



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis tutores la ayuda prestada durante estos meses. A Gúmer, por brindarme la posibilidad de realizar este Trabajo Final de Grado. A María, por tu ayuda y aprecio, por ser todo un ejemplo a seguir tanto a nivel personal como profesional. Sin ti este trabajo no hubiera sido posible.

A Belén Juste, por la “máster-class” de Microshield y a José Luis Vivancos por prestarme su ayuda en parte de este trabajo.

Als meus companys i sobretot amics de la universitat en especial a Alba, Angela, Elia, Queralt, Inma, per tots els moments viscuts dins i fora de les aules.

A Blasco, per la paciència que has tingut, per fer-me tanta companyia però sobretot per dur-me berenars anti estrés ;)

A la meua família i els dinars assemblearis dels dissabtes, per escoltar-me i estar sempre al meu costat, en especial, mon tio Natxo, per formar part d'aquest projecte i fer-me prendre alguna que altra decisió important.

Als meus pares, perquè ningú m'ajuda tant com vosaltres. A tu, pare, pel teu punt de vista filosòfic i reivindicatiu, per ensenyar-me a veure les coses d'una altra manera i per ser l'heroi que sempre derrota els dolents. Y a ti ma, por creer siempre en mí, por ser una luchadora, por estar siempre a mi lado y cuidarme tanto. Eres mi persona.

A tots els meus mestres i professors de l'escola, institut i universitat, per creure i defensar una escola pública i de qualitat. Per seguir lluitant pels drets de tots i totes, per intentar sempre aconseguir la millor educació possible.



# **ÍNDICE GENERAL**

**DOCUMENTO I: MEMORIA**

**DOCUMENTO II: PLANOS**

**DOUMENTO III: PRESUPUESTO**



# DOCUMENTO I: MEMORIA

---



## ÍNDICE MEMORIA

|  |    |
|--|----|
| 1. ANTECEDENTES.....   | 7  |
| 2. OBJETIVO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO.....  | 14 |
| 3. MOTIVACIÓN DEL TFG.....   | 15 |
| 4. JUSTIFICACIÓN DEL TFG. ....   | 16 |
| 5. INTRODUCCIÓN. ....  | 17 |
| 5.1. Conceptos fundamentales. ....   | 17 |
| 5.1.1. Cadenas de desintegración.....  | 21 |
| 5.2. Incidencia radiológica. ....  | 23 |
| 5.3. Protección radiológica. ....  | 25 |
| 5.4. Descripción del problema en las balsas de fosfoyesos de Huelva.....   | 30 |
| 5.4.1. Descripción de las balsas según CRIIRAD .....   | 32 |
| 5.4.2. Descripción de las balsas según el informe presentado por la Universidad de Málaga y Universidad de Huelva .....              | 36 |
| 5.5. Descripción de los elementos radiactivos presentes en las balsas de fosfoyesos de Huelva. ....                                  | 38 |
| 5.5.1. Obtención de las cadenas de desintegración de los elementos presentes en las balsas de fosfoyesos.....                        | 40 |
| 6. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO UTILIZADO .....  | 47 |
| 7. ANÁLISIS DE LA RELEVANCIA RADIOLÓGICA DE LAS BALSAS DE FOSFOYESOS. ....   | 54 |
| 7.1. Determinación del tiempo necesario para la eliminación de la radiactividad .  | 55 |
| 7.1.1. Determinación del tiempo de decaimiento a partir del artículo de la Universidad de Málaga y de la Universidad de Huelva ..... | 55 |
| 7.1.2. Determinación del tiempo de decaimiento a partir del artículo de la Universidad de Málaga y de la Universidad de Huelva ..... | 63 |
| 7.1.3. Comparación de los resultados del tiempo de decaimiento obtenido para cada informe.....                                       | 67 |
| 7.2. Estimación de la radiación mediante Microshield .....   | 68 |
| 7.2.1. Estimación del alcance de la radiactividad a partir del informe del laboratorio CRIIRAD.....                                  | 72 |
| 7.2.2. Estimación del alcance de la radiactividad a partir del informe de la Universidad de Málaga y la Universidad de Huelva.....   | 73 |
| 7.2.3. Comparación de resultados .....   | 74 |
| 8. POSIBLE ALTERNATIVA PARA LAS BALSAS DE FOSFOYESOS. ....   | 76 |
| 9. CONCLUSIONES. ....  | 79 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA .....   | 81 |



## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 5.3: Emisiones de la Cadena del Uranio 238, expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD) .....               | 34 |
| Tabla 5.4: Emisiones de la Cadena del Uranio 235, expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD) .....               | 34 |
| Tabla 5.5: Emisiones de la cadena del Torio 232 expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD) .....                 | 35 |
| Tabla 5.6: Emisiones de la Cadena del Cesio 137 y del Cesio 134 expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kg seco) (Informe CRIIRAD)..... | 35 |
| Tabla 5.8: Cadena de desintegración del uranio 238 y del uranio 235.....   | 45 |
| Tabla 5.9: Cadena de desintegración del torio 232 y del cesio 137 .....  | 46 |
| Tabla 7.1: Tabla resumen de los datos utilizados para el análisis de la incidencia .....   | 54 |
| Tabla 7.3: Exposición por radiación según el informe CRIIRAD para diferentes distancias .....  | 72 |
| Tabla 7.4: Exposición por radiación según el informe de la Universidad de Málaga para diferentes distancias.....                                 | 73 |
| Tabla 7.5: Exposición a la radiación según la geometría anterior/posterior .....   | 74 |
| Tabla 7.6: Exposición a la radiación según la geometría isotrópica .....   | 75 |



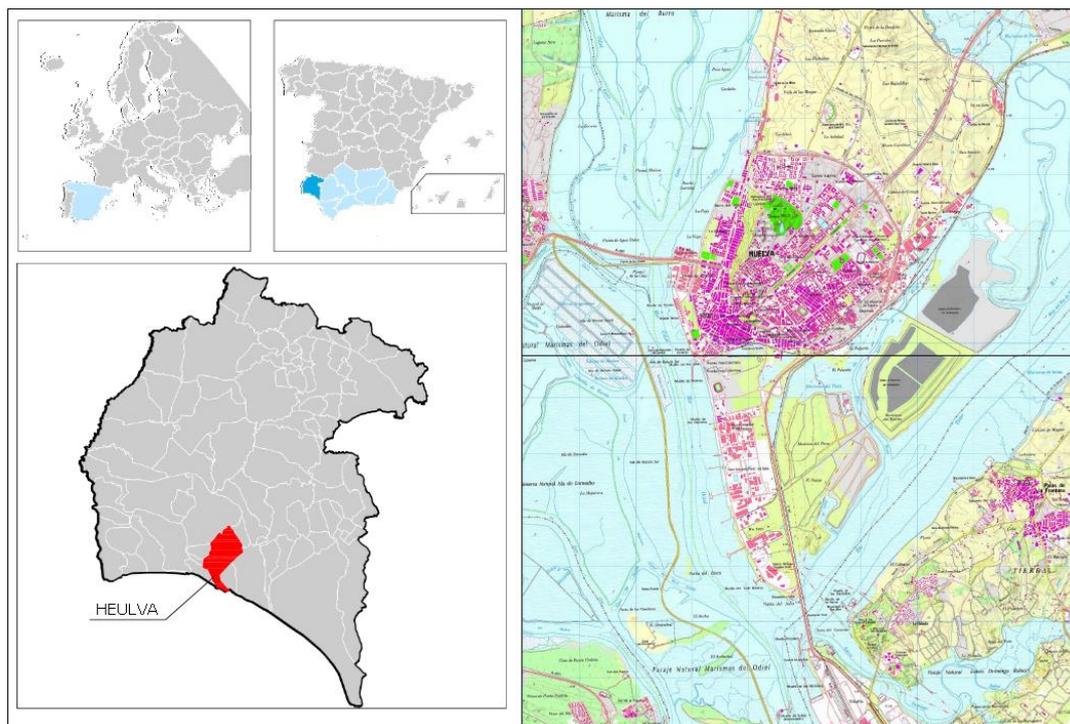
## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Ubicación de Huelva.....                                 | 7  |
| Figura 1.2: Polo Químico de Huelva.....                              | 8  |
| Figura 1.3. Diagrama de bloques: producción de fertilizantes.....    | 9  |
| Figura 1.4: Balsas de fosfoyesos en Huelva.....                      | 11 |
| Figura 1.5: Apilamiento de fosfoyesos.....                           | 12 |
| Figura 5.2: Variaciones equilibrio radiactivo.....                   | 21 |
| Figura 5.3: Cadena de desintegración del Torio.....                  | 22 |
| Figura 5.4: Cadenas de desintegración del Uranio y del Actinio.....  | 22 |
| Figura 5.5: Efecto de las radiaciones en el cuerpo humano.....       | 24 |
| Figura 5.6: Protección radiológica.....                              | 25 |
| Figura 5.7: Acceso prohibido.....                                    | 29 |
| Figura 5.8: Permanencia limitada.....                                | 29 |
| Figura 5.9: Zona controlada.....                                     | 29 |
| Figura 5.10: Ubicación y superficie de las balsas de fosfoyesos..... | 31 |
| Figura 5.11: Puntos de toma de muestra del laboratorio CRIIRAD.....  | 32 |
| Figura 5.14: Cadena desintegración U-235.....                        | 42 |
| Figura 5.15: Cadena desintegración Th-232.....                       | 43 |
| Figura 5.16: Cadena desintegración Cs-137.....                       | 44 |
| Figura 6.1: Menú principal Resrad.....                               | 48 |
| Figura 6.2: Menú principal en detalle.....                           | 50 |
| Figura 6.3: Menú navegador: pasos a seguir en la ejecución.....      | 51 |
| Figura 6.4: Menú navegador: resumen inputs.....                      | 51 |
| Figura 6.5: Menú navegador: tablas y gráficos a obtener.....         | 52 |
| Figura 6.6: Menú navegador: ayuda al usuario.....                    | 52 |
| Figura 7.2: Introducción de datos.....                               | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 7.3 Características de la zona a estudiar.....   | 56 |
| Figura 7.6: Resultados para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe CRIIRAD.....  | 59 |
| Figura 7.8: Resultados para el Ra-226 la población de niños de 15 años basados en los datos del informe CRIIRAD.....  | 61 |
| Figura 7.9: Resultados para el Ra-226 la población de niños de 1 año basados en los datos del informe CRIIRAD.....  | 61 |
| Figura 7.11: Resultados para la población de niños de 15 años basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga.....   | 63 |
| Figura 7.12: Resultados para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga.....   | 64 |
| Figura 7.14: Resultados para el Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga.....  | 65 |
| Figura 7.15: Resultados para el Ra-226 para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga.....  | 66 |
| Figura 7.17: Elección de la geometría de la fuente radiactiva.....  | 69 |
| Figura 7.18: Dimensionamiento de la fuente radiactiva.....  | 70 |
| Figura 7.19: Elección del tipo de material de la fuente.....  | 70 |
| Figura 7.20: Introducción de los datos de las actividades de cada radionucleido.....  | 71 |
| Figura 8.1: Resultados de dosis efectiva para la población de niños de 15 años basados en los datos del CRIIRAD con una capa de recubrimiento de 4,5 metros.....                            | 76 |
| Figura 8.2: Resultados de dosis efectiva del Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos del CRIIRAD con una capa de recubrimiento de 4,5 metros.....                 | 77 |
| Figura 8.3: Resultados de dosis efectiva para la población de niños de 15 años basados en los datos de la Universidad de Málaga con una capa de recubrimiento de 1,5 metros.....            | 78 |
| Figura 8.4: Resultados de dosis efectiva del Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos de la Universidad de Málaga con una capa de recubrimiento de 1,5 metros..... | 78 |

## 1. ANTECEDENTES.

La ciudad de Huelva, se encuentra situada entre los ríos Tinto y Odiel, cuya confluencia da lugar a la ría de Huelva. La ciudad de Huelva tiene una extensión de 149 km<sup>2</sup> y una población de alrededor de 148.000 habitantes. La ubicación de la misma se encuentra en la Figura 1.1:



**Figura 1.1:** Ubicación de Huelva

A escasos metros de la ciudad, se encuentra el denominado Polo Industrial de Huelva, cuya construcción fue aprobada en 1964 (Decreto de 30 de junio de 1964).

El establecimiento del Polo Industrial en Huelva se justificó por las altas tasas de desempleo, el escaso desarrollo de la zona durante esa época y el posible aprovechamiento minero de zonas cercanas. Desde la instalación del polo, Huelva y los municipios vecinos, están estrechamente ligados a la industria química (gas natural, refinерías de petróleo o centrales térmicas entre otros). En la actualidad diversas industrias tienen sus instalaciones en Huelva, tales como: Cepsa, Enagás, Endesa, Repsol YPF, Fertiberia, generando grandes vertederos con gran controversia medioambiental.

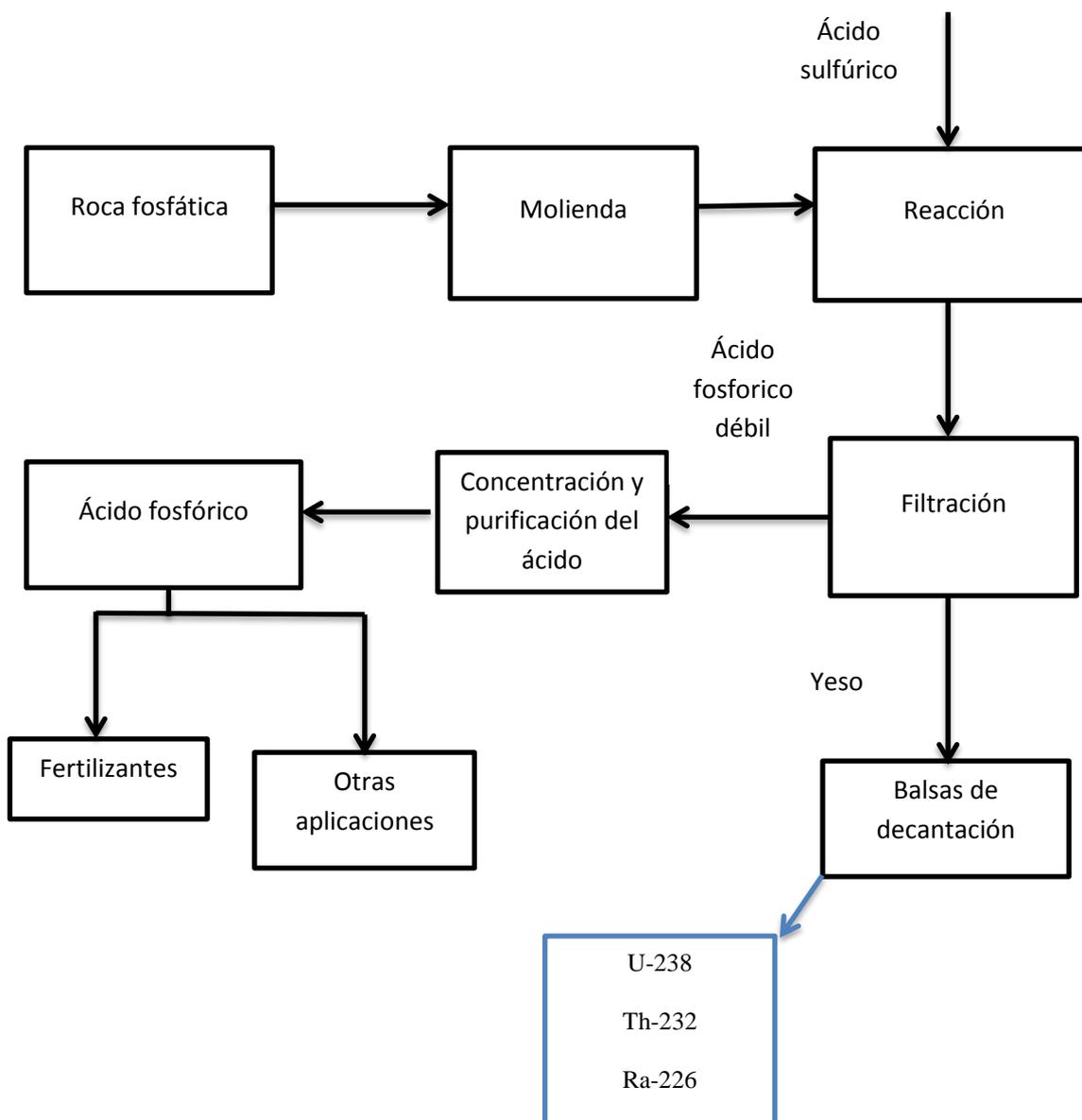
Fertiberia es una gran empresa del sector de fertilizantes en la Unión Europea. Su capacidad de producción alcanza los cinco millones de toneladas entre productos intermedios y finales y cuenta con dos Jefaturas Zonales, ocho Delegaciones de Ventas y cinco unidades de producción entre las que destaca Huelva. Esta empresa se dedica a la producción de fertilizantes: produce ácido fosfórico a partir de la roca fosfórica (proveniente de las minas de África) que contiene de forma natural trazas relativamente altas de uranio y torio. En el proceso industrial, la roca fosfática se tritura y se ataca mediante ácido sulfúrico produciendo ácido fosfórico y yeso, también denominado fosfoyeso, que posteriormente es vertido en balsas.

Dentro del mismo sector de producción de fertilizantes se encuentra también FMC Foret, cuyos vertidos, aunque en menor cantidad, han contribuido junto con los de Fertiberia a ocupar una gran extensión en el Polo Químico. Figura 1.2:



**Figura 1.2:** Polo Químico de Huelva

En el diagrama de bloques de la Figura 1.3 se observa el proceso de producción de fertilizantes seguido por Fertiberia y FMC Foret.



**Figura 1.3:** Diagrama de bloques: producción de fertilizantes

Alrededor de un 85% del uranio y un 30% del torio presentes en la roca fosfática (fosforita) acompañan al ácido fosfórico en la disolución formada. En el residuo obtenido, el fosfoyeso, queda más del 90% del radio y hasta un 70% del torio [1].

Las elevadas cantidades de elementos radiactivos una vez depositadas en las balsas suponen un riesgo importante para la población de Huelva ya que en algunos casos se llega a superar los límites legales establecidos de dosis a recibir.

En 1968 la empresa FESA (posteriormente Fertiberia) empezó a verter sus residuos (fosfoyesos), provenientes de la producción de fertilizantes, en las marismas del río Tinto en la provincia de Huelva. Las denominadas balsas de fosfoyesos están situadas a una distancia entre 500 metros, límite de la población más cercana, y 4 km, la zona más alejada de la capital onubense.

No es hasta 1989, a instancias del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), que se encarga al CIEMAT, que a su vez traslada a Egmasa, la realización de los primeros informes sobre la situación radiológica resultante de la operación de la industria de los fosfatos. Como resultado del estudio de 1989, el CSN envió una serie de sugerencias a la Junta de Andalucía en la gestión de los residuos y la restauración de las balsas de fosfoyesos, entre las que estaba la atenuación de las emisiones de gas radón (producto de la desintegración de Ra-226) utilizando una cubrición adecuada para los depósitos de fosfoyesos, incluyendo la restauración de la vegetación.

Entre 1991 y 1993 la empresa pública EGMASA, dependiente de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, inicia la restauración de 400 Ha en la denominada Zona 1, situada al sur de la zona de vertido, en cumplimiento de las condiciones de la concesión no atendidas por Fertiberia. La restauración consistió en la recubrición con 30 cm de tierra arcillosa y plantación de diversas especies vegetales.

En 1995 Fertiberia S.A. presenta un Proyecto de Reordenación de Vertidos ante la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía que lo aprueba un año después, en diciembre de 1996, con el propósito de disminuir la contaminación en la ría. La aprobación del proyecto implicaba la apilación de los fosfoyesos a 25 metros de altura.

En 1997 tanto Fertiberia como Foret, tras 29 años, cesan sus vertidos directos del agua resultante de la decantación al río y por tanto al mar, iniciando un proceso de recirculación del agua en circuito cerrado. Para ello se construirían 2 balsas de decantación que irían creciendo hasta un máximo de 25 m en las que se irían depositando las aguas con fosfoyesos. Una tercera balsa recogería las aguas aclaradas que volverían a la planta para su recirculación.

En septiembre de 1997, la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía junto con el Ayuntamiento de Huelva y Fertiberia, firman un acuerdo para la rehabilitación y recuperación de algunas de las antiguas balsas de las marismas de Mendaña (zona 4) mediante materiales diversos de relleno provenientes, entre otros, de la planta de la Empresa de Gestión Medioambiental S.A. (EGMASA) [2], para un proceso semejante a la zona 1, con recubrición posterior de tierra fértil.

En mayo de 1998 en las instalaciones de Acerinox, empresa productora de acero inoxidable, en Algeciras, se fundió una partida de virutas de acero contaminadas con cesio 137. Las cenizas que se generaron en la fundición del acero fueron llevadas a la planta de inertización de Palos de la Frontera como era habitual. Estos residuos fueron gestionados por EGMASA sin conocimiento alguno de la contaminación radiactiva que sufrían. El material ya inertizado era utilizado como material de relleno en la recuperación de las balsas de la zona 4. A causa del vertido accidental de cesio 137, el material de relleno quedó contaminado también y depositado en una de las balsas de las marismas [3].

Ese mismo año de 1998, en diciembre, 50.000 toneladas de residuos de las balsas de fosfoyesos se esparcieron al romperse el talud de contención de una de las balsas. Este vertido llegó al río Tinto aumentando la cantidad de metales pesados, arsénico, fosfatos y radiactividad [4]. El suceso provocó una grave contaminación en el medio marino y para la salud humana.

En 1998, EGMASA, informa que la intervención y restauración en las 400 hectáreas de estanques (Zona 1) llevadas a cabo por la Agencia de Medio Ambiente entre 1991 y 1993, junto al cese de los vertidos directos de fosfoyesos a los ríos Tinto y Odiel, habían generado una clara mejora en la situación radiológica en la zona, con radiaciones de fondo similares a otras zonas de la ría.

En octubre de 1998, se abre un expediente sancionador a Fertiberia por *incumplimiento de cláusulas* y un *expediente de caducidad de la concesión* un mes después. En abril de 1999 la Subdelegación del Gobierno dictaminó el expediente sancionador con una multa de diez millones de pesetas ante el Tribunal Superior de Justicia de Andalucía (TSJA) y aunque Fertiberia recurrió la sanción, ésta se hizo firme en febrero de 2005 [4].

Desde 1998 se realizan diversos análisis e informes, a petición de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (EGMASA) y del CSN (CIEMAT) encargados a organismos y Universidades (Huelva, Málaga y Sevilla).

Durante 2000 y 2001 el Ministerio de Medio Ambiente deniega y desestima, respectivamente, la solicitud de modificación de la concesión y su recurso interpuesto por Fertiberia [3].

En noviembre de 2003 y después de que la Audiencia Nacional dictaminase a favor del Ministerio de Medio Ambiente, se emite una orden en la que se declara la caducidad de la concesión de que disponía Fertiberia hasta entonces. En la Figura 1.4 se observan las balsas en las que vertía Fertiberia:



**Figura 1.4:** Balsas de fosfoyesos en Huelva

Siguiendo con recursos y apelaciones por parte de Fertiberia y del Ministerio, en marzo de 2004, el T.S.J.A. falla a favor de la sanción impuesta por la Dirección General de Costas en noviembre de 1998. Adicionalmente, el responsable de transportes y el Director de fábrica de Fertiberia fueron condenados a un año y seis meses de cárcel, un año y seis meses de inhabilitación profesional, así como una multa por un delito contra el medio ambiente y los recursos naturales [3].

En 2007 la Audiencia Nacional dictó una sentencia por la que se confirma la resolución de la caducidad de la concesión [5]. Durante este año y el siguiente, continúan produciéndose una serie de recursos y apelaciones por parte de la empresa hasta enero de 2009, año en el cual el Tribunal Supremo (TS) rechaza la petición de Fertiberia de suspensión cautelar de la sentencia que declaraba la caducidad de la concesión [6].

El TS fijó como fecha de cese de vertidos (Figura 1.5) el 31 de diciembre de 2010 e instó a Fertiberia a realizar una regeneración de los terrenos en los que se encuentran las balsas de fosfoyesos [7].



**Figura 1.5:** Apilamiento de fosfoyesos

El 27 de mayo de 2010, se publica un auto de la Audiencia Nacional en el cual se critica “la pasividad impropia” así como la demora injustificada en la recuperación y regeneración de las zonas afectadas de la marisma de Huelva por parte de Fertiberia [9].

En octubre de 2010 a requerimiento de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, EGMASA, realiza un “Estudio del coste económico y temporal del traslado a vertederos de las balsas de fosfoyesos” con un coste total estimado de 2.500 millones de euros y 30 años para su realización.

El pasado mes de octubre de 2014, una vez iniciada ya la ejecución del Trabajo Final de Grado, Fertiberia ha presentado ante la Audiencia Nacional el “Proyecto Constructivo para la clausura de las Balsas de fosfoyesos”. Según fuentes de *El diario de Cádiz*, Fertiberia considera que se necesitan aproximadamente treinta años para la recuperación de las balsas. La recuperación propuesta consiste en la eliminación del agua presente en las balsas y la cubrición de las mismas mediante una capa de polietileno así como la revegetación de la zona.

Este mes de diciembre la Audiencia Nacional ha admitido a trámite la petición de que Fertiberia avale con 2.546 millones la retirada de los fosfoyesos.

## 2. OBJETIVO DEL TRABAJO FINAL DE GRADO.

El objetivo del presente Trabajo Final de Grado (TFG) es el análisis de la situación radiológica de las balsas de fosfoyesos de Fertiberia y su posible impacto ambiental sobre la población de la ciudad de Huelva utilizando para ello como novedad el programa informático ResRad.

Como fuentes de datos para el análisis se utilizarán dos informes medioambientales (de 2005 y 2007) sobre los vertidos de Fertiberia en las marismas de los ríos Tinto y Odiel en la provincia de Huelva. El primero de ellos fue realizado a petición de la empresa pública EGMASA, dependiente de la Junta de Andalucía, titulado *Exhalation of Rn222 from phosphogypsum piles located at the Southwest of Spain*, publicado en el *Journal of Environmental Radioactivity* [8] El segundo estudio ha sido realizado por el laboratorio francés CRIIRAD a petición de la asociación ecologista Greenpeace y titulado *Control radiológico de las balsas de fosfoyesos y del vertido de Cesio 137 del centro de recuperación de inertes (CRI-9)* (Informe nº 07-117) [9].

Los datos suministrados por ambos informes se utilizarán para realizar estimaciones mediante los programas informáticos ResRad y Microshield, así como posibles valoraciones de las actuaciones realizadas.

El programa ResRad, es una aplicación de escasa utilización en Europa, y casi nula en España, pero con una elevada tasa de éxito en Estados Unidos. Este programa proporciona, entre otros parámetros, el tiempo necesario para el decaimiento de los elementos radiactivos, sus concentraciones a lo largo del tiempo, las cantidades de radón dispersadas, etc., pero sobretodo presenta la incidencia radiológica a través de diversas vías de exposición (radiación externa, inhalación e ingestión) y las tasas efectivas de exposición atendiendo a distintas poblaciones en función de la edad.

El programa Microshield estima las exposiciones por radiación tipo gamma de una población y analiza diversos blindajes para así reducir el impacto radiológico en dichas poblaciones. En el caso de las balsas de fosfoyesos el único blindaje es la propia atmósfera y el factor relevante será la distancia hasta el foco emisor de los diversos grupos de población.

### 3. MOTIVACIÓN DEL TFG.

Durante el curso 2013-2014 en el Grado en Ingeniería Química, especialidad en Medio Ambiente, asistí a la clase de Tecnología Nuclear cuyo temario introducía conceptos básicos de la energía nuclear y las radiaciones, los reactores nucleares y sus características de diseño, el ciclo de combustible de uranio y los materiales radiactivos de origen natural (NORM). En esta asignatura surgió mi interés por el tema nuclear y las negativas consecuencias del mismo si no se toman las medidas necesarias. Por ello, me puse en contacto con mi actual tutor Gumersindo Verdú, quien propuso varios temas a elegir entre los cuales estaba las balsas de fosfoyesos de Huelva. En una primera lectura, no me pareció que un “vertedero de fertilizantes” en la otra parte de España fuese interesante. Sin embargo, cuando posteriormente me fui documentando sobre el tema, me sorprendió la magnitud del problema y cómo ha pasado casi inadvertido durante todos estos años

Además, los estudios, puntuales o de seguimiento, realizados sobre la zona presentan disparidad de resultados en diversos parámetros analizados, por lo que el acercamiento a la problemática suponía un reto, tanto profesional como personal. Por todo ello, decidí involucrarme en el presente TFG, para analizar la situación tratando aspectos de forma diferente que puedan acompañar propuestas que sirvan para regenerar las 1,200 hectáreas contaminadas de fosfoyesos con la mayor brevedad posible.

