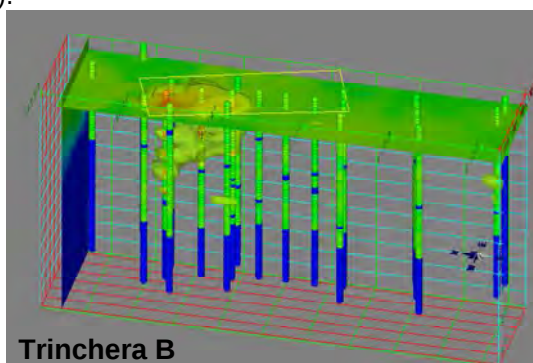
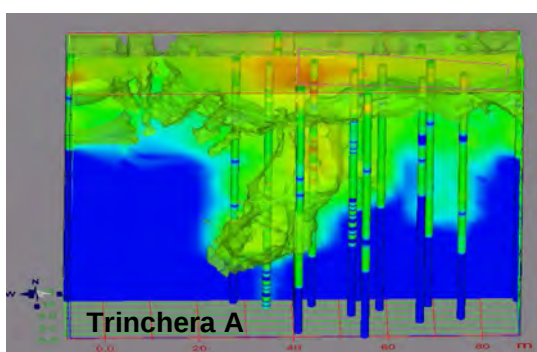


Figura 49: del modelo 3D mostrando las trincheras A y B localizadas en la zona 2

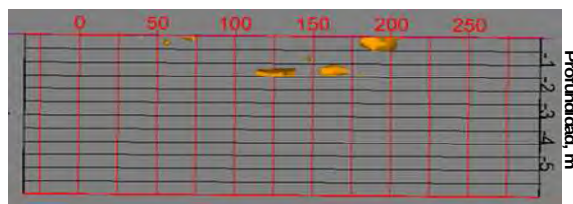
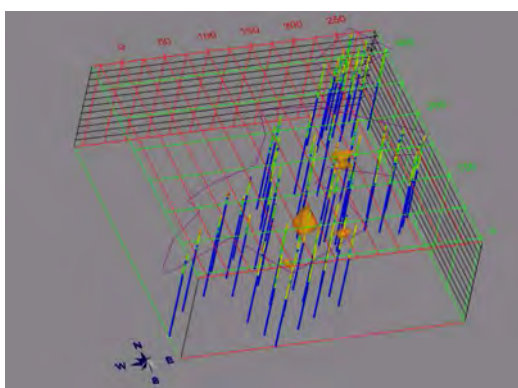


Figura 50: Modelo 3D de la zona 2-bis mostrando los sondeos (izquierda) y la proyección de los volúmenes afectados en el plano vertical (derecha).

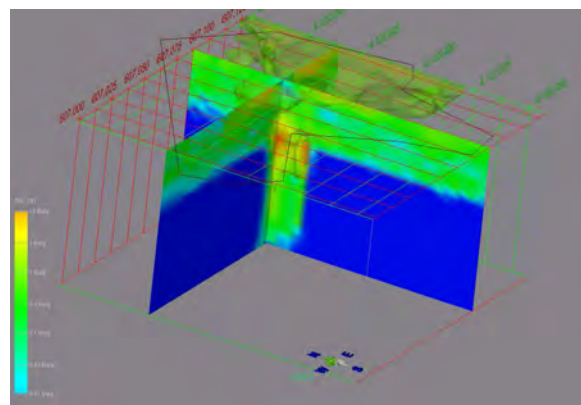
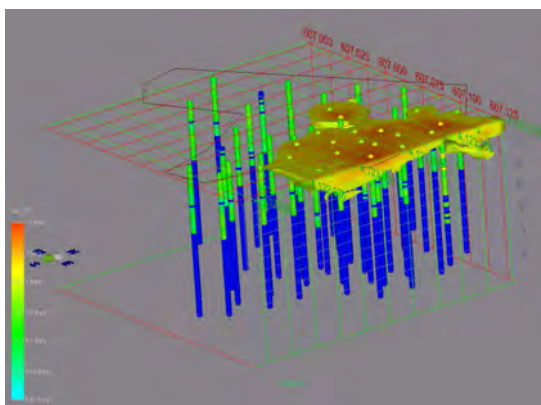


Figura 51: Modelo 3D de la zona 3 mostrando los sondeos (izquierda) y dos secciones transversales (derecha).

Los modelos expuestos (superficial y subsuelo) se han empleado para calcular los volúmenes de terrenos afectados en función de niveles de referencia en términos de los criterios de restricción de uso. En el modelo superficial basta multiplicar las superficies de las áreas afectadas calculadas con ArcGIS por 0,15 m que es el espesor del término fuente considerado en la calibración de las medidas superficiales. En la zona 6 se empleó conservadoramente un espesor 0,2 m por ser esta la máxima profundidad en la que se encontró una muestra suelo inalterado con niveles relevantes de actividad de ^{241}Am . En el modelo 3D del subsuelo, el programa EVS [98] calcula los volúmenes mediante la integración de todas las celdas nodales en las que ha dividido el modelo, clasificándolas por niveles de igual concentración con los siguientes resultados:

Zona 2: Presenta una amplia superficie contaminada (5,9 ha) con distintos perfiles a diversas profundidades (en promedio 1,5 m pero en algunas áreas llega hasta 5 m) y en algunas áreas con niveles elevados como las proximidades del punto de impacto y el interior de las trincheras, que albergan aproximadamente el 12% de tierras afectadas en esta zona y supone aproximadamente el 7% del volumen total.

Zona 2-bis: Presenta una amplia superficie contaminada (3,2 ha) principalmente en la superficie (< 0,5 m) aunque con niveles notables en algunas áreas por tratarse de terrenos inalterados. Se han detectado también zonas discretas con leves concentraciones a 1 m de profundidad.

Zona 3: Presenta una moderada superficie contaminada (0,6 ha) pero con perfiles complejos que alcanzan incluso los 5 m de profundidad incluso debajo de la edificación construida sobre material de relleno en el punto de impacto.

Zona 6: Localizada en las cumbres de algunas colinas de la Sierra Almagrera, presenta una superficie muy extensa (10 ha) en terrenos de difícil acceso y con niveles de contaminación únicamente en su superficie (< 0,3 m), aunque se han identificado algunas áreas discretas con valores elevados.

Los terrenos afectados por el criterio de restricción total de uso suponen menos del 9% del volumen de terrenos afectados por el criterio de restricción parcial de uso. Ello se debe fundamentalmente a la reducción en el volumen de subsuelo afectado, que se reduce en un factor 20 incluso alcanza el valor nulo como es el caso de la zona 2-bis. En el caso de la zona 6, la superficie y volumen afectados se reduce al 1% de los afectados por el criterio de restricción parcial de uso.

5.5 REGISTRO DE RESULTADOS

Toda la información y documentación generada en cualquier soporte y obtenida en el transcurso del objeto de este Informe se encuentra almacenada y custodiada por la RERA. La RERA ha desarrollado una aplicación informática que permite consultar y visualizar los resultados obtenidos en cada una de las fases que se han desarrollado (Figura 52).

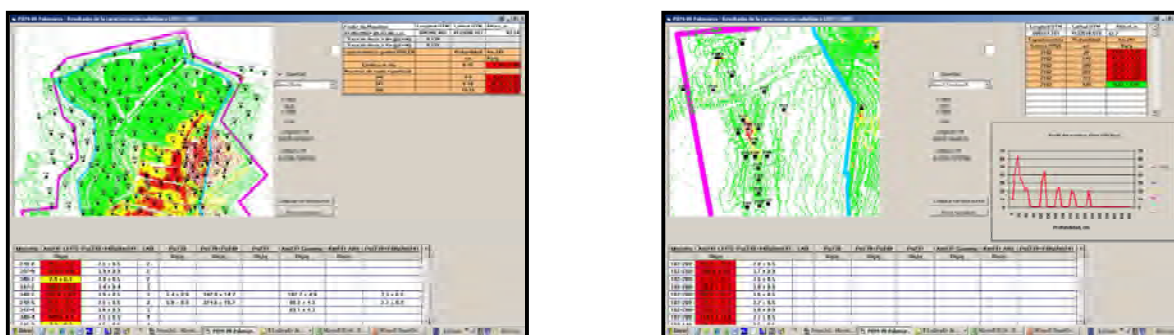


Figura 52: Ejemplos de visualización de datos de muestras superficiales (izquierda) y sondeos.

