

## **Parte A: RESUMEN DE LA PROPUESTA/SUMMARY OF THE PROPOSAL**

**INVESTIGADOR PRINCIPAL 1** (Nombre y Apellidos):

JUAN PEDRO BOLÍVAR RAYA

**TÍTULO DEL PROYECTO:**

FLUJOS DE RADIONUCLEIDOS EMITIDOS POR LAS BALSAS DE FOSFOYESO DE HUELVA, EVALUACIÓN DE SU DISPERSIÓN, RIESGOS RADIOLÓGICOS Y PROPUESTAS DE RESTAURACIÓN

**ACRÓNIMO:** RADFOS

**RESUMEN** (3500 caracteres, incluyendo blanco)

El estuario de Huelva es un sistema muy alterado debido a la elevada acidez y condiciones físico-químicas extremas de las aguas de los ríos mineros que lo alimentan (Tinto y Odiel), ubicándose en el mismo, además, un Complejo Industrial Químico y unos depósitos de residuos conocidos como fosfoyesos. En este sentido, las administraciones competentes, en colaboración con las empresas responsables, están actualmente en fase de diseño y aprobación de un proyecto de recuperación ambiental de estos depósitos de fosfoyesos que permita su uso sostenible.

Desde mitad de la década de los 60 hasta el cierre de las plantas de fertilizantes fosfatados (31/12/2010), se han generado anualmente unos 2.5 millones de toneladas de fosfoyeso. Este residuo se ha almacenado en balsas construidas sobre las marismas de la margen derecha del río Tinto a menos de 1 km de la ciudad, acumulándose en ellas unos 100-120 millones de toneladas, y ocupando una extensión de 1000 ha. Estudios previos han demostrado que las concentraciones en el fosfoyeso de radionucleidos de la serie del U-238 son unas 10-50 veces superiores a suelos típicos, por lo que este residuo debe ser clasificado como NORM (Naturally Occurring Radioactive Material). Estos depósitos pueden emitir radionucleidos hacia su entorno por dos vías principales: (1) atmosférica, por emisión de  $^{222}\text{Rn}$  y material particulado; (2) acuática, por escorrentías superficiales y lixiviados laterales o profundos.

Por tanto, el objetivo central del proyecto será caracterizar y cuantificar la capacidad que tienen estas balsas de contaminar radiactivamente su entorno, evaluando los riesgos radiológicos asociados y como consecuencia, para, finalmente, optimizar el diseño del plan de recuperación y vigilancia ambiental actualmente en desarrollo.

Para alcanzar el objetivo central, el proyecto se estructura en las siguientes líneas de trabajo: 1) Modelización del transporte y exhalación del  $^{222}\text{Rn}$  de las balsas y su utilización como entrada al modelo de dispersión atmosférica, para así evaluar la exposición a radón de la población del entorno. 2) Análisis de la movilidad y evolución geoquímica de los radionucleidos contenidos en el fosfoyeso en las condiciones ambientales de las balsas. 3) Caracterización de lixiviados liberados y cuantificación de sus volúmenes y flujos anuales de radionucleidos. 4) Aplicación de un modelo hidrogeológico y de transporte de radionucleidos, y su posterior acople a un modelo de dispersión en el medio acuático receptor. 5) Evaluación de los riesgos radiológicos sobre la población. 6) Propuesta de alternativas de restauración.

Los resultados esperables del proyecto profundizarán en los procesos de transporte de radionucleidos (gases y en disolución) a través de las balsas de FY, conociendo los flujos de éstos a través de su superficie para, finalmente, determinar la exposición por radiación ionizante asociada a diferentes escenarios (público residente en las proximidades del depósito, trabajador sobre las balsas, uso recreativo, etc.). Los modelos permitirán conocer

el comportamiento de las emisiones a lo largo del tiempo, así como evaluar el grado de eficacia de las diferentes opciones de remediación. La consecución de los objetivos del proyecto, especialmente de las nuevas metodología para evaluación de riesgos radiológicos en depósitos de residuos NORM, supondrá un notable impacto internacional ya que sus resultados serán exportables a una gran multitud de países con esta problemática común.

**PALABRAS CLAVE** (Máximo de 10)

Fosfoyeso, Radiactividad, Residuo, Riesgo, Dispersión, Hidrogeología, Modelización, Radón, Exhalación, Remediación

**TITLE OF THE PROJECT:** RADIONUCLIDES RELEASES FROM PHOSPHOGYPSUM STACKS, DISPERSION ASSESMENT, RADIOLOGICAL RISKS AND REMEDIATION PROPOSALS

**ACRONYM:** RADFOS

**SUMMARY** (3500 characters, including spaces)

The Huelva estuary, formed by the Tinto and Odiel rivers common mouths, it is a system of special interest, since these rivers present extreme physicochemical conditions due to mining activities, and in addition a Chemical Industrial Complex and phosphogypsum waste stacks are located at their surroundings. These facts make that this system is very altered and, therefore, an urgent remediation and environmental restoration is needed for these stacks. In this regard, the competent authorities, in collaboration with the responsible companies, are currently under design and approval of a project for the environmental remediation of these deposits.

From mid-60s until 31/12/2010 have been generated annually about 2.5 million tons of phosphogypsum by fertilizer plants located at this industrial complex. This residue is stored in big stacks built on the marshes of the right bank of the Tinto River, less than 1 km from the Huelva city, and accumulating them about 100-120 million tones covering an area of about 1000 ha. Previous studies have shown that phosphogypsum contains U-series radionuclides concentrations between 10-50 times higher than a typical soils depending of each isotope, and therefore this residue is classified as NORM (Naturally Occurring Radioactive Material). These deposits can emit radionuclides to the environment in the following ways: (1) atmospheric  $^{222}\text{Rn}$  emission and by particulate matter); (2) by waters released from these piles.

Therefore, the main objective of the project has been to characterize, evaluate and quantify the ability of these stacks of radioactively contaminate the environment, the radiation risks associated and, therefore, to apply the results to the recovery plan and environmental monitoring currently in development.

To achieve the main objective, the project is structured in the following steps: 1) modeling the transport of  $^{222}\text{Rn}$  in the stacks calculating the total radon exhalation in order to introduce it as input to an atmospheric dispersion model, and thus assess the radon exposure of the population and the environment. 2) To study in laboratory the mobility and geochemical evolution of the radionuclides contained in the phosphogypsum under different environmental changes. 3) Characterization and quantification of the flows of radionuclides into the estuary. 4) To apply a hydrogeological model of the phosphogypsum stacks to quantify the radionuclides transport into the estuary by these stacks. 5) And finally, to assess of the radiological risks for the population. 6) Remediation proposal.

The expected results of the project are: to examine the processes of radionuclides transport (gas and solution) through phosphogypsum piles knowing the flows through their surface, and finally to know the ionizing radiation exposure associated to different scenarios (resident in the vicinity of the deposits, worker of the piles, recreational use, etc.). The results of the project, and specially the methodology to assess the radiological risks of NORM repositories

the evaluation of the effectiveness of different options engineering barriers, will carry out an important international impact due to the huge number of countries with this problem.

**PALABRAS CLAVE** (Maximum of 10)

Phosphogypsum, Waste, Radioactivity, Risk, Dispersion, Hydrogeology, Modeling, Radon, Exhalation, Remediation.

**¿Se espera que el proyecto tenga un impacto socioeconómico sobre el Estado o la Comunidad Autónoma en que se desarrollará? (Máximo: 3500 caracteres)**

La problemática ambiental y sanitaria asociada a los residuos NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials), como por ejemplo cenizas de carbón, escorias de fundición, residuos mineros, industria del TiO<sub>2</sub>, entre otros, se ha trasladado a una normativa europea y estatal, lo que hace necesario su aplicación de una forma económicamente viable y sostenible. Dentro esta problemática, destaca por su cantidad y ubicación los depósitos de fosfoyeso de Huelva, donde se han almacenado unos 100-120 Mt, existiendo zonas a menos de 500 m del casco urbano de Huelva. La enorme preocupación ciudadana, la alarma social que crea este hecho así como la repercusión que tiene desde el punto de vista socioeconómico (la provincia de Huelva constituye un enclave turístico muy importante) hacen que sea urgente tomar decisiones políticas, basadas en estudios científico-técnicos, para solventar este problema que lleva décadas pendiente de solución.

Resaltar que existe una reglamentación de obligado cumplimiento en relación a las actividades y residuos NORM, destacándose el “Real Decreto 783/2001 sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes”, la “Orden IET/1946/2013 para gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales”, o la instrucción IS-33, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), sobre “criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural” dada esta última por parte del CSN (Consejo de Seguridad Nuclear). Y resaltar también que actualmente están en desarrollo las guías (o recomendaciones) metodológicas del CSN para facilitar la aplicación de dichas normativas.

Depósitos de fosfoyeso se encuentran en otras áreas geográficas de España como, por ejemplo, son los vertidos de fosfoyeso de los terrenos de El Hondón (Cartagena), o las balsas de fosfoyeso de Flix (Tarragona), situadas en la margen de El Ebro. Por tanto, es urgente dar una solución ambientalmente sostenible y compatible con la normativa vigente a los residuos NORM, y en particular a la del fosfoyeso, suponiendo estos depósitos un potencial problema ambiental y sanitario para la Comunidad Autónoma de Andalucía y para España, ya que la responsabilidad de la protección radiológica de la población recae en el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

En este sentido, es especialmente urgente para las administraciones competentes conocer la mejor forma de aislar del medio y estabilizar estos residuos a medio-largo plazo, siendo necesario evaluar el riesgo radiológico y el impacto ambiental que producen, tanto en su estado actual como en las condiciones finales de la ingeniería aplicada en su recuperación final.

Por último, indicar el equipo responsable del proyecto considera que el CSN, como órgano regulador y competente en seguridad nuclear y protección radiológica a nivel estatal, podrá utilizar la metodología y resultados que se obtengan en este proyecto, en el establecimiento de los criterios a seguir en la recuperación ambiental y

radiológica de otros depósitos de residuos NORM que actualmente existen en España bajo el criterio general ALARA (“As Low As Reasonably Achievable”).

## **Parte B: INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL EQUIPO**

**B.1. RELACIÓN DE LAS PERSONAS NO DOCTORES QUE COMPONEN EL EQUIPO DE TRABAJO** (se recuerda que los doctores del equipo de trabajo y los componentes del equipo de investigación no se solicitan aquí porque deberán incluirse en la aplicación informática de solicitud). Repita la siguiente secuencia tantas veces como precise.

1. Nombre y apellidos:

Titulación: licenciado/ingeniero/graduado/máster/formación profesional/otros (especificar)

Tipo de contrato: en formación/contratado/técnico/entidad extranjera/otros (especificar)

Duración del contrato: indefinido/temporal.

1. Silvia Pérez Moreno (SPM):

Titulación: Ingeniera Química

Tipo de contrato: Técnico Superior de Investigación

Duración del contrato: temporal

2. José Luis Guerrero Márquez (JLGM):

Titulación: Graduado en Geología, Máster en Tecnología Ambiental

Tipo de contrato: Formación

Duración del contrato: temporal

## **B.2. FINANCIACIÓN PÚBLICA Y PRIVADA (PROYECTOS Y/O CONTRATOS DE I+D+I) DEL EQUIPO DE INVESTIGACIÓN**

Deberá relacionar los proyectos y/o contratos de I+D+I en los que hayan participado los componentes del equipo de investigación y que hayan recibido financiación o que estén pendientes de resolución, en los últimos 8 años, en convocatorias de ámbito nacional, autonómico o internacional hasta un máximo de 10 proyectos y/o contratos. Si la relación fuera muy extensa, se recomienda seleccionar aquellos que estén más directamente relacionados con la propuesta que se presenta.