#### 4. JUSTIFICACIÓN DEL TFG.

Durante las últimas décadas se han realizado diversos estudios medioambientales, con la colaboración de la empresa Fertiberia, o sin ella, algunos por exigencias judiciales, en los cuales se reflejaban las concentraciones de emisiones radiológicas que suponía el vertido de sus productos en las marismas de Huelva. Por otra parte, existen documentos de asociaciones ecologistas e instituciones científicas independientes sobre la radiactividad existente en las balsas de Huelva. Los datos y resultados de los distintos documentos muestran valores muy diferentes, con discrepancias significativas.

Ante esta situación, el presente TFG pretende profundizar en el análisis de los datos a partir de dos de los documentos consultados y compararlos e intentar proporcionar actuaciones que mitiguen los efectos perniciosos del vertido de fosfoyesos en las marismas onubenses.

Ambos estudios y sus correspondientes informes se realizaron con posterioridad a las primeras intervenciones efectuadas sobre las balsas (cubrición con materiales inertes), la retirada posterior de parte de estos materiales contaminados con Cesio 137, así como los trabajos de restauración emprendidos tras la rotura de los taludes de contención de una de las balsas que vertió 50.000 Tm de materiales altamente tóxicos (cerramiento perimetral mediante un canal de recogida de aguas usadas para el transporte de los fosfoyesos), ambos sucesos ocurridos en 1998.

Para la realización del TFG se han utilizado y comparado los resultados de emisiones obtenidos por el laboratorio francés CRIIRAD y los publicados en el artículo de la revista *Journal of Environmental Radioactivity* presentados en el apartado de 2 del presente TFG.

Por otra parte, este Trabajo Final de Grado supone la culminación del Grado en Ingeniería Química y la obtención del título otorgado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valencia.

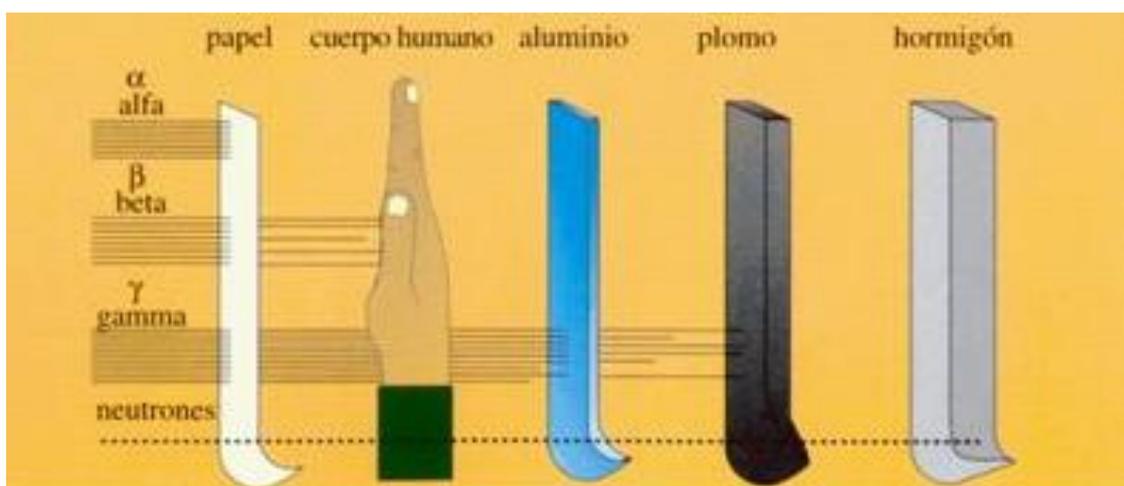
## 5. INTRODUCCIÓN.

### 5.1. Conceptos fundamentales.

La radiactividad es un fenómeno físico natural que se produce en el núcleo de ciertos elementos capaces de transformarse en núcleos de elementos de otros átomos. Algunos cuerpos emiten radiaciones con distintas propiedades tales como producir fluorescencia, ionizar gases, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Esta emisión, su propagación y la transferencia de energía se denominan radiación y se produce mediante ondas electromagnéticas.

La radiación puede clasificarse según si tiene o no suficiente energía como para romper los enlaces que unen los átomos del medio que irradian, esto es, radiación ionizante o no ionizante respectivamente.

Según la interacción con la materia, existen tres tipos diferentes de radiación, que se muestran en la Figura 5.1:



**Figura 5.1:** Tipos de radiación

Siguiendo la representación de la Figura 5.1 y sabiendo que un proceso radiactivo es una *transición espontánea desde un estado energético inicial del núcleo a un estado final* y que se produce debido a que la energía total del sistema inicial es superior a la del sistema final, se pueden distinguir:

- **Radiactividad alfa**, formada por partículas pesadas con carga positiva, un núcleo de He formado por dos neutrones y dos protones. Sólo la pueden presentar nucleídos con número másico  $A > 150$ . Tiene una capacidad limitada de penetración en la materia. El proceso viene dado por la expresión de la ecuación 5.1:



- **Radiactividad beta**, partículas ligeras formadas por positrones (con carga positiva) y por electrones (carga negativa). Tiene una capacidad de penetración en la materia ligeramente superior a la radiación alfa, pero menos intensa. Este tipo de emisión la puede presentar cualquier nucleído sea cual sea su número atómico  $Z$ . Los distintos tipos de radiación beta se agrupan en tres procesos de desintegración:

1. *Desintegración beta negativa*: emisión espontánea de electrones (partículas beta negativas) cuyas velocidades son muy próximas a la velocidad de la luz. Son emisores beta negativos los radionucleidos muy ricos en neutrones. Se convierte un neutrón (n) en un protón (p), un electrón ( $e^-$ ) y un neutrino ( $\bar{\nu}$ ) según la ecuación 5.2:



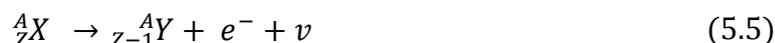
El núcleo descendiente tendrá un número atómico mayor que el precursor y mismo número másico (5.3):



2. *Desintegración beta positiva*: emisión de positrones. Se convierte un protón en neutrón, un positrón y un neutrino según la ecuación 5.4:



El núcleo descendiente tendrá un número atómico menor que el precursor y mismo número másico, según la ecuación 5.5:



En la desintegración *beta* positiva, los positrones que se emiten no son partículas estables, son emitidos y pierden parte de su energía cinética por lo que se combinan con un electrón libre del entorno.

3. *Captura electrónica*: algunos de los electrones que se encuentran en la corteza terrestre pueden ser capturados por un núcleo teniendo lugar el proceso a partir de la ecuación 5.6:



La desintegración en forma de captura electrónica se produce de igual forma que en la desintegración beta positiva según la ecuación 5.7



- **Radiactividad gamma**, formada por fotones sin carga ni masa. Se considera la radiación más penetrante de todas. Este tipo de radiación se emite cuando un núcleo pasa de un estado excitado a otro de menor energía. El proceso se expresa mediante la ecuación 5.8:



Donde \* indica que el núcleo está en un estado excitado.

La radiactividad proviene de la inestabilidad de algunos núcleos atómicos, concretamente del número de neutrones que lo conforman. Se considerará que el núcleo es estable si el número de neutrones es ligeramente superior al número de protones, ya que en él, tanto protones como neutrones están unidos por fuerzas cuya intensidad impide que escape cualquier partícula. Por el contrario, si el número de neutrones no está compensado con el número de protones, el núcleo del átomo no será estable y de forma espontánea tienden a alterar su composición emitiendo partículas y reaccionando hasta alcanzar una configuración estable (radiactividad).

Existirá un exceso de energía que será liberada o bien en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma, rayos X) o bien en forma de emisiones alfa, beta o gamma.

Los núcleos radiactivos siempre se desintegran de forma aleatoria independientemente de la temperatura, humedad, etc., del ambiente. Cada uno de los elementos radiactivos se caracteriza por una constante de desintegración ( $\lambda$ ) que indica la probabilidad de que un núcleo se desintegre por unidad de tiempo, aunque normalmente se utiliza otra constante: periodo de semidesintegración. El periodo de desintegración es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de una muestra determinada, según la ecuación 5.9:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5.9)$$

Siendo  $T$  el periodo de desintegración medido en unidades de tiempo (s) y  $\lambda$  la constante de desintegración (medida en unidades de tiempo<sup>-1</sup>)

Cada núcleo de un tipo de especie tiene una determinada probabilidad de desintegración aunque no se puede conocer qué núcleos exactamente van a sufrirla, sino cuántos. Es por ello, que se define el término de actividad como el promedio de desintegraciones por unidad de tiempo y no depende ni del tipo de radiación (alfa, beta, gamma) ni de su energía. La actividad se mide en el Sistema Internacional en Becquerelios, Bq (1Bq=1 desintegración por segundo) y equivale a la expresión de la ecuación 5.10:

$$A = \lambda \cdot N \quad (5.10)$$

Siendo  $A$ , la actividad radiactiva (medida en Bq),  $\lambda$  la constante de desintegración (medida en unidades de tiempo<sup>-1</sup>) y  $N$  número de núcleos por desintegrar.

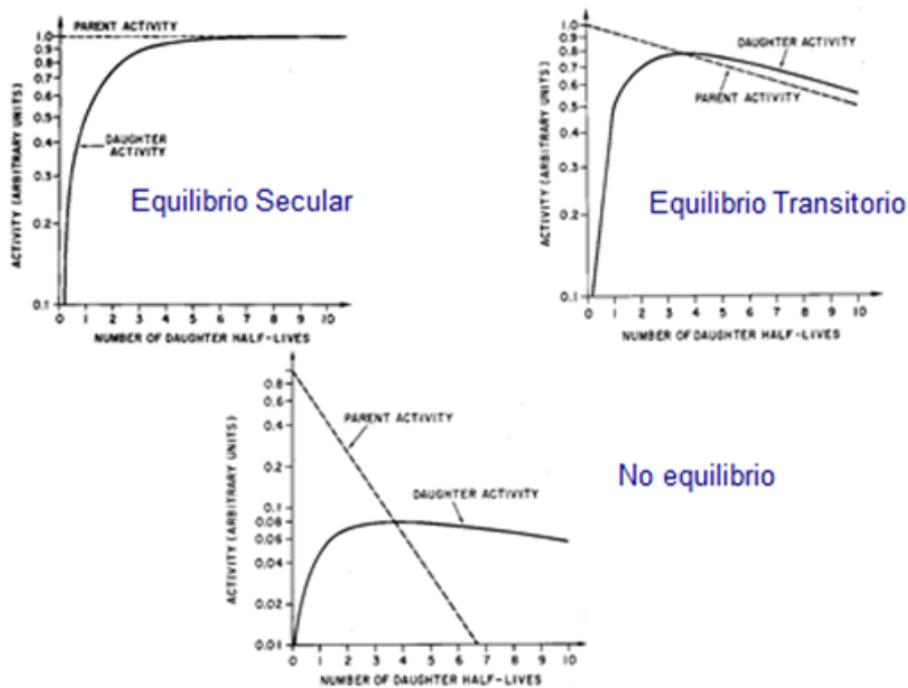
A nivel atómico, se define la actividad por unidad de masa como actividad específica, y se expresa mediante la ecuación 5.11:

$$SA = \frac{6.02 \cdot 10^{23} \cdot \lambda}{M} \quad (5.11)$$

Donde  $SA$  es la actividad específica (Bq/m),  $\lambda$  es la constante de desintegración (medida en unidades de tiempo<sup>-1</sup>) y  $M$  el peso atómico (g/mol).

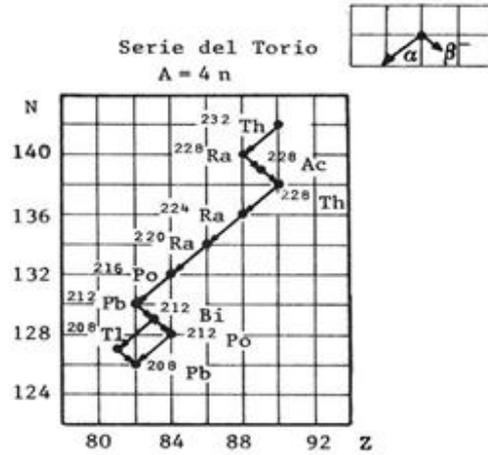
### 5.1.1. Cadenas de desintegración.

Aunque en muchos casos se ha considerado que el núcleo residual obtenido en la desintegración es estable, en otros casos no sucede lo mismo y éste también es radiactivo, aunque con una constante de desintegración distinta a la inicial. Esto provoca la formación de cadenas radiactivas a partir de un radionúclido inicial y finaliza el proceso cuando se alcanza un núcleo estable después de una serie de transformaciones. Se considera que estas cadenas alcanzan el equilibrio después de un proceso de desintegración durante un determinado periodo de tiempo cuando las actividades de sus elementos se hacen iguales. Se encuentran dos variaciones de equilibrio radiactivo como se muestra en la Figura 5.2: equilibrio transitorio, cuando el período del precursor es mayor que el de su producto de desintegración y la actividad del padre es inferior a la del hijo, y equilibrio secular, donde todos los componentes de la cadena se desintegran con un pseudoperíodo igual al del radionúclido inicial y todos ellos tienen la misma actividad [10].

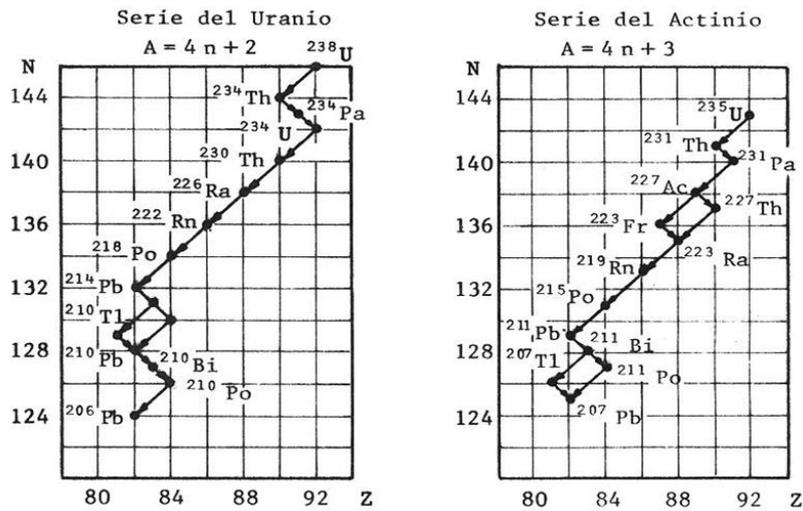


**Figura 5.2:** Variaciones equilibrio radiactivo

Además de los nucleídos estables de la naturaleza, existen alrededor de 50 radionúclidos con elevado número másico que forman parte de algunas de las tres cadenas radiactivas principales: *serie del torio*, *serie del uranio* y *serie del actinio*. La serie del Torio, se inicia por el  $^{232}\text{Th}$ , la del uranio por el  $^{238}\text{U}$ , y la del actinio por el  $^{235}\text{U}$ . Algunos ejemplos de cadenas de desintegración se muestran en las figuras 5. 3 y 5.4:



**Figura 5.3:** Cadena de desintegración del Torio



**Figura 5.4:** Cadenas de desintegración del Uranio y del Actinio

En las Figura 5.3 y 5.4, se representa el número de neutrones (N) frente al número atómico (Z) de la forma:

$$\frac{A}{Z}X \quad (5.12)$$

Siendo  $A = e^- + N$  (5.13)

$$Z = e^- \quad (5.14)$$

Donde A es el número másico o peso molecular,  $e^-$  el número de electrones, N el número de neutrones y Z el número atómico.

Existen también radionucleidos con número másico intermedio en la corteza terrestre que se desintegran en su mayoría mediante emisión beta negativa o captura electrónica. [13].

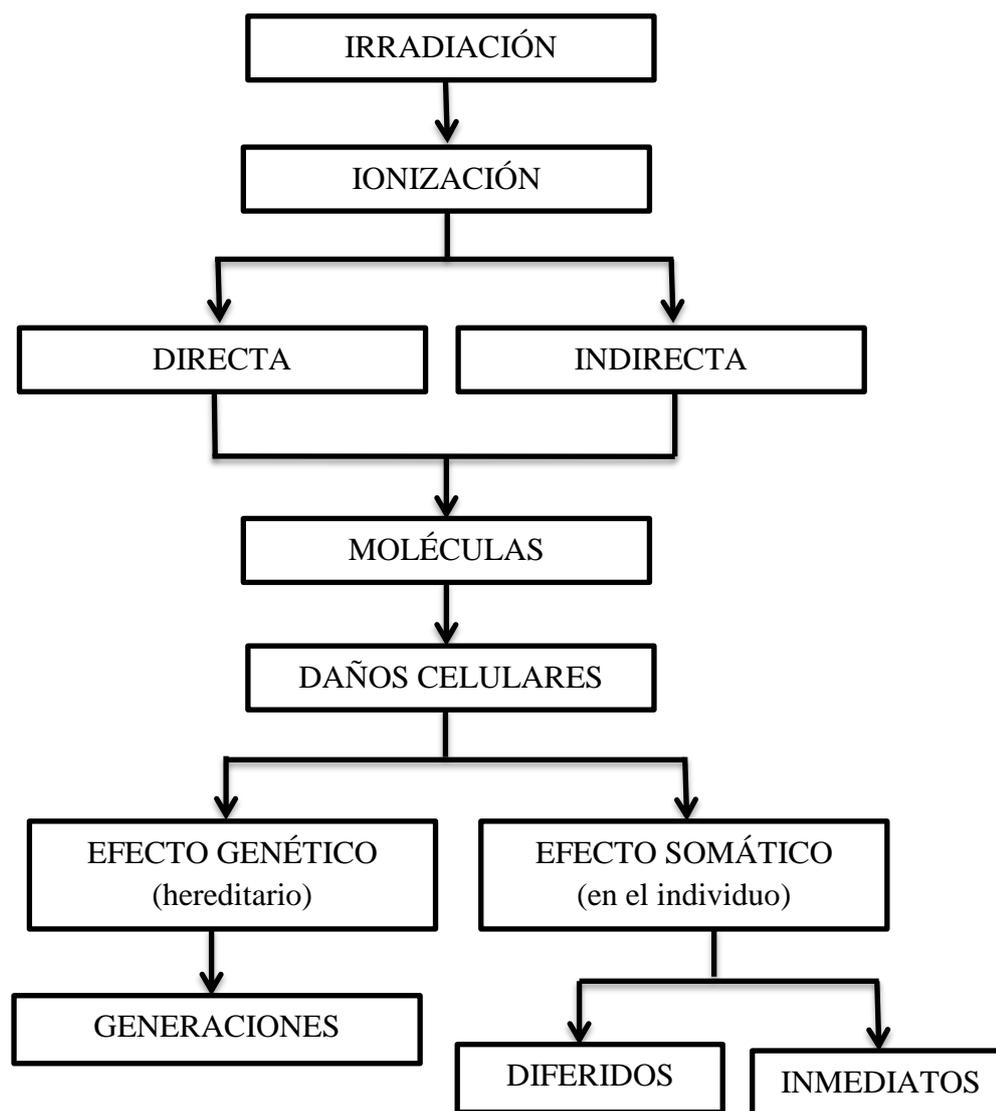
## 5.2. Incidencia radiológica.

La energía desprendida por las radiaciones al atravesar las células vivas producen iones y radicales libres que, a su vez, provocan cambios moleculares en las células afectadas por estas radiaciones [11]. La transferencia de un material radiactivo a otro no radiactivo se denomina irradiación (irradiación externa en el caso de que la persona sólo estuviese expuesta a la radiación siempre y cuando la fuente emisora esté activa). Si hay contacto directo entre uno y otro material, se denomina contaminación radiactiva y ésta puede introducirse en el organismo por vía respiratoria, digestiva, dérmica o parental. Si los radionúclidos están simplemente depositados sobre la piel o la ropa, se tratará de contaminación externa, pero si por el contrario los radionucleidos han penetrado el organismo, se trata de contaminación interna.

El sometimiento de una persona a los efectos de los diferentes tipos de radiaciones (alfa, beta y gamma) pueden ser:

- *Exposición interna:* se produce cuando un radionucleido es ingerido, inhalado o penetra de cualquier otra forma en el organismo y cesa cuando se elimina del organismo.
- *Exposición externa:* se produce cuando el radionucleido o material radiactivo se deposita sobre la piel o sobre cualquier tejido propio.
- *Exposición total:* suma de las exposiciones interna y externa.
- *Exposición continua:* se trata de una exposición externa que se produce durante un largo periodo de tiempo, o una exposición interna en el caso de que los radionucleidos se hayan introducido durante un corto periodo de tiempo.
- *Exposición parcial:* se produce cuando la exposición sólo afecta a una o varias zonas del organismo.

Las vías de exposición para determinar la incidencia radiológica son diversas. El cuerpo humano puede recibir dosis de radiación mediante la inhalación de algunos gases radiactivos como el radón. Además puede ingerirse agua proveniente de algún río o acuífero contaminado o incluso por la ingesta de frutas y verduras cultivadas con tierras contaminadas. Hay que considerar también la cadena alimentaria humana: se come tanto carne como pescado que a su vez podrían haber ingerido alimentos también contaminados. Los radionucleidos pueden emitirse o dispersarse rápidamente afectando al organismo humano tal y como se observa en el de la Figura 5.5.



**Figura 5.5:** Efecto de las radiaciones en el cuerpo humano

En el caso del personal profesionalmente expuesto, para la medición de las radiaciones citadas anteriormente se utilizan los dosímetros, instrumentos capaces de medir una dosis absorbida, una exposición o cualquier otra magnitud radiológica.

En el caso del público en general se puede estimar la dosis absorbida a partir de los estudios de relevancia radiológica con el uso de programas informáticos de simulación de la dispersión de los radionucleidos desde su punto de vista.

### 5.3. Protección radiológica.

La protección radiológica es un conjunto de medidas ya establecidas que se deben cumplir para la manipulación segura de radiaciones ionizantes. Protege a las personas que están en contacto directo o indirecto con cualquier fuente radiactiva.

Existen tres principios básicos y fundamentales en protección radiológica que se muestran en la Figura 5.6:

- **Distancia:** mantenerse alejado de la radiación una distancia prudente según la fuente ya que la intensidad de la radiación disminuye con el cuadrado de la distancia.
- **Tiempo:** se debe intentar minimizar el tiempo de exposición ante cualquier tipo de radiación
- **Blindaje:** implica utilización de pantallas protectoras (láminas de plomo, acero, muros de hormigón...) entre la fuente radiactiva y la persona.

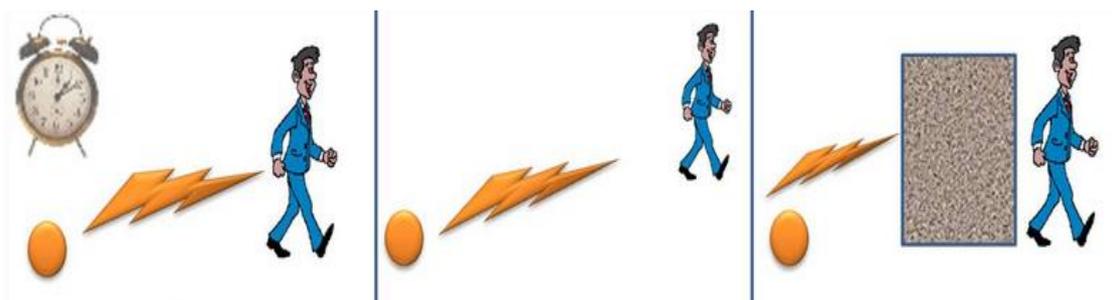


Figura 5.6: Protección radiológica

Para que la protección radiológica se cumpla se han instaurado además, los siguientes principios básicos siguiendo el principio fundamental ALARA (*As Low As Reasonable Available*):

- **Limitación de dosis:** la exposición de cada individuo a las fuentes de radiación debe permanecer dentro de unos parámetros establecidos y controlados, no pudiendo exceder en ningún caso estos límites.
- **Justificación:** cualquier actividad que conlleve el aumento de la dosis recibida por una persona debe suponer tanto al individuo como a la sociedad un beneficio que pueda compensar el riesgo de la exposición.
- **Optimización:** debe procurarse que tanto el número de individuos expuestos como la dosis recibida sea la mínima posible.

Además, se debe esperar, siempre que sea posible, al decaimiento natural de las fuentes radiactivas y, en el caso de existir gases radiactivos, ventilar el recinto.

Las radiaciones explicadas en el apartado de conceptos fundamentales, requieren que se fijen medidas para garantizar la protección tanto de los trabajadores como del público en general. Estas medidas de protección se recogen en el RD 783/2001 por el que se aprueba el “Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes”, intentando minimizar el número de personas expuestas así como el nivel de exposición. Se consideran las siguientes acciones:

1. Evaluación previa de las condiciones laborales para determinar la magnitud del riesgo, y su naturaleza.
2. Clasificación de las zonas de trabajo, considerando diversos factores como el riesgo de dispersión de la contaminación, la magnitud de las exposiciones, la probabilidad, las dosis previstas, etc.
3. Clasificación de los trabajadores expuestos en diferentes categorías según su trabajo
4. Aplicación de las normas y medidas de control y vigilancia.

Es fundamental que tanto los trabajadores como el personal que pudiese estar en contacto con cualquier tipo de emisión radiactiva, tengan en cuenta la limitación de dosis. Los valores máximos de exposición no pueden ser sobrepasados y se aplican tanto a la exposición interna como a la exposición externa. La dosis límite para cada uno de los individuos que estén en contacto con una fuente radiactiva se encuentran en la Tabla 5.1 En esta tabla se caracteriza la población expuesta según la dosis a recibir que pueden ser según el Real Decreto 783/2001:

- **Dosis absorbida:** es la energía absorbida por unidad de masa y su unidad de medida es el Gray (Gy).

- **Dosis equivalente ( $H_{T,R}$ ):** es la dosis absorbida, en el tejido u órgano, ponderada en función del tipo y la calidad de la radiación. Se mide en sievert (Sv):  $1\text{Sv}=1\text{ J/Kg}$  y se calcula como:

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (5.15)$$

Siendo  $w_R$  el factor de ponderación de la radiación,  $D_{T,R}$  la dosis absorbida promediada sobre el tejido u órgano T, procedente de la radiación R.

- **Dosis efectiva (E):** es la suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo a causa de las radiaciones internas y externas. Su unidad de medida es el sievert (Sv):  $1\text{Sv}=1\text{ J/Kg}$  y se estima mediante la ecuación 5.16:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (5.16)$$

Donde  $D_{T,R}$  es la dosis absorbida promediada sobre el tejido u órgano T procedente de la radiación R;  $w_R$  es el factor de ponderación de la radiación y  $w_T$  es el factor de ponderación tisular del tejido u órgano T.

Así mismo en la Tabla 5.1, se realiza una clasificación de la cantidad de dosis recibida por el individuo dependiendo de si están o no expuestos profesionalmente, de su edad o de las partes del cuerpo que podrían estar exponencialmente expuestas en caso de recibir radiación.

Con el estudio del Trabajo Final de Grado se comprobará si las dosis efectivas asociadas a los radionucleidos presentes en las balsas son inferiores al límite establecido por el Real Decreto 783/2001 para la población, que es de  $1\text{mSv/año}$ .

**Tabla 5.1:** Límite de dosis (RD 783/2001)

| <b>Tipos</b>                                  | <b>Cantidad exposición</b>   | <b>Población expuesta</b>                                     | <b>Dosis límite</b>  |
|---|--|---|--|
| <b>Dosis efectiva</b>                         | Personas expuestas profesionalmente  | <b>Trabajadores</b>   | 100 mSv/5 años oficiales consecutivos (máximo: 50 mSv/Cualquier año oficial) |
|   |  | <b>Aprendices y estudiantes (entre 16 y 18 años)</b>          | 6 mSv/año oficial  |
|   | Personas no expuestas profesionalmente   | <b>Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años)</b> | 1 mSv/año oficial  |
| <b>Dosis equivalente</b>                      | Personas profesionalmente expuestas  | <b>Trabajadores</b>   |  |
|   |  | Cristalino  | 150 mSv/año oficial  |
|   |  | Piel  | 500 mSv/año oficial  |
|   |  | Manos, antebrazos, pies y tobillos                            | 500 mSv/año oficial  |
|   |  | <b>Aprendices y estudiantes (entre 16 y 18 años)</b>          |  |
|   |  | Cristalino  | 50 mSv/año oficial   |
|   |  | Piel  | 150 mSv/año oficial  |
|   | Manos, antebrazos, pies y tobillos   | 150 mSv/año oficial   |  |
|   | Personas profesionalmente no expuestas   | <b>Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años)</b> |  |
|   |  | Cristalino  | 15 mSv/año oficial   |
| Piel  |  | 50 mSv/año oficial  |  |
| <b>Casos especiales</b>                       | Embarazo /feto   | Debe ser improbable superar                                   | 1 mSv/embarazo   |
|   | Lactantes  | No debe haber riesgo de contaminación                         |  |
| <b>Exposiciones especialmente autorizadas</b> | Sólo trabajadores Categoría A: las autoridades competentes pueden autorizar exposiciones individuales superiores a los límites establecidos. |   |  |

Considerando también el riesgo de exposición se clasificarán los lugares de trabajo según la siguiente división:

- **Zona de acceso prohibido:** zona en la que con una única exposición existe el riesgo de recibir dosis superiores a los límites establecidos anualmente. Su señalización viene dada por la Figura 5.7:



Figura 5.7: Acceso prohibido

- **Zona de permanencia limitada:** zona en la que con diversas exposiciones se sufre el riesgo de superar los límites máximos de dosis a recibir por el trabajador. Ésta se señala mediante la Figura 5.8:



Figura 5.8: Permanencia limitada

- **Zona controlada:** zona en la que cabría la posibilidad de recibir dosis superiores a  $6\text{mSv/año}$ . Viene determinada por:



Figura 5.9: Zona controlada

#### 5.4. Descripción del problema en las balsas de fosfoyesos de Huelva.

La ciudad de Huelva acoge a escasos metros de su población uno de los vertederos de residuos industriales de mayor extensión de Europa como se puede comprobar en el **Documento III: Planos** del presente TFG. Unas 1.200 hectáreas, extensión casi mayor a la de la propia ciudad de Huelva, están ocupadas por las balsas de fosfoyesos de dos empresas de fertilizantes: Fertiberia y Foret

Más de 120 millones de toneladas de residuos están depositados en las balsas de Huelva, la mayor parte de ellos provenientes de Fertiberia. Los vertidos de residuos se han producido durante casi 45 años, periodo en el cual se han sucedido varias catástrofes medioambientales tal y como se ha introducido en apartados anteriores.