Además, de dicha aplicación, los datos de la caracterización radiológica 3D, se han incorporado a una Geodatabase de ArcGIS, que permite su visualización, análisis y operación con las herramientas propias de un GIS.

Esta unificación de datos permite que se puedan relacionar los datos de la caracterización 3D con los nuevos registros que se están realizando en las actividades del PRPP.

6 REVISIÓN INTERNACIONAL ENTRE PARES OIEA-CIEMAT

En junio de 2009 el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) realizó una Revisión entre Pares a Palomares para verificar el alcance, metodología y resultados del programa de caracterización radiológica realizado por el CIEMAT, incluyendo una visita de los expertos del OIEA a la zona para realizar comprobaciones “in situ”.

La evaluación fue muy positiva, constatando el panel de expertos, que el CIEMAT había realizado el trabajo siguiendo las recomendaciones internacionales, aportando una información rigurosa sobre el término fuente residual, básica para establecer los métodos de restauración de los terrenos afectados por el accidente de 1966, y para optimizar el balance de materiales a gestionar como residuos radiactivos. Este proceso de revisión entre pares concluyó en noviembre de 2009 [22], presentando el equipo evaluador las siguientes conclusiones:

- 1 - La caracterización radiológica del suelo de Palomares se ha realizado de acuerdo con los estándares Internacionales de Seguridad. También las medidas radioanalíticas se llevaron a cabo bajo la acreditación formal de las autoridades españolas.
- 2 - El grupo revisor del OIEA quedó impresionado con la naturaleza del muestreo y las medidas realizadas por el CIEMAT. Se consideró que estos eran adecuados para la caracterización de la contaminación de los suelos con material radiactivo en relación con los niveles de referencia predefinidos.
- 3 - El estudio del CIEMAT utiliza una variedad de técnicas según 'el estado del arte' de manera innovadora, para caracterizar la contaminación del suelo, incluido el uso del ^{241}Am como radionucleido vector del $^{239+240}\text{Pu}$.

- 4 - Las ubicaciones de las muestras y los puntos de medición utilizados se considera que son representativos de la región y adecuados para la caracterización del nivel de contaminación en el suelo.
- 5 - Las herramientas utilizadas para organizar y asignar los datos son consideradas aptas para el objetivo y representan un enfoque reconocido internacionalmente. Los mapas resultantes proporcionan un buen panorama de la situación radiológica en Palomares.
- 6 - La caracterización tridimensional del suelo es una entrada muy útil en la preparación de la estrategia de remediación. Sin embargo, para futuros trabajos es probable que se requiera examinar diferentes opciones y estimar posibles exposiciones futuras, como se menciona en la sección de recomendaciones.
- 7 - El equipo de revisión destacó las relaciones buenas y positivas que el Ciemat tiene establecidas con las autoridades y la población local. Dejando claro que había confianza en el trabajo llevado a cabo por el CIEMAT. También se observó que los habitantes de la zona están expectante por llegar a una solución definitiva para el problema de material radiactivo en la región. Así mismo se señaló la importancia de su participación en las discusiones sobre las opciones de rehabilitación para que las opciones elegidas sean las óptimas.

7 MISIÓN DE VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DEL ARTÍCULO 35 DEL TRATADO DE EURATOM

Un equipo de expertos de la Comisión de la Unión Europea realizó una misión de verificación en la zona de Palomares, en el marco del Artículo 35 del Tratado de EURATOM.

El equipo estaba compuesto por dos expertos en vigilancia radiológica ambiental de la Dirección General de Energía (DG-ENER) de la Comisión Europea. La misión de verificación, realizada durante los días 20 y 21 de abril de 2010, tenía por objeto comprobar la situación y actividades de vigilancia que se llevan a cabo en el entorno de Palomares (Almería), tras el accidente.

El artículo 35, establece que cada estado miembro de la UE debe controlar de modo permanente la radiactividad de la atmósfera, de las aguas y del suelo para garantizar el cumplimiento de las normas básicas de protección radiológica. A esos efectos, la Comisión puede supervisar los mecanismos de control y verificar su funcionamiento y eficacia.

Durante la misión se celebraron reuniones institucionales que contaron con la presencia de representantes de la Subdelegación del Gobierno en Almería, de las autoridades locales de Cuevas del Almanzora y Palomares, así como del CIEMAT y del CSN. Posteriormente, en las reuniones de trabajo mantenidas, se presentaron

los programas de vigilancia establecidos en la zona, así como los resultados de la caracterización radiológica llevada a cabo por el CIEMAT. Como parte de la agenda de la trabajo, los expertos visitaron las tierras afectadas y verificaron las medidas adoptadas para la protección del entorno y de la población de Palomares.

El equipo de verificación presentó en su correspondiente informe [139] las siguientes conclusiones:

- 1 - Los estudios radiológicos y los programas de vigilancia establecidos en las áreas de interés son apropiados y eficientes.
- 2 - Debido al vallado de las zonas 2 y 3 actualmente el potencial impacto radiológico al público por contaminación de plutonio a la opinión pública parece ser muy pequeño. Sin embargo, el grupo de verificación recomienda vallar también la zona 6, al menos el área con mayor contaminación.

El equipo destaca la gran importancia de la cooperación del Gobierno de los Estados Unidos con España para superar las consecuencias socio-económicas del desastre. El suelo contaminado con Plutonio debe retirarse y depositarse de forma segura para su almacenamiento a largo plazo. Así, el equipo recomienda ejecutar el plan de rehabilitación desarrollado por España, reduciendo el volumen de suelo contaminado (≈ 6.000 t) y este suelo debe ser retirado y almacenado con seguridad.

La asistencia de los Estados Unidos a España para la gestión de los desechos radiactivos generados en la rehabilitación del suelo contaminado se considera de primordial importancia para proporcionar una solución definitiva a este problema, sabiendo que España no dispone de instalaciones para el almacenamiento definitivo de estos materiales contaminados con Pu.

- 3 - Con respecto a la supervisión, el equipo de verificación apoya la continuación de la vigilancia de la radiactividad realizado actualmente por el CIEMAT. El equipo considera que hay que tener en cuenta la vida media extremadamente elevada de las sustancias involucradas y por lo tanto, considerar la necesidad de mantener estas medidas.

El CIEMAT; en cumplimiento de la conclusión 2ª, que recomendaba vallar la zona 6, al menos en el área de la zona con mayores niveles de contaminación, procedió a completar y señalizar un vallado (**Figura 53**) el 27 de junio de 2011, en el área más contaminada de la zona 6. Mejorando el anterior existente y que engloba todas las zonas con restricción total de uso, de acuerdo con los criterios establecidos para Palomares por el CSN, con las siguientes características:

- A) Longitud del vallado: 1.500 m lineales, con un espaciado aproximado de 4 m entre postes galvanizados situados a 2 m de altura, mediante la práctica en el terreno de orificios de 50 cm de profundidad recibidos con cemento.
- B) Instalación en el perímetro de una valla cinética de 2 m de altura, junto con accesorios para su tensionado.
- C) Instalación de dos puertas con sus correspondientes cerraduras fabricadas en malla galvanizada en dos hojas de 2 m de alto por 5 m de anchura.

