



Inertización de residuos radiactivos

Autor: Esperanza Pérez Rodríguez

Institución: Universidad de Murcia

Otros autores: Asunción M^a Hidalgo Montesinos (Universidad de Murcia); María Gómez Gómez (Universidad de Murcia); M^a Dolores Murcia Almagro (Universidad de Murcia)

Resumen

Los residuos radiactivos suponen un problema a la hora de gestionarlos adecuadamente debido a sus características de peligrosidad. Estas derivan de la capacidad que tienen estos residuos de emitir radiaciones que pueden afectar a los organismos a nivel genético y producir mutaciones cancerígenas. En este trabajo se identifican las principales fuentes de producción de residuos radiactivos, así como el destino final que tiene cada uno atendiendo a su tiempo de vida. Las principales fuentes de generación de residuos radioactivos son la producción de energía, la sanidad, la industria y la investigación, centrándonos en este trabajo en las tres últimas. Como método de gestión y deposición final se han elegido los englobados dentro del grupo de técnicas de 'estabilización/solidificación', consistentes en estabilizar los residuos mediante la mezcla de éste con aditivos para luego integrarlos en una matriz sólida que impida la lixiviación y contaminación del lugar de depósito antes de que los elementos radiactivos se desintegren hasta otros elementos no radiactivos. Finalmente, se ha aplicado este estudio a un caso concreto, eligiendo el fosfoyeso, que es un residuo radiactivo procedente de la industria química como residuo susceptible de ser inertizado. El fosfoyeso se obtiene como subproducto de la obtención del ácido fosfórico y se deposita en pilas en ecosistemas viables. Para minimizar los riesgos de una posible contaminación se estudia la posibilidad de encapsular el residuo en una matriz de cemento azufrado que actúa como barrera entre el residuo y la zona de depósito; teniendo esta técnica buenos resultados a escala de laboratorio para posteriormente implantarla a escala industrial. También podrían ser reutilizados los materiales originados como materiales de construcción.

Palabras clave: inertización, residuo radiactivo, fosfoyesos, gestión

1. Introducción y antecedentes

Los residuos radiactivos se caracterizan por presentar una alta concentración de algún isótopo radiactivo, siendo los más comunes los derivados del ^{235}U . El mayor porcentaje del total de los residuos radiactivos se produce en las centrales nucleares y son el combustible gastado en los reactores utilizado en producir energía eléctrica. El resto de los residuos radiactivos procede de las áreas de Sanidad, Investigación e Industria. Este trabajo se centra en éstos últimos, que son los que presentan mayor dificultad de gestión al ser de distintos tipos y tener distinta procedencia.

Existen dos vías diferentes para la gestión de estos residuos dependiendo de la vida media de los mismos; si el residuo tiene una vida corta y una actividad media baja será posible su gestión dentro del mismo centro productor, almacenándose adecuadamente hasta que el residuo deja de ser radiactivo y se incinera o se deposita en vertedero, si el residuo por el contrario es de vida más larga y tiene alta actividad es necesaria la gestión por parte de ENRESA, que es la empresa pública que se ocupa de la recogida y gestión de los residuos radiactivos.

Dentro de los posibles métodos de tratamiento de este tipo de residuo, en este trabajo nos vamos a centrar en los denominados de “estabilización / solidificación”. Este tipo de métodos consisten en estabilizar el residuo mezclándolo con distintos aditivos inertes, para posteriormente integrarlo en una matriz sólida que lo aisle del sustrato en el que se deposite para evitar contaminaciones radiactivas que puedan afectar negativamente al medio ambiente o al ser humano.

El mayor volumen de residuos radiactivos procede del combustible gastado, teniendo un peso del 85% del total de los generados, sin embargo, este trabajo se centra en el 15% restante, procedente, como se ha dicho anteriormente, de la sanidad, la industria y la investigación. En concreto, se hace un estudio de las posibles aplicaciones de microencapsulación a los fosfoyesos. Éstos son un residuo radiactivo industrial procedente de la fabricación del ácido fosfórico y su mayor problemática radica en la contaminación del medio si existiese una mala gestión de los residuos.