Fertiberia y Foret son industrias consideradas como industrias NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) y debido a sus actividades en la zona se cree que podrían contribuir al aumento de las concentraciones de radón y otros elementos radiactivos en la misma. Ambas empresas utilizan como materia prima grandes cantidades de roca fosfática para producir abonos, fosfatos y ácido fosfórico.

En el proceso industrial llevado a cabo por estas empresas, representado en el diagrama de bloques en el apartado de *Introducción*, la roca fosfórica se tritura hasta obtener una granulometría determinada y se ataca mediante ácido sulfúrico previamente obtenido con la combustión del azufre. Durante el proceso de fabricación del ácido fosfórico se produce yeso resultante del calcio presente en el mineral. Este yeso se denomina fosfoyeso. El ácido fosfórico se utiliza en diversas aplicaciones entre las que cabe destacar el enriquecimiento con fósforo de fertilizantes complejos y los fosfatos amónicos. El ácido fosfórico es utilizado también en la industria metalúrgica como abrillantador de aluminio, en plantas potabilizadoras y en la industria alimentaria como regulador de pH.

Los fosfoyesos producidos durante la reacción pueden contener de forma natural radionucleidos con concentraciones elevadas. Se trata de las familias del uranio (U-235 y U-238) y del torio (Th-232).

El lugar afectado por el vertedero se divide en cinco zonas diferenciadas que ocupan la extensión mostrada en la Figura 5.10:



**Figura 5.10:** Ubicación y superficie de las balsas de fosfoyesos

La zona 1 se corresponde con las Marismas de El Pinar y su extensión es de 480 hectáreas (Ha) aproximadamente. Debido a la degradación de esta zona, en 1990 la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía decidió que se debía llevar a cabo un proceso de recuperación que consistió en el recubrimiento de la zona con 30 cm de una capa de suelo arcilloso.

En la Marisma de El Rincón, se encuentran la zona 2, que ocupa unas 270 (Ha), y la zona 3, cuya extensión alcanza las 180 Ha. Ambas zonas, hasta fecha de 31 de diciembre de 2010, se utilizaron para la decantación y el apilamiento de los fosfoyesos, siendo la zona 2 donde se encontraban las balsas operativas y la zona 3 donde se encontraba la balsa auxiliar.

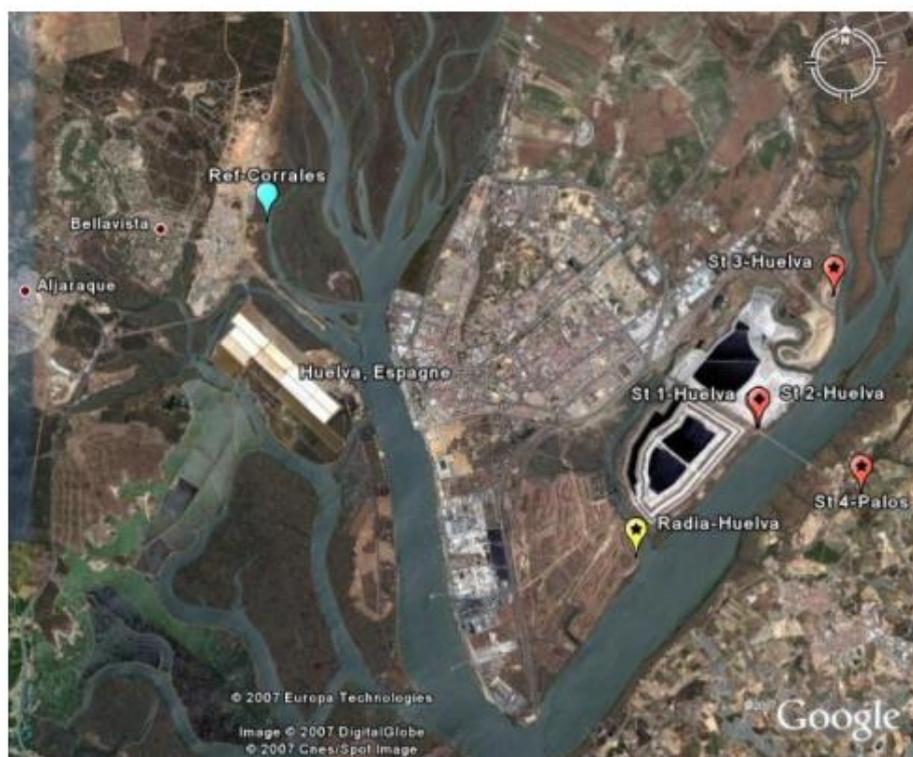
La zona 4 ocupa las Marismas de Mendaña y se utilizaba como depósito de los fosfoyesos hasta que se cesó el vertido de los mismos. En esta zona, en la que también se procuró su recuperación, se utilizó material de cubrición que contenía trazas de Cesio 137.

Sobre la zona 4 y la zona 5 el Ayuntamiento de Huelva y EGMASA han desarrollado durante la última década un proceso de recuperación de alrededor de 100 Ha.

#### 5.4.1. Descripción de las balsas según CRIIRAD

Durante los 45 años que se han utilizado las balsas de Huelva como vertedero de fosfoyesos y otros residuos, han sido numerosos estudios los que se han centrado en el análisis radiológico de los compuestos de los vertidos. Entre estos informes, cabe destacar el informe encargado por Greenpeace al laboratorio francés de la CRIIRAD que fue publicado el 29 de noviembre de 2007. Los técnicos especializados que se desplazaron hasta Huelva realizaron mediciones sobre la zona y recogieron las muestras durante los días 3 y 4 de octubre de 2007 para la caracterización de los residuos que contenían las balsas. De igual forma, se recogieron muestras sobre la zona en la que se había utilizado material de cubrición que contenía Cesio 137. Las muestras tomadas se realizaron con una profundidad de 10 cm en los puntos mostrados en la FIGURA 5.11. Para el análisis de las muestras se llevó a cabo una espectrometría gamma, consistente en la obtención del espectro de las radiaciones gamma emitidas por algunos radionucleidos. La espectrometría gamma permite cuantificar radionucleidos naturales como los descendientes del uranio 235, uranio 238 y torio 232, y artificiales como el cesio 134 y cesio 137.

El informe realizado por CRIIRAD pone de manifiesto por primera vez los fosfoyesos negros, consecuencia del proceso de precipitación del fosfoyeso en las balsas y cuyas concentraciones de elementos radiactivos son superiores que en cualquier otro tipo de residuo.



**Figura 5.11:** Puntos de toma de muestra del laboratorio CRIIRAD

CRIIRAD utiliza una subdivisión más amplia y detallada a la vista anteriormente para las balsas de fosfoyesos como se observa en la Tabla 5.2, donde se clasifican las balsas de fosfoyesos en cinco estaciones y se especifica la localización geográfica de cada estación y la naturaleza de la balsas, es decir, el tipo de elementos que las forman (tierra, residuos de fosfoyeso negro, fosfoyeso blanco o residuo inertizado).

**Tabla 5.2:** Ubicación y caracterización de las balsas (Informe CRIIRAD)

| <b>Código estación</b> | <b>ST0</b>         | <b>ST1</b>                         | <b>ST2</b>                  | <b>ST3</b>                               | <b>ST4</b>                     |
|------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|--------------------------------|
| <b>Naturaleza</b>      | Tierra marismas    | Residuo fosfoyesos (negro)         | Residuo: fosfoyeso (blanco) | Residuo inertizado de ilmenita inatacada | Tierra superficial a sotavento |
| <b>Localización</b>    | Corrales (marisma) | Huelva (entre lagunas decantación) |                             | Vertedero CRI-9                          | Palos (vergel)                 |

Los resultados presentados por CRIIRAD se clasifican según si son elementos radiactivos de origen natural o si son elementos radiactivos artificiales, y servirán para el análisis comparativo del TFG mediante la utilización del software RESRAD. Los resultados ofrecidos tienen la forma:

Actividad  $\pm$  Incertidumbre

Límite de detección si <

**Elementos radiactivos naturales:**

Se observa en la Tabla 5.3 que en la estación 1 (ST1), que se corresponde con la zona que contiene fosfoyeso negro, es la zona con contaminación radiactiva más elevada, superando los 40 Bq/año de la corteza terrestre.

**Tabla 5.3:** Emisiones de la Cadena del Uranio 238, expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD)

| <b>CADENA URANIO 238</b> |            |             |             |            |            |
|--------------------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
|                          | <b>ST0</b> | <b>ST1</b>  | <b>ST2</b>  | <b>ST3</b> | <b>ST4</b> |
| Torio 234                | 270 ±60    | 3020 ±470   | 770±120     | 150 ± 60   | <30        |
| Torio 230                | <390       | 11100 ± 300 | <310        | <330       | <120       |
| Radio 226                | 156 ± 22   | 18000 ±1900 | 1070±120    | 540 ± 120  | 23±6       |
| Plomo 210                | 219 ± 45   | 10100 ±1200 | 17600 ±1900 | 370 ±70    | <44        |

En este caso, Tabla 5.4, la concentración del uranio sigue siendo más elevada en la estación 1 que en cualquiera de las demás, aunque con respecto a las emisiones de uranio 238 y demás radionucleidos no se considera significativa.

**Tabla 5.4:** Emisiones de la Cadena del Uranio 235, expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD)

| <b>CADENA URANIO 235</b> |            |            |            |            |            |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                          | <b>ST0</b> | <b>ST1</b> | <b>ST2</b> | <b>ST3</b> | <b>ST4</b> |
| Uranio 235               | < 42       | < 300      | < 70       | < 27       | < 11       |

Para el análisis de la cadena del torio 232 se observa en la Tabla 5.5 que la estación 3 (ST3) presenta cantidades muy superiores a cualquiera de las demás estaciones debido a los residuos de ilmenita que presentan actividades anormalmente elevadas.

**Tabla 5.5:** Emisiones de la cadena del Torio 232 expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kgseco) (Informe CRIIRAD)

| <b>CADENA TORIO 232</b> |            |            |            |            |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | <b>ST0</b> | <b>ST1</b> | <b>ST2</b> | <b>ST3</b> | <b>ST4</b> |
| Actinio 228             | 56 ± 16    | < 100      | 12 ± 9     | 1280 ± 160 | 30 ± 9     |
| Plomo 212               | 50 ± 8     | 129 ± 25   | 19 ± 5     | 590 ± 70   | 27 ± 5     |
| Potasio 70              | < 600      | < 310      | < 100      | < 390      | 350 ± 80   |

#### *Elementos radiactivos artificiales:*

Las concentraciones de cesio son insignificantes como se observa en la Tabla 5.6 en todas las estaciones excepto en la estación ST0, en el suelo de las marimas de Corrales

**Tabla 5.6:** Emisiones de la Cadena del Cesio 137 y del Cesio 134 expresadas en Bequerelios por kilogramo seco (Bq/kg seco) (Informe CRIIRAD)

|           | <b>ST0</b> | <b>ST1</b> | <b>ST2</b> | <b>ST3</b> | <b>ST4</b> |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Cesio 137 | 10,1 ± 3   | < 4,4      | < 1,1      | < 2,6      | < 0,9      |
| Cesio 134 | < 0,8      | < 4,2      | < 1,1      | < 2,2      | < 0,7      |

Para la puesta en marcha y ejecución del software ResRad se ha utilizado la estación ST1 que es la que contiene las mayores cantidades de contaminación radiactiva, y se han escogido los valores estándar para cada radionucleido sin tener en cuenta la incertidumbre.

#### 5.4.2. Descripción de las balsas según el informe presentado por la Universidad de Málaga y Universidad de Huelva

En el informe presentado por la Universidad de Málaga y la Universidad de Huelva de forma conjunta se ha realizado un estudio por espectrofotometría gamma en diversos puntos de la superficie ocupada por las balsas como se observa en la Figura 5.12.



**Figura 5.12:** Localización de las muestras según el informe de la Universidad de Málaga y Huelva

En este caso las muestras tomadas sólo han mostrado tres radionucleidos: radio (Ra-226), torio (Th-232) y potasio (K-40). Las mediciones realizadas se expresan según

Actividad  $\pm$  Incertidumbre

Límite de detección si  $<$

Los resultados obtenidos por espectrofotometría gamma se observan en la Tabla 5.7:

**Tabla 5.7:** Valores de concentraciones para diferentes radionucleidos (Informe Univ. Málaga)

| Zona                          | Descripción                   | Ra 226<br>(Bq/kg) | K 40<br>(Bq/kg) | Torio 232<br>(Bq/kg) | Número de<br>muestras |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| <b>Fosfoyesos</b>             | Balsa Sur                     | 560 $\pm$ 80      | 30 $\pm$ 3      | 8 $\pm$ 2            | 5                     |
|                               | Balsa Norte                   | 640 $\pm$ 90      | 20 $\pm$ 2      | 7 $\pm$ 2            | 4                     |
|                               | Línea<br>separación<br>balsas | 740 $\pm$ 60      | 50 $\pm$ 6      | < 8                  | 3                     |
| <b>Zona sin<br/>recuperar</b> | Parcela 6                     | 540 $\pm$ 50      | < 35            | < 8                  | 3                     |
|                               | Parcela 7                     | 520 $\pm$ 45      | 70 $\pm$ 60     | 14 $\pm$ 5           | 5                     |
|                               | Parcela 4                     | 660 $\pm$ 60      | < 35            | < 8                  | 4                     |
| <b>Zona<br/>recuperada</b>    | Parcela10                     | 23 $\pm$ 3        | 360 $\pm$ 40    | 14 $\pm$ 5           | 4                     |
|                               | Parcela 5                     | 50 $\pm$ 10       | 230 $\pm$ 25    | 13 $\pm$ 5           | 5                     |
|                               | Parcela 9                     | 180 $\pm$ 60      | 170 $\pm$ 20    | < 8                  | 4                     |
|                               | Parcela 4                     | 210 $\pm$ 25      | < 90            | 10 $\pm$ 4           | 4                     |
|                               | Parcela 2                     | 18 $\pm$ 5        | 200 $\pm$ 20    | 25 $\pm$ 6           | 3                     |
|                               | Parcela 8                     | 17 $\pm$ 5        | 300 $\pm$ 25    | 25 $\pm$ 5           | 4                     |

Comparando ambos informes se observa que mientras que el informe CRIIRAD ha proporcionado datos de diversos radionucleidos como el U-238, U-235, Th-232 y Cs-137 y Cs-134, el informe presentado por la Universidad de Málaga y la Universidad de Huelva sólo muestra las actividades de tres radionucleidos.

Como se irá viendo a lo largo del TFG, para poder analizar y comprar ambos informes se elegirán los mismos radionucleidos, es decir, el radio 226, torio 232 y potasio 40.

## 5.5. Descripción de los elementos radiactivos presentes en las balsas de fosfoyesos de Huelva.

En este apartado se realizará una breve descripción de los principales elementos radiactivos presentes en las balsas de fosfoyesos de Huelva, partiendo de la información ofrecida anteriormente:

- **Radón**

El radón es un elemento químico con número atómico 86 y símbolo Rn. Se produce en la desintegración radiactiva del radio en forma de gas. Se trata de un elemento de alta radiactividad y cuya desintegración se lleva a cabo mediante partículas alfa.

Todos sus isótopos son radiactivos con vida media corta, es decir, tardan alrededor de 4 días en desintegrarse. Contiene 3 isótopos naturales, y otros 22 isótopos sintetizados mediante reacciones nucleares.

El radón tiene una configuración electrónica estable, lo que lo convierte en un gas noble elemental.

El radón se encuentra en fase gaseosa en la naturaleza y su exposición se debe principalmente a la respiración de aire. En los lugares cerrados esta exposición es mayor ya que el radón se introduce en los edificios a través de las grietas y agujeros en cimientos y sótanos. Para evitar una elevada concentración de radón bastaría con una ventilación continuada de la estancia.

- **Uranio**

Es un elemento químico con número atómico 92 y símbolo U. Se trata de un metal muy denso, maleable y dúctil y mal conductor de la electricidad, localizado principalmente en la corteza terrestre.

El uranio es una mezcla de los isótopos U-234, U-235 y U-238, siendo el isótopo fisionable U-235 el de mayor importancia. Durante los últimos años se han creado nuevos métodos de separación de los isótopos para la obtención del U-235 como el proceso de difusión gaseosa llevado a cabo en EEUU, la centrifugación o difusión térmica.

El uranio es una sustancia radiactiva cuya desintegración durante un largo periodo de tiempo puede dar lugar a diferentes enfermedades como el cáncer y puede encontrarse de forma natural en pequeñas cantidades en suelo, aire y agua. Su vida media es:

- U-238: 99,28% con una vida media de  $4,5 \times 10^9$  (4.500.000.000) años
- U-234: 0,0054% con una vida media de  $2,5 \times 10^5$  (250.000) años
- U-235: 0,71% con una vida media de  $7,0 \times 10^8$  (700.000.000) años

- **Torio**

Elemento químico con número atómico 90 y símbolo Th. Es un elemento radiactivo con una vida media larga, aproximadamente  $1,4 \times 10^{10}$  años. El torio metálico es suave y dúctil, de color plateado.

Los compuestos de óxido de torio son utilizados en la producción de mantas de gas incandescentes, en catalizadores para acelerar una reacción o como material cerámico de alta temperatura.

Pequeñas dosis de torio pueden ser recibidas a través de aire, agua o comida. En grandes dosis, puede probar cáncer de pulmón y páncreas así como enfermedades de hígado.

En cuanto al medio ambiente, el torio reacciona de forma lenta con oxígeno, agua y otros compuestos y en grandes cantidades resulta muy dañino para cualquier ser vivo.

- **Plomo**

Elemento químico con número atómico 82 y símbolo Pb. Es un metal pesado, flexible, con fácil fundición, resistente al ataque del ácido sulfúrico y del ácido clorhídrico.

El plomo se emplea generalmente para la formación aleaciones con metales. Sus compuestos son altamente tóxicos y provocan graves riesgos a los trabajadores que están en contacto.

El plomo ocurre de forma natural en la naturaleza aunque se encuentran en mayor concentración debido a la actividad humana. Puede aparecer en aguas y suelos mediante la corrosión de tuberías de plomo en sistemas de transporte.

- **Radio**

Elemento químico con número atómico 88 y símbolo Ra. Se trata de un elemento radiactivo que aparece en minerales de uranio, en una pequeña cantidad. Es el más pesado de los metales alcalinotérreos y es capaz de mantenerse a altas temperaturas. Se conocen hasta 25 radioisótopos del radio, cuatro de ellos de forma natural. El isótopo Ra-226 es el más estable y el más importante a nivel industrial. El Ra-226 tiene un periodo de semidesintegración de 1.602 años y se transforma en radón.

El radio se obtiene generalmente de la desintegración radiactiva del uranio y del torio.

- *Cesio*

El cesio es un elemento químico con número atómico 55 y símbolo Cs. Se trata de un metal blando, ligero y con un bajo punto de fusión que reacciona fuertemente con el oxígeno dando lugar a una mezcla de óxidos.

Es un elemento poco abundante en la corteza terrestre y ocurre de forma natural por erosión o desgaste de rocas y minerales. En ocasiones, a través de la minería, es liberado al suelo, agua y aire y su exposición puede ser causada por respiración o ingestión.

#### *5.5.1. Obtención de las cadenas de desintegración de los elementos presentes en las balsas de fosfoyesos*

Como se ha explicado en apartados anteriores, elementos como el uranio 238, uranio 235, torio 232 y cesio 137 están presentes en las balsas de decantación. Para mejor comprensión de los radionucleidos se han obtenido las cadenas de desintegración compuestas por cada uno de los elementos en los que decaen y el tipo de partícula emitida durante el proceso. Dichas cadenas están representadas en la Figura 5.12., Figura 5.13., Figura 5.14. y Figura 5.15.

Para ello se ha utilizado el programa Janis que ofrece una alta flexibilidad para comparar diferentes conjuntos de datos nucleares y proporcionar cadenas de desintegración.

De igual modo se presentan en forma de tablas, Tabla 5.8 y Tabla 5.9, estas mismas cadenas pero mostrando además el periodo de semidesintegración de cada elemento.