Deberán rellenarse los siguientes datos repitiendo la secuencia que se indica a continuación tantas veces como se necesite. En los campos de relación temática con el proyecto que se presenta y estado del proyecto o contrato deberá tachar o borrar las claves que no procedan:

1. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos):

Referencia del proyecto:

Título:

Investigador principal (nombre y apellidos):

Entidad financiadora:

Duración (fecha inicio - fecha fin, en formato DD/MM/AAAA):

Financiación recibida (en euros):

Relación temática con el proyecto que se presenta: mismo tema/está muy relacionado/está algo relacionado/sin relación

Estado del proyecto o contrato: concedido/pendiente de resolución

1. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F. Vaca, E. Gutiérrez

Referencia del proyecto: UNHU10-1E-1129

Título: Estación para la medida y control de la radiactividad atmosférica

Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya

Entidad financiadora: MINECO

Duración: 1/1/2012 al 31/12/2014

Financiación recibida (en euros): 207593  
Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado  
Estado del proyecto o contrato: concedido

2. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F Vaca, E Gutiérrez de San Miguel Herrera, JE Martín, JL Aguado  
Referencia del proyecto: CTM2009-14321-C02-01

Título: Determinación de tasas de extracción y velocidades de sedimentación mediante radionucleidos reactivos en aguas costeras; aplicación a la modelización de la dispersión de contaminantes

Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya

Entidad financiadora: MICINN

Duración: 1/1/2010 al 31/12/2013

Financiación recibida (en euros): 121000

Relación con el proyecto que se presenta: está algo relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

3. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): M. Casas, F. Vaca, J.L. Aguado

Referencia del proyecto: CGL2012-32860

Título: Estudio de los mecanismos de fraccionamiento isotópico de U-Th-Ra bajo condiciones acidas extremas naturales

Investigador principal: Luis Barbero González

Entidad financiadora: MINECO

Duración: 1/1/2013 al 1/12/2015

Financiación recibida (en euros): 70000

Relación con el proyecto que se presenta: está algo relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

4. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F. Vaca, JL Aguado, E Gutiérrez, JE Martín, JC Cerón

Referencia del proyecto: CTM2006-08148

Título: Radionucleidos como trazadores de los procesos sedimentarios: aplicación al estudio del impacto ambiental existente en el estuario de los ríos tinto y Odiel

Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya

Entidad financiadora: MCYT

Duración: 24/05/2006 al 23/11/2009

Financiación recibida (en euros): 119000

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

5. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): M. Casas

Referencia del proyecto: CTM2009-14321-C02-02

Título: Determinación de tasas de extracción y velocidades de sedimentación mediante radionucleidos reactivos en aguas costeras; aplicación a la modelización de la dispersión de contaminantes

Investigador principal: M. Casas Ruiz

Entidad financiadora: MICINN

Duración: 1/1/2010 al 31/12/2013

Financiación recibida (en euros): 80400

Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado

Estado del proyecto o contrato: concedido

6. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F Vaca, JL Aguado, EG SanMiguel, JC Cerón

Referencia del proyecto: 12/09 (OTRI-UHU)

Título: Estudio de elementos de riesgo para la seguridad radiológica en la recuperación de las balsas de fosfoyeso en las marismas de Huelva

Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya  
Entidad financiadora: TRACSATEC y Ministerio de Medio Ambiente  
Duración: 01/2008 al 12/2009  
Financiación recibida (en euros): 150000  
Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado  
Estado del proyecto o contrato: concedido

7. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): M. Casas

Referencia del proyecto: CeIM-11  
Título: Laboratorio de Control Radiológico del agua  
Investigador principal: Melquíades Casas Ruiz  
Entidad financiadora: Junta de Andalucía  
Duración: 1/12/2013 al 31/12/2015  
Financiación recibida (en euros): 109.494,11  
Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado  
Estado del proyecto o contrato: concedido

8. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F. Vaca. JL Aguado

Referencia del proyecto: 18AB7R 463A.C.02  
Título: Optimización de un procedimiento general para la determinación de isótopos de torio en muestras ambientales e industriales  
Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya  
Entidad financiadora: Proyecto de I+D del Consejo de Seguridad Nuclear  
Duración: 1/11/2012-31/10/2015  
Financiación recibida (en euros): 100527  
Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado  
Estado del proyecto o contrato: concedido

9. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): J.P. Bolívar, M. Casas, F. Vaca, J.C. Cerón, J.E. Martín, E.G. Gutiérrez

Referencia del proyecto: P10- RNM6300  
Título: Caracterización de las balsas de fosfoyeso de Huelva para su gestión y control ambiental  
Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya  
Entidad financiadora: Junta de Andalucía  
Duración: 14/4/2011 al 14/9/2015  
Financiación recibida (en euros): 116650  
Relación con el proyecto que se presenta: mismo tema  
Estado del proyecto o contrato: concedido

10. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos): JP Bolívar, F Vaca, JE Martin

Referencia del proyecto: 30/2011 (OTRI-UHU)  
Título: Evaluación radiológica para el proyecto de rehabilitación de los suelos de la parcela denominada "el hondón" en Cartagena. Fase 1: diagnóstico radiológico  
Investigador principal: Juan Pedro Bolívar Raya  
Entidad financiadora: FCC Ambito  
Duración: 2011-2012  
Financiación recibida (en euros): 45000  
Relación con el proyecto que se presenta: está muy relacionado  
Estado del proyecto o contrato: concedido

## Parte C: DOCUMENTO CIENTÍFICO

La parte C de la memoria científico-técnica es la única que está limitada en cuanto a extensión. **Los cuatro apartados de la parte C no podrán superar las 20 páginas**, debiendo mantenerse además los márgenes, espaciado y tipo de letra establecidos en la convocatoria. Se recuerda que no se admitirán memorias con contenidos propios de la parte C incluidos en otras partes del documento. En su caso, los anexos, imágenes, tablas, fórmulas, etc., estarán incluidos en la parte C.

### C.1. PROPUESTA CIENTÍFICA

1. Los **antecedentes y estado actual** de los conocimientos científico-técnicos de la materia específica del proyecto, incluyendo, en su caso, los resultados previos del equipo de investigación y la relación, si la hubiera, entre el grupo solicitante y otros grupos de investigación nacionales y extranjeros.

Si el proyecto es continuación de otro previamente financiado, deben indicarse con claridad los objetivos y los resultados ya alcanzados de manera que sea posible evaluar el avance real que se propone en el nuevo proyecto. Si el proyecto aborda un tema nuevo, deben indicarse los antecedentes y contribuciones previas del equipo de investigación que justifiquen su capacidad para llevarlo a cabo.

Además, una bibliografía, breve pero actualizada, sobre el tema.

2. La **hipótesis de partida** y los **objetivos generales** perseguidos, así como la **adecuación** del proyecto a la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación y, en su caso, a Horizonte 2020 o a cualquier otra estrategia nacional o internacional de I+D+i.

Si la memoria se presenta a la convocatoria de RETOS, deberá identificarse el reto cuyo estudio se pretende abordar y la relevancia social o económica prevista.

3. Los **objetivos específicos**, enumerándolos brevemente, con claridad, precisión y de manera realista (acorde con la duración prevista del proyecto).

En los proyectos con dos investigadores principales, deberá indicarse expresamente de qué objetivos específicos se hará responsable cada uno de ellos.

4. El detalle de la **metodología** propuesta, incluyendo la viabilidad metodológica de las tareas. Si fuera necesario, también se incluirá una evaluación crítica de las posibles dificultades de un objetivo específico y un plan de contingencia para resolverlas.

5. La descripción de los **medios materiales, infraestructuras y equipamientos singulares** a disposición del proyecto que permitan abordar la metodología propuesta.

6. Un **cronograma** claro y preciso de las fases e hitos previstos en relación con los objetivos planteados en la propuesta.

7. Si se solicita ayuda para la **contratación de personal, justificación** de su necesidad y descripción de las tareas que vaya a desarrollar.

### C.2. IMPACTO ESPERADO DE LOS RESULTADOS

El contenido de este apartado se solicitará también en la aplicación informática de solicitud (con un máximo de 3500 caracteres) y su contenido podrá ser publicado a efectos de difusión si el proyecto fuera financiado en esta convocatoria.

Se recomienda incluir:

1. Descripción del **impacto científico-técnico social y/o económico** que se espera de los resultados del proyecto, tanto a nivel nacional como internacional.
2. El **plan de difusión** e internacionalización en su caso de los resultados.
3. Si se considera que puede haber **transferencia de resultados**, se deberán identificar los resultados potencialmente transferibles y detallar el plan previsto para la transferencia de los mismos.

### **C.3. CAPACIDAD FORMATIVA DEL EQUIPO SOLICITANTE**

Este apartado solo se rellenará si se solicita la inclusión del proyecto en la convocatoria de "Contratos predoctorales para la formación de doctores". Dicha inclusión solo será posible en un número limitado de los proyectos aprobados.

Para evaluar la capacidad formativa del equipo solicitante, se recomienda incluir:

1. El **plan de formación previsto** en el contexto del proyecto solicitado.
2. **Relación de tesis realizadas o en curso** (últimos 10 años) con indicación del nombre del doctorando, el título de tesis y la fecha de obtención del grado de doctor o de la fecha prevista de lectura de tesis.
3. Breve **descripción del desarrollo científico o profesional de los doctores egresados** del equipo de investigación.

### **C.4. IMPLICACIONES ÉTICAS Y/O DE BIOSEGURIDAD**

## INSTRUCCIONES PARA RELLENAR LA MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA

### AVISO IMPORTANTE

En virtud del artículo 11 de la convocatoria **NO SE ACEPTARÁN NI SERÁN SUBSANABLES MEMORIAS CIENTÍFICO-TÉCNICAS** que no se presenten en este formato.

*Este documento está preparado para que pueda rellenarse en el formato establecido como obligatorio en las convocatorias (artículo 11.7.a): letra Times New Roman o Arial de un tamaño mínimo de 11 puntos; márgenes laterales de 2,5 cm; márgenes superior e inferior de 1,5 cm; y espaciado mínimo sencillo. La parte C ("Documento científico") de la memoria deberá tener una extensión máxima de 20 páginas, incluidos todos sus apartados. No se admitirán memorias con contenidos propios de la parte C incluidos en las partes A o B.*

*La memoria consta de tres partes: la parte A contiene información general y básica de la propuesta; la parte B contiene la relación de los componentes del equipo de trabajo (excepto doctores) y la información específica sobre la financiación pública y privada del equipo de investigación; y la parte C es el documento científico propiamente dicho.*

#### **Con carácter general:**

1. Las memorias pueden rellenarse en español o en inglés, a excepción de la parte A: RESUMEN DE LA PROPUESTA/SUMMARY OF THE PROPOSAL, que debe rellenarse en ambos idiomas.
2. Se recomienda rellenar la memoria empleando un ordenador con sistema operativo Windows y usando como procesador de textos MS Word (MS Office).
3. Una vez terminada la memoria en Word, deberá convertir el archivo en formato pdf (de no más de 4Mb) y aportarlo en la aplicación informática de solicitud del proyecto en el apartado Añadir documentos > Memoria científico-técnica.

## Parte A: RESUMEN DE LA PROPUESTA/SUMMARY OF THE PROPOSAL

*Toda la información de este apartado deberá también rellenarse en la aplicación de solicitud para que los campos puedan explotarse informáticamente, aunque se incluyen también en la memoria para facilitar las tareas de evaluación. Se aconseja que se utilice el copiar y pegar desde la memoria hasta la aplicación informática de solicitud o viceversa para que no haya inconsistencias en el contenido de los textos.*

*Todos los campos de este apartado deberán rellenarse obligatoriamente en inglés y en español.*

*El resumen de la propuesta/summary of the proposal (con un máximo de 3500 caracteres, contando los espacios en blanco) contendrá los aspectos más relevantes de la propuesta, así como los objetivos planteados y los resultados esperados. Su contenido podrá ser publicado a efectos de difusión si el proyecto fuera financiado en esta convocatoria, salvo que haya indicado expresamente en la aplicación de solicitud que existen resultados susceptibles de ser protegidos.*

### RESUMEN DE LA PROPUESTA

**HECHO AL PRINCIPIO DEL DOCUMENTO**

## SUMMARY OF THE PROPOSAL

### HECHO AL PRINCIPIO DEL DOCUMENTO

#### Parte B: INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL EQUIPO

##### B.1. RELACIÓN DE LAS PERSONAS NO DOCTORES QUE COMPONEN EL EQUIPO DE TRABAJO

*No se relacionarán en este apartado los datos del personal perteneciente al equipo de investigación ni los datos de los doctores pertenecientes al equipo de trabajo, puesto que esas personas deberán incluirse en la aplicación informática de solicitud.*

*Deberán rellenarse los siguientes datos del personal perteneciente al equipo de trabajo, excepto los doctores, repitiendo la secuencia que se indica a continuación tantas veces cuantas se necesite. En los campos de titulación, tipo de contrato y duración del contrato deberá tachar o borrar las claves que no procedan.*

1. Nombre y apellidos:

*Titulación: licenciado/ingeniero/graduado/máster/formación profesional/otros (especificar)*