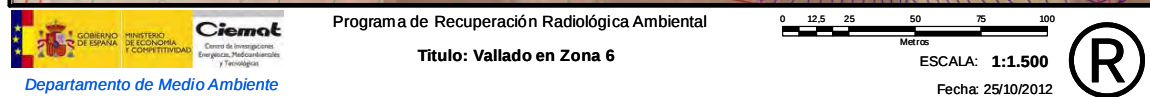
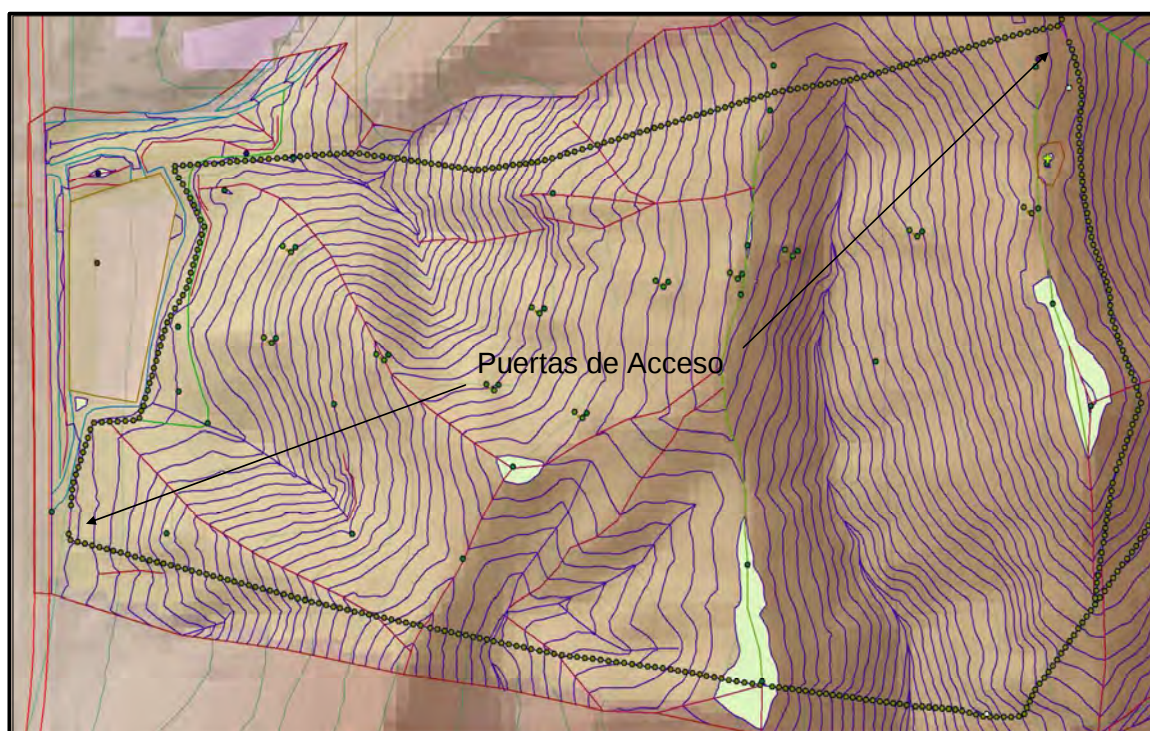


Figura 53: Trazado del vallado realizado a requerimiento del artículo 35 de EURATOM.

8 PLAN DE REHABILITACIÓN DE PALOMARES .PROPUESTA PRELIMINAR

En su día se acordó que las condiciones radiológicas tras la remediación inicial eran aceptables. En particular, considerando que las parcelas afectadas no tenían uso alguno en el momento del accidente y que eran explotadas agrícolamente de modo esporádico. Durante décadas se confirmó la vigencia de estas condiciones mediante comprobaciones experimentales realizadas por la JEN y luego el CIEMAT, constatándose que las dosis al público debidas a la contaminación remanente estaban por debajo de las establecidas en las normas de protección radiológica vigentes en cada momento. Estas comprobaciones se ejecutaron con objeto de hacer un seguimiento de la población, además de estudios superficiales de suelos, agua, aire, vegetación natural, productos agrícolas y ganaderos y sedimentos marinos [30][32][33][34][35][42][44][47][51][52][53][54][59][62][63][64][67][87][100][119][120].

Las actividades del PIEM-VR enmarcadas dentro del Anexo III [157], tuvieron como objetivo fundamental evaluar el término fuente residual en las zonas afectadas para así establecer el inventario radiológico actual y su representación en 3-D, lo que permite una selección de las posibles estrategias de recuperación.

Una vez finalizado el mapa radiológico tridimensional de Palomares, el CIEMAT prevé realizar una rehabilitación de los terrenos y, para ello, ha preparado un plan que requerirá el informe previo del CSN, según establece el Título VI (Intervenciones) del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. El plan prevé instalar “in situ” unas plantas de tratamiento de suelos con objeto de minimizar el volumen de residuos producidos de forma que sea plausible la transferencia a Estados Unidos para su almacenamiento definitivo. El plan prevé así mismo la adecuación del programa de vigilancia a estas actividades.

Como fase inicial de este plan, el CIEMAT remitió al CSN el documento “Plan de rehabilitación de Palomares. Propuesta preliminar”, que describe las líneas generales del plan de rehabilitación previsto con el objetivo de retirar la contaminación radiactiva de los suelos de Palomares y que es el objeto de la evaluación del presente informe. El Pleno del CSN lo informó favorablemente el 5 de mayo de 2010.

En líneas generales, las operaciones previstas para la rehabilitación son las siguientes:

- Extracción de tierras: desbrozado de vegetación a ras de suelo pero sin alcanzar su superficie. Después de esto se emplazarán los monitores de aire en continuo y se asegurarán los equipos de protección individual necesarios.

Las tierras afectadas de difícil acceso y que hayan permanecido inalteradas desde 1996 se retirarán mediante aspiración. Se contará con mangueras de hasta 80 m de largo.

Para reducir en lo posible la producción de polvo durante la extracción y carga de los volquetes, el suelo se regará y se contará con un sistema de supresión

del polvo (nebulización, niebla seca con tensoactivos). En caso necesario se confinará el área de trabajo y se dotará de los medios de PR necesarios.

Se realizarán comprobaciones radiológicas de las tierras remanentes después de la extracción al objeto de comprobar el cumplimiento de los objetivos.

- Tratamiento de tierras en seco: instalación estanca con sistemas de separación en función de la granulometría. En cada salida de material se instalará un sistema de medida de la radiación y segregación. En el ambiente de trabajo se controlará en continuo la concentración de actividad en aire.
- Tratamiento de tierras en húmedo: instalación no estanca con sistemas de separación en función de la granulometría. En cada salida de material se instalará un sistema de medida de la radiación y segregación. En esta instalación se construirán las canalizaciones y arquetas necesarias para evitar vertidos de aguas contaminadas al exterior de la misma.
- Expedición y transporte de los residuos radiactivos.
- Restauración ambiental: relleno de terrenos y comprobación radiológica.
- Desmontaje de las instalaciones.
- Control radiológico final.

9 SITUACIÓN ACTUAL

El Programa de Recuperación Radiológica Ambiental del CIEMAT, en la actualidad, está trabajando en las siguientes líneas de trabajo para completar la versión definitiva del PRP:

9.1 ADECUACIÓN Y AUDITORÍA INTERNA DEL LABORATORIO DE MEDIDAS

Realizar auditorías internas en base al Sistema de Gestión de Calidad del CIEMAT (SGC) para verificar la correcta implantación y cumplimiento del sistema de calidad, asegurar la corrección de no conformidades, mediante la aplicación de acciones correctivas, identificar las áreas de mejora y asegurar la eficiencia y efectividad del SGC para conseguir la calidad requerida.

Las verificaciones que se efectúan durante las auditorías comprenden diferentes actuaciones:

- La revisión de los documentos del SGC aplicables, para comprobar que las unidades organizativas auditadas disponen de los documentos que le son aplicables, así como que la emisión y control de los mismos son los adecuados.
- Examen de los registros y evidencias documentales que demuestren el cumplimiento de las disposiciones del Sistema.