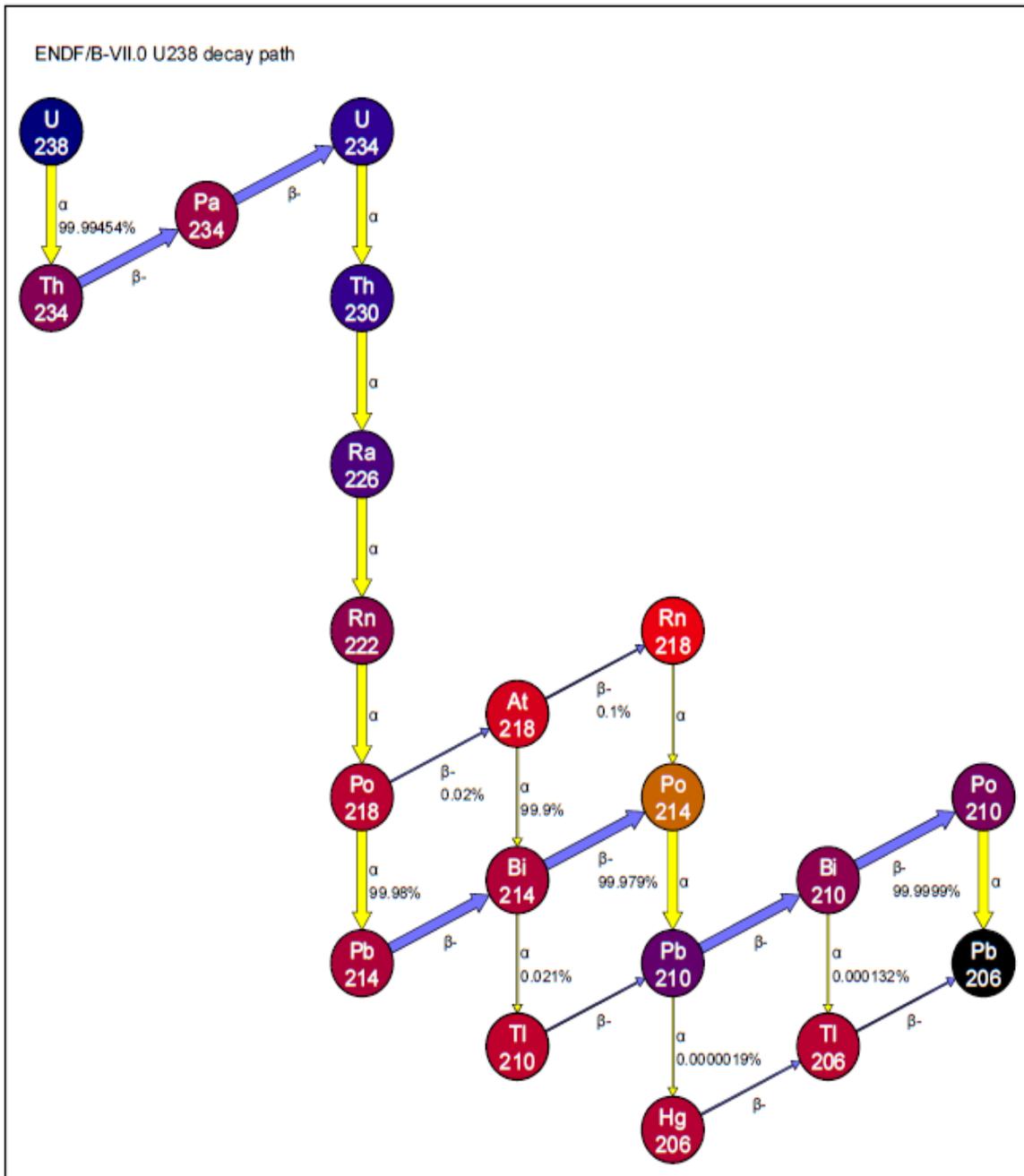


Figura 5.13: Cadena desintegración U-238

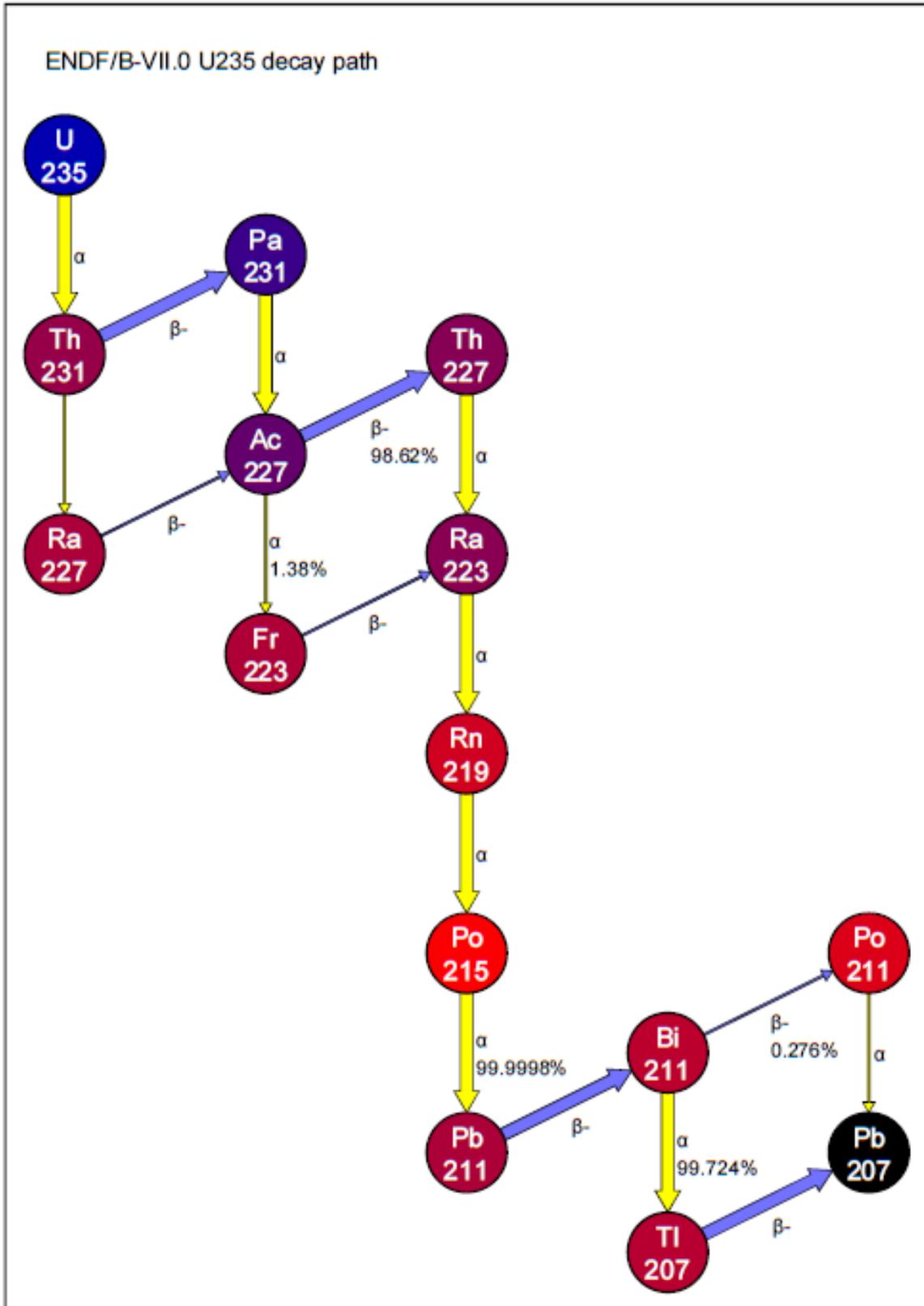


Figura 5.14: Cadena desintegración U-235

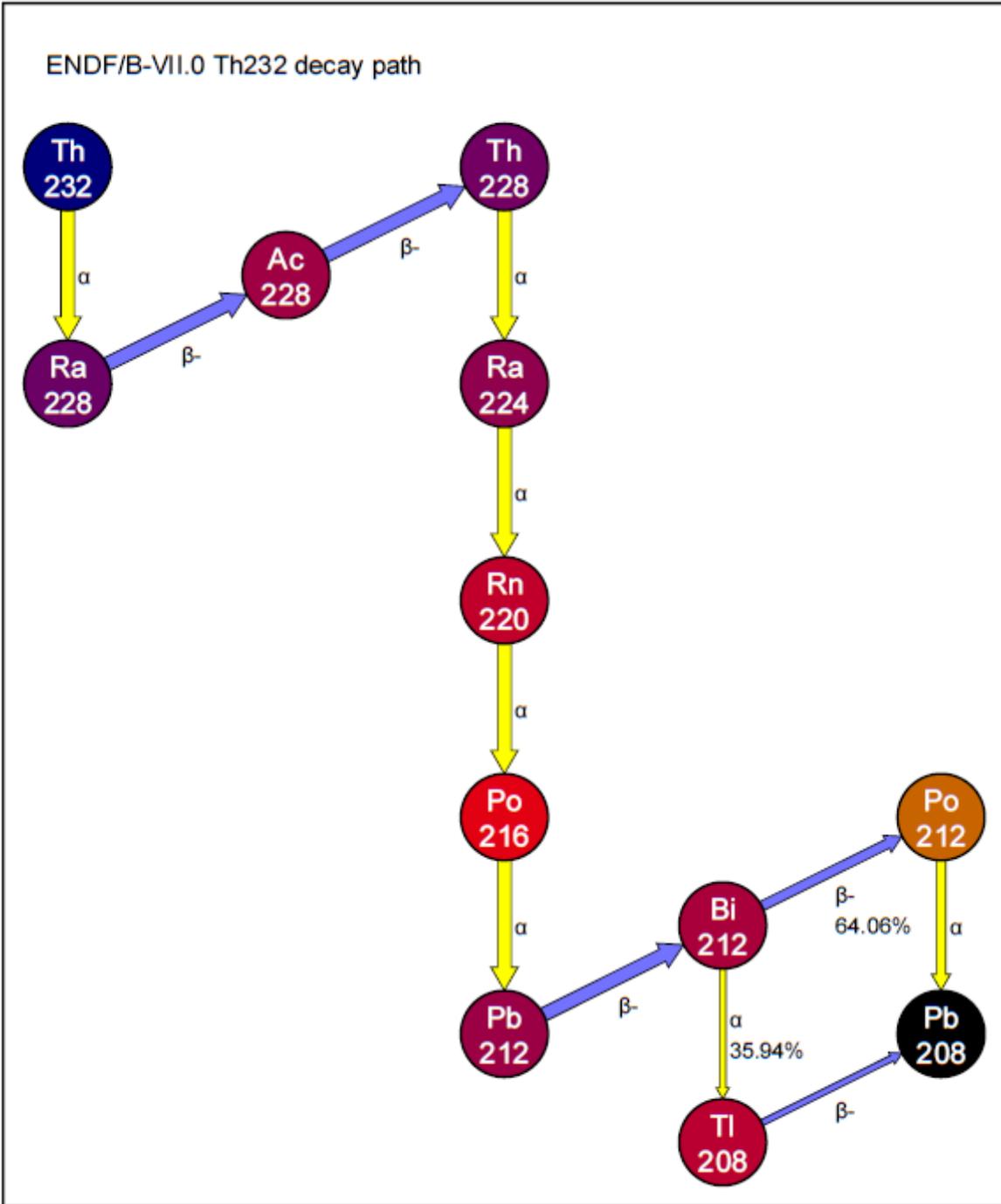
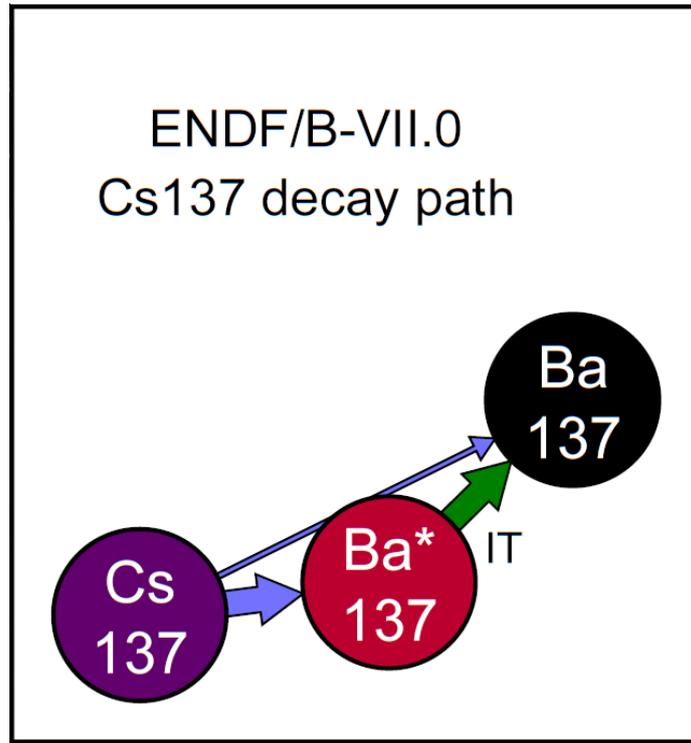


Figura 5.15: Cadena desintegración Th-232



**Figura 5.16:** Cadena desintegración Cs-137

Tabla 5.8: Cadena de desintegración del uranio 238 y del uranio 235

| CADENA DEL URANIO 238 |                         |                                   |                        | CADENA DEL URANIO 235 |                         |                                |                        |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Núcleo                | Producto desintegración | Período de semidesintegración (s) | Modo de desintegración | Núcleo                | Producto desintegración | Período Semidesintegración (s) | Modo de desintegración |
| U238                  | Th234                   | $1,41 \cdot 10^{17}$              | $\alpha$               | U235                  | Th231                   | $2,22 \cdot 10^{16}$           | $\alpha$               |
| Th234                 | Pa234                   | $2,082 \cdot 10^6$                | $\beta^-$              | Th231                 | Pa231                   | 91872                          | $\beta^-$              |
| Pa234                 | U234                    | 24120                             | $\beta^-$              | Th231                 | Ra227                   | 91872                          | $\alpha$               |
| U234                  | Th230                   | $7,747 \cdot 10^{12}$             | $\alpha$               | Pa231                 | Ac227                   | $1,0338 \cdot 10^{12}$         | $\alpha$               |
| Th230                 | Ra226                   | $2,378 \cdot 10^{12}$             | $\alpha$               | Ra227                 | Ac227                   | 2532                           | $\beta^-$              |
| Th230                 |                         | $2,378 \cdot 10^{12}$             | Fisión espontanea      | Ac227                 | Th227                   | $6,871 \cdot 10^8$             | $\beta^-$              |
| Ra226                 | Rn222                   | $5,049 \cdot 10^{12}$             | $\alpha$               | Ac227                 | Fr223                   | $6,871 \cdot 10^8$             | $\alpha$               |
| Rn222                 | Po218                   | 330350,4                          | $\alpha$               | Th227                 | Ra223                   | $1,6139 \cdot 10^6$            | $\alpha$               |
| Po218                 | Pb214                   | 186                               | $\alpha$               | Fr223                 | Ra223                   | 1320                           | $\beta^-$              |
| Po218                 | At218                   | 186                               | $\beta^-$              | Ra223                 | Rn219                   | $9,875 \cdot 10^5$             | $\alpha$               |
| Pb214                 | Bi214                   | 1608                              | $\beta^-$              | Rn219                 | Po215                   | 3,96                           | $\alpha$               |
| At218                 | Bi214                   | 1,5                               | $\alpha$               | Po215                 | Pb211                   | 0,001781                       | $\alpha$               |
| At218                 | Rn218                   | 1,5                               | $\beta^-$              | Pb211                 | Bi211                   | 2166                           | $\beta^-$              |
| Bi214                 | Po214                   | 1194                              | $\beta^-$              | Bi211                 | Tl207                   | 128,4                          | $\alpha$               |
| Bi214                 | Tl210                   | 1194                              | $\alpha$               | Bi211                 | Po211                   | 128,4                          | $\beta^-$              |
| Rn218                 | Po214                   | 0,035                             | $\alpha$               | Tl207                 | Pb207                   | 286,2                          | $\beta^-$              |
| Po214                 | Pb210                   | 0,0001643                         | $\alpha$               | Po211                 | Pb207                   | 0,516                          | $\alpha$               |
| Tl210                 | Pb210                   | 78                                | $\beta^-$              |                       |                         |                                |                        |
| Pb210                 | Bi210                   | $7,005 \cdot 10^8$                | $\beta^-$              |                       |                         |                                |                        |
| Pb210                 | Hg206                   | $7,005 \cdot 10^8$                | $\alpha$               |                       |                         |                                |                        |
| Bi210                 | Po210                   | 433036,8                          | $\beta^-$              |                       |                         |                                |                        |
| Bi210                 | Tl206                   | 433036,8                          | $\alpha$               |                       |                         |                                |                        |
| Hg206                 | Tl206                   | 489                               | $\beta^-$              |                       |                         |                                |                        |
| Po210                 | Pb206                   | $1,195 \cdot 10^7$                | $\alpha$               |                       |                         |                                |                        |
| Tl206                 | Pb206                   | 252                               | $\beta^-$              |                       |                         |                                |                        |

**Tabla 5.9:** Cadena de desintegración del torio 232 y del cesio 137

| CADENA DEL TORIO 232 |                         |                                   |                        | CADENA DEL CESIO 137 |                         |                                |                        |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Núcleo               | Producto desintegración | Período de semidesintegración (s) | Modo de desintegración | Núcleo               | Producto desintegración | Período Semidesintegración (s) | Modo de desintegración |
| Th232                | Ra228                   | $4,43 \cdot 10^{17}$              | $\alpha$               | Cs137                | Ba137m                  | $9,49 \cdot 10^8$              | $\beta^-$              |
| Th232                |                         | $4,43 \cdot 10^{17}$              | Fisión espontanea      | Cs137                | Ba137                   | $9,49 \cdot 10^8$              | $\beta^-$              |
| Ra228                | Ac228                   | $1,81 \cdot 10^8$                 | $\beta^-$              | Ba137m               | Ba137                   | 153,1199                       | Transición isomérica   |
| Ac228                | Th228                   | 22140                             | $\beta^-$              |                      |                         |                                |                        |
| Th228                | Ra224                   | $6,0325 \cdot 10^7$               | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Ra224                | Rn220                   | 316223,9                          | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Rn220                | Po216                   | 55,6                              | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Po216                | Pb212                   | 0,145                             | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Pb212                | Bi212                   | 38304                             | $\beta^-$              |                      |                         |                                |                        |
| Bi212                | Po212                   | 3633                              | $\beta^-$              |                      |                         |                                |                        |
| Bi212                | Tl208                   | 3633                              | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Po212                | Pb208                   | $2,99 \cdot 10^{-7}$              | $\alpha$               |                      |                         |                                |                        |
| Tl208                | Pb208                   | 183,1799                          | $\beta^-$              |                      |                         |                                |                        |

## 6. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO UTILIZADO

En esta apartado se detallará el manual de uso del programa ResRad que se utilizará en diversos estudios en este TFG. ResRad ha sido instalado recientemente en las instalaciones del departamento de Ingeniería Nuclear pero con escaso uso hasta ahora.

ResRad es un software creado por *The University of Chicago* a instancia de la *Environmental Assessment Division*, del laboratorio *Argonne National Laboratory* del *United States Department of Energy* para estimar las dosis y los riesgos de la radiación de materiales **RESiduales RADiactivos**. Resrad 7.0 presenta la última versión del código Resrad que se lanzó en 1989. Este software ha sido utilizado por el *U.S. Department of Energy (DOE)* para estimar los límites para los radionucleidos en el suelo.

Resrad es el precursor de una serie de códigos para evaluar de forma específica diferentes contaminantes ambientales. Estos códigos se desarrollan sobre la base de los algoritmos fundamentales utilizados en Resrad y son:

- RESRAD-BUILD: calcula las dosis a recibir las personas dentro de las estructuras de los materiales radiactivos.
- RESRAD-CHEM: realiza transporte ambiental y análisis de riesgos de productos químicos peligrosos
- RESRAD-BASELINE: calcula las dosis y riesgos de los radionucleidos y mediciones de las concentraciones químicas en el medio ambiente.
- RESRAD-OFFSITE: formado por una pareja de un modelo de dispersión atmosférica y un modelo de transporte de las aguas subterráneas permitiendo el cálculo de la dosis que afectan a personas situadas más allá de los límites del lugar.
- RESRAD-RECYCLE: calcula las dosis de los trabajadores y del público en general del reciclaje de materiales que contienen trazas radiactivas.
- RESRAD-ECORISK: calcula riesgos para los receptores ecológicos derivados de la exposición a sustancias químicas peligrosas.

El software Resrad se ha convertido en un programa muy popular y utilizado en EEUU y Brasil debido a la capacidad de adaptación para situaciones específicas de exposición.

El menú principal del software Resrad se presenta como aparece en la Figura 6.1:

- **RESRAD-DOS *Emulator*:** ventana de menú principal que facilita la transición al usuario.
- **Ventana de navegación:** ventana con pestañas que permite el acceso a la información a través de gráficos.
- **Menú y barra de herramientas:** herramientas de Windows para manipular archivos y otras ventanas

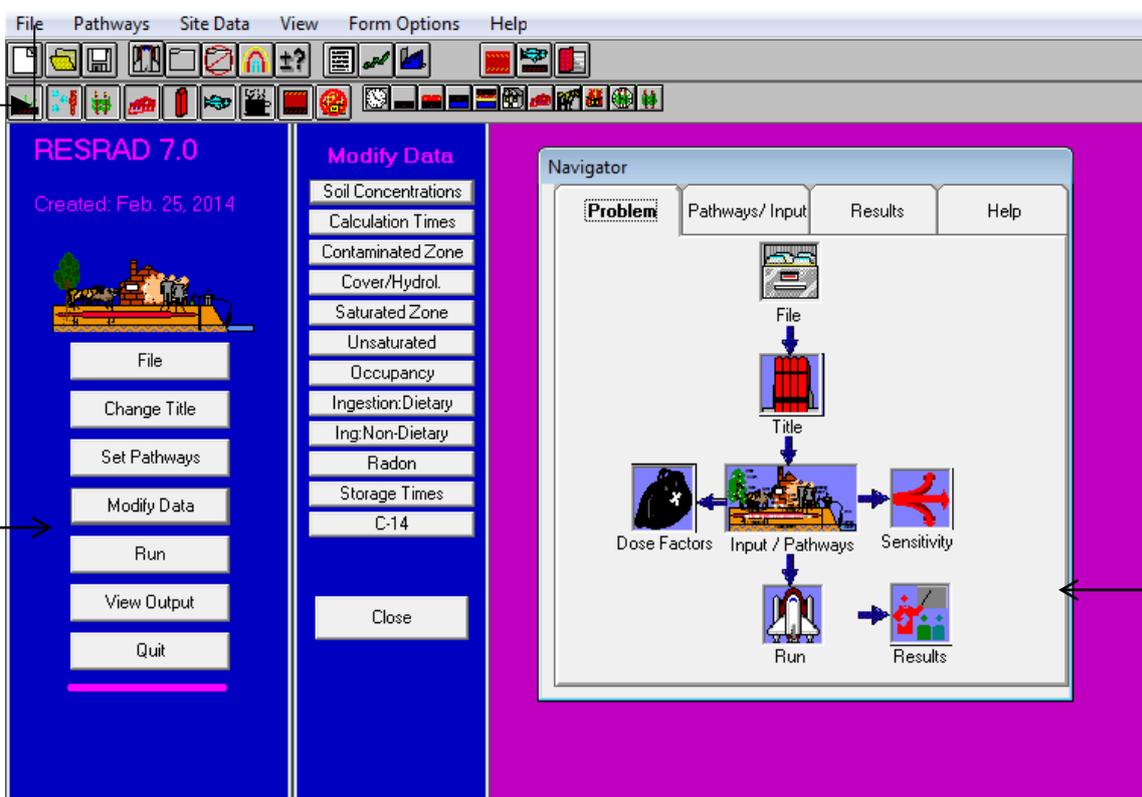


Figura 6.1: Menú principal Resrad

Para la resolución de un caso, es conveniente seguir la lista de comandos de la parte izquierda de la interfaz.

- **File (archivo):** partiendo de un caso existente o configurando los parámetros para un nuevo caso.
- **Change Title (cambio de título):** la ventana que aparece incluye otro caso específico de información. Generalmente se pueden mantener todos los valores por defecto.
- **Set Pathways (camino):** muestra las vías de exposición, que pueden ser activadas o desactivadas en función del caso con el que se trabaje.
- **Modify data (modificación de datos):** aparece una segunda columna de botones. Cada uno de estos botones da acceso a un grupo de parámetros que definen el caso a estudiar. Después de cada cambio de los datos se debe guardar la hoja de cálculo.
- **Run (poner en marcha los cálculos):** una vez ya se ha especificado el caso, el archivo se guarda y se inician los cálculos. Aparece una nueva ventana que muestra la evolución de los cálculos. Si hubiese algún error de cualquier parámetro, una ventana emergente indica qué ha pasado y donde se encuentra el error en la ejecución del programa.
- **View output (vista de salida):** de forma general, el informe de resultados aparece después de los cálculos. Esta ventana muestra otros informes y una gráfica interactiva.
- **Quit (salir):** permite salir del software Resrad simplemente haciendo clic en esta pestaña.
- **Other Tools (otras herramientas):** el análisis de sensibilidad y el análisis probabilístico son herramientas de análisis opcionales. Estas herramientas permiten al usuario identificar los parámetros que son importantes en cada caso.

La Figura 6.2 muestra, de forma detallada, el proceso a seguir para la resolución de un caso:

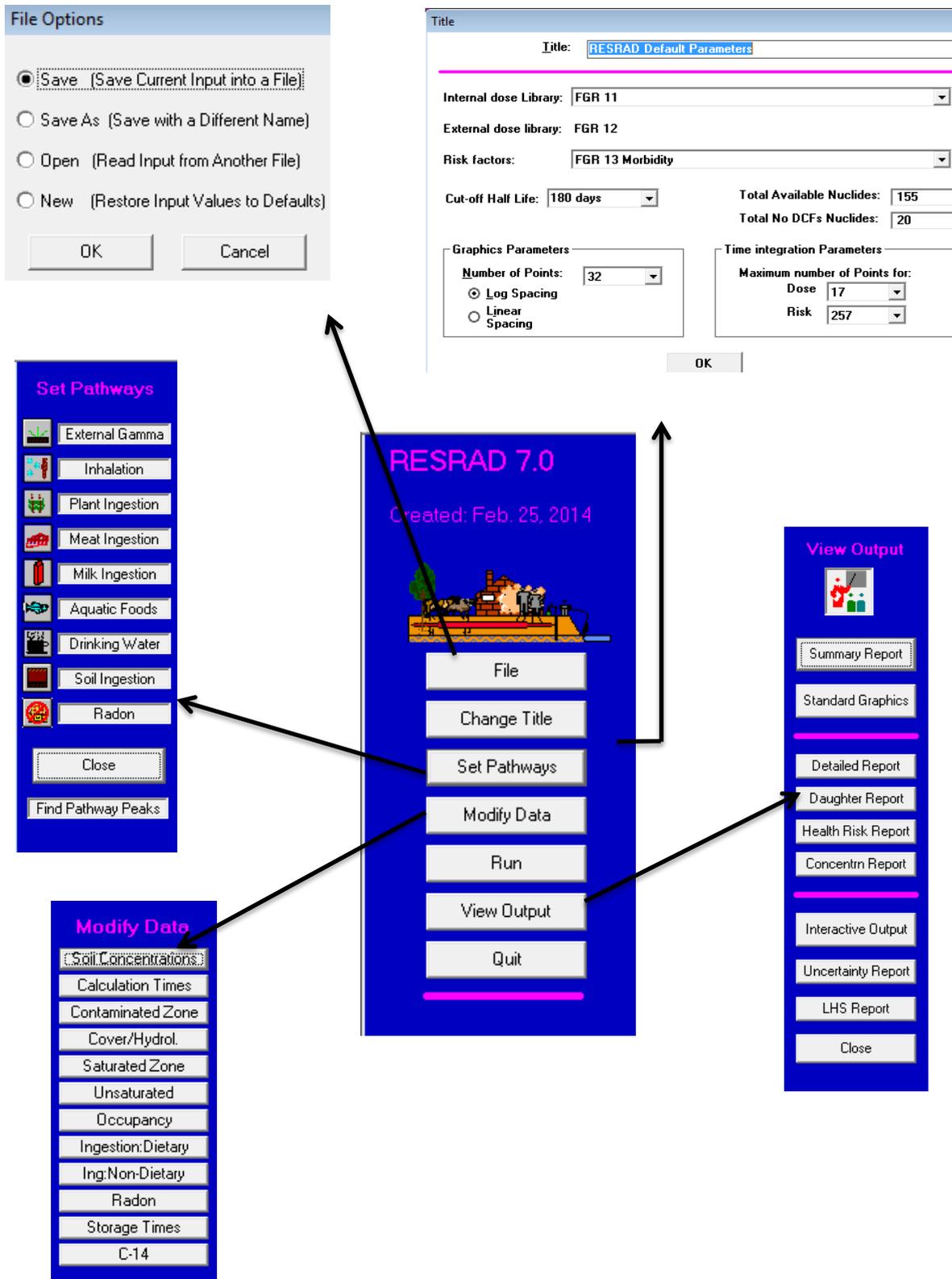


Figura 6.2: Menú principal en detalle



- **Results (resultados):** los dos primeros botones (*Summary Report*, *Standard Graphics*) permiten el acceso a los principales resultados en forma de informe y de gráficas. Los siguientes botones son para acceder a los informes complementarios. Los últimos cuatro botones (*Report*, *Interactive Output*, *UHS Report*, *Correlate Output*) aparecen cuando el análisis resulta incierto según se observa en la Figura 6.5:

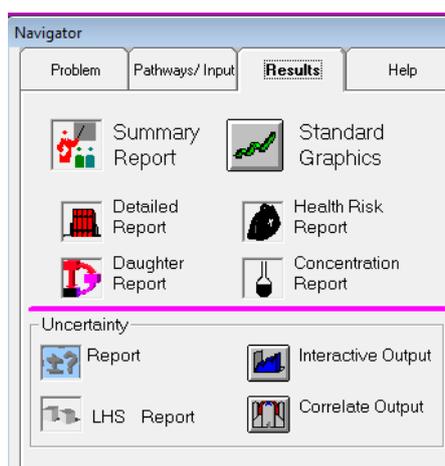


Figura 6.5: Menú navegador: tablas y gráficos a obtener

- **Help (ayuda):** en esta ventana, Figura 6.6, se puede acceder a todas las funciones de ayuda del Resrad, incluyendo descripciones de los parámetros, diapositivas del taller Resrad, colección de datos y el sitio web RESRAD.



Figura 6.6: Menú navegador: ayuda al usuario

El menú de la ventana principal ofrece acceso a muchas de las tareas comunes del software. Estas tareas incluyen:

- **File (archivo):** permite al usuario acceder a tareas de archivos comunes tales como el establecimiento de nuevos parámetros (*New*), la apertura de un archivo previamente definido (*Open*), guardar la configuración de un archivo actual (*Save*), etc.
- **Pathways (rutas o caminos):** permite al usuario alternar las vías de exposición.
- **Site data (datos del sitio):** esta opción permite el acceso a las distintas ventanas de entrada de datos.
- **View (vista):** proporciona acceso a diversos resultados y ventanas de retroalimentación.
- **Form options (opciones de forma):** esta opción permite al usuario introducir datos y llevar a cabo tareas como el ahorro, cancelación de cambios de Windows, ajustes de sensibilidad, análisis de la incertidumbre en el parámetro seleccionado y los ajustes al valor del parámetro seleccionado.
- **Help (ayuda) :** permite el acceso a la ayuda general, ayuda específica del contexto y acerca del Resrad. Esta pantalla contiene información sobre la identificación de las versiones y fecha de lanzamiento.

## 7. ANÁLISIS DE LA RELEVANCIA RADIOLÓGICA DE LAS BALSAS DE FOSFOYESOS.

Para el estudio de la relevancia radiológica de los diferentes radionucleidos presentes en las balsas de fosfoyesos de Huelva se han utilizado los datos de los dos informes presentados en el apartado 5.4.1., para el caso del laboratorio francés CRIIRAD, y en el apartado 5.4.2., para el artículo científico del *Journal of Environmental Radioactivity*.

Como se observa en dichos apartados, el laboratorio CRIIRAD ha obtenido por espectrometría gamma diversos radionucleidos como el uranio, plomo, radio, torio y potasio. En el informe presentado en *Journal of Environmental Radioactivity* en cambio, sólo aparecen las actividades (Bq/año) de tres de los radionucleidos: radio (Ra-226), torio (Th-232) y potasio (K-40). Es por ello que, para realizar un análisis de ambos informes y poder compararlos entre sí, se han seleccionado los mismos elementos radiactivos en ambos casos, y se han descartado el resto.

En ambos casos, se ha elegido las muestras tomadas con concentraciones más elevadas ya que suponen los valores más críticos, y si la normativa se cumple para los valores más críticos lo hará también para el resto de emisiones. En la Tabla 7.1 que se presenta a continuación se muestran los valores de las mediciones realizadas en las balsas de fosfoyesos.

**Tabla 7.1:** Tabla resumen de los datos utilizados para el análisis de la incidencia

| <b>CRIIRAD</b> |                        | <b>Universidad de Málaga</b> |                        |
|----------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| Radionucleido  | Actividad (Bq/kg seco) | Radionucleido                | Actividad (Bq/kg seco) |
| Ra-226         | 18000 ± 1900           | Ra-226                       | 740 ± 60               |
| Th-232         | < 100                  | Th-232                       | 50 ± 6                 |
| K-40           | < 310                  | K-40                         | < 8                    |

Las muestras tomadas por ambos estudios, como se observa en la Tabla 7.1, son dispares. Las actividades medidas del informe CRIIRAD respecto al informe de la Universidad de Málaga, se multiplican hasta en 24 veces en el caso del Ra-226, el doble para el caso del Th-232 y 38 veces en el caso del K-40.

## 7.1. Determinación del tiempo necesario para la eliminación de la radiactividad

En este apartado se obtendrá para cada uno de los radionucleidos el tiempo que necesitan para que decaiga su radiactividad por completo, así como las principales vías de exposición de los mismos considerando unas condiciones ambientales estándar dadas por el Resrad.

### 7.1.1. Determinación del tiempo de decaimiento a partir del artículo de la Universidad de Málaga y de la Universidad de Huelva

El análisis de las mediciones se ha realizado mediante el software Resrad como se ha explicado anteriormente. El proceso a seguir viene representado por las siguientes figuras que permiten una mejor visualización así como una mejor comprensión.

En la Figura 7.1 se observa la ventana utilizada para nombrar el archivo con el que se trabajará. Además, esta ventana permite elegir la librería que se utilizará durante los cálculos. Para el análisis de los datos ofrecidos, se utilizará la base de datos IRCP 72 (*International Commission on Radiological Protection*). Esta librería permite elegir diferentes edades de una misma población: adultos y niños de 15, 10, 5 y 1 año. Para el resto de parámetros que se observan en la Figura 7.1 se mantendrán los predeterminados según las especificaciones del software Resrad y según la base de datos que emplea:

- *Number of points*: número de veces que, además de los tiempos de evaluación especificados por el usuario, se utilizarán para generar trazados de datos suaves.
- *Maximum number of points*: el número máximo de puntos de integración para el cálculo de dosis (*dose*) y para el riesgo (*risk*)
- *Use Line Draw Character*: para producir tablas y gráficos de calidad.