1.1. Definición y clasificación de residuos radioactivos

Según la ley 25/1964, de 29 de abril, de Energía Nuclear, vigente en la actualidad, un residuo radiactivo es cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear.

Antes de clasificar los residuos radiactivos es necesario definir la radiación para comprender las características que presentan estos residuos y que influyen en la manera de clasificarlos y por lo tanto de gestionarlos.

La radiactividad se define como la propiedad de emitir radiaciones ionizantes por núcleos inestables. Un núcleo inestable es aquel que no presenta una relación correcta entre el número de protones y el de neutrones y, para estabilizarse, comienza a desintegrarse emitiendo radiaciones. El proceso de desintegración puede transformar el núcleo inestable en uno todavía radiactivo o en uno estable.

Las radiaciones que emite un núcleo inestable al desintegrarse pueden ser de tres tipos:

- Radiación alfa: emite partículas cargadas positivamente poco penetrantes pero con gran carga iónica. Se producen al desprenderse del núcleo dos protones y dos neutrones. Estas partículas están cargadas positivamente y son iguales a los núcleos del helio. Por ser muy pesadas y presentar carga positiva al interactuar con otros elementos pierden una gran cantidad de energía. Se pueden detener con una hoja de papel.
- Radiación beta: compuesta por flujos de protones con un mayor poder de penetración que las alfa pero menos ionizantes que éstas. Los isótopos quedan descompensados en carga al tener el núcleo un protón más y un neutrón menos aunque el número másico es el mismo. Se pueden detener con una hoja de aluminio.
- Radiación gamma: son ondas electromagnéticas con alto poder de penetración que necesitan barreras de plomo u hormigón para detenerlas. Estas radiaciones se producen cuando un átomo que está excitado libera energía para volver a su estado fundamental.

Otra forma de clasificación puede realizarse a través del periodo de semidesintegración, definido como el tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos inestables de una sustancia. Este tiempo es variable según la sustancia. Al desintegrarse los núcleos inestables los elementos se van transformando en otros.

La clasificación de los residuos radiactivos se puede hacer atendiendo a su estado físico, al tipo de radiación emitida, al periodo de semidesintegración, a su actividad específica y a su radiotoxicidad.

La clasificación más utilizada los divide en función de su actividad específica agrupándolos en tres tipos:

Los residuos radiactivos de Muy Baja Actividad (RBBA) son los que presentan una muy baja actividad específica, se producen en el desmantelamiento de las centrales nucleares y los requisitos para su gestión son mucho menores que para el resto de residuos radiactivos.

Los residuos radiactivos de Baja y Media Actividad (RBMA) se caracterizan por presentar una actividad específica baja y no generar calor. Además son emisores de radiación beta y gamma, emitiendo radiación alfa en concentraciones muy bajas, tienen un periodo de semidesintegración menor de 30 años y este tipo de residuos engloban las herramientas, la ropa de trabajo, el instrumenta, entre otros.

Los residuos radiactivos de Alta Actividad emiten radiaciones alfa en concentraciones apreciables, su periodo de semidesintegración es mayor de 30 años, pueden generar calor y todos los residuos con alta actividad son el combustible gastado tras su uso en los reactores nucleares de las centrales.

En España la gestión de los residuos radiactivos la realiza la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), esta empresa es pública y aparte de encargarse de la gestión de los residuos radiactivos también es la que desmantela las instalaciones nucleares y restaura las minas de uranio. Es responsable asimismo de la investigación y desarrollo de técnicas referentes a los residuos radiactivos [1-4].