- Supervisión directa de procesos, para comprobar que las actividades encomendadas a la unidad organizativa se desarrollan de manera prevista en la documentación del SGC.

9.2 EVALUACIÓN DE PESTICIDAS, METALES PESADOS E HIDROCARBUROS

La determinación de metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y pesticidas organoclorados en las muestras de suelos de Palomares, tiene como objetivo la realización de un estudio preliminar de la concentración de estos elementos y compuestos en el suelo que contendrían los suelos gestionados como residuos radiactivos.

9.3 REGISTROS HISTÓRICOS: PERSONALES Y AMBIENTALES

Actualmente se está normalizando la información y el proceso de informatización de los datos históricos de vigilancia dosimétrica de la población de Palomares, así como resultados y registros históricos de la vigilancia del medio ambiente, obtenidos durante la ejecución de los sucesivos PVR en la zona de Palomares.

Se trata de completar la documentación del proceso de informatización a efectos de contar con un registro de las actividades realizadas y cumplir con los requisitos del sistema de gestión de la calidad establecido en el CIEMAT.

9.4 MODELO DE DISPERSIÓN METEOROLÓGICA

Con objeto de evaluar el impacto ambiental por partículas, dentro del plan de vigilancia ambiental, y minimizar su impacto, como consecuencia de las diferentes actividades antropogénicas necesarias para el proceso de recuperación del suelo contaminado en Palomares, es necesario desarrollar y poner a punto una metodología de actuación que contemple la evaluación del impacto ambiental para cada escenario meteorológico. Esta evaluación se realizará mediante modelos meteorológicos y de dispersión de partículas y se complementará con medidas experimentales.

9.5 PLAN DE VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL

El objetivo es diseñar y desarrollar el PVRAP constituido por una red de estaciones de muestreo, situadas fuera de las zonas valladas, distribuidas en el área circundante a los terrenos vallados (zonas de intervención), que podría verse influenciada por la dispersión de la contaminación antes, durante y después de la ejecución y desarrollo del PRP.

Se identificarán:

- Área de influencia del PVRAP.
- Estaciones de muestreo.
- Tipos de muestra y análisis.
- Frecuencia de muestreo.

- Muestras y análisis que serán sometidos a Control de Calidad (CC) por un laboratorio diferente al que habitualmente realiza los análisis.
- Presentación de resultados analíticos y su comunicación.

9.6 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES

Este análisis definirá las condiciones técnicas y económicas para el PRP con el objeto de identificar sobre el terreno los distintos condicionantes de diseño y ejecución de los trabajos de rehabilitación.

Para ello se realizarán los siguientes estudios:

- Criterios legales
- Orografía y topografía
- Climatología
- Geología y geotecnia
- Medio natural
- Patrimonio arqueológico
- Riesgo sísmico
- Riesgos asociados a la extracción y gestión de materiales
- Riesgos por cada contaminante, vía de exposición y receptor potencial.
- Análisis de soluciones.

9.7 MANUAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS

Se establecerán para todas las operaciones contenidas en el PRP:

- Las normas básicas y medidas de protección radiológica relativas a la protección de los trabajadores, los miembros de público y el medio ambiente, contra los riesgos que resulten de las operaciones.
- Los aspectos organizativos, las funciones y las responsabilidades en relación con la Protección Radiológica.

Los textos y documentación que conforman el presente Manual y los procedimientos con él relacionados se someterán al SGC, a fin de garantizar documentalmente su efectividad dejando constancia fehaciente de sus acciones.

Las normas contenidas en el MPR-PRP corresponden tanto al desarrollo de las actividades normales de la intervención, como a circunstancias especiales que puedan presentarse como consecuencia de incidentes, accidentes y de emergencia radiológica.

El MPR-PRP aplica a cualquier actividad que implique un riesgo radiológico durante el desarrollo de cualquiera de las etapas del PRP, incluidas las etapas previas: construcción de infraestructuras y posteriores a las operaciones de rehabilitación, como el desmontaje de instalaciones y control radiológico final.

10 CONCLUSIONES

- 1) De la exhaustiva información obtenida en la caracterización radiológica 3D, se concluye que la contaminación reside en el propio suelo, en profundidades que van desde unos centímetros hasta varios metros. Dado que los contaminantes son en su mayoría emisores alfa, la exposición externa para la población es irrelevante ya que se ha constatado que no existe incremento notable en la tasa de dosis sobre los valores del fondo de radiación natural [136].
- 2) El riesgo que se podría dar en Palomares es que las partículas contaminantes que están de un modo estable adheridas a los suelos puedan ser ingeridas o inhaladas por su transferencia a alimentos o al aire. Ambas vías se controlan en la actualidad de acuerdo a los criterios de restricción de uso de los terrenos con la delimitación y control de accesos a las zonas afectadas y por tanto, puede asegurarse que la exposición de la población de Palomares es muy baja y que las dosis son irrelevantes desde el punto de vista de la protección radiológica del público.
- 3) El seguimiento desde 1966 del estado de salud en más de 1.000 habitantes de Palomares concluye que no se ha observado ninguna evidencia de patología directamente relacionada con el accidente, incluso en aquellas personas que presentan algún resultado dosimétrico por encima del límite de detección.
- 4) Desde el momento del accidente, el Gobierno de España ha realizado un esfuerzo decidido para estudiar, vigilar y en su caso resolver, el problema de la contaminación radiactiva residual en Palomares. Desde entonces, no ha existido una situación radiológica de riesgo inaceptable para la población de Palomares aunque los cambios en los usos de los terrenos suscitados en los últimos años podrían haber incrementado dicho riesgo. Por ello el CIEMAT, con el conocimiento del CSN, ha emprendido una serie de actuaciones que impidan actividades que conlleven el aumento de la exposición de la población. Más aún, de la información recopilada se ha propuesto de modo preliminar un PRP para la retirada de las tierras contaminadas.

11 REFERENCIAS

- [1] Dictamen favorable del CSN sobre el "Plan de Investigación a desarrollar por el CIEMAT en los terrenos de Palomares que requieren una especial vigilancia radiológica ambiental. Consejo de Seguridad Nuclear, 11 de diciembre de 2003.
- [2] "Palomares Summary Report". Place, W.M; Cobb, F.C; Defferding, C.G. Defence Nuclear Agency. (1975).
- [3] "Palomares Nuclear Weapons Accident". U.S. Air Force Medical Services, Revised Dose Evaluation Report. April 2001.
- [4] "Scientific Review of the Palomares Plutonium Surveillance Program 1966-1998". E. Iranzo, Ch. R. Richmond, E. Sollet, G. L. Voelz.US-DOE-CIEMAT. 1998.
- [5] "Experience Gained from a Case of Accidental Contamination by Radioactive Elements". Ramos, E; Iranzo, E: Second International Civil Defence Symposium on Nuclear Radiation Hazards, 10-15 October, Monaco. (1966).
- [6] "The limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons". Scott D. Sagan. (Princeton, NJ: Princeton University Press) pp.202 – 203. (1993).
- [7] "The toxicity of plutonium, americium and curium". Nenot, J C, and Stather, J W. Luxembourg, CEC, EUR 6157 (1979).
- [8] "A. Use of DTPA for increasing the rate of elimination of plutonium-238 and americium-239 from rodents after their inhalation as nitrates". Staher, J W, Stradling, G N, Gray, S A, Moody, J C, and Hodgson, Human Toxicol, 4, 573-82 (1985).
- [9] "Biokinetics of ²³⁹Pu/²⁴¹Am dioxide bearing dusts in the rat after inhalation: Implications for human exposure". Moody, J C, Stradling, G N, and Gray, S A. J.Aerosol Sci. 22, Supp. 1, 805-8 (1991).
- [10] "Derivation and validation of a urinary excretion function for plutonium applicable over tens of years post uptake". Jones, S R. Radiat. Prot. Dosim. 11, 19-27 (1985).
- [11] EPA-402-C-99-001(Rev.1). "Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: CD Supplement". Environmental Protection Agency. Federal Guidance Report 13. (2002).
- [12] RD 783/2001. Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes. (BOE nº 178, de 26 de julio de 2001).
- [13] Catálogo de suelos de Andalucía. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 1984.
- [14] Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Estación meteorológica de Cuevas del Almanzora. <http://www.juntadeandalucia.es/innovacioncienciayempresa/ifapa/ria>.