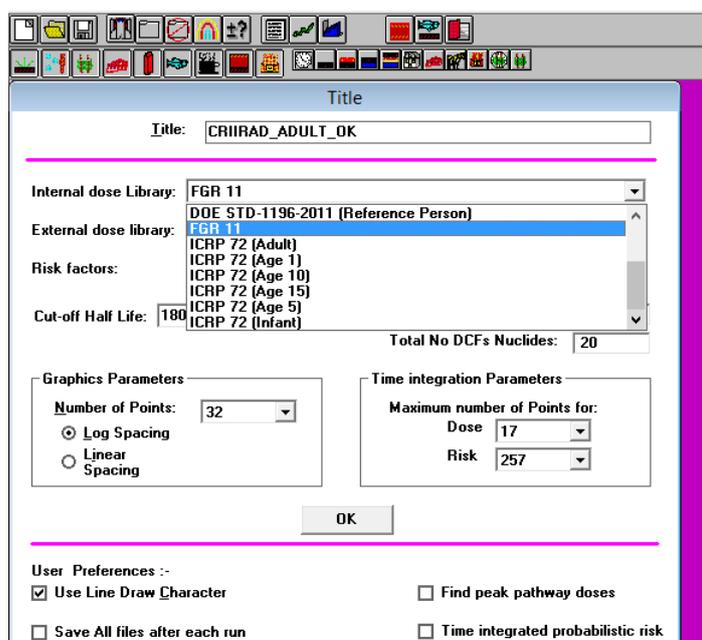


Figura 7.1: Título del archivo y librería utilizada

Se seleccionará el apartado *Modify Data* y a su vez, *Soil Concentration*, que permite introducir los datos de los diferentes radionúclidos como se muestra en la Figura 7.2.:

Figura 7.2: Introducción de datos

Por último, en el apartado *Contaminated Zone* se introducen las características de la zona a estudiar tal cual se representa en la Figura 7.3. Se ha sobredimensionado la parcela en la que se encuentran las dos balsas incluyendo no sólo la superficie de vertido sino un perímetro de seguridad alrededor de la misma, ya que con este estudio se pretende medir la incidencia radiológica de las balsas para su posterior cubrición. Por tanto, se ha utilizado una dimensión de aproximadamente 270 hectáreas (ha). Además, se ha considerado que las muestras han sido tomadas a unos 10 cm de profundidad, ya que los datos que se tienen del informe CRIIRAD están tomados a esta profundidad y al ser valores significativamente más elevados que el otro informe, se toma éste primero como informe más crítico. La distancia media hasta la zona hidrológica más cercana tomada ha sido de 25 m, suponiendo que es la distancia más crítica. Si para el caso más estricto se cumplen los límites según la normativa, se cumplirán en cualquier punto más alejado.

Figura 7.3 Características de la zona a estudiar

Se ha decidido estudiar la población adulta, la población de jóvenes de 15 años y niños 1 año de edad. Para cada uno de estos grupos poblacionales se han obtenido diversas representaciones que incluyen por una parte, todos los radionucleidos y la suma de éstos, y por otra parte, la caracterización del radio 226 con todas las vías de exposición del mismo ya que como se verá posteriormente, el radio es el elemento más influyente en el total de la radiación

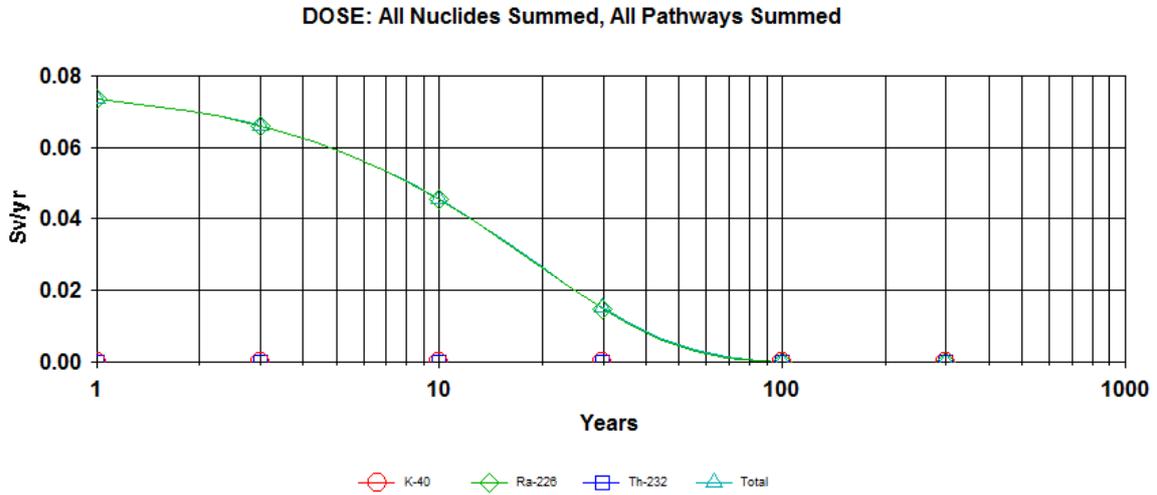
Las principales vías de exposición que aparecen el software Resrad se clasifican según:

1. Radiación externa:
  - Suelo (superficie o volumen)
  - Aire:
    - Polvo
    - Radón y productos de desintegración del radón
    - Otros radionucleidos gaseosos
  - Agua
2. Inhalación
  - Polvo
  - Radón y productos de desintegración del radón
  - Otros radionucleidos gaseosos
3. Ingestión
  - Comida:
    - Alimentos vegetales (verduras, cereales y frutas)
    - Carne
    - Leche
  - Agua:
    - Aguas subterráneas
    - Aguas superficiales
  - Suelo

Las tres principales vías de exposición (radiación externa, inhalación e ingestión) corresponden a las vías en que los radionucleidos pueden entrar en el cuerpo. En la primera vía, la exposición se produce por radiación externa de los radionucleidos fuera del cuerpo. En la segunda y tercera vía, la exposición es por radiación interna de los radionucleidos que se inhalan o se ingieren.

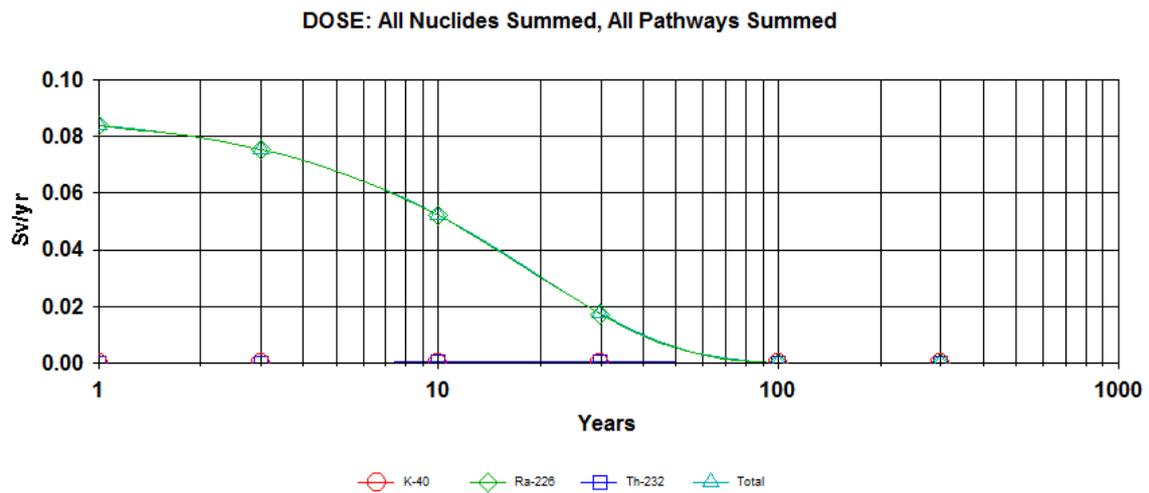
Para cada vía de exposición los radionucleidos pueden migrar desde el origen hasta una persona.

La dosis efectiva para la población adulta y la estimación del tiempo de decaimiento de los radionucleidos obtenidas con el ResRad se muestran en la Figura 7.4:



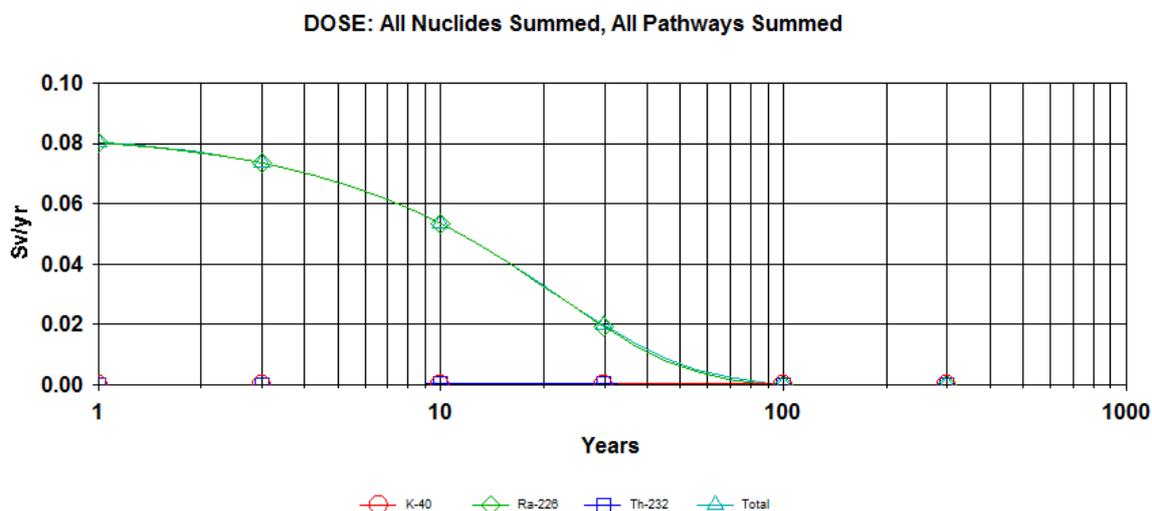
**Figura 7.4:** Resultados para la población adulta basados en los datos del Informe CRIIRAD

Si se tiene en cuenta una población de niños de 15 años, se obtiene la Figura 7.5 que se encuentra a continuación:



**Figura 7.5:** Resultados para la población de niños de 15 años basados en los datos del Informe CRIIRAD

Por último, se estudia la dosis efectiva para el caso de niños de 1 año, que se muestra en la Figura 7.6:



**Figura 7.6:** Resultados para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe CRIIRAD

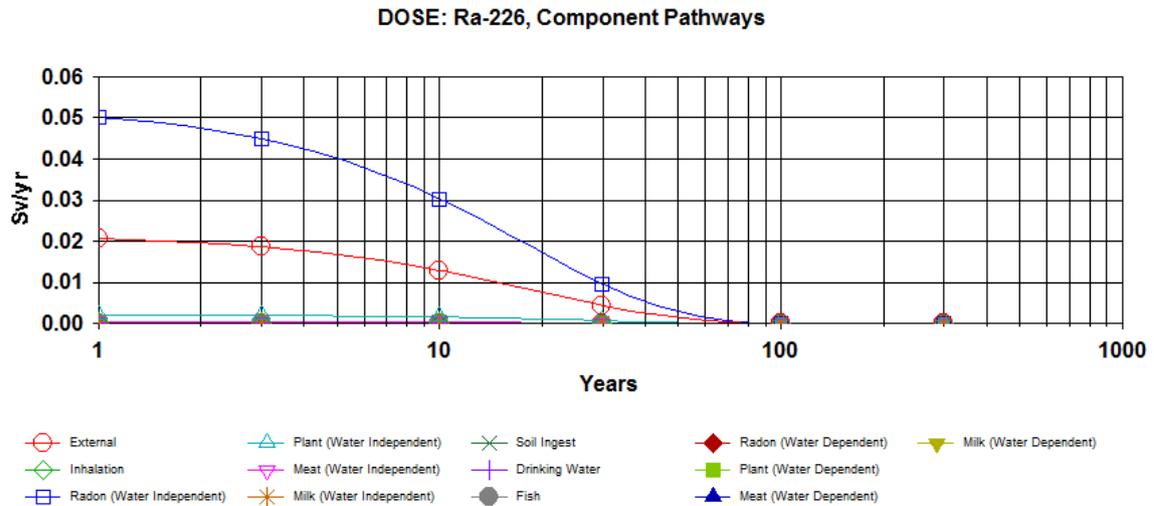
Los gráficos presentados muestran la dosis de radiación sobre la superficie de las balsas de fosfoyesos y el tiempo que será necesario para que su actividad se vea reducida hasta valores prácticamente nulos, que será aproximadamente de 100 años. Como se observa, la cantidad del radionucleido Ra-226 es casi el total de radiación de la zona ya que ha sido el elemento medido con mayor actividad en la zona. Por otra parte el Th-232 y el K-40 tienen aproximadamente el mismo orden de magnitud, muy inferiores que el Ra-226.

Como se observa en las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3, las dosis de radiación efectiva en toda la población son muy elevadas (80 mSv/año), aproximadamente unas 80 veces superiores al límite establecido para personas profesionalmente no expuestas que es de 1 mSv/año.

En el caso de personas adultas, la dosis de radiación a recibir, como muestra la Figura 7.1, es ligeramente inferior a la de los niños. Esto es debido a que las células de bebés, niños y adolescentes están en desarrollo y crecen rápidamente. Al incidir sobre esta población dosis elevadas de radiación, las células se queman y el crecimiento y salud de los pequeños se ve afectada.

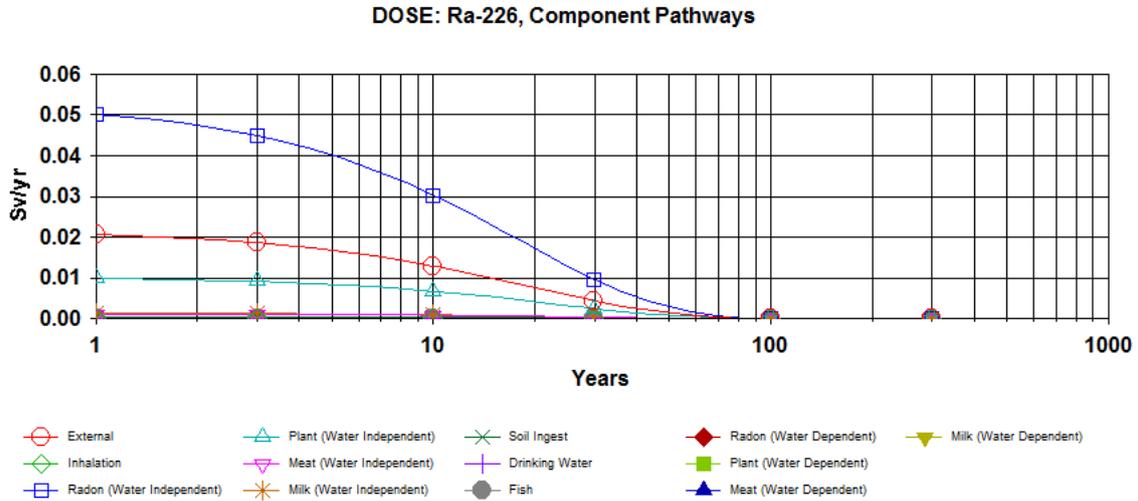
Siguiendo con el análisis de las actividades de los radionucleidos, se ha elegido estudiar el efecto del Ra-226 ya que como se ve en las figuras anteriores, es el elemento que aparece en mayor proporción y el valor más crítico sobre el total de las emisiones radiactivas en las balsas. La elevada cantidad de radón se debe a que aparece de forma continuada en el suelo y se dispersa rápidamente en forma de gas, de elevada difusión por su naturaleza gaseosa.

Del estudio de la afectación de la radiación debida al radón sobre una población adulta, se han obtenido los resultados que se observan en la Figura 7.7:



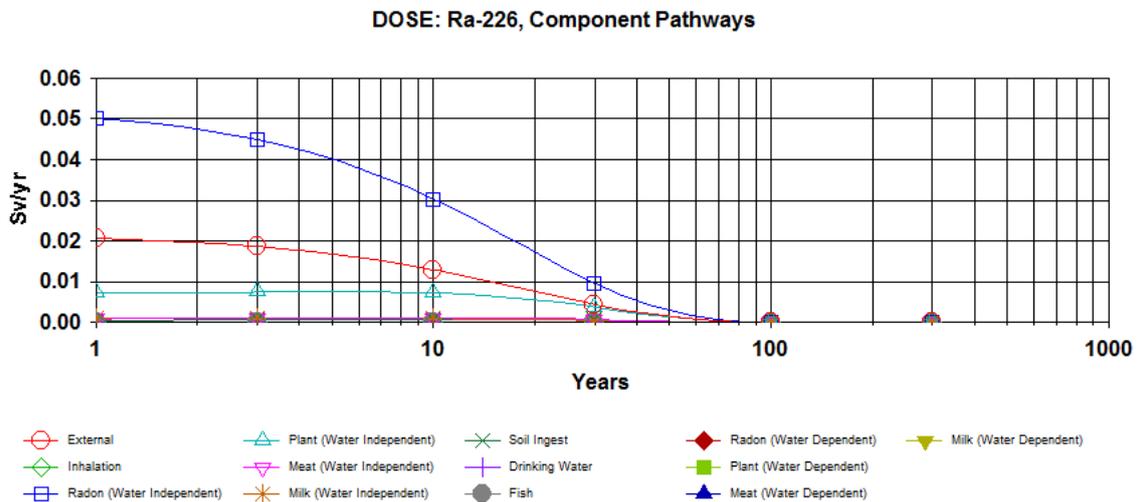
**Figura 7.7:** Resultados para el Ra-226 la población de adultos basados en los datos del informe CRIIRAD

Para el análisis de la dosis recibida por niños de 15 años se ha obtenido la gráfica mostrada en la Figura 7.8:



**Figura 7.8:** Resultados para el Ra-226 la población de niños de 15 años basados en los datos del informe CRIIRAD

Por último, para el caso de estudio de niños de 1 año, se obtienen los resultados de la Figura 7.9:



**Figura 7.9:** Resultados para el Ra-226 la población de niños de 1 año basados en los datos del informe CRIIRAD

Se observa en las Figuras 7.7, 7.8 y 7.9 la actividad del Ra-226 y su decaimiento, que se producirá alrededor de 100 años. En los tres casos analizados (adultos, niños de 15 años y niños de 1 año) la dosis recibida de Ra-226, parámetro más relevante, es de 50 mSv/año, dosis significativamente superior a la dosis efectiva máxima que debe recibir una persona no expuesta profesionalmente.

Para el caso de personas expuestas profesionalmente, el límite de dosis según el RD 783/2001 está, como se observa en la Tabla 5.1, en 50 mSv/año, y según las representaciones obtenidas mediante Resrad, los trabajadores de las balsas de fosfoyesos están recibiendo el máximo de dosis permitida.

En toda la población, la cantidad de radón, obtenida en el proceso de desintegración del radio 226, es el parámetro más significativo debido a su naturaleza gaseosa y a su fácil difusión.

La exposición a radiación externa (*External Radiation*) se produce como resultado de la emisión radiactiva de los diferentes radionucleidos, así como de la emanada por los radionucleidos que han sido transportados hasta aire, agua o suelo. Es por esto, que es el segundo parámetro más significativo observado en las anteriores gráficas. La dosis a recibir por vía externa, 20 mSv/año, sigue superando la dosis efectiva máxima a recibir para personas no expuestas, pero en cambio, ya se encuentra dentro de los límites establecidos para los trabajadores de las balsas de fosfoyesos.

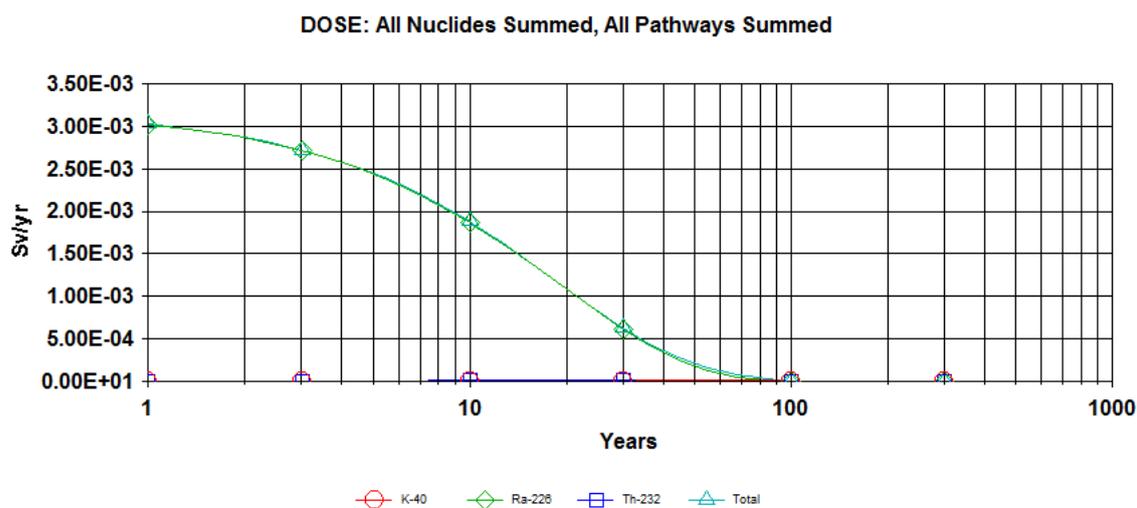
Por otra parte, plantas y árboles, son los que se ven afectados más significativamente por la radiación del Ra-226, con unos 10 mSv/año, debido a que se encuentran en contacto directo con la tierra. El suelo recibe altas dosis de radiación tanto por las lluvias que se filtran en la tierra como por los fosfoyesos arrastrados.

La ingestión de comida (leche, carne, vegetales, pescado), de agua o de tierra es insignificante ya que este tipo de ingestión se produce por vía directa y para la población estudiada, es nula.

### 7.1.2. Determinación del tiempo de decaimiento a partir del artículo de la Universidad de Málaga y de la Universidad de Huelva

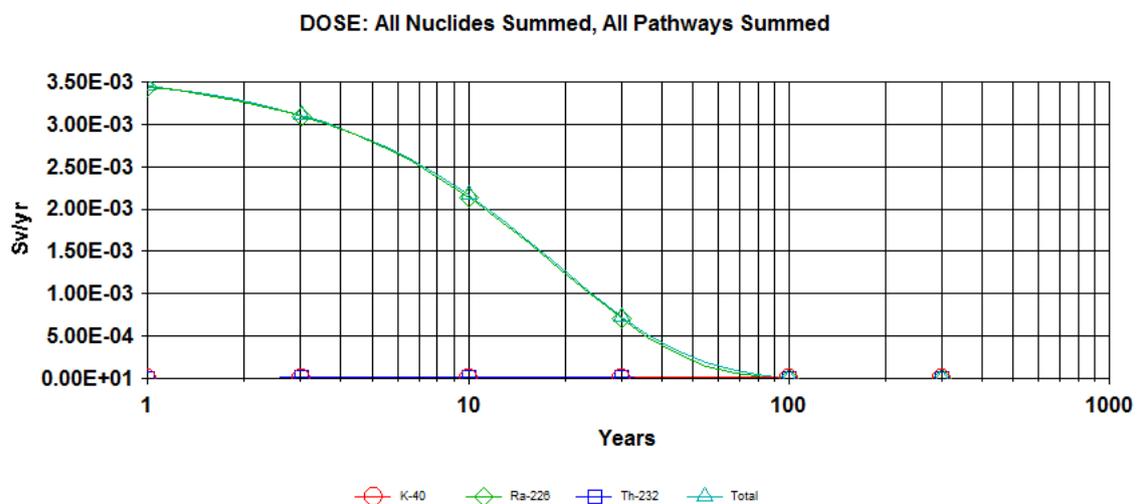
A continuación se estudian los datos obtenidos del artículo del *Journal of Environmental Radioactivity* de la misma forma en la que se han estudiado los datos basados en el informe CRIIRAD.

Para la población adulta estudiada, y partiendo de las concentraciones de todos los radionucleidos presentes en las balsas, se obtiene la gráfica de la Figura 7.10:



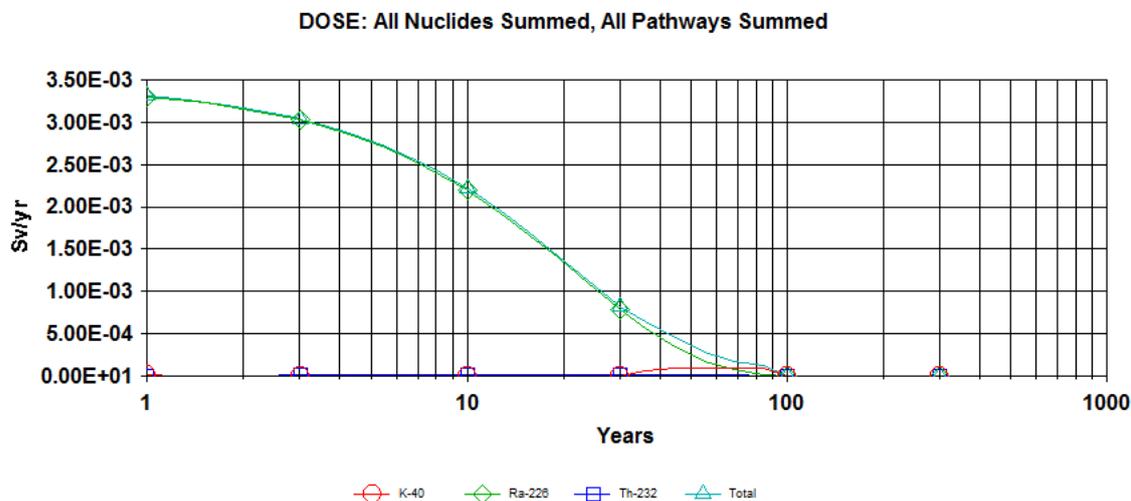
**Figura 7.10:** Resultados para la población de adultos basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Si se estudia la dosis recibida por una población de niños de 15 años, considerando todos los radionucleidos se obtiene la gráfica de la Figura 7.11:



**Figura 7.11:** Resultados para la población de niños de 15 años basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Para el caso en que las emisiones radiactivas afecten a niños de 1 año, la dosis a recibir se representa en la gráfica de la Figura 7.12:

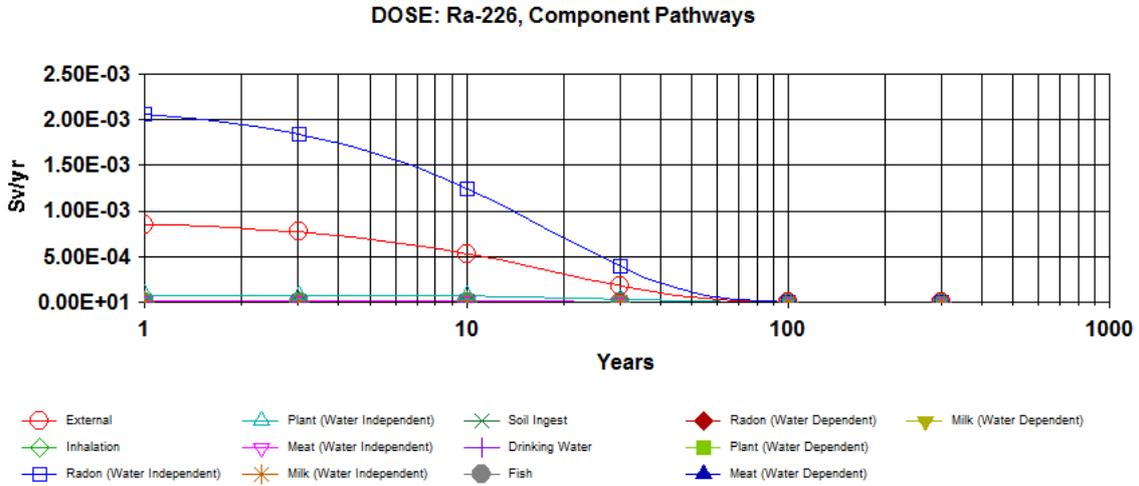


**Figura 7.12:** Resultados para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Como se muestra en las gráficas anteriores, la dosis a recibir según la actividad de cada radionucleido presente en las balsas de fosfoyesos de Huelva, varía entre 3 mSv/año y 3,5 mSv/año. Como se ha nombrado anteriormente, el límite de dosis a recibir se encuentra en la Tabla 5.1, según RD 783/2001 y es de 1 mSv/año. Por lo tanto, el artículo científico presentado en el *Journal of Environmental Radioactivit* y analizado mediante el software Resrad, presenta valores ligeramente superiores a los límites establecidos para personal profesionalmente no expuesto, que es de 1 mSv/año.

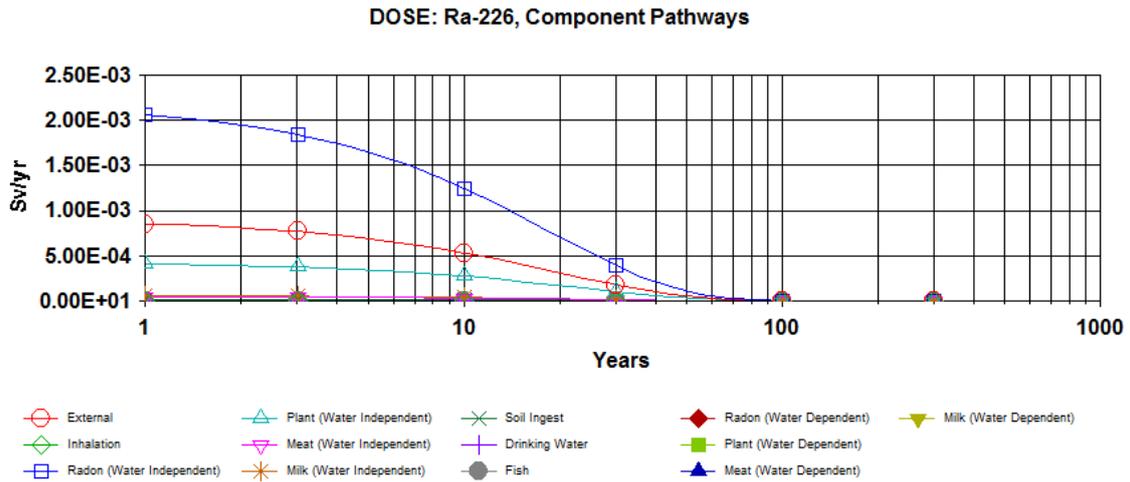
Si se analiza la incidencia radiológica sobre la población adulta, la dosis a recibir es menor que en el caso de niños tal y como se esperaba. Si se observa elemento a elemento, la actividad del Ra-226 es prácticamente el total de la radiactividad emitida en las balsas. Esto se produce debido a que el Ra-226 aparece en la desintegración del uranio, que se encuentra en mayor proporción como se ha indicado en el diagrama de bloques del proceso de producción de fertilizantes.