1.2. Identificación de los procesos que producen residuos radiactivos

La mayor fuente de residuos radiactivos procede de las centrales nucleares y los conforman los residuos procedentes del combustible nuclear que ya ha sido utilizado. En un principio los restos de combustible eran almacenados en la propia central, pero en la actualidad se transportan al almacén temporal centralizado. Estos residuos suponen el 85% del total de los residuos radiactivos producidos en España, pero en este trabajo, nos centraremos en el 15% restante, que provienen otros campos, la sanidad, la industria y la investigación [3].

1.2.1. Sanidad

En el campo sanitario, la medicina nuclear utiliza radioisótopos para diagnóstico o como tratamiento para distintas enfermedades. Así se diferencian el radiodiagnóstico, que es la obtención de imágenes del organismo tras el paso de rayos X por el cuerpo. A partir de ésta técnica se desarrolló la tomografía axial computarizada (TAC) que permite ver los órganos en tres dimensiones.

La radioterapia utiliza las radiaciones ionizantes para destruir tejidos o tumores, si el tratamiento es superficial se hace con rayos X de baja energía, si los tumores están más profundos son necesarias radiaciones más energéticas producidas por aceleradores lineales o por bombas de cobalto. Otra técnica de diagnóstico consiste en introducir una sustancia radiactiva (radiofármaco) que emite radiación gamma que se capta en un equipo llamado gammacámara [2].

Los residuos sanitarios especiales son los residuos peligrosos, radiactivos y químicos, destacando principalmente entre los radiactivos los siguientes: ^{14}C , ^{51}Cr , ^{198}Au , ^{131}I , ^{59}Fe , ^{39}P , ^{24}Ra .

Dentro de los hospitales sólo se van a utilizar materiales radiactivos en los servicios de Medicina Nuclear, Radioterapia y Laboratorios, estos incluyen diferentes especialidades y programas de investigación. De los departamentos anteriores, el que genera mayor volumen de residuos radiactivos es el de Medicina Nuclear, al utilizar fuentes no encapsuladas como radiotrazadores, seguido de los laboratorios que utilizan técnicas de

marcado. En Radioterapia se utilizan fuentes encapsuladas caracterizadas por una alta actividad específica y pequeño volumen generado. Las fuentes encapsuladas son aquellas constituidas por fuentes radiactivas incorporadas a una matriz sólida y sellada en un envoltorio inactivo para evitar la dispersión de los radiosiótopos [3].

Los residuos radiactivos sanitarios están englobados dentro de la categoría de líquidos o sólidos de media y baja actividad (Figuras 1 y 2). Las fuentes de residuos que sean por contaminación de sustancias radiactivas se pueden gestionar dentro del mismo centro, para ello es necesario remitirse al Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, que fija los límites de inhalación y de concentración de radionucléidos en el aire a los que puede estar expuesto un trabajador, así como el límite anual de inhalación o ingestión para las personas no trabajadoras. Si una actividad conlleva unas concentraciones mayores a las permitidas son necesarios procesos de confinamiento y tratamiento hasta que se alcancen los niveles permitidos.

Los residuos radiactivos líquidos provienen de soluciones acuosas de sustancias radiactivas, los sólidos proceden de generadores radioisotópicos, jeringas, viales, guantes, entre otros. Todos los residuos mencionados anteriormente pueden gestionarse en el mismo centro; ENRESA debe ocuparse de las fuentes encapsuladas de los materiales radiactivos utilizados como el Cobalto, el Cesio, el Iridio, etc. [5-7]

Residuos Radiactivos	Líquidos	Líquidos de centelleo	
		H ₃ , C ₃₆ , P ₃₂ , S ₃₅ , I ₁₂₅ , Cr ₅₁	
		Líquidos biológicos	
		Material Contaminado	
	Sólidos	El Cobalto, el Cesio y el Iridio	
	Listado de símbolos utilizados de la tabla periódica de elementos	- H: Hidrógeno	- S: Azufre
		- C: Carbono	- I: Yodo
		- P: Fósforo	- Cr: Cromo

Figura 1. Clasificación de los residuos radiactivos sanitarios por componente

Para gestionar estos residuos es necesario que se cumplan ciertas normas para evitar la contaminación:

- El personal que los evacue debe estar debidamente autorizado.