- [15] Mapa de suelos, escala 1:100.000, Garrucha-1015, Mojacar-1032. Proyecto LUCDEME, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1988.
- [16] CSN/C/SRA/07/121. Propuesta de ocupación temporal de terrenos en la zona de Palomares. Consejo de Seguridad Nuclear, 2 de julio de 2007.
- [17] CSN/C/SRA/08/63. Caracterización radiológica detallada en Palomares. Consejo de Seguridad Nuclear, 30 de abril de 2007.
- [18] MM5 Mesoscale Modeling System. Pennsylvania State University / National Centre for Atmospheric Research numerical model USA, PSU/NCAR (última versión octubre 2008).
- [19] Collaboration in the fields of health and safety in accordance with the Agreement for Cooperation for Civil Uses of Atomic Energy between Spain and the United States. J.A. Hall (Atomic Energy Commission), J.M. Otero (Junta de Energía Nuclear) (1966).
- [20] 6º Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR) , aprobado en el Consejo de Ministros celebrado el 23 de junio de 2006.
- [21] SG/PIEM-VR-01/09. Mapa radiológico tridimensional de Palomares. CIEMAT. Informe Final, febrero 2009.
- [22] International Peer Review on the Application of International Safety Standards for the Radiation Protection of the Public in the Environment of Palomares (Spain). Final Report. International Atomic Energy Agency. Vienna 2009.
- [23] "Procedures to define Pu isotopic ratios characterizing a contaminated area in Palomares". C. Gascó, M.P. Antón, A. Espinosa, A. Aragón, A. Álvarez, N. Navarro, E. García-Toraño. (Spain).J.Radioanal.Nucl.Chem. 222, 81-86 (1997).
- [24] Environmental Visualization System EVS 9.1. C-Tech Development Corporation, 2006.
- [25] DOE/NV/10845-57 UC-703. "Evaluation of technologies for volume reduction of plutonium-contaminated soils from the Nevada test site". Charalambos Papis; Roger L.Jacobson; Forest L.Miller; Lynn K.Shaulis. June 1996.
- [26] "Remediation of plutonium-contaminated soils". S.Amos; J.Voss; I.Croudace; P.Warwick. February 27-March 3, 2005.
- [27] "Characterization of plutonium contaminated soils from the Nevada test site in support of evaluation of remediation technologies".Guilhermina Torrao; Robert Carlino; Steve L. Hoeffner; James D.Navratil. February 2003.
- [28] "Evaluation of Remediation Methods for Plutonium Contaminated". Steve L. Hoeffner; James D.Navratil; Guilhermina Torrao.; Richard Smalley, 30 October-1 November 2001, National Energy Technology Laboratory (NETL), Morgantown, West Virginia. 32 pp, 001.
- [29] ADR. Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera. (BOE nº 164, de 11 de julio de 2011).

- [30] "Presence of plutonium contamination in soils from Palomares (Spain)". M.C.Jiménez-Ramos, R. García-Tenorio, I. Vioque, G. Manjón, M. García-León. *Environmental Pollution* 142, pp. 487 – 492. (2006).
- [31] "Determination of the Pu-240/Pu-239 atomic ratio in soils from Palomares (Spain) by low-energy accelerator mass spectrometry". E. Chamizo, M. García-León, H-A. Synal, M. Sutter, L. Watcher. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 249, pp. 768 – 771. (2006).
- [32] "On the presence of enriched amounts of U-235 in hot particles from the terrestrial area affected by the Palomares accident (Spain)". M.C. Jiménez-Ramos, H. Barros, R. García-Tenorio, I. Vioque, G. Manjón. *Environmental Pollution* 145, pp. 391 – 394 (2007).
- [33] "Characterization of Plutonium contaminated soils from the Nevada test site in support of evaluation of remediation technologies". G. Torrao, R. Carlino; S.L. Hoeffner, J.D. Navratil. WH'03 Conference, February 23 – 27, Tucson. AZ (2003).
- [34] "Evaluation of Remediation Methods for Plutonium Contaminated Soil". S.L. Hoeffner, J.D. Navratil, G. Torrao, R. Smalley. *Proceeding of Industry Partnerships for Environmental Science and Technology Conference*, Morgantown, WV. October 30 – November 1 (2001).
- [35] "Identification of Radionuclide Partitioning in soils and Sediments: Determination of Optimum Conditions for the Exchangeable Fraction of the NIST Standard Sequential Extraction Protocol". M. Schultz, K. Inn, W. Burnett, S. Biegalski, J. Filliben. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 49, pp.1289 – 1293. (1998).
- [36] H – Bomb incident crippled pilot's career. Hayes, Ron. *Palm Beach Post*, January (2007).
- [37] "America's Lost H – Bomb: Palomares, Spain". Maydew, Randall C. *Sunflower University Press*.8 (1.966).
- [38] "H – Bombs Rain down on a Spanish Fishing Village". Long, Tony. *Wired*. January (2008).
- [39] "The Day They Lost the H – Bomb and how they got it back". Moran, Barbara (Fall 2044). *Invention & Technology*.
- [40] "Dropping Nuclear Bombs on Spain, the Palomares Accident of 1966 and the U.S. Airborne Alert". Megara, John. *Florida State University*.
- [41] "El accidente nuclear de Palomares: 1966 – 1986". C. Eibenschutz Hartman; S. Lluís I Moncada; J. Martí I Valls. *Centre d'Anàlisis: Programes Sanitaris (CAPS)*. (1986).
- [42] "Distribution and Migration of Plutonium in Soils of an Accidentally Contaminated Environment". E. Iranzo, P. Rivas, E. Mingarro, C. Martin, M. A. Espinosa, E.Iranzo. *Radiochimica Acta* 52/53, 240-256 (1991).
- [43] "Experience with environmental behaviour of Pu in Palomares Spain". A. Espinosa; A. Aragón; J. Martínez Serrano; J. Gutiérrez., pp.173-186. (2000).
- [44] "Distribution and geochemical associations of radiouclides in soils of Palomares and Chernobyl scenarios". A. Espinosa; A. Aragón; J. Martínez; J.M. Pérez; F. Besuus; B. Besnainou. *Migration'95*. Saint Maló (France). (1995).