Siguiendo con el análisis radiológico, se realiza un estudio de la radiación emitida por el Ra-226 a partir de todas sus vías de exposición para la población adulta tal y como se muestra en la Figura 7.13:



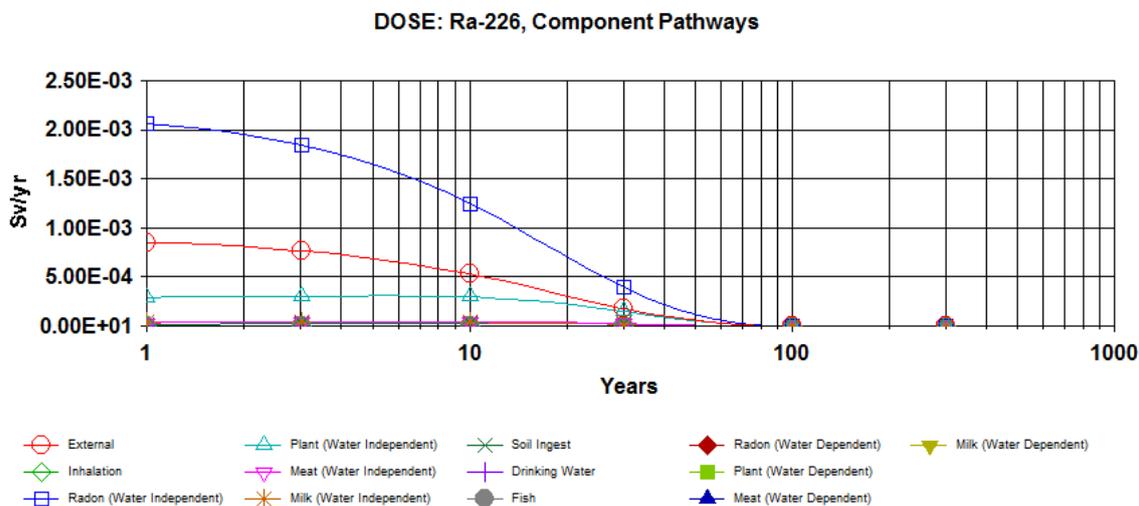
**Figura 7.13:** Resultados para el Ra-226 la población de adultos basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Si se estudia las dosis de radiación que inciden sobre una población de niños de 15 años se obtiene la Figura 7.14:



**Figura 7.14:** Resultados para el Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Por último, se estudia la dosis recibida en la población infantil de 1 año en todas las vías de exposición, a partir de la gráfica de la Figura 7.15:



**Figura 7.15:** Resultados para el Ra-226 para la población de niños de 1 año basados en los datos del Informe de la Universidad de Málaga

Comparando las tres representaciones del análisis del Ra-226 y todas sus vías de exposición, se puede deducir que según el informe científico, este radionucleido prácticamente tiene la misma incidencia sobre toda la población. Esto puede deberse a que las concentraciones en este caso no son excesivamente elevadas.

Se observa que, el radón es el compuesto más influyente y significativo. Como se ha explicado con anterioridad, esto es debido a que se trata de un gas con alta capacidad de difusión.

Las vías de exposición como la ingesta por vía suelo, el pescado, la carne o el agua, son prácticamente despreciables frente a la radiación externa, consistente en la emisión de todos los radionucleidos, y a la vía de exposición como plantas y árboles. Estos dos últimos parámetros, aun siendo de los más significativos, no suponen riesgo para la salud pública ya que en ningún caso exceden los límites de dosis a recibir.

### 7.1.3. Comparación de los resultados del tiempo de decaimiento obtenido para cada informe

Se estudia para varios intervalos de tiempo, la dosis de radiación a la que estaría expuesto cada grupo poblacional situado sobre la superficie (270 Ha) de las balsas. Para ello se presenta la Tabla 7.2:

**Tabla 7.2:** Cuadro resumen de las dosis de radiación

| Tiempo<br>(años) | ADULTOS |                 | 15 AÑOS |                 | 1 AÑO   |                 |
|------------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
|                  | CRIIRAD | Univ.<br>Málaga | CRIIRAD | Univ.<br>Málaga | CRIIRAD | Univ.<br>Málaga |
| 1                | 0,0734  | 0,0030          | 0,0837  | 0,0034          | 0,0804  | 0,0033          |
| 3                | 0,0661  | 0,0027          | 0,0755  | 0,0031          | 0,0737  | 0,0030          |
| 10               | 0,0455  | 0,0019          | 0,0523  | 0,0022          | 0,0535  | 0,0022          |
| 30               | 0,0151  | 0,0006          | 0,0175  | 0,0007          | 0,0195  | 0,0008          |
| 100              | 0,0000  | 0,0000          | 0,0000  | 0,0000          | 0,0000  | 0,0000          |

Como se aprecia en la tabla anterior, para un mismo tiempo los valores de las dosis de un mismo informe se asemejan, con tendencia ascende si disminuye la edad de estudio.

Si se comparan ambos informes entre sí existen diferencias importantes dentro de un mismo grupo poblacional, llegando incluso a multiplicar en 24 veces los valores.

## 7.2. Estimación de la radiación mediante Microshield

En el *Documento II: Planos*, en el plano 8 *Afección por distancia*, se ha representado la distancia entre las balsas de fosfoyesos y la ciudad de Huelva. Se ha elegido estudiar la incidencia radiológica sobre la población para los siguientes radios de alcance, Figura 7.16:

- 500 m
- 1000 m
- 2000 m
- 4000 m

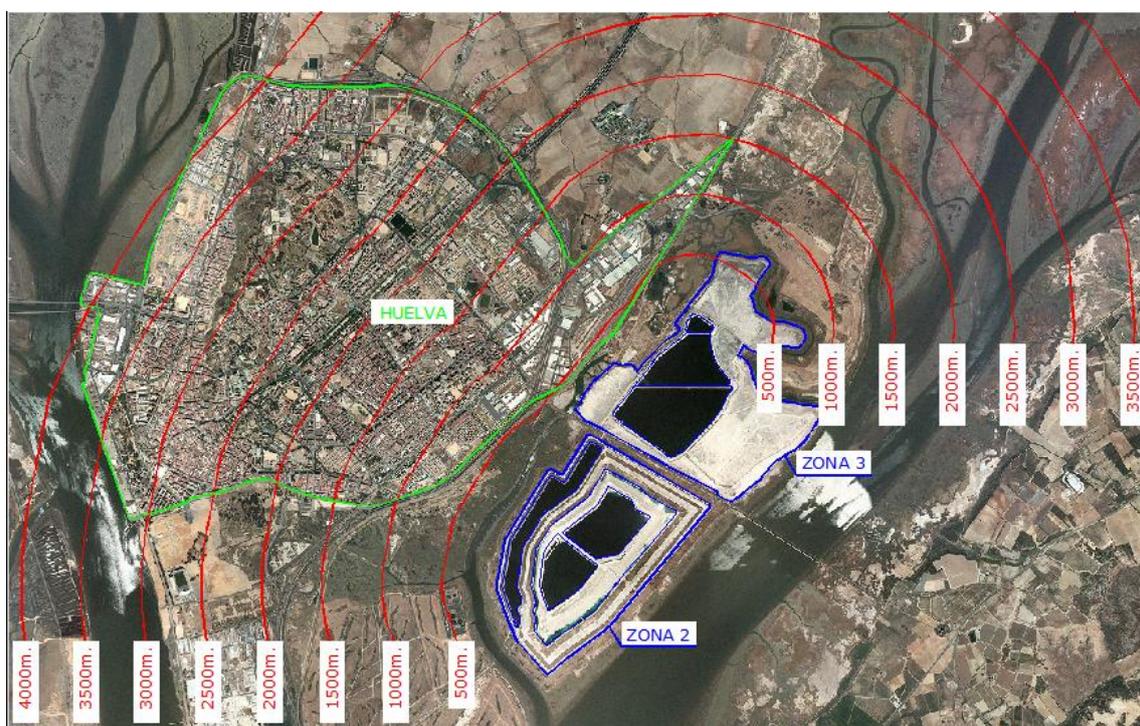
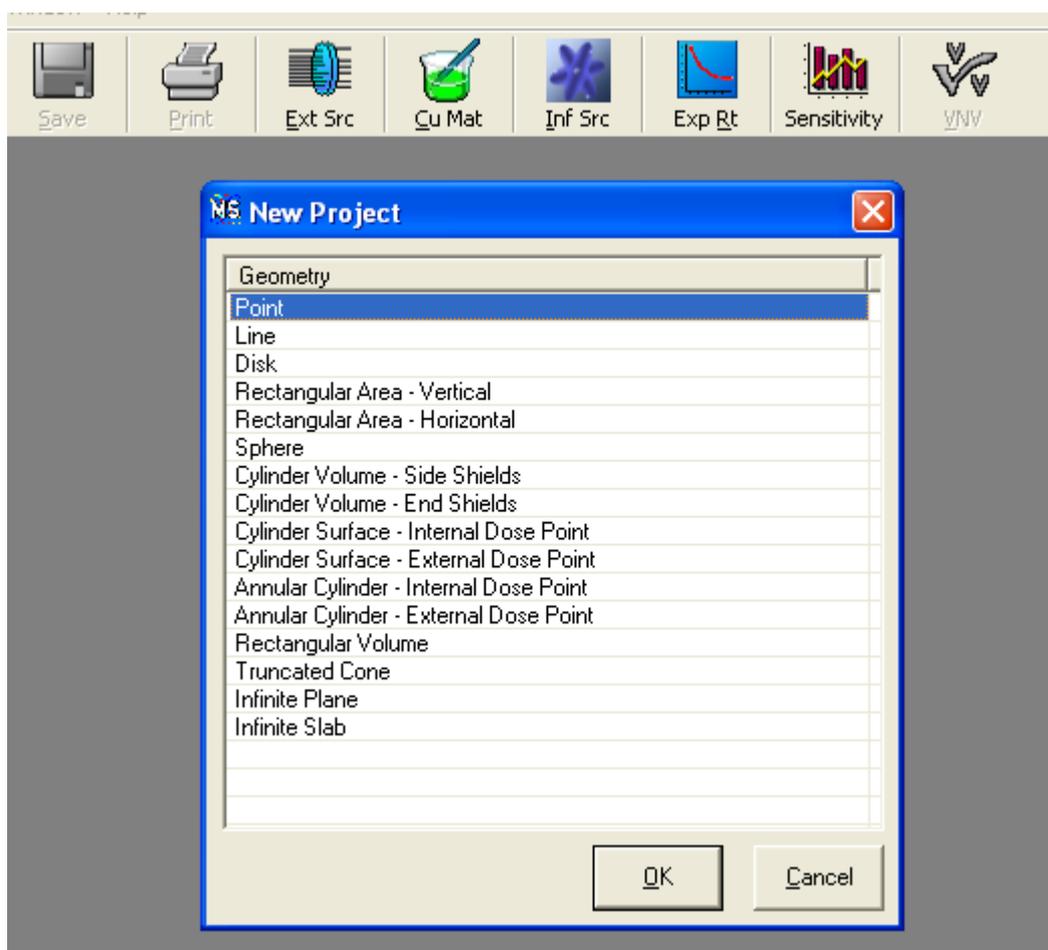


Figura 7.16: Radio de alcance de la radiación

Para estudiar el alcance de la radiación se ha empleado el programa Microshield, que estima las exposiciones por radiación gamma de una población y analiza blindajes. El uso de este programa necesita de unas aclaraciones previas sobre su funcionamiento que se detallan a continuación.

La pantalla principal muestra una selección de la geometría de la fuente radiactiva a analizar y tiene la forma que se observa en la Figura 7.17:



**Figura 7.17:** Elección de la geometría de la fuente radiactiva

Para el caso a estudiar en este TFG, se elige un volumen rectangular cuyas dimensiones son 1900x1300 m, que coinciden con el área ocupada por las balsas sin sobredimensionar, y una profundidad de 10 cm. En la Figura 7.18 se observa dónde se han de introducir los datos sobre el dimensionamiento en Microshield. En color naranja está remacada la zona en la que se completa los datos de la fuente radiactiva y en verde, donde se introducen los datos de las distancias respecto a la fuente de emisión a las que se quiere medir la exposición a la radiación. Microshield crea un eje de coordenadas y lo sitúa en el punto (0,0) a partir del cual se realizarán las estimaciones.

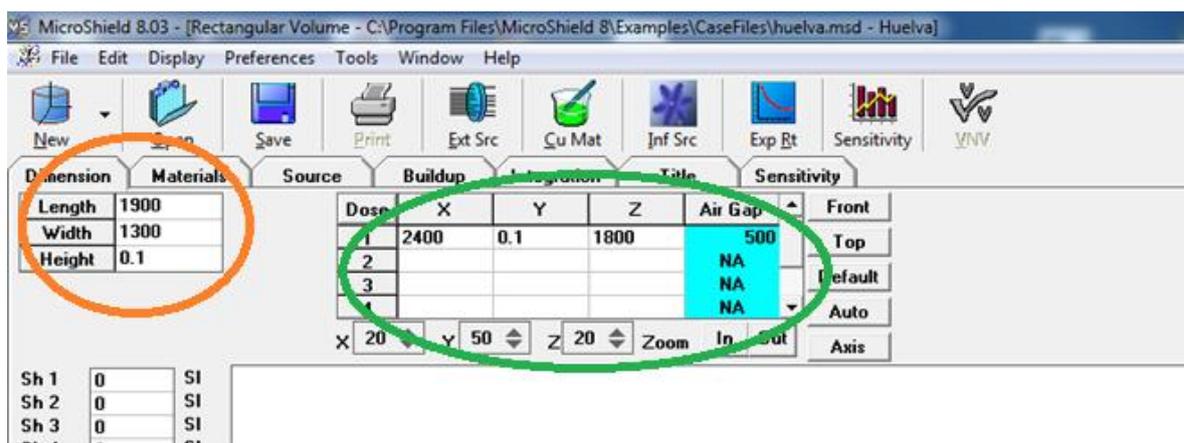


Figura 7.18: Dimensionamiento de la fuente radiactiva

Como los tipos de materiales que presenta Microshield son limitados, se elige uno que se asemeje a los fosforescos que ocupan las balsas. Es por esto, que se elige como material, el hormigón (*Concrete*), Figura 7.19, con una densidad  $\rho = 1,5 \frac{kg}{m^3}$ . La densidad introducida es la densidad de la tierra, que a su vez se asemeja a la de los fosforescos que ocupan las balsas.

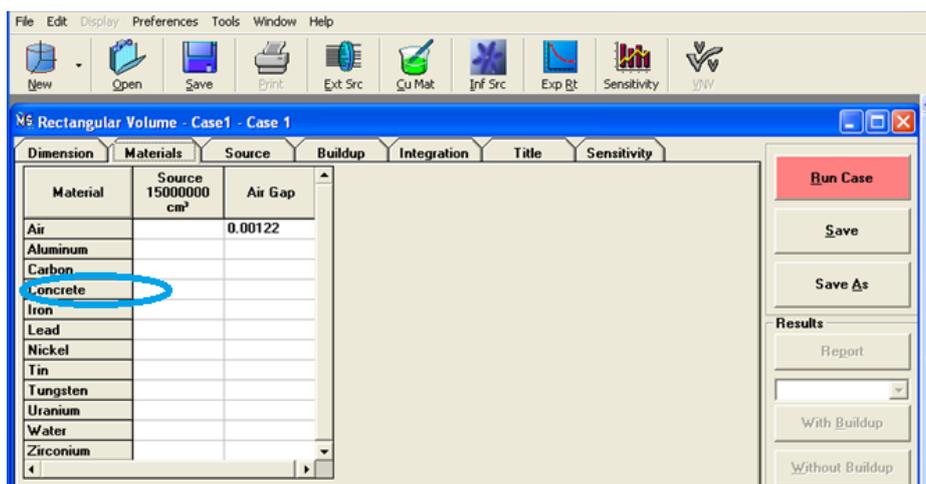


Figura 7.19: Elección del tipo de material de la fuente

Se eligen las Fuentes (*Source*) a estudiar: Ra-226, Th-232 y K-40, los radionucleidos comunes a ambos informes, y se introduce la cantidad de cada una de ellas como se muestra en la Figura 7.20.

El programa utiliza la nomenclatura  $Bq/cm^3$  y como los datos de los dos informes a estudiar se encuentran en  $Bq/año$ , se multiplica esta actividad por la densidad de la tierra ( $\rho = 1,5 \frac{kg}{m^3}$ ), obteniéndose así las unidades requeridas.

| Nuclide | curies      | becquerels  | $\mu Ci/cm^2$ | $Bq/cm^2$   |
|---------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| K-40    | 5.0068e+003 | 1.8525e+014 | 2.0270e-002   | 7.5000e+002 |
| Ra-226  | 7.4100e+004 | 2.7417e+015 | 3.0000e-001   | 1.1100e+004 |
| Th-232  | 8.0108e+002 | 2.9640e+013 | 3.2432e-003   | 1.2000e+002 |

| Group # | Energy (MeV) | Activity Photons/sec | Volume Source Photons/sec/cm <sup>2</sup> | % Energy Activity |
|---------|--------------|----------------------|---|-------------------|
| 1       | 0.003        | 1.7369e+012          | 7.0320e+000                               | .011              |
| 2       | 0.0117       | 2.1995e+013          | 8.9050e+001                               | .543              |
| 3       | 0.0123       | 2.4869e+012          | 1.0068e+001                               | .065              |
| 4       | 0.059        | 5.6316e+010          | 2.2800e-001                               | .007              |
| 5       | 0.0811       | 4.9411e+012          | 2.0004e+001                               | .845              |
| 6       | 0.0838       | 8.2078e+012          | 3.3230e+001                               | 1.450             |
| 7       | 0.0949       | 3.7210e+012          | 1.5065e+001                               | .745              |
| 8       | 0.125        | 1.2449e+010          | 5.0400e-002                               | .003              |
| 9       | 0.1862       | 8.9928e+013          | 3.6408e+002                               | 35.316            |
| 10      | 0.3097       | 1.8287e+011          | 7.4037e-001                               | .119              |
| 11      | 1.4608       | 1.9766e+013          | 8.0025e+001                               | 60.896            |

Figura 7.20: Introducción de los datos de las actividades de cada radionucleido

La intensidad de un haz residual será mayor que la prevista porque incorpora parte de los fotones que se dispersan y no sólo los del haz directo que alcanzan la población. Para tener en cuenta este hecho, se modifica la ley de atenuación introduciendo el factor de acumulación (*BuildUp*). En la Figura 7.21 se muestra el *BuildUp*, en el cual se seleccionan aquellos factores que tengan una energía mayor. En este caso, se seleccionará el aire como *BuildUp*.

| Name of Shield | Input Thickness (or source size) | Total Density (gm/cm <sup>3</sup> ) | Typical MFP at 1.4608 MeV |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Source         | 247000 m <sup>2</sup>            | 1.5                                 | 9563.53569                |
| Air Gap        |                                  | 0.00122                             | 4.07944                   |

Figura 7.21: Elección del material de blindaje de la radiación

Una vez introducidos los parámetros a analizar, se pulsa en *Run Case* y se esperan los resultados. Una vez obtenidos los resultados, se elegirán los que corresponden a una geometría anterior/posterior y los que corresponden a dosis efectiva con geometría isotrópica. La dosis efectiva anterior y posterior es la que afecta a una persona de forma directa por ambas partes, a diferencia de la dosis efectiva isotrópica que es la que se depositada por todas las partes del cuerpo.

Para la estimación de las exposiciones por radiación gamma se han estudiado los dos informes, objeto de estudio en el presente TFG.

### 7.2.1. Estimación del alcance de la radiactividad a partir del informe del laboratorio CRIIRAD

Se inicia el estudio de la incidencia radiológica a partir de las mediciones realizadas por el laboratorio CRIIRAD.

Los datos de dosis efectiva (anterior y posterior e isotrópica) obtenidos para diferentes radios de afectación se representan en Tabla 7.3:

**Tabla 7.3:** Exposición por radiación según el informe CRIIRAD para diferentes distancias

| CRIIRAD                 |                                       |                         |                        |                         |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Radio de afectación (m) | Dosis efectiva equivalente (mSv/hora) |                         |                        |                         |
|                         | Geometría anterior/posterior          |                         | Geometría isotrópica   |                         |
|                         | Con <i>BuildUp</i>                    | Sin <i>BuildUp</i>      | Con <i>BuildUp</i>     | Sin <i>BuildUp</i>      |
| 500                     | $9,565 \cdot 10^{-25}$                | $2,367 \cdot 10^{-126}$ | $5,511 \cdot 10^{-25}$ | $1,770 \cdot 10^{-126}$ |
| 1000                    | $4,536 \cdot 10^{-25}$                | $5,830 \cdot 10^{-130}$ | $2,613 \cdot 10^{-25}$ | $4,359 \cdot 10^{-130}$ |
| 2000                    | $1,786 \cdot 10^{-25}$                | $6,502 \cdot 10^{-135}$ | $1,029 \cdot 10^{-25}$ | $4,861 \cdot 10^{-135}$ |
| 4000                    | $5,959 \cdot 10^{-26}$                | $1,86 \cdot 10^{-143}$  | $3,433 \cdot 10^{-26}$ | $1,391 \cdot 10^{-143}$ |

Según la tabla anterior, los valores de la radiación por exposición gamma para diferentes radios de actuación son insignificantes. Esto podría ser debido a que gran parte de la radiación de las balsas de fosfoyesos se dispersa por caminos como suelo y agua.

### 7.2.2. Estimación del alcance de la radiactividad a partir del informe de la Universidad de Málaga y la Universidad de Huelva

Siguiendo la forma de actuación del apartado 7.2, se estimarán las dosis equivalentes efectivas para el estudio realizado por la Universidad de Málaga.

Los resultados obtenidos, tanto para la radiación anterior y posterior como para la isotrópica, se encuentran en la Tabla 7.4:

**Tabla 7.4:** Exposición por radiación según el informe de la Universidad de Málaga para diferentes distancias

| <b>INFORME UNIVERSIDAD DE MÁLAGA Y UNIVERSIDAD DE HUELVA</b> |  |                         |                             |                         |
|--|--|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Radio de afectación (m)                                      | <b>Dosis efectiva equivalente (mSv/hora)</b> |                         |                             |                         |
|  | <b>Geometría anterior/posterior</b>          |                         | <b>Geometría Isotrópica</b> |                         |
|  | <i>Con BuildUp</i>                           | <i>Sin BuildUp</i>      | <i>Con BuildUp</i>          | <i>Sin BuildUp</i>      |
| <b>500</b>   | $3,945 \cdot 10^{-26}$                       | $3,818 \cdot 10^{-127}$ | $2,275 \cdot 10^{-26}$      | $2,855 \cdot 10^{-127}$ |
| <b>1000</b>  | $1,871 \cdot 10^{-26}$                       | $9,404 \cdot 10^{-131}$ | $1,079 \cdot 10^{-26}$      | $7,030 \cdot 10^{-131}$ |
| <b>2000</b>  | $7,365 \cdot 10^{-27}$                       | $1,049 \cdot 10^{-135}$ | $4,247 \cdot 10^{-27}$      | $7,840 \cdot 10^{-136}$ |
| <b>4000</b>  | $2,458 \cdot 10^{-27}$                       | $3,001 \cdot 10^{-144}$ | $1,417 \cdot 10^{-27}$      | $2,243 \cdot 10^{-144}$ |

Como se observa en la Tabla 7.4, las actividades de cada radionucleido según el informe de la Universidad de Málaga no suponen riesgo alguno para la población situada a un radio de 500m y en consecuencia, para cualquier radio mayor.

### 7.2.3. Comparación de resultados

Para poder realizar un análisis comparativo entre ambos informes, se estudia por una parte la dosis efectiva para una geometría anterior/posterior, y para una geometría isotrópica por la otra. En ambos casos se ha elegido la dosis con *BuildUp*, que recoge la radiación dispersa además del haz de radiación directo.

En la Tabla 7.5 se muestra la geometría anterior/posterior:

**Tabla 7.5:** Exposición a la radiación según la geometría anterior/posterior

| Dosis equivalente efectiva (geometría anterior/posterior) (mSv/hr) |                        |  |
|--|------------------------|--|
| Radio (m)  | Informe CRIIRAD        | Informe Universidad Málaga y Universidad de Huelva |
| 500  | $9,565 \cdot 10^{-25}$ | $3,945 \cdot 10^{-26}$                             |
| 1000   | $4,536 \cdot 10^{-25}$ | $1,871 \cdot 10^{-26}$                             |
| 2000   | $1,786 \cdot 10^{-25}$ | $7,365 \cdot 10^{-27}$                             |
| 4000   | $5,959 \cdot 10^{-26}$ | $2,458 \cdot 10^{-27}$                             |

Tal y como se observa en la Tabla 7.5, la cantidad de radiación que llega a la población para diferentes radios de actuación es insignificante en ambos casos, siendo los valores obtenidos a partir del informe CRIIRAD ligeramente superiores.

Esto es debido a que los radionucleidos presentes en las balsas de fosfoyesos no se dispersan por esta vía de exposición sino por otras vías como los acuíferos y el suelo.

Para una geometría isotrópica, según se ve en la Tabla 7.6:

**Tabla 7.6:** Exposición a la radiación según la geometría isotrópica

| Dosis equivalente efectiva (geometría isotrópica) (mSv/hr) |                        |                               |
|--|------------------------|-------------------------------|
| Radio (m)  | Informe CRIIRAD        | Informe Universidad de Málaga |
| 500  | $5,511 \cdot 10^{-25}$ | $2,275 \cdot 10^{-26}$        |
| 1000   | $2,613 \cdot 10^{-25}$ | $1,079 \cdot 10^{-26}$        |
| 2000   | $1,029 \cdot 10^{-25}$ | $4,247 \cdot 10^{-27}$        |
| 4000   | $3,433 \cdot 10^{-26}$ | $1,417 \cdot 10^{-27}$        |

Siguiendo con el análisis anterior, pero esta vez para una geometría tipo isotrópica, la cantidad de radiación que afecta a la población es también insignificante, siendo de nuevo el informe CRIIRAD el que presenta valores de dosis efectivas mayores.

## 8. POSIBLE ALTERNATIVA PARA LAS BALSAS DE FOSFOYESOS.

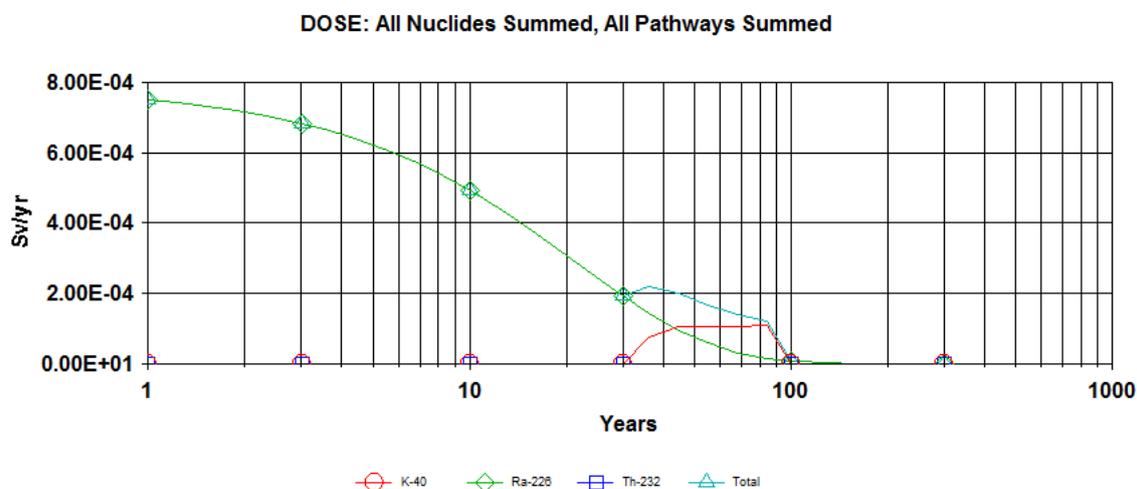
Como se ha visto en el apartado 7.1 y según las actividades medidas de cada radionucleido en las balsas de fosfoyesos, las dosis efectivas superar el límite establecido por la legislación que está en 1 mSv/año. Para el caso del informe del CRIIRAD, es límite de dosis se supera alrededor de 80 veces (80 mSv/año) y para el caso de estudio realizado por las Universidades de Málaga y Huelva, la dosis (3 mSv/año), aunque en menor medida, supera también el límite que se establece en el RD 783/2001. Es por ello, que, de forma genérica y mediante el software ResRad, se ha supuesto la creación de una cubierta sobre la zona contaminada. El material a cubrir, será tierra, cuya densidad ( $\rho = 1,5 \text{ kg/m}^3$ ) se asemeja a la de los fosfoyesos ( $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ).