- El traslado de residuos debe hacerse por parte de personal especialmente formado.
- La evacuación de residuos al exterior debe hacerse desde el Almacén Central, que previamente debe estar clasificado y controlado.
- Deben separarse los residuos radiactivos sólidos de los líquidos.
- No deben mezclarse los residuos con sustancias inactivas.
- Separación de isótopos de vida media de los de vida corta.
- Hay que tener los residuos almacenados adecuadamente, señalizados y controlados hasta su recogida.
- Los líquidos de centelleo deben separarse en contenedores por isótopos.

Tipo	Descripción	Unidad de Contención	Tratamiento Externo
S01	Residuos compactables	Bolsa plástico 25 L	Compactación
S02	Residuos no compactables	Bolsa plástico 25 L	Almacén directo
S03	Residuos biológicos	Congelados bolsa 25 L	Incineración
S04	Agujas hipodérmicas	Recipientes rígidos dentro de bolsa de plástico 25 L	Inmovilización directa
M01	Residuos con líquido de centello en el vial	Recipientes de 25 L normalizados ENRESA	Trituración e incineración
L01	Residuos líquidos orgánicos	Recipientes de 25 L normalizados ENRESA	Incineración
LO2	Residuos líquidos acuosos	Recipientes de 25 L normalizados ENRESA	Fabricación de mortero de relleno

S: sólidos, M: mixtos, L: líquidos

Figura 2. Clasificación de ENRESA para los residuos radiactivos sanitarios

1.2.2. Industria

En la industria existen numerosos procesos que pueden dar lugar a residuos radiactivos, algunos de ellos son la gammagrafía, la obtención de ácido fosfórico, la construcción de pararrayos y el reciclado de materiales metálicos.

La construcción de pararrayos en la actualidad ya no se realiza, pero en los años ochenta se construían con radioisótopos de ^{241}Am , ^{90}Sr , ^{14}C y ^{226}Ra para crear un campo de ionización que atrajera los rayos de manera más efectiva. Ahora mismo lo que se intenta es retirar los pararrayos que aún permanecen para evitar la contaminación radiactiva.

El proceso de gammagrafía industrial se utiliza para comprobar la integridad y calidad de las soldaduras, así como la resistencia del material de tuberías, tanques, piezas metálicas... También se usa en el proceso de construcción de grandes estructuras metálicas como el montaje de plantas industriales o el tendido de oleoductos. Este proceso consiste en colocar una fuente de radiación cerca del objeto que se quiera estudiar y obtener una radiografía del mismo, si hay defectos en las soldaduras o el material se aprecia en las placas. Las fuentes utilizadas para esta técnica están encapsuladas y son el ^{192}I y el ^{60}Co , aunque se siguen utilizando asimismo algunas fuentes de ^{137}Ce [1].

En la obtención del ácido fosfórico se obtiene como subproducto el fosfoyeso, que es un material blanco con contenidos variables verdosos por fosfato de hierro y azules, por fosfatos de cobre. En la producción de ácido fosfórico se utiliza como materia prima roca fosfatada, que contiene de manera natural uranio, torio y radio; la concentración de estos elementos radiactivos es variable según la procedencia de la roca. El proceso industrial de obtención de fosfórico consiste en la trituración de la roca con ácido sulfúrico, esta reacción produce ácido fosfórico y yeso. El yeso precipita con el radio aunque el uranio y el torio no.

La problemática de estos fosfoyesos como subproducto es su acumulación en el medio tras la producción de ácido fosfórico. Actualmente en Huelva, en las Marismas de Mendaña, existe una gran polémica al sospecharse incidencias en la salud y el medio ambiente por la acumulación de estos materiales y su posible traslado a un cementerio nuclear. Esto sucede por la alta concentración de ^{238}U que presenta la roca fosfatada original, aunque estudios del consejo de seguridad nacional sostienen que el nivel de radiación presente en estos residuos está muy por debajo de los límites establecidos por ley y por lo tanto no son peligrosos. Los fosfoyesos como residuo radiactivo susceptible de inertización se han seleccionado como ejemplo y se desarrollan en un apartado posterior [8].