*Tipo de contrato: en formación/contratado/técnico/entidad extranjera/otros (especificar)*

*Duración del contrato: indefinido/temporal*

### HECHO AL PRINCIPIO DEL DOCUMENTO

##### B.2. FINANCIACIÓN PÚBLICA Y PRIVADA (PROYECTOS Y CONTRATOS DE I+D+I) DEL EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

*Deberá relacionar los proyectos y/o contratos de I+D+I en los que hayan participado los componentes del equipo de investigación y que hayan recibido financiación o que estén pendientes de resolución, en los últimos 8 años, en convocatorias de ámbito nacional, autonómico o internacional hasta un máximo de 10 proyectos y/o contratos. Si la relación fuera muy extensa, se recomienda seleccionar aquellos que estén más directamente relacionados con la propuesta que se presenta.*

*Deberán rellenarse los siguientes datos repitiendo la secuencia que se indica a continuación tantas veces como se necesite. En los campos de relación temática con el proyecto que se presenta y estado del proyecto o contrato deberá tachar o borrar las claves que no procedan:*

1. Investigador del equipo de investigación que participa en el proyecto/contrato (nombre y apellidos):

*Referencia del proyecto:*

*Título:*

*Investigador principal (nombre y apellidos):*

*Entidad financiadora:*

*Duración (fecha inicio - fecha fin, en formato DD/MM/AAAA):*

*Financiación recibida (en euros):*

*Relación temática con el proyecto que se presenta: mismo tema/está muy relacionado/está algo relacionado/sin relación*

*Estado del proyecto o contrato: concedido/pendiente de resolución*

### HECHO AL PRINCIPIO DEL DOCUMENTO

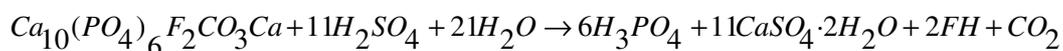
## Parte C: DOCUMENTO CIENTÍFICO

La parte C de la memoria científico-técnica es la única que está limitada en cuanto a extensión. Los cuatro apartados de la parte C no podrán superar las **20 páginas**, debiendo mantenerse además los márgenes, espaciado y tipo de letra establecidos en la convocatoria. Se recuerda que no se admitirán memorias con contenidos propios de la parte C incluidos en otras partes del documento. En su caso, los anexos, imágenes, tablas, fórmulas, etc. estarán incluidos en la parte C.

### C.1. PROPUESTA CIENTÍFICA

#### 1.- Antecedentes y estado actual.

El proceso de producción de ácido fosfórico para materia prima de fertilizantes fosfatados suele hacerse por la vía sulfato, y se basa en el ataque del mineral (denominado “fosforita” o “roca fosfática”), con ácido sulfúrico al 70%, produciéndose ácido fosfórico y un sólido blanco, denominado fosfoyeso (en adelante FY), que mayoritariamente es sulfato cálcico dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). La reacción química simplificada de su formación es:



El consumo mundial de roca fosfatada comercial en el año 2011 superó los 174 millones de toneladas (IFA, 2011), lo que generó en dicho año más de 250 millones de toneladas de FY, el cual generalmente se almacena en grandes apilamientos (Cisse y Mrabet, 2004; Carmichael, 1988), ya sea en horizontal o formando pirámides mediante terrazas con alturas variables entre 20-100 m, o se libera directamente al mar. La gestión, ya sea su almacenamiento seguro o su reciclado y valorización, de esta inmensa cantidad de residuos es uno de los retos internacionales actuales más importantes.

En el caso de Huelva, desde el año 1968 se ubicaron en su estuario cinco plantas de producción de ácido fosfórico que generaban anualmente unos 2.5-3 millones de toneladas de FY, las cuales se cerraron el 31-12-2010 por mandato de la Audiencia Nacional.

Esta industria está clasificada como NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) (Scholten, 2003), ya que su materia prima y/o materiales intermedios o finales contienen concentraciones de radionucleidos naturales por encima de los umbrales establecidos en la Instrucción técnica IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, la cual desarrolla el Real Decreto 783/2001 sobre Protección Sanitaria contra la Radiaciones Ionizantes actualmente vigente en nuestro país (Título VII). En este sentido, y en consonancia con lo establecido en la normativa mencionada, en las balsas de FY, se deben realizar los estudios necesarios de las balsas de FY a fin de determinar si existe un incremento significativo de la exposición recibida por los trabajadores o los miembros del público que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica. Esta problemática radiológica y ambiental posee una dimensión internacional y la sufren un gran número de países, independientemente de su grado de desarrollo.

La roca fosfática utilizada en Huelva era de origen sedimentario y contenía concentraciones de  $^{238}\text{U}$  y descendientes en torno a  $1.5 \cdot 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$ , unas 50 veces superior a un suelo típico natural, mientras que los radionucleidos de la serie del  $^{232}\text{Th}$  y del  $^{40}\text{K}$  presentan niveles inferiores al fondo natural, en torno a  $10 \text{ Bq/kg}$  y  $30 \text{ Bq kg}^{-1}$  para el  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , respectivamente (Bolívar et al., 1996; 2009), y por tanto le será aplicable la citada normativa.

Los radioelementos presentes en la roca fosfática experimentan a lo largo del proceso de producción fraccionamientos selectivos según su comportamiento químico, haciendo que la mayoría del uranio y del torio presente en la materia prima (más del 85 % del  $^{238}\text{U}$  y 50-70% del  $^{230}\text{Th}$ ) se asocien con el ácido fosfórico, mientras que más del 95 % del  $^{226}\text{Ra}$ , del  $^{210}\text{Pb}$  y del  $^{210}\text{Po}$  queden ligados al FY (Bolívar et al., 1998, 2009).

Hasta finales del año 1997, el 20% del fosfoyeso generado era directamente vertido en la desembocadura del río Odiel, mientras que el 80% restante se transportaba mediante bombeo en una suspensión de agua marina (10-20% FY) hacia las balsas, donde decantaba y finalmente quedaba apilado en balsas con una altura promedio de 5 m (ver Figura 1). A comienzos de 1998 cambió la política de gestión de los fosfoyesos, y desde entonces hasta finales de 2010 el 100% del FY se apila en una balsa especialmente diseñada para ello (zona 2 de la figura 1). El nuevo sistema funcionó en ciclo cerrado, transportándose el FY con agua dulce y, tras su decantación, el agua usada se bombeaba de nuevo hacia las plantas de ácido fosfórico para su reutilización en el proceso industrial. Se estima por la industria que esta nueva política de gestión del fosfoyeso redujo en más del 95% la emisión de contaminantes hacia el estuario, lo cual en parte ha sido ratificado, ya que en sedimentos recientes están disminuyendo notablemente las concentraciones de radionucleidos naturales de la serie del uranio (Hierro et al., 2013). Desde 1990 se han restaurado dos grandes zonas del apilamiento de fosfoyesos (zonas 1 y 4), quedando todavía otras dos por recuperar (zonas 2 y 3), tal y como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Fotografía aérea de la zona de las marismas del río Tinto utilizada desde 1968 para el apilamiento de fosfoyesos. (1) balsas de decantación, zona de vertido de FY; (2) embalse regulador, (3) canal perimetral, (4) estación de bombeo.

La **zona 1** se corresponde con la parte más antigua de las balsas de fosfoyeso y son terrenos propiedad de la autoridad portuaria de Huelva. En su parte central se acumulan otros residuos procedentes de la industria de producción de cobre y de ácido sulfúrico. La zona 1 fue revegetada entre los años 1990-1992 con una capa de suelo natural de unos 30-40 cm de espesor.

La **zona 2** es la última balsa que ha sido "activa" y se formó durante la gestión del FY en ciclo cerrado sobre otra antigua balsa de unos 3-5 m de altura. Posee una altura de unos 25 m (ver Figura 1 y pie explicativo), un embalse regulador y un canal perimetral, que rodea toda su base para la recogida de lixiviados laterales.

La **zona 3** (ver Figura 1) está totalmente sin restaurar, en ella se construyó un embalse de seguridad para las aguas sobrantes de la zona 2 y posee un espesor de unos 5 m. Actualmente es la zona más degradada y con mayor urgencia de remediación.

La **zona 4** terminó su restauración en el año 2009 (Figura 1), y ésta se realizó con una primera capa de residuos inertizados, sobre la que se depositó una segunda capa de residuos de la construcción, terminando el sellado con una capa de suelo vegetada. Es importante resaltar que en esta zona se vertieron accidentalmente en 1998 cenizas inertizadas de la fundición de Acerinox (Algeciras), en dos zonas de unos 1500 m<sup>2</sup>, contaminados por <sup>137</sup>Cs. ENRESA trasladó a El Cabril la fracción más contaminada, mientras que para el resto se realizó una restauración de acuerdo con el condicionado del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

El fosfoyeso seco posee una densidad real de las partículas de 2.3 g cm<sup>-3</sup>, una densidad aparente (incluyendo la porosidad) de 1.5 g cm<sup>-3</sup> y una solubilidad en agua marina en torno a 2 g L<sup>-1</sup> (May y Sweeney, 1984). Su granulometría presenta una gran proporción de partículas de tamaño medio y fino (Bolívar et al., 1996), y su conductividad hidráulica vertical es muy variable, oscilando entre los 10<sup>-3</sup> y 10<sup>-6</sup> cm s<sup>-1</sup>. Aunque más del 95% del FY es sulfato cálcico dihidratado, una fracción importante de ácido fosfórico (en torno al 1%), queda atrapado en su estructura cristalina y/o en sus poros de forma más móvil, haciendo que su pH esté en torno a 1.5-2 (Bolívar, 1995).

Estudios realizados por el equipo de este proyecto han demostrado que los contenidos en radiactividad natural del FY son muy variables, siendo los valores medios y rangos los siguientes: <sup>226</sup>Ra (650 Bq kg<sup>-1</sup>, 400-1100 Bq kg<sup>-1</sup>), <sup>210</sup>Pb (500 Bq kg<sup>-1</sup>, 300-600 Bq kg<sup>-1</sup>), <sup>238</sup>U (120 Bq kg<sup>-1</sup>, 30-300 Bq kg<sup>-1</sup>), <sup>230</sup>Th (400 Bq kg<sup>-1</sup>, 200-700 Bq kg<sup>-1</sup>), entre otros (Bolívar et al., 1998, 2007; Mas et al., 2006). Estas concentraciones son unas 10-40 veces superiores a los niveles encontrados en suelos típicos no perturbados.

Las *vías de impacto* potencial de estos depósitos sobre el medio ambiente y las personas son:

- a) Atmosférica: exhalación del gas <sup>222</sup>Rn, o resuspensión y transporte del material superficial de las balsas por la acción del viento y otros agentes meteorológicos.
- b) Acuática en disolución: lixiviación de radionucleidos y otras especies, producida por el agua de lluvia y la acción de las mareas, y su migración por la base o los taludes laterales del depósito hacia el estuario.
- c) Acuática en suspensión: Transporte directo del fosfoyeso por escorrentías, o desprendimiento de una parte por pérdida de estabilidad.

Exposición directa por radiación gamma emitida desde la superficie de las balsas. En relación a la vía atmosférica, las elevadas concentraciones de <sup>226</sup>Ra en el FY hacen que sea necesario cuantificar, tanto experimentalmente como por modelización, las emisiones de radón a la atmósfera. La variable que define la emisión es la tasa de exhalación (Bq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), la cual deberá, además de medirse en las condiciones actuales, evaluarse en diferentes condiciones de restauración mediante el uso de modelos de migración de radón que el grupo del proyecto ya dispone, la cual es una entrada muy importante para el modelo de dispersión de radón que se aplique.

Se han realizado estudios previos sobre las balsas de fosfoyeso de Huelva (Dueñas et al., 2006; Abril et al., 2008), encontrándose gran variabilidad de resultados. La gran heterogeneidad de las propiedades físicas y químicas del FY de las balsas, unido a la fuerte dependencia de la exhalación con las condiciones meteorológicas, plantea la necesidad de profundizar más en el problema con objeto de obtener una buena caracterización de la fuente de radón. En este sentido, se hace necesario el estudio de los fenómenos de transporte de radón en el seno de la balsa y su dependencia con las diferentes condiciones en que se encuentre el FY (López-Coto et al., 2009; Rogers and Nielson, 1991; López-Coto et al., 2014). El principal parámetro que debe conocerse es el factor de emanación y su

variación con las condiciones físicas del fosfoyeso (temperatura, humedad, granulometría, etc.), lo cual permitirá implementar un modelo físico-matemático de transporte de radón en el seno del FY que cuantifique el término fuente de radón en cada circunstancia particular, y permita así evaluar la eficacia de las diferentes posibles medidas de remedio. Una vez el radón se ha liberado a la atmósfera su dispersión en la misma se realizará mediante modelización, que podrá validarse usando la estación de radiactividad atmosférica que este equipo tiene instalada en Huelva.