Para cada uno de los informes estudiados en este TFG se analizará el grado de cubrición que sería necesario para que se viese reducida la dosis efectiva hasta ser menor que la establecida por la legislación.

Se tendrá en cuenta también, que la población crítica, la más sensible a la radiación son los niños y por tanto, si para este grupo poblacional, la cantidad de radiación que recibida está dentro de los límites, para los adultos, menos vulnerables a la radiación, también lo estarán. Se ha decidido analizar el efecto de la radiación sobre la población de niños de 15 años porque tal y como se ha mostrado en las figuras del apartado anterior, éstos son más sensibles a la radiación.

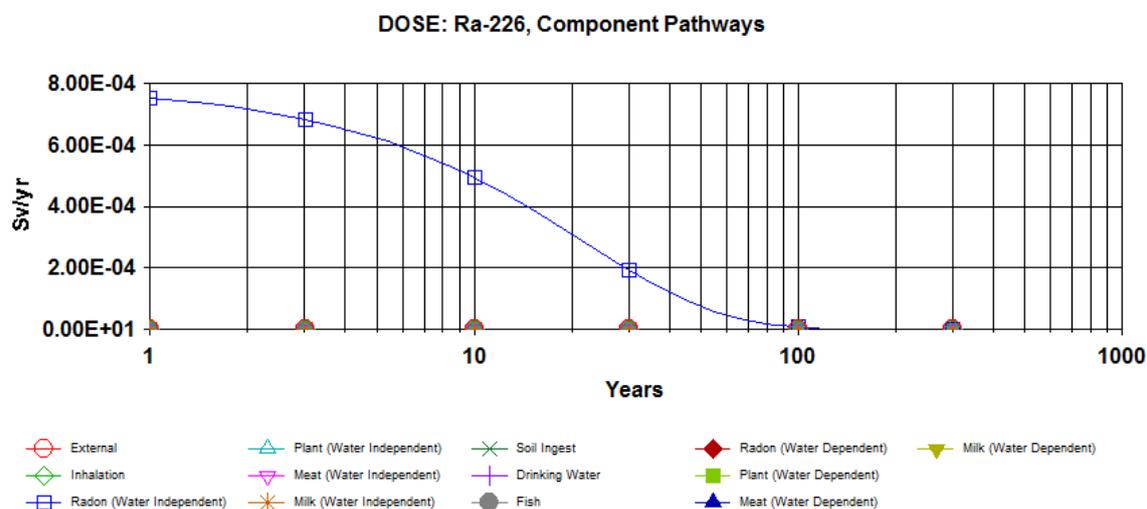
Para poder conocer la profundidad del recubrimiento se ha ido probando con distintos valores hasta alcanzar una dosis efectiva a tiempo 0, menor que el límite de 1 mSv/año que establece la normativa.

En el caso del informe del laboratorio CRIIRAD, se ha necesitado un recubrimiento de 4,5 metros de material con una densidad de  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ . La disminución de la dosis efectiva sobre la población de niños se muestra en la Figura 8.1:



**Figura 8.1:** Resultados de dosis efectiva para la población de niños de 15 años basados en los datos del CRIIRAD con una capa de recubrimiento de 4,5 metros

El radio sigue siendo el elemento más significativo en el total de la dosis efectiva, por lo que, igual que se ha hecho en el apartado 7.1 se ha decidido estudiar este mismo elemento de forma individual incluyendo todas las vías de exposición. Dichos resultados se observan en la Figura 8.2:

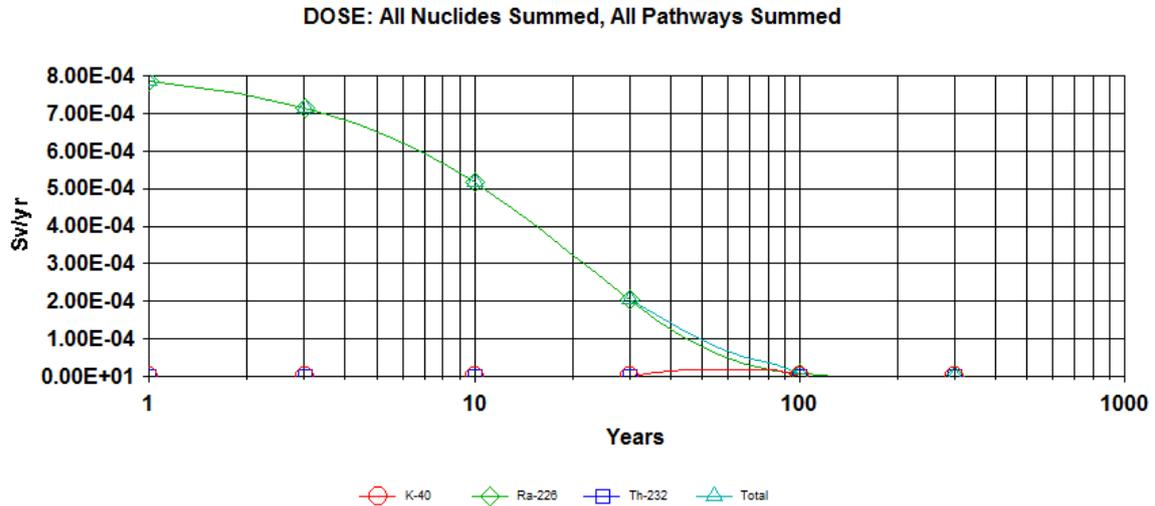


**Figura 8.2:** Resultados de dosis efectiva del Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos del CRIIRAD con una capa de recubrimiento de 4,5 metros

El resultado obtenido en la Figura 8.2 ha sido el esperado. Al añadir un recubrimiento la dosis efectiva se ha visto reducida hasta 0,8 mSv/año, por lo que sí cumpliría los límites establecidos de dosis efectiva para personas no expuestas profesionalmente (1mSv/año).

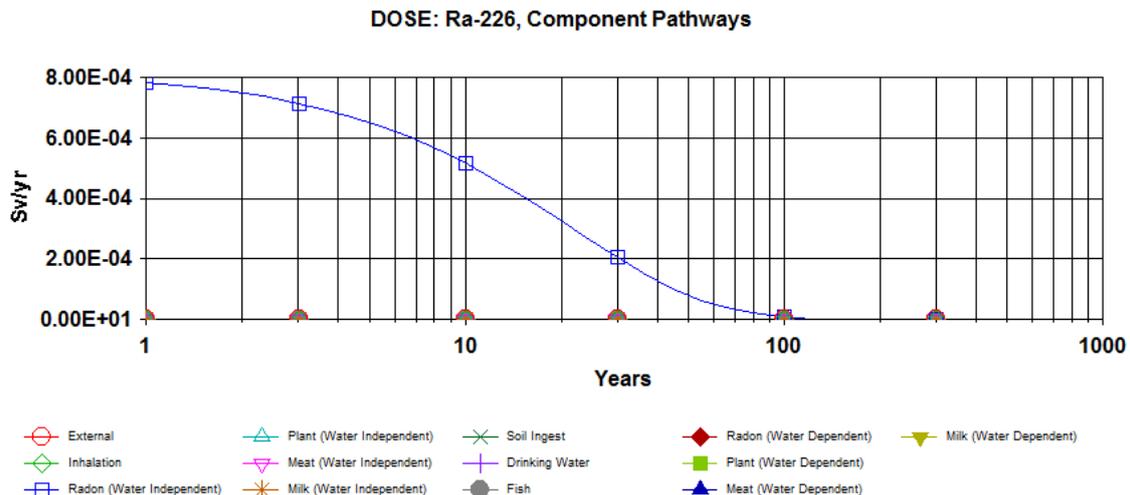
Los datos medidos de actividades de cada radionucleido proporcionados por la Universidad de Málaga son significativamente menores que para el caso del CRIIRAD y en consecuencia, la capa de recubrimiento que necesitarán para que los residuos de fosfoyesos cumplan con la normativa, será menor.

Se ha ido probando diversos perfiles de recubrimiento y se ha observado que para una capa de recubrimiento de 1,5 metros con un material cuya densidad es de aproximadamente  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  la dosis efectiva ya entra dentro de los límites de seguridad. Para todos los radionucleidos se ha obtenido la Figura 8.3 que muestra cómo ha disminuido la dosis efectiva a recibir para la población de niños de 15 años



**Figura 8.3:** Resultados de dosis efectiva para la población de niños de 15 años basados en los datos de la Universidad de Málaga con una capa de recubrimiento de 1,5 metros

Siguiendo con la misma idea de que el radio 266 es el elemento con mayor actividad y por tanto, el elemento a tener en cuenta, se observa en la Figura 8.4 su proceso de decaimiento.



**Figura 8.4:** Resultados de dosis efectiva del Ra-226 para la población de niños de 15 años basados en los datos de la Universidad de Málaga con una capa de recubrimiento de 1,5 metros

Como se puede ver, el radón es el elemento que más influye en cuanto a la dosis efectiva a recibir mientras que todas las demás vías de exposición (ingestión, inhalación, etc) son prácticamente nulas

## 9. CONCLUSIONES.

En el presente Trabajo Final de Grado (TFG) se ha estudiado la incidencia radiológica de los radionucleidos (Ra-226, Th-232 y K-40) presentes en las balsas de fosfoyesos de Huelva partiendo de dos informes con valores aparentemente dispares.

Por una parte, se ha realizado un análisis de la posible afectación de la población sobre la propia superficie de 270 Ha de las balsas (Zona 2) y por otra, la incidencia radiológica de los residuos radiactivos de las balsas sobre la población a diferentes radios de actuación (500 metros, 1000 metros, 2000 metros y 4000 metros).

En el primer caso, para el análisis de las dosis efectivas que recibirían los humanos situados sobre las balsas de vertido, se ha utilizado el software ResRad.

En el caso del estudio de la incidencia radiológica para diferentes radios de actuación, se ha utilizado el software Microshield.

Como resultados relevantes cabe destacar que en ambos informes se aprecian dosis efectivas superiores a las legalmente permitidas (1 mSv/año para personas expuestas no profesionalmente). Si bien en el informe presentado por las Universidades de Málaga y Huelva estas dosis sólo aparecen ligeramente por encima de los límites establecidos (alrededor de 3 mSv/año) para la población *in situ*, el informe presentado por CRIIRAD supera ampliamente estos límites, llegando a alcanzar dosis efectivas de 80 mSv/año.

Mediante el software ResRad, se han estudiado dosis efectivas para diferentes grupos poblacionales que como era de esperar difieren ligeramente entre sí, siendo los adultos los que se ven menos perjudicados frente a los niños ante las dosis recibidas.

ResRad realiza estimaciones de las distintas vías de exposición para cada radionucleido y como se observa en las figuras del apartado 7, el gas radón es el elemento más crítico cuyos valores representan casi la totalidad de la radiación.

En cuanto a la incidencia radiológica mediante el software Microshield, se han obtenido cantidades de radiación ínfimas para las diferentes distancias radiales estudiadas, considerando que la atmosfera recoge tanto las radiaciones del haz como las dispersas.

Ante toda la problemática referente a las balsas de fosfoyesos, se ha propuesto, mediante el software ResRad, la cubrición de la parcela (Zona 2) ocupada por los residuos apilados, que para cada uno de los informes requerirá de un espesor determinado para que el valor descienda por debajo de los límites para la población en general. Para el informe elaborado por CRIIRAD, se necesitaría aproximadamente 4,5 metros de cubrición y para los valores de radiación obtenidos por las Universidades de Málaga y Huelva, 1,5 metros. En ambos casos este espesor requerido será muy superior a las tareas de regeneración ya realizadas.

El ResRad se ha mostrado como un instrumento muy potente para el estudio de la incidencia radiológica sobre la superficie contaminada además de permitir dar una solución de cubrición efectiva.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guimond y Hardin (2009). Natural radioactivity assessment of a phosphate fertilizer plant area. *Journal of Environmental Radioactivity*
- [2] Cabanillas, F.,(2014, 28 de mayo). Las claves del conflicto del Ministerio de García Tejerina contra su antigua empresa. *El diario*. Recuperado el 20 de agosto de 2014 de <http://eldiario.es>
- [3] Laboratorio de la CRIIRAD (2007). *Control radiológico de las balsas de fosfoyesos y del vertido de cesio 137 del CRI-9* (Publicación Nº 07-117). Valence
- [4] Greenpeace España, (2007, 5 de marzo). Ría de Huelva: un desastre ecológico a escala mundial. Recuperado de <http://greenpeace.org/espana/Global/espana/report>
- [5] WWF- España (2007, 17 de julio). La Audiencia Nacional da la Razón a WWF/Adena en el caso Fertiberia y confirma su incumplimiento de la Ley de Costas en la ría de Huelva. Recuperado el 25 de octubre desde [http://www.wwf.es/noticias/sala\\_de\\_prensa/?1300](http://www.wwf.es/noticias/sala_de_prensa/?1300)
- [6] Marín, A. ,(2011, 22 de febrero). El TS confirma la prohibición a Fertiberia de seguir apilando fosfoyesos en las marimas. Recuperado 25 de agosto de 2014 desde <http://www.elmundo.es/elmundo/2011/02/21/andalucia/1298300485.html>
- [7] Planelles, M. (2014, 13 de junio). La justicia asume el control de la restauración de las balsas de fosfoyesos. Recuperado de [http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/06/13/andalucia/1402667525\\_027004.html](http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/06/13/andalucia/1402667525_027004.html)
- [8] Dueñas, C., Liger, E., Cañete, S., Pérez, M. y Bolívar, J.P. (2010, 4 de enero). Radiological impactes of natural radioactivity from phosphogypsum piles in Huelva (Spain). Recuperado el 27 de noviembre de 2014 de <http://www.elsevier.com/locate/radmeas>
- [9] Díez, S., Ricos, B. y Alonso, S. (2014). Curso especialista en Protección Radiológica, Módulo General.
- [10] Menéndez, S., García, A., Vaño,E. (2014, marzo). Procedimientos de Protección Radiológica para manipulación de fuentes no encapsuladas utilizadas en la instalación radiactiva central (IRC). *Universidad Complutense de Madrid*
- [12] LENNTECH. Recuperado el 11 de octubre de 2014 desde: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/u.htm>
- [13] LENNTECH. Recuperado el 11 de octubre de 2014 desde: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cs.htm>
- [14] LENNTECH. Recuperado el 11 de octubre de 2014 desde: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/th.htm>
- [15] LENNTECH. Recuperado el 11 de octubre de 2014 desde: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ra.htm>

[16] EGMASA (2010, 15 de julio). Informe de inspección de residuos (IP-W-RE-001-10). Recuperado el 10 de agosto de 2014 desde [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal\\_web/web/temas\\_ambientales/vigilancia\\_y\\_preencion\\_ambiental/planificacion/plan\\_calidad\\_huelva\\_2010\\_15/informe\\_caracterizacion\\_residuos.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/vigilancia_y_preencion_ambiental/planificacion/plan_calidad_huelva_2010_15/informe_caracterizacion_residuos.pdf)

[17] Egmasa (2010, 15 de julio). Estudio básico de la viabilidad ambiental y social del traslado a vertedero de los fosfoyesos de Huelva. Recuperado el 2 de junio de 2014 de [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=bd96c19711bcc210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=476fb17d59dbb310VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang\\_es](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=bd96c19711bcc210VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=476fb17d59dbb310VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang_es)

[18] Dueñas, C., Liger, E., Cañete, S., Pérez, M. y J.P. Bolívar (2010). *Exhalation of Rn222 from phosphogypsum piles located at the Southwest of Spain. Journal of Environmental Radioactivite.*