1.2.3. Investigación

Uno de los usos de los isótopos radiactivos y que luego implica que deban tratarse como residuos radiactivos es en la investigación de nuevos fármacos. Éstos se utilizan como marcadores en los fármacos para localizarlos en los órganos y comprobar su eficacia, los más utilizados son el ^3H y el ^{14}C [3].

En el campo de la investigación se ha avanzado mucho en los últimos años; cuando se comenzó a investigar con el uso de radioisótopos existían muchas limitaciones ya que no había un número muy grande de radioisótopos disponible, sin embargo, con el avance de la física experimental, se han podido incorporar cada vez más isótopos. El mayor descubrimiento en este campo fue cuando se consiguió la fisión del uranio y con ello la producción a gran escala de radioisótopos.

El uso de radioisótopos se puede aplicar para localizar yacimientos carboníferos utilizando fuentes radiactivas en los sondeos y con un detector determinar la estructura, espesor y profundidad del yacimiento. Otro uso es el de la determinación cronológica de objetos en yacimientos arqueológicos para datarlos temporalmente, normalmente se utiliza el ^{14}C . Para el estudio de los meteoritos se tienen en cuenta las modificaciones de los isótopos presentes en ellos tras pasar por los rayos cósmicos; al ser el período de un isótopo específico se puede determinar el tiempo que ha pasado el meteorito en el espacio y bajo qué condiciones [9].

El análisis por activación neutrónica es un procedimiento usado para conocer las cantidades de cada contaminante presente en una muestra, normalmente de aire, y determinar así de dónde provienen los contaminantes. Consiste en irradiar una muestra y luego ver su espectro de emisión, que determina los elementos presentes y en qué concentración están.

En química se utilizan los isótopos radiactivos para conocer la velocidad de una reacción reversible y establecer así las condiciones de equilibrio. También como marcador se utilizan estos radioisótopos en biología, para ver el camino que sigue cualquier compuesto por un organismo [10].

1.3. Problemática ambiental

El riesgo de irradiación asociado a los residuos radiactivos es muy bajo ya que las personas que los manejan deben estar informadas de los riesgos y sometidas a controles bastantes estrictos, siendo su gestión competencia de ENRESA.

La incorporación de radioisótopos al suelo es un riesgo derivado de una mala gestión de los residuos radiactivos. El suelo tiene la capacidad de incorporar cualquier elemento ajeno a él, por lo que cuando los radionucléidos se introducen en el medio edáfico alteran sus características al sustituir en la estructura a los iones de Ca^{2+} , Mn^{2+} o K^+ . Se altera así la absorción de estos elementos y se incluyen en los organismos los isótopos

radiactivos siendo posible su bioacumulación. La mayor o menor absorción de los elementos radiactivos radica en las características del suelo, cuanto más ligera es la estructura, menos capacidad de retención presentan. El pH también influye, los suelos más alcalinos producen precipitados insolubles de aniones disminuyendo su disponibilidad. El mayor problema se da cuando los radioisótopos se incluyen en la fracción biológica y forman quelatos, porque son más difíciles de eliminar [11].