El segundo bloque de este proyecto trata de caracterizar la movilidad por vía acuática de los radionucleidos de los FY de estos depósitos. Tanto las aguas de lluvia como la acción mareal podrán generar lixiviados de este residuo que afecten al agua y a los sedimentos de su entorno (Bolívar et al., 2002; Pérez-López et al., 2010), pero la proporción exacta y su comportamiento bajo condiciones de meteorización aún no ha sido evaluado. Son necesarios, por tanto, estudios de lixiviación forzada que evalúen la fracción móvil bajo las diferentes condiciones geoquímicas en que se pueda encontrar el FY en la balsa.

La siguiente etapa de este bloque (vía acuática) trata de cuantificar los flujos de radionucleidos que las balsas de fosfoyeso liberan a su entorno, tanto experimentalmente en las condiciones actuales, como por modelado bajo distintas tecnologías-ingenierías de remedio. En un estudio realizado previamente por Tragsatec (año 2009), constató que el sustrato de las balsas está constituido mayoritariamente por arcillas muy impermeables, pero presentan algunos estratos de arena que podrían dar lugar a “puentes hidrológicos” con grandes percolaciones que podrían alcanzar la marisma más profunda. Por tanto, con los datos que se obtengan en este proyecto y los disponibles por la administración, se desarrollará un modelo hidrogeológico de transporte de radionucleidos en el interior de las balsas, que nos servirá para proponer soluciones técnicas en su restauración posterior. Una vez conocida la fuente radiactiva (depósitos de FY), se implementará un modelo de dispersión de radionucleidos para el estuario de Huelva y el litoral onubense (Periáñez et al., 2013a,b).

La consecuencia del almacenamiento seguro del FY es que permitirá de forma continua y constante en el tiempo ir estudiando la viabilidad de diversas aplicaciones comerciales de este residuo, o sea, su reciclado y/o valorización. Así, desde hace más de 20 años se usa el FY de Huelva como enmienda de suelos salinos (ENRESA, 2006), o en potenciales usos en ingeniería civil, como son la fabricación de cementos (Gázquez et al., 2013), o en firmes de carreteras, entre otras.

Una vez descrita la problemática radiológica de los depósitos de FY, el **objetivo central de este proyecto es realizar una cuantificación experimental de las emisiones de radionucleidos (vías atmosféricas y acuática) de las balsas de fosfoyeso de Huelva en el estado actual, y mediante modelización bajo diferentes condiciones de restauración, con objeto de evaluar los riesgos radiológicos que actualmente suponen estos depósitos y, en su caso, proponer las mejores soluciones técnicas de restauración.**

Por último, resaltar la alta proyección internacional de este proyecto, siendo la primera vez que se abordaría en Europa un estudio integrado para un depósito de residuos NORM, donde se evalúen y cuantifiquen de forma unificada e interdisciplinar las diferentes vías de impacto, tanto experimentalmente como por modelización, con objeto de optimizar su futura recuperación ambiental.

## **Referencias**

Abril J.M., García-Tenorio R. y Manjón, G. Extensive radioactive characterization of a phosphogypsum stack in SW Spain:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$  concentrations and  $^{222}\text{Rn}$  exhalation rate. Journal of Hazardous Materials. 164 (2009) 790-797

Bolívar J.P., García-Tenorio R. y García-León M. "On the fractionation of natural radioactivity in the production of phosphoric acid by the wet acid method". Journal of Radioanal. and Nucl. Chem. Letters 214 (1996) 77-88.

- Bolívar J.P., García-Tenorio R. y Mas, J.L. Radioactivity of phosphogypsum in the South-West of Spain. *Radiation Protection Dosimetry* 76 (1998) 185-189.
- Bolívar J.P., García-Tenorio, R., Más, J.L., Vaca, F. Radioactive impact in sediments from an estuarine system affected by industrial waste releases. *Environ Int.* 27 (2002) 639-45.
- Bolívar J.P. et al. Behaviour and fluxes of natural radionuclides in the production process of a phosphoric acid plant. *Applied radiation and isotopes* 67 (2009) 345-356.
- Borrego, E., Más J.L., Martín J.E., Bolívar, J.P. y Vaca, F. "Radioactivity levels in aerosols particles surrounding a large TENORM waste repository after application of preliminary restoration tasks". *Science of the Total Environment* 377 (2007) 27-35.
- Carmichael J.B. (1988). Worldwide production and utilization of phosphogypsum. In: *Proceedings of the Second Int. Symp. On Phosphogypsum*, Miami, FL, FIPR, Vol. 1, pp. 105-116.
- Cisse, L. y Mrabet, T. World Phosphate Production: Overview and Prospects. *Phosphorus Research Bulletin* Vol. 15 (2004) 21-25.
- Dueñas, C., Liger, E., Cañete, S., Pérez, M. y Bolívar, J.P. Exhalation of <sup>222</sup>Rn from phosphogypsum piles located at the Southwest of Spain. *Journal of Environmental Radioactivity* 95 (2007) 63-74
- García-León M., Martínez-Aguirre, A., Periañez, R., Bolívar J.P. y García-Tenorio, R. "Levels and behaviour of natural radioactivity in the vicinity of phosphate fertilizers industries". *J. Radioanal and Nucl. Chem.* 197 (1995) 174-184.
- Gazquez, M. J.; Bolivar, J. P.; Vaca, F.; et ál. Evaluation of the use of TiO<sub>2</sub> industry red gypsum waste in cement production. *Cement & Concrete Composites* 37, (2013) 76-87.
- Haridasan, P.P., Maniyan, C. G., Pillai P. M. B. and Khan A. H. Dissolution characteristics of <sup>226</sup>Ra from phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity* 62 (2002) 287-294.
- Hierro, A. Behavior of Radionuclides in an estuary affected by industrial waste and acid mine drainage: the Ria de Huelva. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva. 2013.
- International Fertilizer Industry Association (IFA), Phosphate rock statistics; trends from 1992 to 2011 (2011).
- López-Coto I., Mas J.L., Bolívar J.P. y García-Tenorio R. A short-time method to measure the radon potential of porous materials. *Applied Radiation and Isotopes* 67 (2009) 133-138.
- López-Coto I., Mas J.L., Vargas A. y Bolívar J.P. Studying radon exhalation rates variability from phosphogypsum piles in the SW of Spain, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 280, 15 September 2014, Pages 464-471.
- McEnroe, B.M. y Schroeder, P.R. 1988 "Leachate Collection in Landfills: Steady Case". *ASCE Jour of Env. Eng.*, 114(5), pp. 1052-1062.
- Más J.L., San Miguel E.G., Bolívar, J.P. Vaca, F. y Pérez, J.P. An assay on the effect of preliminary restoration tasks applied to a large TENORM wastes disposal in the south-west of Spain. *Science of the total Environment* 364 (2006) 55-66.
- Más, J.L., Bolívar, J.P., García-Tenorio, R., Aguado, J.L., San Miguel, E.G. y González, J. A dosimetric model for determining the effectiveness of soil covers for phosphogypsum waste piles *Health Physics* 80 (2001) 34-40.
- Mantero, J., Calleja, A., Más, J.L., Hurtado, S., Manjón, G., García-Tenorio, R. y García-León, M. Natural Radioactivity and Trace Elements in the Huelva estuary. *Contribución a Vth International Workshop on Natural Radiation and Environment*, Valladolid, July 2006.

May, A. y Sweeney, J.W. Assessment of environmental impacts associated with phosphogypsum in Florida. En: R.A. Kuntze (Ed.). The chemistry and Technology of Gypsum. ASTM Special Technical Publication No. 861 pp. 116-139.

Monterde, J.R. 2004. Ambientes sedimentarios y morfología de la piritita diagenética temprana en los sedimentos recientes de la Ría de Huelva (S.O. España). PhD Thesis, University of Huelva, Spain.

Nieto J.M., Sarmiento, A.M., Olías, M., Cánovas, C.R., Riba, I. Kalman, J. y Delvals, T.A. Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. Environment International 33 (2007) 445-455.

Pérez-López, R.; Nieto, J.M.; López-Coto, I; Aguado, J.L.; Bolívar, J.P.; Santisteban, M. Dynamics of contaminants in phosphogypsum or the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): From phosphate rock ore to the environment. Applied Geochemistry 25 (2010) 705–715.

Periañez, R., Hierro, A., Bolívar, J.P., Vaca, F. The geochemical behavior of natural radionuclides in coastal waters: A modeling study for the Huelva estuary. Journal of Marine Systems 126 (2013a) 82-93.

Periañez R., Bolívar J.P. y Casas, M. Tidal circulation, sediment and pollutant transport in Cádiz Bay (SW Spain): a modelling study. Ocean engineering 69 (2013b) 60-69.

Rawls, W.J. y Brakensiek, D.L. (1989). "Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties," H.J. Morel-Seytoux (ed.), Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling, Theory and Practice, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, pp. 275-300.

Rogers VC, Nielson KK. Multiphase radon generation and transport in porous media. Health Physics 60 (1991) 807-815.

Real Decreto 783/2001 de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes

Rutherford P.M., Dudas M.J. y Samek R.A. Environmental impact of phosphogypsum. The Science of the Total Environment 149 (1994) 1-38.

Scholten L.C. Approaches for regulating management of large volumes of wastes containing natural radionuclides in enhanced concentrations. European Commission, Report EUR 16956 (1996).

Skamarock, W. C., Klemp, J.B., Dudhia, J. Gill, D.O., Barker, D. M., Wang, W. and Powers, J.G. 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical note NCAR/TN-468+STR.

U.S. Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 3.64. Calculation of radon flux attenuation by earthen uranium mill tailings covers. Washington DC. (1989).

Yu C., et al.. New Source Term Model for the RESRAD-OFFSITE Code Version 3, ANL/EVS/TM/11-5, NUREG/CR-7127 (Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 2013).

## 2. Hipótesis de partida, objetivos generales y adecuación al Reto H2020

La **Hipótesis de partida** trata de analizar si las balsas de fosfoyeso, tanto en su estado actual como bajo diferentes ingeniería de restauración, suponen un riesgo radiológico para el medio ambiente y la población. Se trata de dar respuesta a las siguientes preguntas:

- a) ¿Cuál es el valor de las emisiones atmosféricas y acuáticas de los depósitos de fosfoyeso de Huelva en su estado actual?
- b) ¿Suponen éstas un riesgo radiológico para la población y el medio ambiente de su entorno en función del tipo de escenario?

- c) ¿Cuál es la mejor opción tecnológica para su restauración bajo el prisma de que su riesgo radiológico sea tan bajo como razonablemente sea posible (criterio ALARA)?

Para contrastar la hipótesis de partida y responder estas preguntas, se han establecido los siguientes **objetivos generales**:

- 1) Realizar una caracterización radiactiva de los materiales de las balsas de FY, cuantificando experimentalmente sus emisiones (vías atmosférica y acuática), evaluando la movilidad ambiental de los radionucleidos que contienen.
- 2) Aplicar un modelo de transporte de radón en las balsas de FY para cuantificar su emisión, y modelización posterior de su dispersión en la atmósfera para estimar la exposición recibida por la población de su entorno.
- 3) Aplicar un modelo hidrogeológico al sistema de balsas-sustrato, que permita evaluar los flujos de radionucleidos hacia el estuario del Tinto en las condiciones actuales y otros escenarios de restauración posibles, y modelización posterior de su dispersión en el medio acuático de su entorno, con objeto de estimar el alcance del potencial impacto radiactivo y la exposición recibida por la población de su entorno.
- 4) Una vez cubiertos los tres objetivos anteriores, evaluar los riesgos radiológicos bajo diferentes escenarios y opciones ingenieriles de restauración, con objeto de proporcionar recomendaciones técnicas para la recuperación ambiental de las balsas de fosfoyeso, con la meta final de bajar las dosis tanto como razonablemente sea posible según el principio ALARA de la protección radiológica.