- [45] "Evaluation of remedial actions taken in an agricultural area contaminated by transuranides". Iranzo; A.Espinosa; C.E. Iranzo. Impact des Accidents d'origine nucléaire sur l'environnement 2, F.1 – F21.Cadarache (France) ISBN 2-7272-0143.5 (1988).
- [46] "Composición isotópica del plutonio grado bomba procedente del accidente de Palomares". A. Espinosa; A. Aragón; J. Martínez 25 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Granada, 17-19 Noviembre (1999).
- [47] "Radioecología de Transuránidos: Caracterización y comportamiento de partículas de combustible nuclear en suelos afectados por el accidente de Palomares". A. Aragón. Colección Documentos del CIEMAT. Editorial CIEMAT. ISBN 84-7834-460-8. (2003).
- [48] "Comportamiento ambiental de las partículas de combustible nuclear (fundamentalmente plutonio) tras un accidente nuclear en un ecosistema de tipo Mediterráneo". A. Espinosa. Editorial CIEMAT, ISBN 84-7834-459-4. (2003).
- [49] "Influence of cow urine in the bioavailability of plutonium oxide particles in Palomares soils". A. Espinosa; A. Aragón; B de la Cruz; J. Gutiérrez. Radioprotection, Suppl. 1, vol.40. (2005).
- [50] "On the dissolution of breathable PuO₂ particles". Fleischer, Rob. Health Physics 29, pp. 69 – 73. (1975).
- [51] "Plutonium Contamination from Accidental Release or Simply Fallout: Study of soil at Palomares, Spain". Rubio Montero, M.P, A. Martin Sanchez Journal of Environmental Radioactivity, Vol.55, pp. 157 – 165. (2001).
- [52] "Analysis of Plutonium in Soil Samples". Rubio Montero, M.P, A. Martin Sanchez, M.T. Crespo Vazquez, J.L. Gascón Murillo. Applied Radiation and Isotopes, VI. 53, pp. 259 – 264. (2000).
- [53] "Distribution and Migration of Plutonium in Soils of an Accidentally Contaminated Environment". Iranzo, E; Rivas, P; Mingarro, E; Marín, C; Espinosa M^a.A and Iranzo, C.E. Radiochimica Act. Vol. 52/53, pp. 249 – 256. München. (1991).
- [54] "Distribution of Pu, Am and Cs in margin sediments from western Mediterranean (Spanish coast)". Gascó, C. M.P. Antón, M. Pozuelo, J. Meral, A.M. González, C. Papucci and R. Delfanti. Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 59, N^o. 1, pp.75 – 89. (2002).
- [55] "Perturbation of the 240Pu /239Pu Global Fallout Ratio in local sediments following the nuclear accidents at Thule (Greenland) and Palomares (Spain)". Mitchell, P.J et al Science of the Total Environment, Vol. 202. pp.147 – 153. (1997).
- [56] "One of Our H-Bombs is missing". Flora Lewis, (New York: McGraw – Hill), p.12. (1967).
- [57] "The Bombs of Palomares". Flora Lewis, (New York: The Viking Press). (1967).
- [58] "A Fusion Bomb over Andalucía: Palomares Incident". David Stiles, U.S. Information Policy and the 1966.

- [59] "Concentrations of Plutonium and Americium in plankton from the western Mediterranean sea". Sanchez- Cabeza,J,A ; Merino,J ; Masque,P ; Mitchell,PI ;Vintro,LL ; Schell,Wr ; Cruz,L; Calbe A; Science of the total environment volume 311, nº.-1,pp. 233-245 .(2003).
- [60] "Multi-Technique characterization of a nuclear bomb particle from the Palomares accident". Pöllänen, R et al; Journal of Environmental Radioactivity, pp.15-28. (2006).
- [61] "Caracterización de partículas de U/Pu originadas en el accidente nuclear aéreo de Palomares, España -1966 y Thule, Groenlandia -1968". García-León, M; García-Tenorio, R.Science of the total Environment, 376, pp.294-305. (2007).
- [62] 04.7-13/14.INEEL/EXT-03-00558 (Rev.0). "Fate and transport of Pu and Am in the subsurface". Flury, M; Harsh, J.B.Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel, WXT.Idaho, LLC. (2003).
- [63] "Distribution and mobilization of Pu and Am in soil profiles of the Palomares Area". Aragón, A; Espinosa, A; Iranzo, C.E Fourth International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission products in the Geosphere, Charleston, SC USA. (1993).
- [64] "Influencia de las características del sustrato en el comportamiento biológico de los radionúclidos de vida larga". Aragón, A; Espinosa, A, Martínez, J. Congreso de la SEPR. Córdoba. (1996).
- [65] "Methodology for the Inventory of the Assessment of Plutonium contamination in a hilly area of Palomares". Espinosa, A; Aragón, A; Martinez, J; Gutierrez, J. Second Research Coordination Meeting: "Site Characterization Techniques used in Environmental Restoration". IAEA. Madrid. November, 3-7 (1997).
- [66] "Complementary Pu resuspension study in Palomares, Spain". Shinn, J.H. UCRL-ID-15098. (2002).
- [67] "Radiochemical, Chemical and Physical Characterization of radioactive particles in the environment". Burns, K. First Research Coordination Meeting (RCM) IAEA, Vienna 7-11 may (2001).
- [68] Colección Documentos CSN nº 10. "Estudios sobre dietas y hábitos alimentarios en la población española". (2002).
- [69] NCAR-TN/STR-110. "Actinides in the environment and their uptake by man". Martell, E.A. CAR Technical Note.Colorado .USA. (1975).
- [70] "241Am Concentration and 241Pu /239+240 Pu ratios in soils contaminated by weapons-grade Plutonium". Irlweck, K; Hrneck, E. Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry.242, 595. (1999).
- [71] Visual Sampler Plan. Version 1.2."User Manual".
- [72] Doc HPA; RCE-2, 5-20. "Dose Criteria for the designation of radioactively contaminated land". Mobbs, SF; Smith, KR; Cooper, JR. (2006).

- [73] Doc NRPB, 9(2), 1-12. "Radiological Protection Objectives for land contaminated with radio nuclides". NRPB. (1998).
- [74] Doc NRPB, 8(1), 1-20. "Intervention for recovery after accidents". NRPB. (1997).
- [75] Informes Técnicos CIEMAT nº 975. "Estimación del contenido de Americio existente en el año 1987 en una zona de Palomares contaminada en 1966 por material de Plutonio Grado Bomba". A, Espinosa; A, Aragón; B, de la Cruz. Octubre, 2001.
- [76] "Un mapa radiológico para Palomares". Barrigós, C. Alfa. Revista de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear. Número 2 (pp. 16-19), II trimestre 2008.
- [77] "Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil". Dautry R: 3. Rapport á l'Académie des sciences, Tec & Doc Lavoisier, Paris. (2005).
- [78] Safety Requirements, WS-R-3. "Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents ". IAEA. Vienna, (2003).
- [79] Technical Report Series Nº 424. "Remediation of Sites with Dispersed Radioactive Contamination". IAEA. Vienna, (2004).
- [80] ICRP Publication 82. "Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure". IAEA. Pergamon Press, Oxford and New York. (2002).
- [81] " Kriging". Geoff Bohling. C&PE 940, 19 October (2005).
- [82] "Isolation of Pu-isotopes from environmental samples using ion chromatography for accelerator mass spectrometry and alpha spectrometry". E. Chamizo, C. Jiménez-Ramos, L. Wacker, I.Vioque, A. Calleja, M. García-León, R. García- Tenorio. Analitica Chimica Acta 606 p.239-245. (2008).
- [83] "Comparison of near-field and far-field air monitoring of plutonium-contaminated soils from the Tonopah test range, Nevada". John L. Browne, David S. Shafer. Publication No.45181, May (2001).
- [84] "Evaluation of remediation technologies for Plutonium contaminated soil". Richard Smalley, Steve L. Hoeffner, James D. Navratil, Guilhermina Torrao. WM'02 Conference, February 24-28, Tucson, AZ. (2002).
- [85] Safety Standards Series. No TS-G-1.1 (ST-2). "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material". IAEA. Vienna, (2002).
- [86] Safety Standards. Safety Guide No. WS-G-3.1."Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents". IAEA, Vienna (2007).
- [87] "Location and isolation methodology of radioactive particles in Plutonium and Americium contaminated soil". A. Espinosa Canal, A. Aragón del Valle, Berta de la Cruz Cantero and J.A.Fernández Amigot.