[19] Instituto Geográfico Nacional

[20] Consejo de Seguridad Nuclear



# DOCUMENTO II: PLANOS

---



## ÍNDICE PLANOS

Plano 1: Situación

Plano 2: Planta general

Plano 3: Planta detalle

Plano 4: Planta general topografía

Plano 5: Planta topografía detalle I

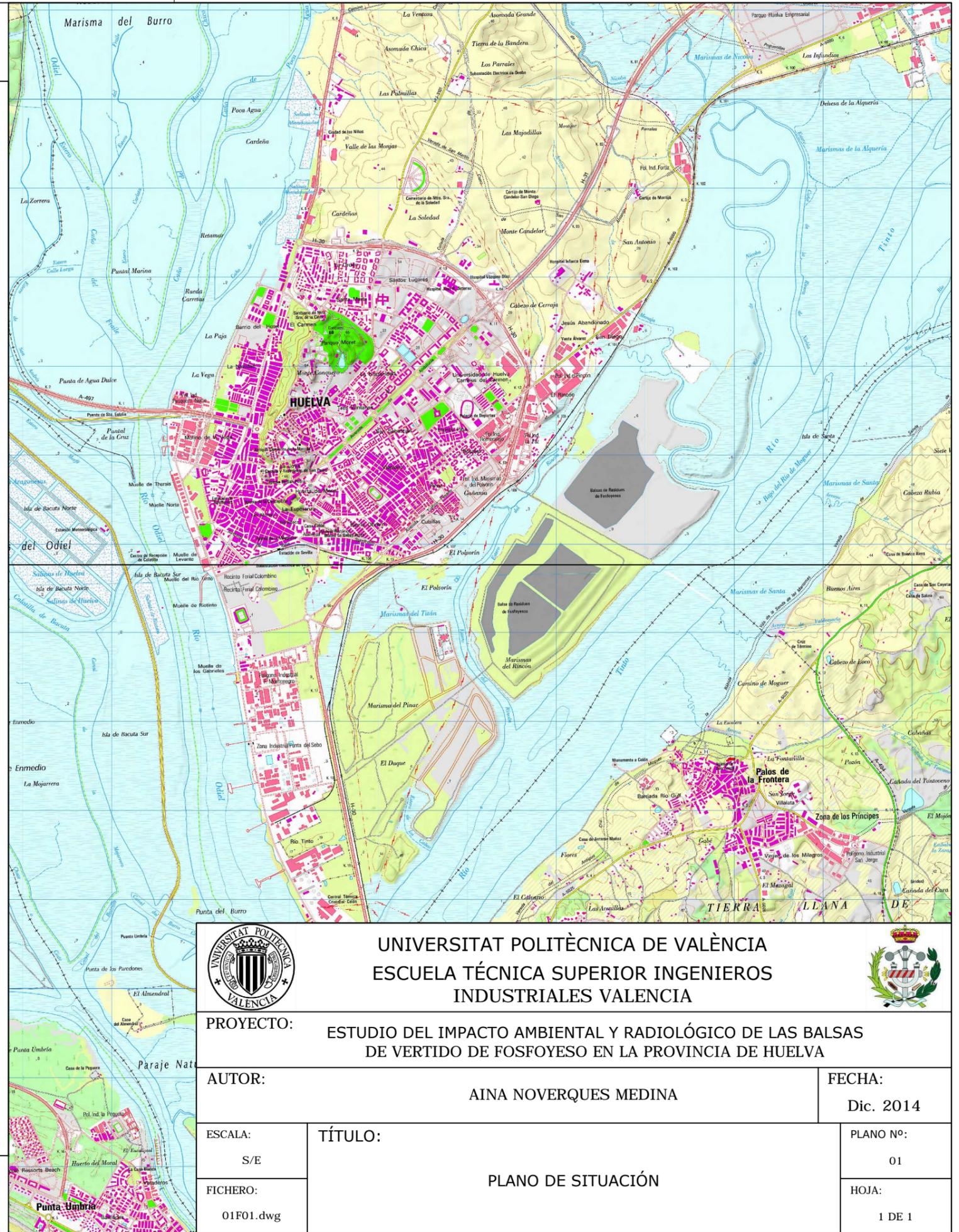
Plano 6: Planta topografía detalle II

Plano 7: Perfiles balsas A-A

Plano 8: Perfil de balsas B-B y C-C

Plano 9: Afección por distancia





UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA: Dic. 2014

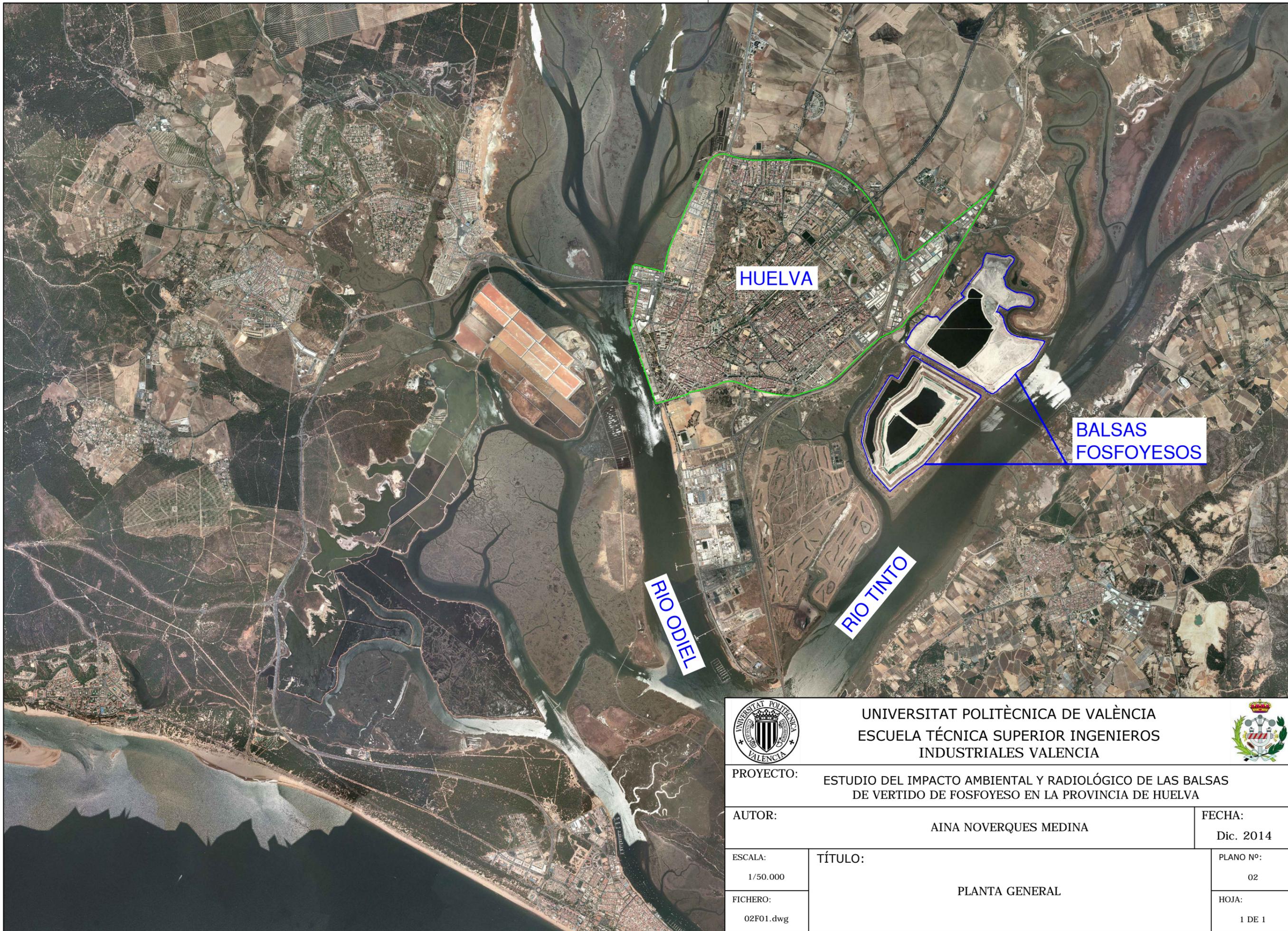
ESCALA: S/E

TÍTULO: PLANO DE SITUACIÓN

PLANO Nº: 01

FICHERO: 01F01.dwg

HOJA: 1 DE 1



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA: Dic. 2014

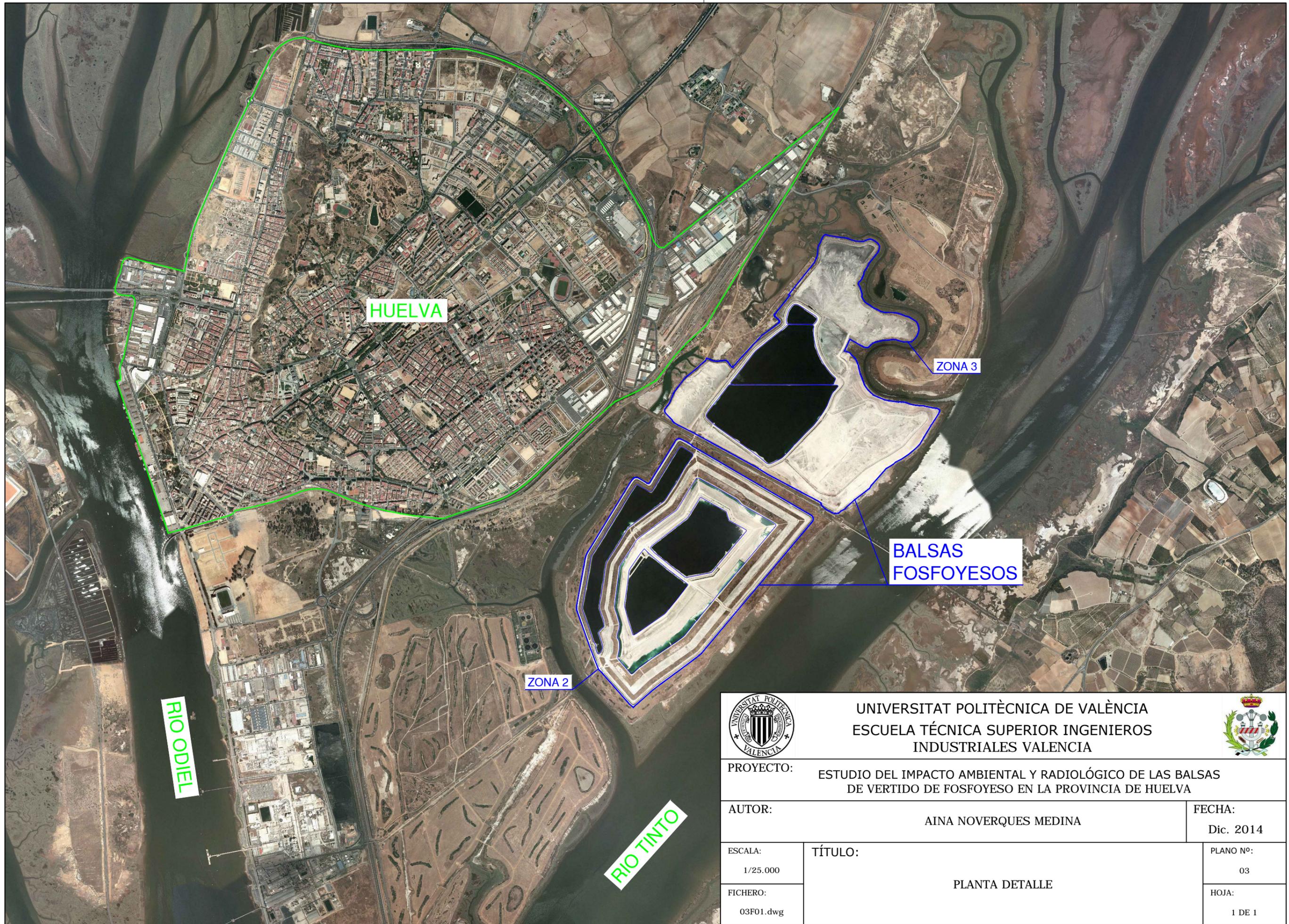
ESCALA: 1/50.000

TÍTULO: PLANTA GENERAL

PLANO Nº: 02

FICHERO: 02F01.dwg

HOJA: 1 DE 1



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA: Dic. 2014

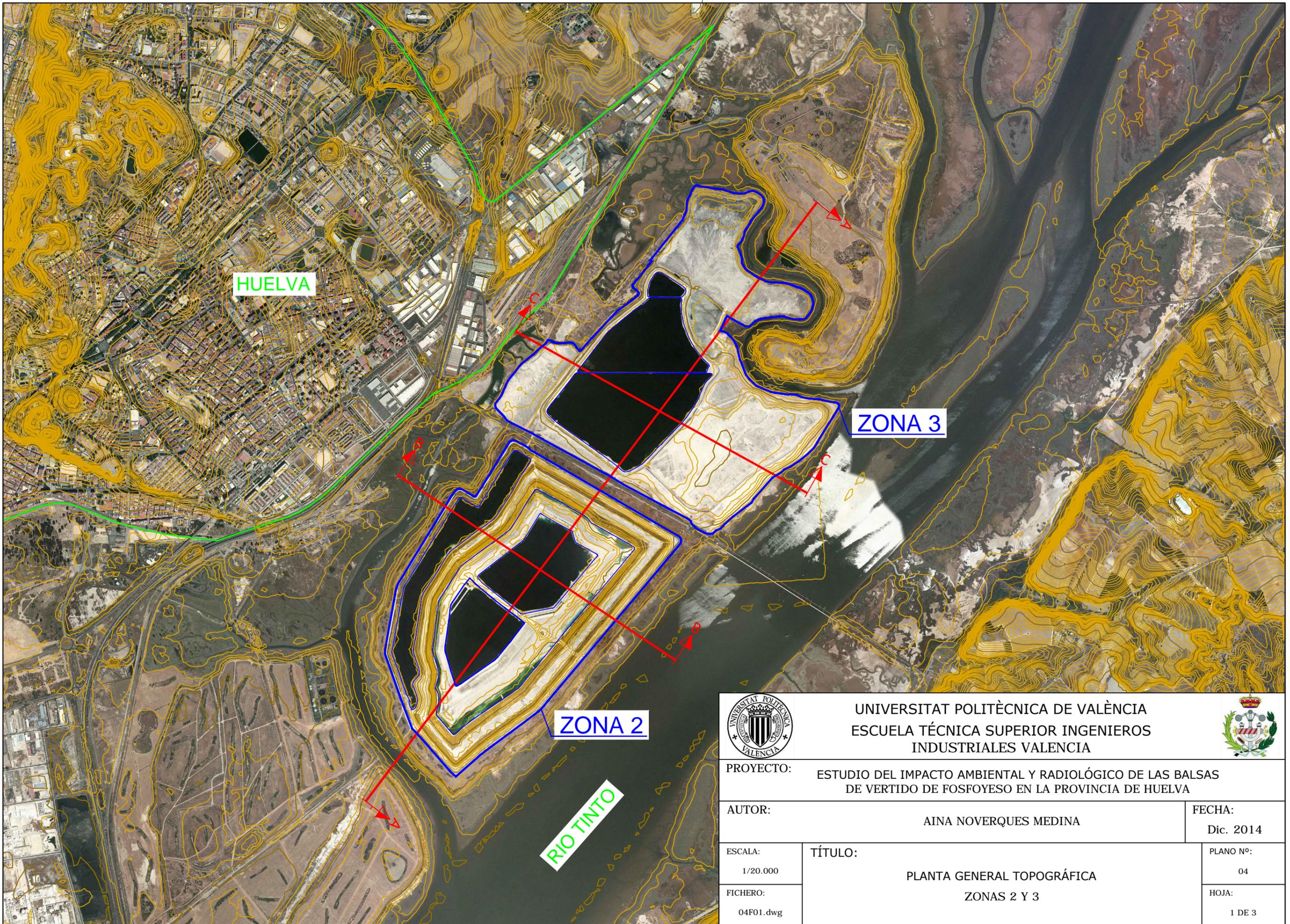
ESCALA: 1/25.000

TÍTULO: PLANTA DETALLE

PLANO Nº: 03

FICHERO: 03F01.dwg

HOJA: 1 DE 1



HUELVA

ZONA 3

ZONA 2

RIO TINTO



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA: Dic. 2014

ESCALA: 1/20.000

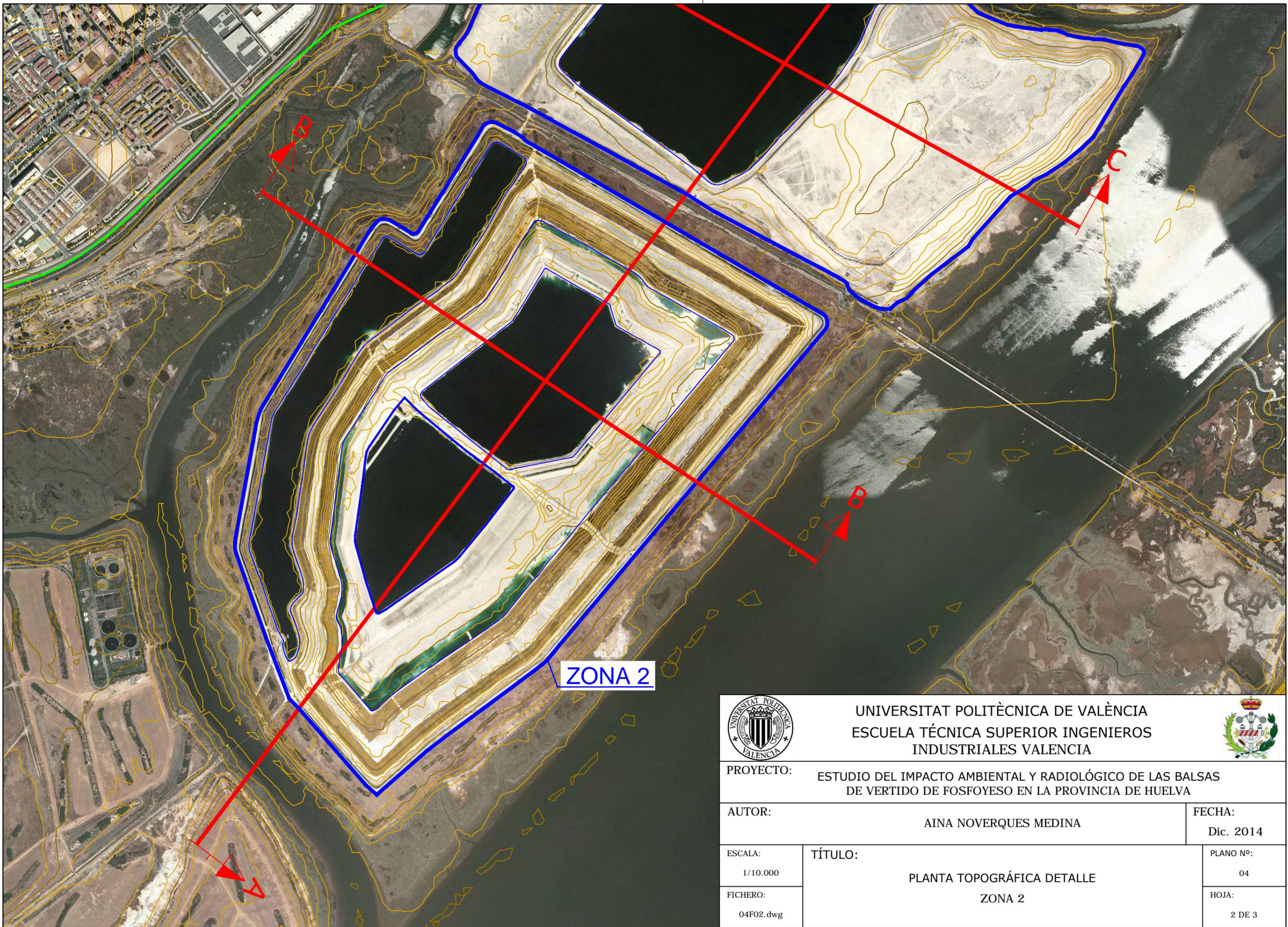
TÍTULO: PLANTA GENERAL TOPOGRÁFICA

PLANO Nº: 04

FICHERO: 04F01.dwg

ZONAS 2 Y 3

HOJA: 1 DE 3



ZONA 2



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS  
 DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA:  
 Dic. 2014

ESCALA:  
 1/10.000

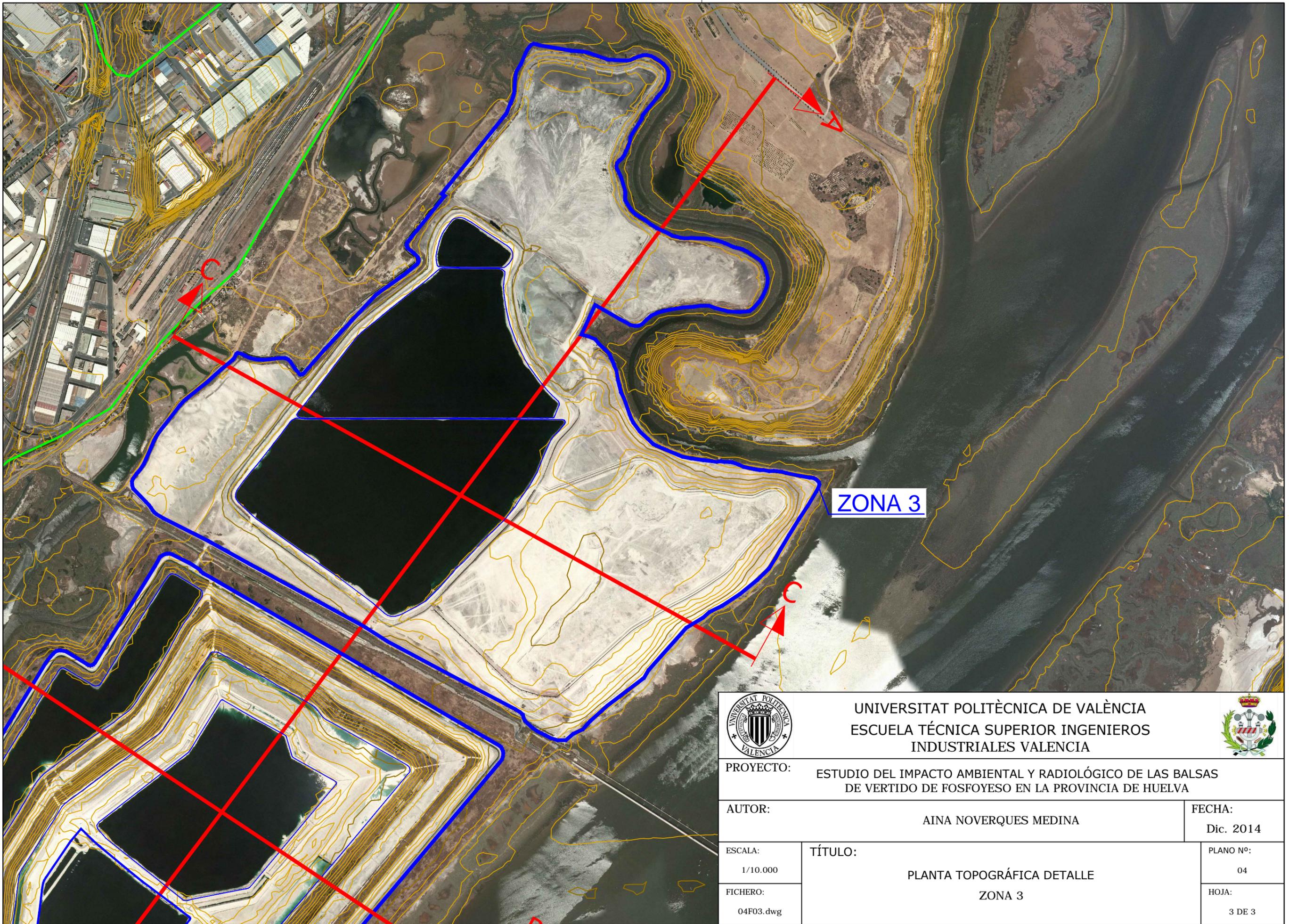
TÍTULO:  
 PLANTA TOPOGRÁFICA DETALLE

PLANO Nº:  
 04

FICHERO:  
 04F02.dwg

ZONA 2

HOJA:  
 2 DE 3



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS  
 DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA:  
 Dic. 2014

ESCALA:  
 1/10.000

TÍTULO:  
 PLANTA TOPOGRÁFICA DETALLE

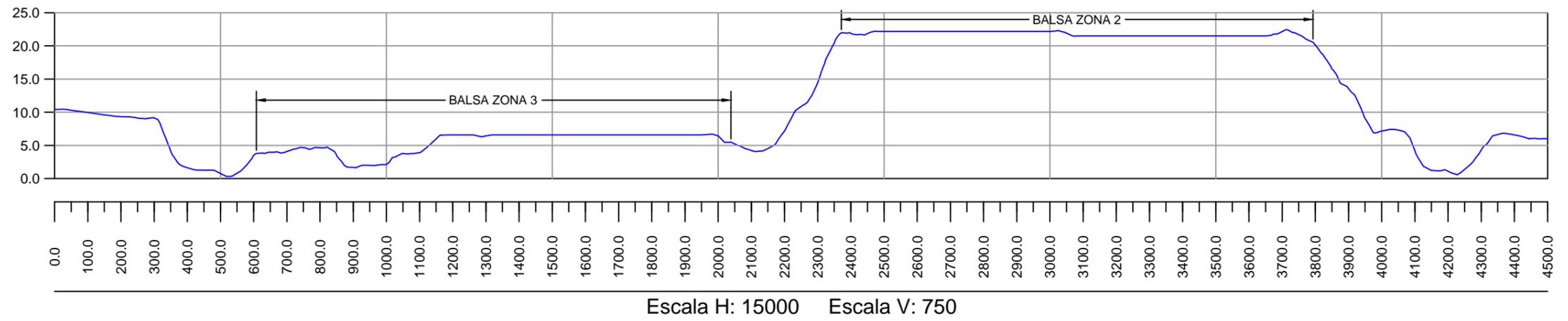
PLANO Nº:  
 04

FICHERO:  
 04F03.dwg

ZONA 3

HOJA:  
 3 DE 3

## PERFIL A-A



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS**  
**INDUSTRIALES VALENCIA**



**PROYECTO:** ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

**AUTOR:** AINA NOVERQUES MEDINA

**FECHA:**  
Dic. 2014

**ESCALA:**  
H: 1/15.000  
V: 1/750

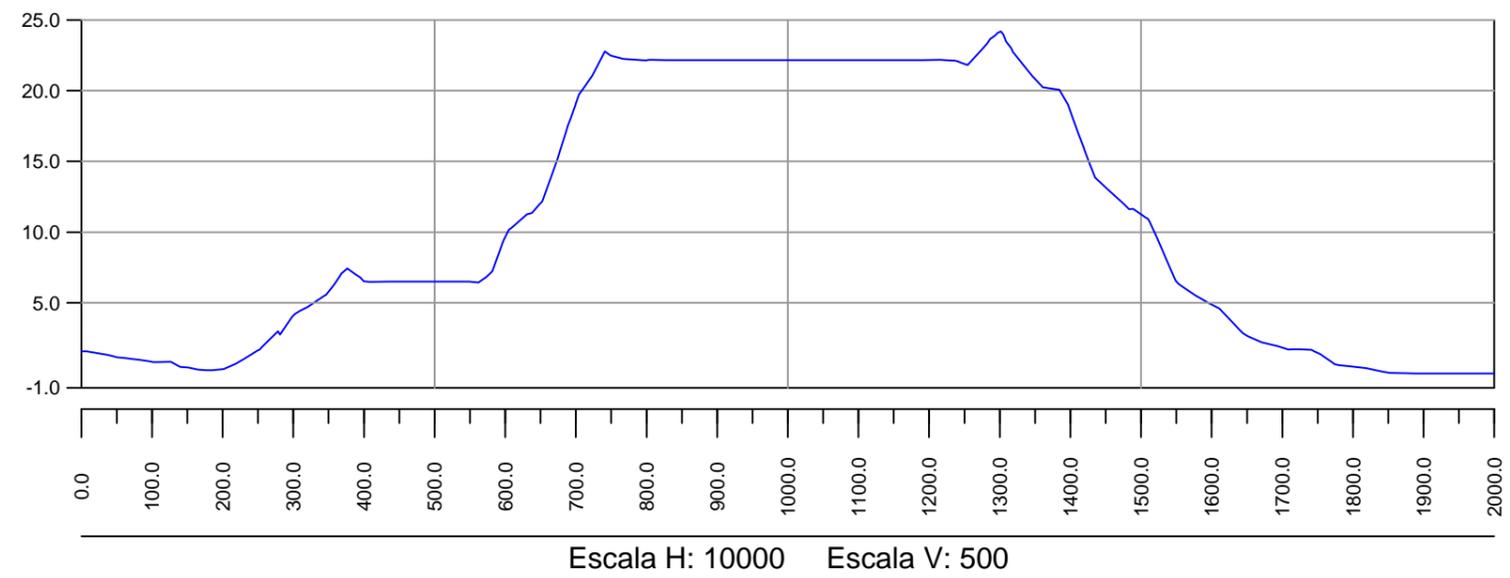
**TÍTULO:**  
  
PERFILES BALSAS  
PERFIL A-A

**PLANO Nº:**  
05

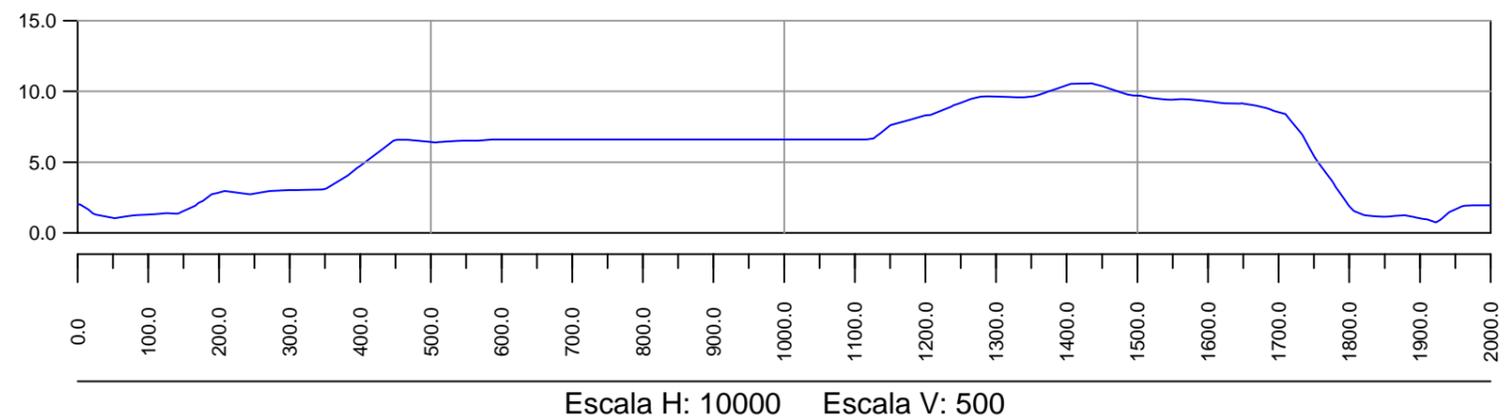
**FICHERO:**  
05F01.dwg

**HOJA:**  
1 DE 2

### PERFIL B-B (ZONA 2)



### PERFIL C-C (ZONA 3)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

AUTOR: AINA NOVERQUES MEDINA

FECHA: Dic. 2014

ESCALA:  
 H: 1/10.000  
 V: 1/500

TÍTULO:  
 PERFILES BALSAS  
 PERFIL B-B Y C-C

PLANO Nº:  
 05

FICHERO:  
 05F02.dwg

HOJA:  
 2 DE 2



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS  
 INDUSTRIALES VALENCIA



PROYECTO: ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL Y RADIOLÓGICO DE LAS BALSAS DE VERTIDO DE FOSFOYESO EN LA PROVINCIA DE HUELVA

|        |                       |        |           |
|--------|-----------------------|--------|-----------|
| AUTOR: | AINA NOVERQUES MEDINA | FECHA: | Dic. 2014 |
|--------|-----------------------|--------|-----------|

|           |                        |           |
|-----------|------------------------|-----------|
| ESCALA:   | TÍTULO:                | PLANO Nº: |
| 1/25.000  |                        | 06        |
| FICHERO:  | AFECCIÓN POR DISTANCIA | HOJA:     |
| 06F01.dwg |                        | 1 DE 1    |



# DOCUMENTO III: PRESUPUESTO

---



## ÍNDICE PRESUPUESTO

|   |    |
|---|----|
| 1. CUADRO DE PRECIOS MATERIALES .....         | 5  |
| 2. CUADRO DE PRECIOS MANO DE OBRA .....       | 5  |
| 3. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS .....      | 6  |
| 4. CUADROS DE PRECIOS UNITARIOS .....         | 10 |
| 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....     | 11 |
| 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA..... | 12 |



## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Cuadro de precios materiales .....           | 5  |
| Tabla 2: Cuadro de precios de mano de obra .....      | 5  |
| Tabla 3: Cuadro de precios descompuestos, ID01 .....  | 6  |
| Tabla 4: Cuadro de precios descompuestos, ID02 .....  | 6  |
| Tabla 5: Cuadro de precios descompuestos, ID03 .....  | 7  |
| Tabla 6: Cuadro de precios descompuestos, ID04 .....  | 7  |
| Tabla 7: Cuadro de precios descompuestos, ID05 .....  | 8  |
| Tabla 8: Cuadro de precios descompuestos, ID06 .....  | 8  |
| Tabla 9: Cuadro de precios descompuestos, ID07 .....  | 9  |
| Tabla 10: Cuadro de precios descompuestos, ID08 ..... | 9  |
| Tabla 11: Cuadro de precios unitarios .....           | 10 |
| Tabla 12: Presupuesto de ejecución material .....     | 11 |



Un presupuesto es un plan de operaciones y recursos que se recoge en términos monetarios. En este caso, se ha planteado un presupuesto para la realización del Trabajo Final de Grado. Para la consecución del presupuesto de forma completa, éste se ha dividido en los siguientes cuadros de precios:

## 1. CUADRO DE PRECIOS MATERIALES

**Tabla 1:** Cuadro de precios materiales

| <b>Materiales</b> |                 |                        |                   |
|-------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>     | <b>Precio (€)</b> |
| TM1               | €               | Ordenador              | 850               |
| TM2               | €               | Licencia Resrad        | 0                 |
| TM3               | €               | Curso Formación Resrad | 1117,2            |
| TM4               | €               | Licencia Janis 4.0     | 0                 |
| TM5               | €               | Licencia Microshield   | 1000              |

## 2. CUADRO DE PRECIOS MANO DE OBRA

**Tabla 2:** Cuadro de precios de mano de obra

| <b>Mano de obra directa</b> |                 |                                |                   |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| <b>Uds</b>                  | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> |
| MO1                         | Horas           | Estudiante Ingeniería Química  | 15                |
| MO2                         | Horas           | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                |
| MO3                         | Horas           | Ingeniera Industrial CO-tutora | 50                |
| MO4                         | Horas           | Ingeniero Químico              | 50                |

### 3. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

**Tabla 3:** Cuadro de precios descompuestos, ID01

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                                   |                                |                   |                 |                    |
|-------------------|-----------------|--|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ID01              | Uds             | Planteamiento del problema y definición de objetivos |                                |                   |                 |                    |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>                                      | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe (€)</b> |
|                   | MO1             | Horas  | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 20              | 300                |
|                   | MO2             | Horas  | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 1               | 70                 |
|                   | MO3             | Horas  | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 1               | 50                 |
| <b>TOTAL ID01</b> |                 |  |                                |                   | 420             |                    |

**Tabla 4:** Cuadro de precios descompuestos, ID02

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>      |                                |                   |                 |                    |
|-------------------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ID02              | Uds             | Búsqueda de información |                                |                   |                 |                    |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>         | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe (€)</b> |
|                   | MO1             | Horas                   | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 40              | 600                |
|                   | MO2             | Horas                   | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 2               | 140                |
|                   | MO3             | Horas                   | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 2               | 100                |
| <b>TOTAL ID02</b> |                 |                         |                                |                   | 840             |                    |

**Tabla 5:** Cuadro de precios descompuestos, ID03

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>  |                                |                   |                 |                    |
|-------------------|-----------------|---|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ID03              | Uds             | Puesta en marcha y desarrollo de los softwares Resrad y Microshield |                                |                   |                 |                    |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>   | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe (€)</b> |
|                   | MO1             | Horas   | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 120             | 1800               |
|                   | MO2             | Horas   | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 5               | 350                |
|                   | MO3             | Horas   | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 2               | 100                |
| <b>TOTAL ID03</b> |                 |   |                                |                   | <b>2250</b>     |                    |

**Tabla 6:** Cuadro de precios descompuestos, ID04

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>        |                                |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| ID04              | Uds             | Elaboración de la memoria |                                |                   |                 |                  |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>           | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe €</b> |
|                   | MO1             | Horas                     | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 80              | 1200             |
|                   | MO2             | Horas                     | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 1               | 70               |
|                   | MO3             | Horas                     | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 1               | 50               |
| <b>TOTAL ID04</b> |                 |                           |                                |                   | <b>1320</b>     |                  |

**Tabla 7:** Cuadro de precios descompuestos, ID05

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b> |                                |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| ID05              | Uds             | Realización planos |                                |                   |                 |                  |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>    | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe €</b> |
|                   | MO1             | Horas              | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 10              | 150              |
|                   | MO2             | Horas              | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 0,5             | 35               |
|                   | MO3             | Horas              | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 1               | 50               |
| <b>TOTAL ID05</b> |                 |                    |                                |                   | <b>235</b>      |                  |

**Tabla 8:** Cuadro de precios descompuestos, ID06

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>          |                                |                   |                 |                  |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| ID06              | Uds             | Elaboración del presupuesto |                                |                   |                 |                  |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>             | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe €</b> |
|                   | MO1             | Horas                       | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 5               | 75               |
|                   | MO2             | Horas                       | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 1               | 70               |
|                   | MO3             | Horas                       | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 1               | 50               |
|                   | MO4             | Horas                       | Ingeniero Químico              | 50                | 1               | 50               |
| <b>TOTAL ID06</b> |                 |                             |                                |                   | <b>245</b>      |                  |

**Tabla 9:** Cuadro de precios descompuestos, ID07

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                    |                                |                   |                 |                    |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ID07              | Uds             | Seguimiento, reuniones y correcciones |                                |                   |                 |                    |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>                       | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe (€)</b> |
|                   | MO1             | Horas                                 | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 20              | 300                |
|                   | MO2             | Horas                                 | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 5               | 350                |
|                   | MO3             | Horas                                 | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 10              | 500                |
| <b>TOTAL ID07</b> |                 |                                       |                                |                   | <b>1150</b>     |                    |

**Tabla 10:** Cuadro de precios descompuestos, ID08

| <b>Ids</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>                      |                                |                   |                 |                    |
|-------------------|-----------------|---|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| ID08              | Uds             | Análisis y valoración de los resultados |                                |                   |                 |                    |
|                   | <b>Ids</b>      | <b>Unidades</b>                         | <b>Descripción</b>             | <b>Precio (€)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Importe (€)</b> |
|                   | MO1             | Horas                                   | Estudiante Ingeniería Química  | 15                | 15              | 225                |
|                   | MO2             | Horas                                   | Ingeniero Industrial Tutor     | 70                | 5               | 350                |
|                   | MO3             | Horas                                   | Ingeniera Industrial Co-tutora | 50                | 5               | 250                |
| <b>TOTAL ID08</b> |                 |   |                                |                   | <b>825</b>      |                    |

#### 4. CUADROS DE PRECIOS UNITARIOS

**Tabla 11:** Cuadro de precios unitarios

| <b>Tarea</b> | <b>Unidades</b> | <b>Descripción</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Precio (€)</b> |
|--------------|-----------------|---|-----------------|-------------------|
| ID01         | Uds.            | Planteamiento del problema y definición de objetivos                | 1               | 420               |
| ID02         | Uds.            | Búsqueda de información   | 1               | 840               |
| ID03         | Uds.            | Puesta en marcha y desarrollo de los softwares Resrad y Microshield | 1               | 2250              |
| ID04         | Uds.            | Elaboración de la memoria   | 1               | 1320              |
| ID05         | Uds.            | Realización de los planos   | 1               | 235               |
| ID06         | Uds.            | Elaboración del presupuesto   | 1               | 245               |
| ID07         | Uds.            | Seguimiento, reuniones y correcciones                               | 1               | 1150              |
| ID08         | Uds.            | Análisis y valoración de los resultados                             | 1               | 825               |

## 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

**Tabla 12:** Presupuesto de ejecución material

| Presupuesto de ejecución material               |          |  |          |            |                   |
|---|----------|--|----------|------------|-------------------|
| Tarea   | Unidades | Descripción  | Cantidad | Precio (€) | Importe total (€) |
| ID01  | Uds.     | Planteamiento del problema y definición de objetivos                 | 1        | 420        | 420               |
| ID02  | Uds.     | Búsqueda de información  | 1        | 840        | 840               |
| ID03  | Uds.     | Puesta en marcha y desarrollo de los softwares Resrad y Microshield. | 1        | 2240       | 2250              |
| ID04  | Uds.     | Elaboración de la memoria  | 1        | 1320       | 1320              |
| ID05  | Uds.     | Realización de los planos  | 1        | 235        | 235               |
| ID06  | Uds.     | Elaboración del presupuesto  | 1        | 245        | 245               |
| ID07  | Uds.     | Seguimiento, reuniones y correcciones                                | 1        | 1150       | 1150              |
| ID08  | Uds.     | Análisis y valoración de los resultados                              | 1        | 825        | 825               |
| ID09  | Uds.     | Materiales utilizados  | 1        | 2967,2     | 2967,2            |
| <b>TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL (€)</b> |          |  |          |            | <b>10252,2</b>    |

## 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| Presupuesto de ejecución material     | 10252,20 |
| 20% Gastos generales                  | 205,44   |
| 0% de beneficio industrial            | 0,00     |
| <br>                                  |          |
| Suma                                  | 12302,64 |
| 21% IVA                               | 2583,44  |
| <br>                                  |          |
| Presupuesto de ejecución por contrata | 14886,19 |

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata a la cantidad de CATORCE MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y SEIS CON DIECINUEVE CÉNTIMOS.