Uno de los riesgos más evidentes de los residuos radiactivos es el de contaminación por mala gestión, un ejemplo de ello es el del accidente de la acería Acerinox en Algeciras en mayo de 1998. El ^{137}Cs provenía de partidas de chatarra procedentes del resto de Europa, por lo que no se pudo determinar el origen exacto. Se encontraron concentraciones anómalas de ^{137}Cs en Francia, Italia, Suiza y Alemania, no eran valores peligrosos para el medio ni para el ser humano, pero más altos de lo que deberían ser. En España no hubo alerta de contaminación radiactiva y es unas semanas después cuando se realizan pruebas en la fábrica, encontrando ^{137}Cs en el sistema de filtración de un horno y se determina éste como foco emisor de la contaminación encontrada en Europa. Se cree que esta contaminación no se depositó en la península debido a las condiciones meteorológicas del día del escape, que alejaron el cesio hacia el norte. Fue necesaria una investigación del Centro de Seguridad Nuclear (CSN), y en las plantas de inertización a las que se enviaban los residuos de la acería se hallaron unos altos niveles de radiación, por lo que fue preciso el aislamiento y descontaminación de la zona [12].

Los problemas ambientales en la atmósfera derivan de la retención a largo plazo de los residuos radiactivos de vida corta. Esto se manifiesta en forma de lluvia radiactiva troposférica, que ocurre cuando hay una pequeña desintegración radioactiva, pero aún así puede dañar el medio. Si los isótopos son de vida larga su riesgo potencial de contaminación aumenta considerablemente al permanecer más tiempo en la estratosfera. La lluvia radiactiva puede ser inicial y tardía, la primera ocurre en caso de explotar una bomba nuclear, ya que los residuos están cerca de la superficie terrestre y la contaminación es muy alta. Si la dispersión llega a las capas altas de la atmósfera produce la lluvia tardía y la zona afectada es mucho mayor. En ambos casos el riesgo de irradiación y contaminación radiactiva sólo es peligroso para los humanos cuando los residuos proceden de armas o explosiones nucleares, si provienen de fugas o escapes de centrales no llegan a concentraciones tan altas como para afectar al medio y al ser humano. Las consecuencias de una lluvia radiactiva dañina para el ser humano se ven en el aumento de los casos de cáncer en las ciudades de Chernobil, Hiroshima y Nagasaki [13].

1.4. Normativa

- Ley 25/1964, de 29 de abril, de Energía Nuclear. El artículo 38 de esta ley es el que caracteriza y evalúa los residuos radiactivos que se producen en las distintas actividades.
- Plan General de Residuos Radiactivos.

- Directiva 2011/70/Euratom del consejo de 19 de julio de 2011 por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos.
- Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.
- Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. Regula las actividades y las instalaciones.
- Real Decreto 1349/2003, de 31 de octubre, sobre ordenación de las actividades de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A. (ENRESA), y su financiación. Agrupa en una sola norma toda la legislación que anteriormente había al respecto, derogando total o parcialmente la misma.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. En cuanto a los residuos radiactivos, este Reglamento establece las normas sobre su almacenamiento, sobre la evacuación de efluentes y residuos sólidos al medio ambiente (solo con autorización expresa), y fija el régimen sancionador por sus inobservancias, entre ellas las referentes a no disponer de los sistemas adecuados para el almacenamiento, tratamiento y, en su caso, evacuación de efluentes y residuos sólidos o evacuar éstos sin autorización o superando los niveles autorizados para la emisión.
- Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos [14-16].

1.5. Formas de gestión

Según la procedencia se pueden clasificar los residuos radiactivos en los siguientes tipos:

A) Residuos procedentes de hospitales

Estos residuos proceden de unidades de teleterapia y de braquiterapia, ambas dentro del ámbito de la Radioterapia. La teleterapia genera residuos radiactivos en fuentes encapsuladas de ^{60}Co , que o bien gestiona la casa comercial o ENRESA. En la braquiterapia se generan como residuos fuentes encapsuladas de ^{137}Cs y ^{90}Sr , y sólidos radiactivos de ^{192}Ir y semillas de ^{125}I . Al igual que los anteriores es necesaria su gestión por una empresa autorizada.

B) Residuos procedentes de centros de investigación

La gestión de este tipo de residuos resulta más complicada debido a la alta variedad tanto de elementos utilizados como del estado físico en el que se encuentran. Los que no gestiona ENRESA se pueden evacuar como residuo convencional o incinerarse en el mismo centro, en ambos casos se deposita el residuo en vertedero.