La **adecuación** de la temática del proyecto a la estrategia del Horizonte 2020 se justifica por su relación con el Reto de "Acción sobre cambio climático y eficiencia en la utilización de recursos y materias primas" (Prioridad II: "Eficiencia en la utilización de recursos y materias primas"). Consideramos que el proyecto se relaciona con los siguientes apartados de la Prioridad II: **(viii)** reducción del impacto industrial en el medioambiente, en la salud humana y animal, en la vegetación y en el patrimonio natural y cultural, así como los factores de emisión de los principales contaminantes en los procesos productivos y en otras actividades antropogénicas o la formación de contaminantes secundarios; **(ix)** desarrollo y validación de modelos cuantitativos sobre el estado de la calidad del aire y la influencia de variables climatológicas y geográficas entre otras; **(xii)** obtención de medidas y parámetros representativos de la calidad del aire y de apoyo a la identificación de fuentes de contaminantes y procesos de formación y transformación de contaminantes atmosféricos."

### 3. Objetivos específicos

Los *objetivos específicos* del proyecto son:

1. Conocer los niveles de radionucleidos naturales de larga vida de interés (isótopos de U, Th, Ra y  $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$ ) en los materiales presentes en las balsas de fosfoyeso (sólidos, aguas de interior, sedimentos del sustrato).
2. Realizar una caracterización radiactiva de los lixiviados laterales y profundos de las balsas para cuantificar experimentalmente los flujos de radionucleidos anuales emitidos por vía acuática en el estado actual de los depósitos de FY.
3. Estudiar la movilidad de los radionucleidos de interés en las condiciones ambientales en que se encuentra el fosfoyeso en las balsas, oxidantes en la superficie y reductoras de sus capas profundas, o en los ciclos alternantes de oxidación-reducción que se producen en la interfase de la zona no saturada.
4. Medir y caracterizar la emanación y exhalación del radón en el FY, desarrollando un modelo de transporte de radón de la balsa (FY y posibles capas de materiales para su restauración), que sirva para cuantificar el flujo de radón hacia la atmósfera en diferentes condiciones del FY y atmosféricas.

5. Aplicar un modelo de dispersión atmosférica de radón para evaluar el incremento en la concentración de radón en el aire del entorno de las balsas, identificando y caracterizando a la vez las situaciones meteorológicas que implican un mayor impacto.
6. Aplicar, a partir de la caracterización hidrogeológica de las balsas de fosfoyeso, un modelo hidrogeológico de transporte de radionucleidos (U, Th, Ra, Po-Pb), que evalúe los flujos al estuario por la vía acuática en diferentes condiciones y escenarios.
7. Aplicar un modelo de dispersión en el estuario de Huelva y litoral costero de los radionucleidos emitidos por las balsas, con objeto de evaluar los incrementos de concentraciones en sus aguas y sedimentos del entorno.
8. Una vez establecidos los modelos de emisión de las balsas, y para diferentes escenarios y diseños de restauración de las mismas, aplicar el código RESRAD de la EPA de EE. UU. (onsite y offsite) en la evaluación de los riesgos radiológicos para la población e impactos sobre el medio ambiente del entorno, para finalmente proponer recomendaciones tanto para el proyecto de ingeniería de la restauración de estos depósitos, como para el futuro plan de vigilancia y control.

#### 4. Metodología

La metodología para la consecución de los objetivos del proyecto se ha planteado por actividades, o tareas, a conseguir.

##### **Actividad 1: Diseño y realización de los muestreos**

###### *1.1. Balsas de fosfoyeso y sustrato*

El objetivo de estos muestreos es conocer la distribución espacial de los radionucleidos de interés en las balsas de fosfoyeso y en la capa superficial de marisma sobre la que se asientan. En noviembre de 2009 se construyó por el Ministerio de Medio Ambiente una red de siete nidos piezómetros, teniendo cada nido tres piezómetros (A, B, C), que captan agua a diferentes profundidades (A: del fosfoyeso a unos 4 m; B: de la marisma inmediata por debajo del fosfoyeso; y C: capta agua de unos 15-20 m de profundidad). Aprovechando esta infraestructura de piezómetros, se realizarán, durante dos años consecutivos, dos muestreos al final de la época seca (primera quincena de septiembre), y los respectivos al final de la época húmeda (finales de marzo o abril), con objeto de evaluar los lixiviados profundos.

En cada uno de los siete puntos donde ya existen los nidos piezométricos, se realizará un muestreo vertical con barrena, o *vibracore*, con el fin de caracterizar los materiales existentes en la columna sedimentaria. Debido a que el sedimento acumula el historial del agua con la que ha interactuado, en principio se tomarán tres muestras de fosfoyeso (superficial, intermedia y cerca de la interfase FY-marisma), dos muestras de marisma entre 10-30 cm por debajo de la interfase, otra a 50 cm y una última muestra de marisma a 100 cm de la base inferior o muro del FY. Los resultados de este muestreo permitirán evaluar el grado de contaminación radiactiva existente en la marisma sobre la que se apoyan las balsas (lixiviados profundos).

###### *1.2. Lixiviados laterales*

A lo largo de todo el perímetro de las balsas se realizarán, durante dos años consecutivos, un muestreo al final de la época seca (septiembre) y otro en húmeda (marzo), de los lixiviados laterales más significativos que se detecten a través de los taludes de las balsas. Se medirá el caudal de lixiviado cada uno de los puntos, y se recogerán las correspondientes muestras de agua. Los parámetros Físico-Químicos (pH, conductividad, potencial redox, temperatura), se determinarán *in situ*. Los lixiviados se filtrarán inmediatamente en el laboratorio, y posteriormente se medirán las concentraciones de radionucleidos.

### *1.3. Aguas del interior de las balsas*

En la zona 3 ha quedado almacenada el "agua" del embalse de seguridad (ver introducción), estimándose que contiene en torno a un millón de m<sup>3</sup> de "agua", presentando concentraciones de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en torno al 15 %. Asimismo, en la zona 2 también quedaron aguas de proceso en el embalse regulador y en la zona superior. Estas acumulaciones de agua están sometidas a procesos de evaporación durante el periodo estival y de recarga durante la estación lluviosa. Por tanto, de estas aguas de interior se realizarán durante dos años consecutivos dos muestreos, uno al final de la época húmeda (máxima dilución), y otro al final periodo seco (máxima concentración), con objeto de evaluar su evolución. Si es posible, también se muestrearán materiales del fondo de estos embalses, ya que es previsible que durante este ciclo anual de evaporación-recarga se formen precipitados que se acumularán en el fondo.

### *1.4. Medida en continuo de la concentración de radón en aire*

El equipo del proyecto acaba de instalar en el Campus de El Carmen (Universidad de Huelva) una estación de medida de la radiactividad atmosférica, financiada por el MINECO con un proyecto de infraestructura (Ref.: UNHU10-1E-1129), que permite la medida en continuo de gas radón y de sus descendientes, así como la recogida de muestras de alto volumen de aerosol atmosférico (TSP, PM10, PM2.5 y PM1), y está previsto para el próximo año instalar otro equipo de radón y otro de descendientes en el lado opuesto de las balsas (Campus de la Rábida) en relación a la estación actual. Durante el tiempo que dure este proyecto se contará con la base de datos de radón y de descendientes en estos dos puntos, lo que permitirá cuantificar experimentalmente por primera vez la aportación de las balsas a los niveles de radón en el aire atmosférico de Huelva y su entorno.

#### **Actividad 2:** *Medida de las concentraciones de radionucleidos y análisis complementarios.*

El equipo de investigación que solicita el proyecto posee un laboratorio de radiactividad ambiental y una dilatada experiencia en la medida de concentraciones de radón y de radionucleidos en muestras sólidas, líquidas y filtros atmosféricos, por las técnicas de espectrometría alfa y gamma con detectores de semiconductor. En todas las muestras se medirán los radionucleidos naturales con semivida del orden o superior al año, isótopos de U (<sup>238,234</sup>U), Ra (<sup>226, 228</sup>Ra), Th (<sup>232,230,228</sup>Th), <sup>210</sup>Pb y <sup>210</sup>Po. En las muestras líquidas se aplicará la técnicas de espectrometría alfa usando un método de extracción secuencial de medida de los isótopos de U, Th, Ra, Pb y Po, basado en la combinación del uso el tributifosfato (TBP) con resinas de intercambio iónico. Todas las muestras sólidas se determinarán, además de por espectrometría alfa, por espectrometría gamma con detectores de Ge de ventana delgada (pozo y XtRa).

Por otro lado, en las muestras también se determinarán "in situ" parámetros físico-químicos como el pH, conductividad eléctrica y Eh, entre otros. Las muestras que se consideren más relevantes se analizarán de forma complementaria por ICP-OES/MS, y algunos sólidos se caracterizarán desde el punto vista mineralógico y micro-estructural por difracción de rayos-X (XRD), microscopio electrónico de barrido (SEM-EDS), o granulometría láser, análisis que se realizarán en los servicios generales de investigación de la Universidad de Huelva.

#### **Actividad 3:** *Distribución de radionucleidos en los materiales de las balsas y sustrato de marisma; evaluación de los flujos de radionucleidos liberados por vía acuática.*

##### *3.1. Caracterización radiactiva de los materiales sólidos*

A partir de las muestras tomadas se realizará una caracterización radiactiva de los diferentes materiales del depósito de fosfoyeso. Esto permitirá realizar una cuantificación aproximada de los inventarios radiactivos presentes en las balsas, así como estudiar los fraccionamientos isotópicos entre radionucleidos. Esta caracterización radiactiva incluye también las eflorescencias, o materiales formados disolución/precipitación en el interior de las balsas, los cuales podrían acumular radionucleidos específicos.

En esta actividad también se investigará experimentalmente el alcance en profundidad de la posible migración de radionucleidos por la base de las balsas hacia la marisma. Es esperable que las condiciones reductoras existentes en la interfase FY-sustrato favorezcan una precipitación de los radionucleidos disueltos en el agua de poro, impidiendo que estos se transfieran hacia el sustrato sedimentario (antigua marisma).

### *3.2. Evaluación de los flujos de radionucleidos por lixiviados laterales*

Se realizará un estudio de las concentraciones de radionucleidos en estos lixiviados y sus fraccionamientos, analizando su dependencia con las propiedades del medio acuoso (pH, conductividad, etc.). Se espera una gran variabilidad en las concentraciones de actividad, ya que éstas dependerán del tiempo de contacto del agua con el residuo, así como de las propiedades físico-químicas de la misma. A partir de la medida de los caudales de las fugas más representativas y de las concentraciones presentes en las mismas, se calculará la actividad total liberada al estuario para cada radionucleido de interés, y época del año (húmeda y seca). Estos datos podrán introducirse en los modelos dispersión de radionucleidos para medios acuáticos que vamos a implementar, y calcular el impacto radiactivo que las balsas generan en el medio acuático de su entorno (estuario de Huelva y aguas costeras del Golfo de Cádiz).

#### **Actividad 4: Movilidad de radionucleidos en los fosfoyesos y sedimentos del sustrato**

Con esta actividad se pretende analizar la evolución temporal del fosfoyeso bajo las posibles condiciones de meteorización a que pueda estar sometido si se libera al medio ambiente; oxidantes, reductoras, y de ciclos de oxidación-reducción. Estos experimentos se realizarán con dos tipos de muestras: (1) fosfoyeso, para evaluar el potencial contaminante de las balsas, (2) sedimentos afectados por las balsas, para evaluar cómo liberarían radionucleidos en diferentes condiciones hidroquímicas.

Para evaluar la movilidad se emplearán los siguientes procedimientos: 1) técnica de extracción secuencial *BCR* (*Community Bureau of Reference*), recomendado para metales por la Unión Europea, y puesta a punto por nuestro grupo para radionucleidos; procedimientos más simples como 2) agua destilada, para simular la lluvia que cae en su superficie, y 3) agua marina para simular las condiciones del fosfoyeso directamente liberado al estuario del Tinto.

El método BCR evalúa tres fases móviles. La primera fracción (F1) está constituida por las especies más fácilmente intercambiables, que son aquellas solubles en agua o ácidos muy débiles, tales como especies carbonatadas o cationes, y se extrae con ácido acético diluido 0.11 M. La segunda fracción (F2) es la parte reducible (óxihidróxidos de hierro y manganeso principalmente, y para su extracción se utiliza clorhidrato de hidroxilamina (0.1 M) ajustado a pH 2 con ácido nítrico comercial (HNO<sub>3</sub>). La tercera fase (F3) es la fracción oxidable (materia orgánica y sulfuros), y para su obtención se utiliza H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (8.8 M) y acetato amónico (1 M) ajustado a pH 2 con ácido nítrico. Por último, la fase residual (F4) está constituida por las especies que no se liberan del residuo en condiciones ambientales, y es la fracción soluble en ácidos fuertes, que en nuestro caso se hace con agua regia. El procedimiento detallado se puede consultar en el informe de certificación del patrón BCR-701 ([https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/rm/BCR-701\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/rm/BCR-701_report.pdf)).