- [88] "Spanish Experience in Intervention at an Accidentally Contaminated Site". Gutiérrez, J., Iranzo, C.E., Espinosa, A., Iranzo, E., In Proc. Int. Symp. On Remediation and Restoration of Radioactive-contaminated Sites in Europe. Antwerp, 11-15 October 1993. European Commission. Radiation Protection-74. 1994.
- [89] "Study on the contamination of transuranides in Pulmonata Gastropoda collected in Palomares (Spain)". A. Aragón, A. Espinosa, M.P. Antón. Czechoslovak journal of physics. Vol. 56 Suppl. D. 2006.
- [90] "Estudio de la contaminación de plutonio y americio en un área agrícola, impacto radiológico ocasionado por consumo de vegetales contaminados". A. Espinosa, A. Aragón y J. Gutiérrez. Congreso de Protección Radiológica IRPA. Brasil. 2001.
- [91] "Comportamiento ambiental de las partículas de combustible nuclear (Fundamentalmente Pu) tras un accidente nuclear en un ecosistema de tipo mediterráneo". A. Espinosa. Tesis Doctoral .2002.
- [92] ICRP Publication 66. "Human respiratory tract model for radiological protection". Annals of the ICRP 24 (1-3). International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1994.
- [93] ICRP Publication 71. "Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 4, Inhalation dose". Annals of the ICRP 25 (3/4). International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1995.
- [94] ICRP Publication 82. "Protection of the Public in Situation of Prolonged Radiation Exposure". International Commission on Radiological Protection (ICRP).1999.
- [95] "Resuspension in the Palomares Area of Spain: A Summary of Experimental Studies". E. Iranzo, A. Espinosa, J. Martinez. Journal of Aerosol Science Vol. 25, No 5 pp. 833-841. 1994.
- [96] MPR-PIEM Edición 1. Manual de Protección Radiológica para el Plan de Investigación Energética y Medioambiental en Materia de Vigilancia Radiológica en Palomares. CIEMAT, Abril de 2008.
- [97] Arc View GIS 3.2. Environmental Systems Research Institute Inc. 1992-1999.
- [98] Environmental Visualization System EVS 9.1. C-Tech Development Corporation, 2006.
- [99] "Resuspensión and transport of plutonium in the Palomares area". García-Olivares, A; Iranzo, C.E Journal of Environmental Radioactivity, 37, 1.101-104. (1997).
- [100] "Influence of the submarine orography on the distribution of long –lived radionuclides in the Palomares marine ecosystem". Gascó, C; Antón, M.P. Journal of Environmental Radioactivity 34, 2 (1997) 111-125.

- [101] "Sistema para la caracterización dinámica de emisores de fotones de baja energía en grandes superficies". Sáez Vergara, J .C; Correa Garcés, E; Sancho Llerandi, C; Burgos García, D. XI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Nº 53 Vol. XIV. Extraordinario de septiembre. P. 168 - 171. Tarragona. 2007.
- [102] "Post-accident Inhalation Exposure and Experience with Plutonium". Shinn, J.H. UCRL-JC-131173. (1998).
- [103] "Interpolation of Spatial Data. Some Theory for Kriging." Michael L. Stein. Springer Series in Statistics. (1999).
- [104] "Application of spatial filter theory to Kriging." Carr, I.R. Math. Geol. 22 1063-1079. (1990).
- [105] "Discussion of Kriging and splines: An empirical comparison of their predictive performance". Handcok, M.S. Meier, K. and Nychka, D. by G.M. Laslett. J. Amer. Statist. Assoc 89 401-403. (1994).
- [106] "Bayesian Kriging- merging observations and qualified guesses in Kriging". Omre, H. Math. Geol. 19 25-39, (1987).
- [107] "On the effect of covariance function estimation on the accuracy of Kriging predictors". Putter, H, and Young, G.A. Manuscript. (1998).
- [108] "Some asymptotic properties of Kriging when the covariance function is misspecified ".
- [109] "A comparison of kriging with nonparametric regression methods". Yakowitz, S.J. and Szidarovszky, F. I. Multivariate Analog. 16 21-53. (1985).
- [110] "A Monte Carlo comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary Kriging predictors". Zimmerman, D.L. and Zimmerman, M.B. Technometrics 33 77-91. (1991).
- [111] "The origins of kriging". Cressie, N. Math. Geol.22 239-252. (1990).
- [112] "Robustness of variograms and conditioning of kriging matrices". Diamond, P. and Armstrong, M. J. Internat. Assoc. Math. Geol.16 563-586. (1984).
- [113] "A Bayesian analysis of kriging". Handcock, M.S. and Wallis, J.R Technometrics 35 403-410. (1993).
- [114] "Robust Kriging- a proposal". Hawkins, D.M. and Cressie, N. J. Internat. Assoc. Math. Geol. 16 3-18. (1984).
- [115] "Bayesian Kriging- merging observations and qualified guesses in kriging". Omre, H. Math. Geol. 19 25-39. (1987).
- [116] "El día que perdieron la bomba". Christopher Morris Plaza y Janes. (1967).
- [117] NRPB-M444. "Biokinetics of plutonium-239 and americium-241 in the rat after the pulmonary deposition of contaminated dust obtained from soil samples at Palomares: Implications for human exposure". Stradling, G.N., Gray, S.A., Moody, J.C. et al. Chilton, National Radiological Protection Board.1993.

- [118] "The Palomares Accident. In Medical Management of Radiation Accidents". Mettler, F A, Kelsey, C A, Ricks, R C, (Eds). Chapter IV. Boca Raton, CRC Press, pp 53-65 (1990).
- [119] "Geochemical distribution of plutonium and americium in Palomares soil". Iranzo, E, Mingarro, E, Salvador, S, Iranzo, C E, and Rivas, P. In Proceedings of Seminar on the Cycling of Long-Lived Radionuclides in the Biosphere: Observations and Models, Madrid, September 1986. Madrid, CIEMAT, Volume II, pp 392-419 (1987).
- [120] "Distribution and migration of plutonium in soils of an accidentally contaminated environment". Iranzo, E, Rivas, P, Mingarro, E, Marin, C, Espinosa, MA, and Iranzo, C E. In Proceedings 2nd International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Monterey, November 1989. Radiochim. Acta, 52/53, 453-61 (1991).
- [121] "Air concentrations of ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu and potential radiation doses to persons living near Pu-contaminated areas in Palomares, Spain". Iranzo, E, Salvador, S, and Iranzo, C E. Health Phys, 52,453-61 (1987).
- [122] "Inhalation for the population near a contaminated area". Salvador, S and Iranzo, E. In Second International Congress of the International Radiation Protection Association, Brighton, 1970. Oxford, Pergamon Press, Book of abstracts, No. 190 (1970).
- [123] "Dose estimation by bioassay for population involved in an accident with plutonium release". Iranzo, E, Espinosa, A, and Iranzo C E. Presented at Second Conference on Radiation Protection and Dosimetry, Orlando, 1988.
- [124] "Radiological implications of inhaled ²³⁹Pu and ²⁴¹Am in dusts at the former nuclear test site in Maralinga". Stradling, G N, Stather, J W, Gray, S A, Moody, J C, Ellender, M, Pearce, M, and Collier, C G. Health Phys. 63,641-50 (1992).
- [125] " Biokinetics of plutonium-239 and americium-241 in the rat after the pulmonary deposition of contaminated dust obtained from soil samples at Palomares: Implications for human exposure". Stradling, G.N., Gray, S.A., Moody, J.C. et al. 1993.
- [126] "Recent animal studies on the deposition, retention and translocation of plutonium and other transuranic compounds. In Diagnosis and Treatment of incorporated Radionuclides". Bair, W J. Vienna, IAEA, pp 51-83 (1976).
- [127] "The clearance of Pu and Am from the respiratory system of rodents after the inhalation of oxide aerosols of these actinides either alone or in combination with other metals. In Biological Implications of Radionuclides Released from Nuclear Industries". Stather, J W, James, A C, Brightwell, J, and Rodwell, P. Vienna, IAEA, pp 3-25 (1979).
- [128] "Assessment of doses to adult members of the public in Palomares from inhalation of plutonium and americium". Espinosa, A., Aragon, A., Stradling, G.N. et al. Radiat. Prot. Dosim., 79, 161–164 (1998).
- [129] R.D. 1836/1999. De 3 de Diciembre por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas. (BOE nº 313, de 31 de Diciembre de 1999).