Se medirán por espectrometría alfa las concentraciones de los radionucleidos naturales de interés en las cuatro fracciones obtenidas de cada muestra y a partir de ellas se calculará la cantidad relativa de actividad de cada radionucleido, en % respecto a lo que contiene la muestra inicial, que se libera para cada fracción del BCR.

#### **Actividad 5: Caracterización y modelización de las emisiones de radón y de su dispersión atmosférica.**

##### *5.1. Caracterización experimental de la exhalación de radón*

Se determinarán experimentalmente las propiedades del fosfoyeso en relación a la emisión de radón, principalmente el factor de emanación y el potencial de radón, y éstas se

relacionarán con variables como la temperatura, humedad, porosidad o granulometría. También se medirá la tasa de exhalación de la superficie de las balsas a varias horas del día y en diversos puntos seleccionados, tanto en las balsas sin restaurar como en las ya restauradas, para analizar su variabilidad espacio-temporal, en función de las diferentes propiedades y condiciones en que se encuentre el FY de las balsas. Para ello se diseñarán campañas para la medida de la tasa de exhalación *in situ*, tanto estacionales como día-noche, que cubrirán de manera representativa toda la superficie de las balsas. La Universidad Politécnica de Cataluña (Grupo del Dr. A. Vargas), colaborará en la instalación de un equipo de medida de la tasa de exhalación en continuo en las balsas de fosfoyeso. De este modo se obtendrán datos suficientes para estudiar la variabilidad de las magnitudes comentadas, además de permitir calibrar y validar el modelo de transporte de radón en el interior de la balsa que se pretende realizar en la siguiente actividad.

### *5.2. Simulación numérica del transporte de radón en el interior de la balsa*

El I.P. del proyecto dirigió la tesis doctoral al Dr. López-Coto, dedicándose un capítulo de la misma a la implementación de un modelo estacionario de transporte de radón en medios porosos heterogéneos, y mediante su aplicación se estudió la variabilidad de las emisiones de radón a la atmósfera desde las balsas de fosfoyeso en diferentes “escenarios de remediación”. Además, determinamos que la humedad y temperatura de la balsa son los principales parámetros que gobiernan la tasa de exhalación de radón, siendo las condiciones meteorológicas las responsables de las grandes diferencias entre las emisiones registradas en las campañas de medida.

En base a estos resultados, es muy necesario conocer la evolución de las emisiones de forma continua, o al menos conocerla bajo las condiciones más frecuentes que se producen a lo largo de un ciclo anual. En esta actividad se pretende desarrollar un modelo difusivo de columna (1D) que permita evaluar la tasa de exhalación (el flujo de radón en superficie) de la balsa de fosfoyeso, de manera continua, y dependiente del perfil de humedad y temperatura del FY.

Los parámetros “estáticos” necesarios para las simulaciones (porosidad y  $^{226}\text{Ra}$ ), se tomarán de las medidas experimentales realizadas en el apartado anterior y los resultados de estas simulaciones se validarán a través de comparaciones con los resultados obtenidos en las medidas de exhalación “in situ”. Esta actividad resultará en un modelo simple y validado de exhalación de radón para la balsa de fosfoyeso dependiente del tiempo y de las condiciones meteorológicas, con la capacidad de usar los resultados de simulaciones meteorológicas (temperatura y humedad del suelo) como parámetros de entrada.

Los resultados de este modelo se compararán con aquellos que proporcione el código certificado y de acceso libre RESRAD OFFSITE (ver actividad 7).

### *5.3. Modelización de la dispersión atmosférica del radón emitido por las balsas*

La dispersión del gas radón desde las balsas de FY es un fenómeno de transporte atmosférico complejo, afectado por las condiciones meteorológicas a escala sinóptica, de mesoescala y local. En esta actividad se realizarán los cálculos de dispersión en aire tanto del radón como de sus descendientes. Se propone en el proyecto evaluar la dispersión del radón a través de una doble metodología. La primera, en la que el equipo de investigación ya posee experiencia y la tiene implementada, será usar el modelo WRF-CHEM, que no es más que el modelo de predicción meteorológica “Weather Research and Forecasting” (WRF, de libre uso) acoplado a un modelo químico que permite la dispersión de especies químicas y radiactivas como el radón, si incluimos en el la variación por desintegración radiactiva. El Dr. López-Coto, participante en el proyecto ya tiene desarrollado el módulo “Radón” en el WRF-CHEM.

Por otro lado, la segunda vía que se prevé utilizar es el código RESRAD (Residual radioactivity) “on site” y “off site”, también de acceso libre, y que en su versión “off-site” incluye un módulo para cálculo de concentraciones de radón y descendientes en aire del entorno del depósito de residuos NORM. La última versión de RESRAD off-site admite

entradas temporales de concentraciones de radionucleidos en la zona primaria contaminada y en la de mezcla (balsas e interfase), calculando los flujos de radionucleidos hacia las aguas subterráneas y hacia la atmósfera a través de la superficie del depósitos de residuos, así como las concentraciones y exposiciones a que están expuestos diferentes receptores por ingestión (agua, alimentos, etc.) e inhalación de aire.

Como control de calidad, los resultados de estas simulaciones se compararán con las medidas de concentración de radón en dos puntos opuestos a las balsas usando los dos equipos mencionados anteriormente (El Carmen y La Rábida). También podrán usarse datos de otras redes de organismos públicos como el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear).

#### *5.4. Identificación y caracterización de escenarios meteorológicos que favorecen episodios de radón en la ciudad de Huelva*

Una vez liberado a la atmósfera, las concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el aire depende de los procesos de transporte, dispersión o acumulación que en ella tienen lugar. En esta sub-actividad se identificarán y caracterizarán aquellas situaciones meteorológicas, desde escala sinóptica a escala local, que favorecen el transporte del gas  $^{222}\text{Rn}$  emitido por las balsas de fosfoyeso hacia la ciudad de Huelva. Este estudio se basará en: 1) base de datos de  $^{222}\text{Rn}$  y de variables meteorológicas registradas en la estación de medida instalada en el Campus de El Carmen, 2) mapas sinópticos y series de variables meteorológicas (temperatura, viento, humedad relativa, etc.), y 3) modelo meteorológico de mesoescala WRF, que permitirá definir un conjunto de escenarios meteorológicos que serán tomados de referencia para pronosticar los episodios de radón que supongan un mayor impacto para la ciudad de Huelva.

#### **Actividad 6:** *Modelado hidrogeológico del transporte de radionucleidos en el sistema balsas-sustrato, y de la dispersión en el medio acuático cercano al que se liberan.*

La primera parte de esta actividad será el modelo conceptual de los parámetros hidrológicos que controlan la balsa de fosfoyeso, y a partir de éste obtener un modelo de flujo subterráneo sobre el que implementar el posterior modelo de transporte geoquímico que determine la migración y destino de los radionucleidos contenidos en los lixiviados (plumas), delimitando los procesos físicos y químicos involucrados. Y la segunda parte tratará de cuantificar las velocidades de flujo horizontal y vertical en la balsa de fosfoyeso para evaluar los flujos de lixiviados producidos en función de determinadas condiciones de contorno.

Un proyecto previo realizado por el Ministerio de Medio Ambiente caracterizó los parámetros hidrogeológicos requeridos en los modelos de flujo del sistema acuífero formado por el conjunto "balsa-sustrato", concluyéndose que el acuífero lo forman tres unidades: A) Fosfoyesos; B) Sedimentos estuarios superiores (arcillas y limos); C) Unidad Arenosa. Se implementará el código de cálculo HYDROGEOCHEM, que es un modelo numérico 3-D de flujo de fluidos, térmico y de transporte hidrológico, que considera reacciones en equilibrio en medios desde saturados hasta completamente insaturados. Este modelo puede también simular aspectos geoquímicos muy importantes como son el efecto de los procesos redox sobre procesos de adsorción/desorción, influencias hidrogeoquímicas sobre la degradación de hormigones o adsorción/desorción de radionucleidos entre las fases sólida y líquida en ambientes dinámicos. De forma paralela también se va a aplicar el modelo RESRAD OFFSITE para la evaluación de dosis, que es el recomendado por la mayoría de las agencias reguladoras nacionales e internacionales (ver actividad 7), para finalmente usar los datos de salida de HYDROGEOCHEM en el RESRAD.

Los resultados de la simulación hidrogeoquímica permitirá conocer: a) distribución espacial y temporal de las concentraciones de los radionucleidos como consecuencia de las lluvias y la actividad mareal; b) fracción de la actividad (Bq) almacenada en las balsas que desaparece por los procesos de transformación y transporte; c) evolución temporal de la "limpieza" del FY, es decir, evolución de la concentración de radionucleidos en el fosfoyeso a lo largo del tiempo.

A partir de las emisiones de radionucleidos estimadas de las balsas, evaluaremos su impacto en las aguas superficiales del estuario del Tinto y el Odiel, así como en el Golfo de Cádiz. Para ello se emplearán modelos de dispersión que resuelven la circulación del agua superficial y, posteriormente, el transporte de radionúclidos incluyendo procesos de transferencia agua-sedimentos. El transporte en la columna de agua es obtenido a partir de una ecuación de advección/difusión, empleándose una descripción dinámica mediante coeficientes de transferencia para las interacciones agua-sedimento.

Se dispone de un modelo de dispersión 2D, integrado en profundidad, del estuario que ya ha sido previamente validado mediante la simulación del transporte de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{238}\text{U}$ . Esta herramienta será aplicada en el proyecto. Para evaluar el potencial impacto de las emisiones de las balsas en el Golfo de Cádiz es preciso utilizar un modelo tridimensional. Dicho modelo del Golfo de Cádiz ha sido puesto a punto en la Universidad de Sevilla, habiendo sido aplicado al estudio de la dispersión de diversos metales pesados en el Golfo. Por tanto ha sido debidamente validado y será empleado en este proyecto a fin de simular la dispersión de radionucleidos. El Dr. Raúl Periañez, que participa en el proyecto, será el responsable de desarrollar y aplicar este modelo de dispersión de radionucleidos en el estuario de Huelva y Golfo de Cádiz.

**Actividad 7:** Evaluación de los riesgos radiológicos generados por las balsas, y optimización de los criterios de diseño de las barreras de ingeniería a aplicar en su restauración con el código RESRAD.

El código RESRAD (ONSITE u OFFSITE) ha sido desarrollado y mantenido por la "Environmental Assessment Division", del Argonne National Laboratory, e incorpora sofisticados modelos de transporte de radionucleidos entre la fuente contaminante y el medio receptor, y se puede aplicar "onsite" (receptor sobre la zona de los depósitos), u "offsite" (receptor fuera del depósito de residuos). Considera todas las vías de emisión de radionucleidos por las balsas (atmosférica, escorrentías superficiales y lixiviación), y de transporte hacia el receptor (Figura 2). Este código modela la liberación de radionucleidos desde la fuente hacia el receptor, permitiendo evaluar:

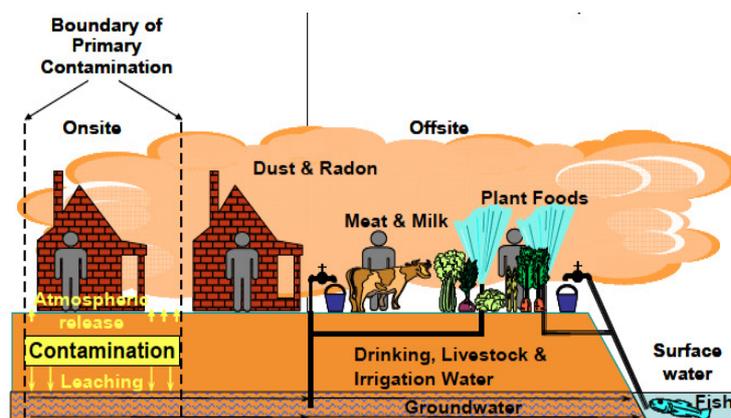


Figura 2. Representación del modelo conceptual del código RESRAD OFFSITE.

- La liberación de radionucleidos desde la zona contaminada, así como la concentración y distribución de los radionucleidos dentro de la zona contaminada.
- La liberación a la atmósfera de partículas debido a la resuspensión y de compuestos volátiles debido a la difusión y la evapotranspiración.
- La liberación a aguas superficiales debido a la erosión del suelo por el agua de escorrentía, y la liberación a aguas subterráneas debido a la infiltración de agua por lixiviación.
- La distribución de radionucleidos en aguas, aire, suelos y plantas del sistema receptor ("offsite").

RESRAD OFFSITE considera nueve vías de exposición al individuo: directa por la contaminación presente en el suelo, inhalación de partículas, inhalación de radón, ingestión de alimentos de origen vegetal (verduras, cereales, frutas, etc.), ingestión de carne, ingestión de leche, ingestión de alimentos acuáticos, ingestión de agua y la ingestión accidental de suelo. Asimismo, se pueden modelar escenarios residenciales, ocupacionales

o recreativos, especificando los parámetros apropiados y mediante la activación de las vías de exposición pertinentes.

A partir de este código se obtendrán las concentraciones de radionucleidos en los diferentes subsistemas ambientales (aire, suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas), niveles de referencia para los criterios de dosis establecidos por las autoridades regulatorias, dosis efectivas anuales a trabajadores expuestos al material contaminado, y, a partir de un análisis ALARA ("As Low As Reasonably Achievable") de coste-beneficio, se elaborarán recomendaciones para la toma de decisiones en la restauración de la zona contaminada.

#### ***Actividad 8: Difusión de los resultados y conclusiones del proyecto***

Un aspecto muy importante en el desarrollo de un proyecto es difundir los resultados y conclusiones. Para ello, el primer paso será diseñar y realizar una página web, en la que se publicará un resumen de la memoria del proyecto, así como los resultados y conclusiones más relevantes que se vayan obteniendo a lo largo del mismo.

Se recopilarán todos los resultados obtenidos por cada anualidad, realizándose el informe de seguimiento, y una vez finalizado el proyecto se emitirá el informe final. De los resultados obtenidos en este proyecto se espera obtener dos tesis doctorales; una primera sobre la caracterización y modelización de las emisiones de radón, y la segunda sobre la caracterización y modelización hidrogeológica de las balsas, y evaluación del impacto ambiental radiactivo y radiológico generado por vía acuática. Además, esperamos publicar más de 8 artículos internacionales en revistas de alto impacto, y se asistirá al menos a 4-5 congresos internacionales, además de otros tantos nacionales, que permitirán difundir los resultados que se obtengan en el proyecto.

Adicionalmente, las conclusiones obtenidas en el proyecto permitirán escribir un informe técnico proponiendo las recomendaciones sobre los criterios de diseño y tecnologías a aplicar en la realización del proyecto de recuperación ambiental, el cual han de aprobar las administraciones competentes en un futuro próximo. Asimismo, los resultados de este proyecto podrán usarse para diseñar el futuro plan de vigilancia y control ambiental de los depósitos de fosfoyeso, el cual por normativa debe tener una duración mínima de 30 años.

#### **5. medios materiales, infraestructuras y equipamientos singulares**

- Cluster de ordenadores para realizar las simulaciones de los modelos del proyecto.
- Espectrómetro alfa de 18 cámaras con detectores de semiconductor de implantación iónica (PIPS).
- Espectrómetro gamma con detector de Ge y ventana delgada de carbono.
- Laboratorios de Radioquímica con todo el equipamiento típico de este tipo de laboratorios (UCA y UHU).
- Laboratorio de Pretratamiento de Muestras.
- Unidad de Rayos X de la UHU.
- Laboratorio de Microscopía Electrónica de la UHU y UCA
- ICP-MS Agilent 7700 y el ICP-OES Jobin Yvon Ultima 2.
- Horno de temperatura controlada hasta 1400 °C
- Microondas Anton Par Multiwave, que se utilizará para la disolución de muestras sólidas.
- Contador de Partículas MASTERSIZER 2000-MALVERN INSTRUMENTS, muy útil para obtener la curva granulométrica de los materiales a ensayar.
- Estación de medida y control de la radiactividad atmosférica de la UHU contando con equipos de: radón, descendientes radón y diversos muestreadores de aerosoles atmosféricos de alto volumen.
- "Vibracoring" y/o una barrena extensible para muestreo de columnas sedimentarias.

## 6. Cronograma

Actividades/Tareas	Persona responsable e involucradas	Primer año												Segundo año												Tercer año												Cuarto año												
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	
<b>Actividades / mes del año</b>		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	
<b>Actividad 1: Diseño y realización de los muestreos</b>																																																		
1.1. Balsas de fosfoyeso y sustrato (Sólidos)	JPB, SPM,																																																	
1.2. Lixiviados laterales	FVG, JLA,																																																	
1.3. Aguas del interior de las balsas	AC																																																	
1.4. Medida en continuo de la concentración de radón en aire																																																		
<b>Actividad 2: Medida de las concentraciones de radionucleidos y análisis complementarios.</b>	EGSM, MGG, JPB, MEK, AC																																																	
<b>Actividad 3: Estudio sobre la distribución de radionucleidos en los materiales de las balsas y sustrato de marisma; evaluación de los flujos de radionucleidos liberados por vía acuática.</b>	JPB, FMP, MEK, MGG																																																	
3.1. Caracterización radiactiva de los materiales sólidos																																																		
3.2. Evaluación de los flujos de radionucleidos por lixiviados laterales																																																		
<b>Actividad 4: Estudio de la movilidad de radionucleidos en los fosfoyesos y sedimentos del sustrato</b>	FVG, JPB, MGG, SPM																																																	
<b>Actividad 5: Caracterización y modelización de las emisiones de radón y de su dispersión atmosférica</b>																																																		
5.1. Caracterización experimental de la exhalación de radón	JEM, JPB,																																																	
5.2. Simulación numérica del transporte de radón en el interior de la balsa	ILC, MHC, FMP, AC																																																	
5.3. Modelización de la dispersión atmosférica del radón emitido por las balsas.																																																		
5.4. Identificación y caracterización de escenarios meteorológicos que favorecen episodios de radón en la ciudad de Huelva																																																		
<b>Actividad 6: Modelado hidrogeológico del transporte de radionucleidos en el sistema balsas-sustrato, y de la dispersión en el medio acuático cercano al que se liberan</b>	JCC, MCR, JPB, RPR, JLGM																																																	
<b>Actividad 7: Evaluación de los riesgos radiológicos generados por las balsas, y optimización de los criterios de diseño de las barreras de ingeniería a aplicar en su restauración con el código RESRAD.</b>	JPB, FMP, MGG, JEM, JLA																																																	
<b>Actividad 8: Difusión de los resultados y conclusiones del proyecto</b>	JPB, Todos																																																	

*Cronograma incluido a modo de imagen ante la imposibilidad de incluirlo en formato apaisado por incompatibilidad con el formato establecido para la memoria.*

Juan Pedro Bolívar (**JPB**); Federico Vaca galán (**FVG**); Enrique Gutiérrez de San Miguel Herrera (**EGM**); Juan Carlos Cerón García (**JCC**); José Enrique Martín Domínguez (**JEM**); Juan Luis Aguado Casas (**JLA**); Melquiades Casas Ruiz (**MCR**); Raúl Periañez Rodríguez (**RPR**); Fernando Mosqueda Peña (**FMP**); Manuel Jesús Gázquez González (**MGG**); Israel López Coto (**ILC**); Miguel Ángel Hernández Ceballos (**MHC**); Silvia Pérez Moreno (**SPM**); Michael Edward Ketterer (**MEK**). José Luis Guerrero Márquez (**JLGM**)

## 7. Justificación de la contratación de personal

Las actividades del proyecto reflejan la existencia de una gran carga de trabajo experimental, tanto para los muestreos como para realizar las medidas de radionucleidos (se estiman unas 600 muestras), lo que requerirá la contratación de un técnico, el cual se

dedicará a realizar la mayoría de los análisis y ensayos que se requieren en las tareas del proyecto. Como la duración del proyecto es de 4 años, la contratación del técnico será por un tiempo de 2.5 años para fundamentalmente la realización de medidas experimentales: análisis radiométricos, caracterización física y microestructural de muestras sólidas, y medidas de radón.

## **C.2. IMPACTO ESPERADO DE LOS RESULTADOS**

### **1. Impacto científico-técnico, social y económico**

- a) Los resultados del proyecto incrementarán de forma notable el conocimiento de los procesos básicos que regulan la interacción del fosfoyeso con el medio ambiente que le rodea (agua y aire), luego es esperable que generen un claro impacto internacional, ya que estos podrán ser aplicados en la optimización de la restauración de este tipo de instalaciones, u otras análogas.
- b) La metodología desarrollada para realizar el análisis de riesgos radiológicos podrá ser exportada a otros casos similares existentes en España, Europa, y a nivel internacional, tanto de países en desarrollo como desarrollados, la cual permitirá evaluar cuáles son las mejores tecnologías para la remediación ambiental de depósitos de residuos en general.
- c) Las nuevas metodologías que se desarrollarán, especialmente para los estudios de movilidad ambiental de contaminantes y modelización del transporte de radionucleidos en depósitos de residuos serán muy útiles, tanto a nivel nacional como internacional, en la solución de multitud de problemas análogos al del proyecto.
- d) La ejecución del proyecto permitirá configurar un equipo multidisciplinar e internacional de investigadores, procedentes de diferentes grupos de investigación y países (medida de radionucleidos, modelización ambiental, hidrogeología, etc.), que servirá para alcanzar de forma muy satisfactoria los objetivos del proyecto.
- e) Se mejorarán los modelos de transporte de radón en medios porosos, los cuales no han sido desarrollados a nivel internacional en el grado que requiere los retos actuales.
- f) Por otro lado, las herramientas de modelización que se van a implantar permitirán afrontar de forma rápida y eficaz episodios contaminantes accidentales.
- g) El claro impacto internacional del proyecto se manifiesta en que se espera publicar unos 8-10 artículos en revistas SCI, así como realizar 2 tesis doctorales con Mención Internacional, y por artículos. Igualmente, se expondrán los resultados y conclusiones más relevantes del proyecto en congresos internacionales, y se mantendrá una página Web del Proyecto conteniendo todo el desarrollo del mismo, castellano y en inglés.
- h) El carácter multidisciplinar del equipo de investigación formado para desarrollar el proyecto será muy enriquecedor, potenciando las líneas de investigación que desarrollan los grupos de investigación de origen de los miembros de este equipo.
- i) Los resultados y conclusiones del modelo sobre el funcionamiento general de depósitos de fosfoyeso, así como del análisis de riesgos radiológicos, contribuirán de forma significativa a obtener soluciones para la restauración y control ambiental y sanitario de depósitos NORM, las cuales podrán ser usadas por las autoridades competentes españolas y de otros países a nivel internacional.

### **2. Plan de difusión e internacionalización de los resultados**

La producción de ácido fosfórico se desarrolla en múltiples países de todo el mundo, generándose a nivel mundial unos 250 millones de toneladas de fosfoyeso. Algunos de los países o regiones donde existe una problemática similar a la estudiada en el proyecto son EEUU, Rusia, todos los del Norte de África, UE, China, etc. Por tanto, los resultados del proyecto tendrán una clara repercusión internacional. Asimismo, aún no se ha realizado a nivel mundial ningún estudio tan exhaustivo e integral como el que se propone en este

proyecto, lo que tendría una clara repercusión internacional. El plan de difusión e internacionalización de los resultados del proyecto será:

- Publicación de 2 Tesis Doctorales.
- Publicación de unos 8-10 artículos en revistas de difusión internacional (JCR).
- Participación en 6-8 congresos científicos internacionales.
- Realización y mantenimiento de la página web del proyecto.
- Realización de talleres informativos con las partes interesadas (*stakeholders*).
- Exposición de los resultados en la Semana de la Ciencia de la UHU y UCA.
- Entrevistas al equipo investigador en los medios de comunicación (radio, TV, prensa)
- Emisión de informes de resultados del proyecto (3-4)
- Publicación de un protocolo metodológico de evaluación de riesgos radiológicos de depósitos de residuos NORM.
- Publicación de 2-3 artículos en prensa para difusión de los objetivos y resultados del proyecto.

### **3. Transferencia de resultados**

Es especialmente urgente por parte de la administración competente el conocimiento sobre la mejor forma de estabilizar los fosfoyesos aislándolos del medio ambiente a medio-largo plazo. Los principales beneficiarios del conocimiento adquirido en este proyecto serán todos aquellos organismos públicos con responsabilidad en la gestión futura de estos residuos, así como las empresas que generan dichos residuos, que podrán contar con protocolos y directrices sobre cuáles son las condiciones óptimas de almacenamiento de los fosfoyesos para minimizar su impacto ambiental y los potenciales riesgos radiológicos.