- [130] Informe DG/PRP-01/08. Mapa radiológico tridimensional de Palomares. Informe al Consejo de Seguridad Nuclear, Segundo Semestre 2007. Caracterización radiológica superficial intensiva. CIEMAT. Marzo de 2008.
- [131] Informe DG/PRP-02/08. Mapa radiológico tridimensional de Palomares. Informe al Consejo de Seguridad Nuclear, Primer Semestre 2008. CIEMAT. Septiembre de 2008.
- [132] Vigilancia radiológica en la zona de Palomares. Informe al Consejo de Seguridad Nuclear. Informes semestrales desde 1997a 2006. CIEMAT.
- [133] Inspección mediante GEORADAR (GPR) en Palomares-Almería para el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Cóndor GEORADAR, 2007.
- [134] Informe Final. INF-MA-000207. Asistencia Técnica para la realización del mapa para la vigilancia radiológica superficial en el área global de Palomares (Almería). ENUSA Industrias Avanzadas, Junio 2007.
- [135] Asistencia técnica de la UTPR de Proinsa para el control radiológico superficial de las Zonas 2,3 y 6 de Palomares (Almería). PNI19CI-50. Proinsa, julio 2008.
- [136] Informe DG/PRP-07/08. Estimación de la tasa de dosis externa debida a la presencia de transuránidos en el suelo superficial (0-15 cm). Diciembre de 2008.
- [137] INF-MA-000304. Reconocimiento del subsuelo en las Zonas 2, 3 y 6 de Palomares (Almería). Informe final de los trabajos. ENUSA Industrias Avanzadas, Junio 2008.
- [138] INF-MA-000315. Proyecto de caracterización tridimensional de los terrenos expropiados de Palomares. Estudio geológico e hidrogeológico. ENUSA Industrias Avanzadas, Julio 2008.
- [139] ES-10/01. "Verifications under the terms of Article 35 of the EURATOM Treaty .Plutonium contaminated sites in the Palomares region".
- [140] "Use of high gradient magnetic separation for actinide application". L.R.Avens; L.A.Worl; D.D.Padilla. LA-UR-96-2064. July 1996.
- [141] Directiva 96/29/EURATOM. European Basic Safety Standard Directive (BSS).
- [142] Informe nº 60. ICRP. Basic Recommendations of the ICRP.
- [143] Radiation Protection 124 (RP-1245), Comisión Europea (CE), noviembre del 2000.
- [144] CSN/SGEPR/PRO-000/47/1-87. Informe sobre los resultados del Plan de Vigilancia Radiológica asociado a la contaminación residual en la Zona de Palomares durante el año 1986.

- [145] "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium".
- [146] Joint FAO/WHO, food standards Programme Codex Alimentarius commission, Codex General Standard for contaminants and toxins in foods. Schedule 1-Radionuclides. Codex Stan 193-1995. Roma 1996.
- [147] Volume 9, nº1 Documents of the NRPB. "Revised Generalised Derived Limits for Radioisotopes of Strontium, Ruthenium, Iodine, Caesium, Plutonium, Americium and Curium".
- [148] Estimación de la dosis total recibida por la población de Palomares debida a la radiactividad natural y a la presencia de transuránidos. A. Espinosa Canal A. Aragón del Valle J. Martínez Serrano J.A. Fernández Amigot. VIII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Protección Radiológica (Maspalomas 2000). Panel.
- [149] MA/PIEM-VR-04/11. Análisis de los datos registrados de viento en la torre meteorológica de Palomares (años 2009 y 2010). CIEMAT.
- [150] Technical report 1993/94. "ECP1 contamination of surfaces by resuspended material". J. Martínez-Serrano, A. Aragón, A. Espinosa. I. Diciembre, 1994. Informe a la CEC. Final Report.
- [151] Informe SG/PIEM-VR-05/10. Resumen de datos históricos del Programa de Vigilancia Ambiental. Proyecto INDALO, 1980-2010. CIEMAT. Diciembre 2010.
- [152] Caracterización del territorio de la OCA "Costa Levante-Bajo Almanzora" (Huércal-Overa). Unidad de prospectiva, Consejería de agricultura y pesca, Junta de Andalucía. Marzo 2001.
- [153] Technical Reports Series Nº 295. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. International Atomic Energy Agency. Vienna (1989).
- [154] Regulatory Guide 4.15. Quality Assurance for Radiological Monitoring Programs (Normal Operations)-Effluent Streams and the Environment. U.S.N.R.C.
- [155] 6º Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), aprobado en el Consejo de Ministros celebrado el 23 de junio de 2006.
- [156] Project Annex II under Implementing Arrangement between the Department of Energy of the United States of America and the Ministry of Industry and Energy of the Kingdom of Spain on Cooperation in Research on Radiological Evaluations. J. Spitaleri Shaw, J.A. Rubio (2006).
- [157] Project Annex III under Implementing Arrangement between the Department of Energy of the United States of America and the Ministry of Industry and Energy of the Kingdom of Spain on Cooperation in Research on Radiological Evaluations. G.S. Podonsky, M.A. Quintanilla (2007).
- [158] CSN-C-SRA-10-65. Dictamen aceptable del Consejo de Seguridad Nuclear sobre la propuesta preliminar del Plan de Rehabilitación de Palomares. Consejo de Seguridad Nuclear, 6 de mayo 2010.
- [159] SG/PIEM-VR-01/10. Dictamen aceptable del Consejo de Seguridad Nuclear sobre la propuesta preliminar del Plan de Rehabilitación de Palomares. Consejo de Seguridad Nuclear, 6 de mayo 2010.

- [160] PT-PIEM-VR-19. Informe sobre la gestión documental de la URTRC.
- [161] DT-RERA-08. Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental de Palomares.
- [162] Dudhia, J., Gill, D., Manning, K., Bourgeois, A., Wang, W., 2002. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3). <http://box.mmm.ucar.edu/mm5/>.
- [163] Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5). Earth Tech Inc. <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>.
- [164] SG/PIEM-VR-01/10. Plan de Rehabilitación de Palomares. Propuesta preliminar. Rev. 1 Febrero 2010
- [165] Gascó C., Antón M.P., Romero L. "Radioecología de transuránidos en el Mediterráneo español". Radioprotección 1, 21-29.

12 GLOSARIO

ADR: Acuerdo Europeo de Transporte por Carretera de Mercancías Peligrosas.

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

BOE: Boletín Oficial del Estado.

BSS: Normas Básicas de Seguridad.

CAMD: Concentración de Actividad Mínima Detectable.

CC: Control de Calidad.

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas.

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear.

DOE: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ENRESA: Empresa Nacional de Residuos, S.A.

EPI: Equipo de Protección Individual.

ERA-40: ECMWF 40 Year Re-analysis (ERA-40). The re-analysis project ERA-40 will cover the period from mid-1957 to mid-2002.

EURATOM: Comunidad Europea de la Energía Atómica.

FIDLER: Field Instrument for Detection of Low Energy Radiation.

GSBAS: Global Satellite-Based Augmentation System.

ICRP: Comisión Internacional de Protección Radiológica.

JEN: Junta de Energía Nuclear.

LEPS: Low Espectrometry Photons System.

LIC: Lugares de Interés Comunitario

LID: Límite Inferior de Detección.

MP: Miembro del Público.

MPR-PRP: Manual de Protección Radiológica del Plan de Rehabilitación de Palomares.

NTS: Nevada Test Site.

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica.

PIEM-VR: Plan de Investigación Energética y Medioambiental en Materia de Vigilancia Radiológica de Palomares.

PRP: Plan de Rehabilitación de Palomares.

PSU/NCAR: Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research numerical model, USA

PVRAP: Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental de Palomares.

PVRP: Plan de Vigilancia Radiológica de Palomares.

RD: Real Decreto.

REERA: Programa de Recuperación Radiológica Ambiental

RP: Radiation Protection.

RPSRI: Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

TE: Trabajador Expuesto.

TPR: Técnico de Protección Radiológica.

URTRC: Unidad de Recuperación de Terrenos Radiológicamente Contaminados.

ZEPA: Zonas de Especial Protección para la Aves.