Se prevé durante el desarrollo de este proyecto una estrecha colaboración con la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, ENRESA, y con las empresas responsables de su restauración ambiental, las cuales se han ofrecido a proporcionar todos los datos de que disponen sobre los depósitos de fosfoyeso, tanto a nivel de control como de la ingeniería aplicada en su construcción. Asimismo, la empresa Environmental Technology Solutions, una Spinoff creada hace unos años en nuestro departamento, probablemente pueda transferir los resultados del proyecto al trabajo de consultoría que realiza a diario sobre residuos NORM.

### **C.3. CAPACIDAD FORMATIVA DEL EQUIPO SOLICITANTE**

#### **1. Plan de formación**

Durante la ejecución del proyecto, tal y como se ha indicado en el plan de difusión, se abordará la realización de, al menos, una Tesis Doctoral con el siguiente plan de formación.

Título: Desarrollo de un modelo transporte de radionucleidos de las balsas de fosfoyeso de Huelva y evaluación de los riesgos radiológicos bajo distintas tecnologías de restauración.

Director: Juan Pedro Bolívar Raya

Codirectores: Juan Carlos Cerón García – Rafael Pérez López

Problema e hipótesis: Teniendo presente los estudios previos, la hipótesis central es que las balsas de fosfoyeso pueden suponer un riesgo radiológico para la población. La tesis trata de resolver las siguientes preguntas, ¿Cuál es el modelo de funcionamiento hidrogeológico de estos depósitos de fosfoyeso? ¿Cuál es el valor de sus emisiones por vía acuática en su estado actual? ¿Suponen éstas un riesgo radiológico para la población y el medio ambiente de su entorno en función del tipo de escenario? ¿Cuál es la mejor opción de restauración para eliminar estas emisiones hasta niveles que no supongan un riesgo para las personas y el medio ambiente?

Objetivos:

1. Aprender por el doctorando los fundamentos de radiactividad ambiental y de modelización hidrogeológica necesarios para desarrollar los objetivos siguientes.
2. Dominar por parte del doctorando las técnicas de espectrometría alfa y gamma.
3. Realizar una caracterización radiactiva de los diferentes materiales sólidos presentes en las balsas (fosfoyesos, aguas y sustrato), y de los lixiviados laterales.
4. Conocer la movilidad de los radionucleidos naturales de vida larga en diferentes condiciones ambientales (reductoras, oxidantes y ciclos oxidación-reducción)
5. Implementar, validar y aplicar en el código RESRAD un modelo hidrogeológico de los depósitos de FY para calcular los niveles y flujos de radionucleidos por los lixiviados, así como y sus concentraciones finales en el medio receptor.
6. Realizar con el modelo anterior un análisis de riesgos radiológicos bajo diferentes ingenierías de restauración, y proponer el diseño óptimo bajo el criterio ALARA.

#### Metodología (en consonancia con las actividades del Proyecto)

1. Diseño y realización de muestreos de aguas y materiales sólidos.
2. Medida de las concentraciones de radionucleidos y análisis complementarios.
3. Estudio de la distribución de radionucleidos en materiales de las balsas y sustrato.
4. Estimación de los flujos de radionucleidos liberados por vía acuática.
5. Estudio de movilidad de radionucleidos en los fosfoyesos y sedimentos del sustrato.
6. Desarrollo de un modelo de funcionamiento hidrogeológico del sistema balsas-sustrato, que una modelos de transporte como el código HYDROGEOCHEM, con modelos de cálculo de dosis radiológicas (RESRAD OFFSITE).
7. Evaluación de los riesgos radiológicos generados por las balsas y obtención de los mejores criterios de diseño para su restauración
8. Escritura de artículos y confección de la tesis doctoral

Plan de trabajo: se adecuará al cronograma realizado para el proyecto

## **2. Relación de tesis doctorales realizadas o en curso**

### TESIS REALIZADAS

1. Juan Rodrigo Oliva. Características de los isótopos de U y Th de las masas de agua presentes en el entrono de la Bahía de Cádiz y una modelización de su interacción. **22/7/2015**.
2. Rafael Sánchez Sánchez. Caracterización y evaluación de la contaminación acústica en una ciudad turística costera (El Portill) y en su entorno natural. **9/7/2015**.
3. Manuel Díaz Pérez. Influencia del CO2 alimentado en la corriente de combustible en pilas de combustible tipo PEMF de baja y alta temperatura. **27/4/2015**
4. Almudena Hierro Gutiérrez. Behavior of radionuclides in an estuary affected by industrial wastes and acid mine drainage: the Ría of Huelva. **31/07/2013**.
5. Rafael Luis Lozano Bermejo. Radionucleidos naturales en aerosoles atmosféricos de Andalucía Occidental. **14/12/12**
6. Laura Galván González. Modelización hidrogeológica del río Odiel. Aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas. **14/12/2011**.
7. Israel López Coto. Variabilidad espacial y temporal de fuentes y concentraciones de radón en la baja atmósfera. **28/10/11**
8. Miguel Ángel Hernández Ceballos. Caracterización meteorológica y modelización de Andalucía occidental. **22/07/11**.
9. Manuel Gázquez González. Caracterización y valorización de residuos generados en la industria de producción de dióxido de titanio. **9/07/10**.
10. Fernando Mosqueda Peña. Desarrollo de procedimientos para la determinación de radioisótopos en muestras ambientales mediante técnicas de bajo recuento por centelleo líquido y radiación Cherenkov. **19/06/09**.

11. Daniel Domínguez López. Caracterización y comportamiento del ozono y los óxidos de nitrógeno en Andalucía Occidental. **30/10/09**.
12. Carlos Casal Bejarano. Caracterización de la radiación ultravioleta en la provincia de Huelva e incidencia en la productividad y el valor biotecnológico de cultivos de interés comercial. **8/11/08**.
13. Francisco Feria Márquez. Procesos de migración vertical de radionúclidos emisores gamma en columnas sedimentarias de zonas costeras. **28/07/06**
14. Juan Pedro Pérez Moreno. **Radionúclidos** en la industria de producción del ácido fosfórico. **15/07/05**.
15. José Antonio Adame Carnero. Caracterización y comportamiento del ozono superficial en la provincia de Huelva. **23/06/05**.

#### TESIS EN REALIZACIÓN (con proyectos de tesis inscritos)

1. Silvia Pérez Moreno. Caracterización de residuos ricos en calcio (yesos artificiales) y su posterior valorización. **Junio/2016**
2. Manuel Contreras Llanes. Aplicaciones de los inatacados de ilmenita en materiales de construcción sostenibles. **Marzo/2016**
3. Gert Woeltge. Caracterización de suelos negros fértiles de los indios del Amazonas; aplicación a la fabricación de compostajes para recuperación de suelos contaminados. **Octubre/2016**.
4. Fernando Isorna Llerena. Efectos del amoniaco como contaminante en las prestaciones de pilas de combustible de polímero sólido (PEMFC). **Diciembre/2016**.

#### **3. Breve descripción del desarrollo científico o profesional de los doctores egresados del equipo de investigación.**

1. **Manuel Díaz Pérez:** Trabaja en la empresa Abengoa como Ingeniero de Proyectos, desarrollando su actividad en ensayos de laboratorio para la evaluación de catalizadores. Análisis y evaluación de tecnología catalíticas de los posibles competidores, e industrialización de catalizadores de laboratorio para su aplicación industrial. Evaluación de catalizadores a escala de laboratorio y piloto. Experto en cromatografía de gases para el seguimiento y evaluación de resultados experimentales en las tecnologías de reacción.
2. **Juan Rodrigo Oliva:** Ha realizado su tesis doctoral en la Universidad de Cádiz financiado por el grupo de investigación del Dr. Casas, y recientemente está trabajando en ESG (Inglaterra), la cual es una compañía líder en consultoría y realización de ensayos y analíticas. El Dr. Rodrigo-Oliva está en ESG trabajando como técnico en el laboratorio de ICP-MS, que es la herramienta analítica en la que se especializó en su tesis doctoral, sobre todo en la medida de isótopos de U y Th.
3. **Rafael Sánchez Sánchez:** Ha trabajado en el grupo Telefónica hasta hace dos años, se jubiló y actualmente sólo trabaja como Profesor Asociado en la Universidad de Huelva. Posee una dilatada experiencia profesional en redes de comunicaciones, y actualmente es el responsable de la línea de Acústica Ambiental del grupo de investigación FRYMA de la UHU. El Dr. Sánchez trata de conseguir un proyecto sobre desarrollo de metodologías para evaluación de espacios naturales.
4. **Inmaculada Ramos Lerate:** Ha desarrollado su labor profesional en los siguientes centros: CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas, Suiza), Europeo XFEL (European X Ray Láser de Electrones Libres, en Hamburgo, Alemania), la Universidad de Aarhus (Dinamarca), KVI (Centro de Aceleradores y Física Nuclear, en Groningen, Países Bajos), ESRF (Instalación Europea de Radiación Sincrotrón, en Grenoble, Francia) y el sincrotrón ALBA, centro en el cual continúa prestando servicios.

5. **Manuel Barrera Izquierdo:** Se ha incorporado a la Universidad de Cádiz en calidad de Profesor Contratado Doctor después de haber pertenecido al Servicio de Radiactividad Ambiental del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)
6. **Francisco Feria Márquez:** Desarrolla su labor profesional en la División de Fisión Nuclear (Unidad de Seguridad Nuclear) del CIEMAT.
7. **Almudena Hierro Gutiérrez.** Actualmente está desarrollando un contrato postdoctoral de 2 años en la Universidad Autónoma de Barcelona en evaluación radiológica de industrias NORM, en el grupo liderado por el Dr. P. Masqué.
8. **Manuel Gázquez González.** Actualmente trabaja en la empresa de consultoría ambiental ENTEC Solutions, y antes estuvo más de un año en la Universidad Técnica Particular de Loja, en Ecuador, como docente investigador bajo el programa Prometeo, iniciativa del Gobierno ecuatoriano. Ha desarrollado tareas sobre caracterización y valorización de residuos NORM de diversas industrias, contaminación de suelos, etc.
9. **Israel López Coto.** Trabaja actualmente para el departamento de comercio (DOC) de los Estados Unidos como investigador en el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) como miembro de los proyectos de investigación (INFLUX y Megacities Carbon Project) Previamente ha trabajado para la Universidad de California San Diego (UCSD) como investigador postdoctoral, Max Plank Institute for Biogeochemistry (MPI-BGC) Jena, Alemania, como investigador visitante.
10. **Miguel Ángel Hernández Ceballos.** Tras finalizar su Tesis Doctoral trabajó en proyectos de investigación de la UHU. Desde hace dos años, está contratado como investigador por el *Joint Research Center* (Unión Europea), dedicado al análisis de datos de calidad del aire de redes europeas.
11. **Fernando Mosqueda Peña.** Ha estado contratado como investigador para el grupo FRYMA, y desde hace unos tres años en promotor y Responsable de Proyectos en *Environmental Technology Solutions* (ENTEC Solutions, Spin off de la Universidad de Huelva) en el marco del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, relativos a la determinación de radón en puestos de trabajo, las evaluaciones radiológicas de complejos industriales, y la evaluación de terrenos afectados por actividades NORM
12. **Daniel Domínguez López.** Desde que finalizó su Tesis Doctoral ha trabajado en los servicios generales de la Universidad de Huelva. Actualmente compatibiliza un contrato de técnico de investigación con docencia en un centro de enseñanza secundaria.
13. **Carlos Casal Bejarano.** Tras finalizar su Tesis Doctoral ha trabajado como investigador en el Laboratorio de Investigación y Control Agroalimentario (CIDERTA) de la UHU.
14. **Juan Pedro Pérez Moreno.** Después tres años como investigador en la UHU, accedió mediante oposición a profesor funcionario de enseñanza secundaria.
15. **José Antonio Adame Carnero.** Desde que finalizó la tesis doctoral trabaja como investigador para el INTA en la estación de sondeos atmosféricos de El Arenosillo (Huelva), desarrollando diversos proyectos de dicho organismo.

#### **C.4. IMPLICACIONES ÉTICAS Y/O DE BIOSEGURIDAD**

NO HA IMPLICACIONES ÉTICAS Y/O DE BIODIVERSIDAD.