C) Residuos procedentes de la industria y la agricultura

Según su nivel de radioactividad se devuelve la fuente al suministrador y se cambia por una nueva o se gestiona a través de ENRESA [1], [4], [17-18].

En la Figura 3 se muestra un esquema de gestión interna de residuos radiactivos en los centros mencionados anteriormente.

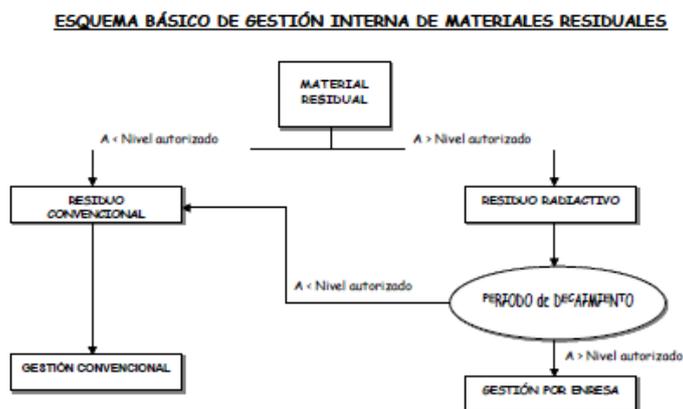


Figura 3. Esquema de gestión

1.5.1. Transporte de los residuos

Los residuos que tienen una actividad media y baja son transportados hasta el almacén de El Cabril, donde se almacenan entre barreras naturales y de ingenierías hasta que se transforman en un material no radiactivo.

Los residuos de alta actividad antes no se transportaban, almacenándose en piscinas o en contenedores dentro de las propias centrales, sin embargo, ahora existe un Almacén Temporal Centralizado y es necesario realizar un transporte adecuado hasta las nuevas instalaciones. Este transporte está sujeto a reglamentación internacional: el Acuerdo Europeo para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR) y la guía de seguridad del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) [1], [4], [16].

1.5.2. Instalaciones de El Cabril para residuos radiactivos

Las instalaciones están divididas en dos zonas, una de edificios y otra de almacenamiento. En la de edificios hay dos laboratorios que comprueban la calidad de los residuos y existe una zona para tratar los residuos. La zona de almacenamiento está compuesta por tres plataformas divididas en celdas donde se almacenan los residuos de baja y media actividad.

Las instalaciones presentan automatismo para minimizar la exposición de los trabajadores, resistencia sísmica para proteger de los terremotos y solidificación, que significa que todos los residuos que se almacenan lo hacen en forma sólida.

Si los residuos llegan de una central nuclear vienen ya acondicionados, pero si provienen de hospitales, centros de investigación o industrias se acondicionan en las propias instalaciones. Los residuos, una vez acondicionados, se introducen en bidones y estos a su vez en contenedores de hormigón. Cuando un contenedor se llena, se inmoviliza con mortero y después va a la celda de almacenamiento. Todas las celdas están provistas de sumideros para comprobar si existen filtraciones de agua. Una vez que todas las celdas construidas se llenen, se impermeabilizarán y se integrarán en el entorno, tras esto, comenzará el periodo de control y vigilancia durante 300 años [1].

1.5.3. Tratamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos

En el centro donde se procesan todos los residuos radiactivos de España, se acondicionan dependiendo de sus características físicas, químicas y radiológicas.

En el caso de residuos líquidos, se dividen en acuosos y orgánicos para después pasar por procesos de filtración, centrifugación, evaporación, precipitación e intercambio iónico tantas veces como sea necesario hasta que se alcancen los niveles de descontaminación deseados. Tras estos procesos se transforman a sólidos mezclándose con hormigón, mortero o cemento.

Los residuos sólidos siguen un tratamiento similar, aunque los tratamientos son sobre todo de compactación para reducir su volumen antes de inmovilizarlos en un balde de cemento. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente este proceso [1], [17].

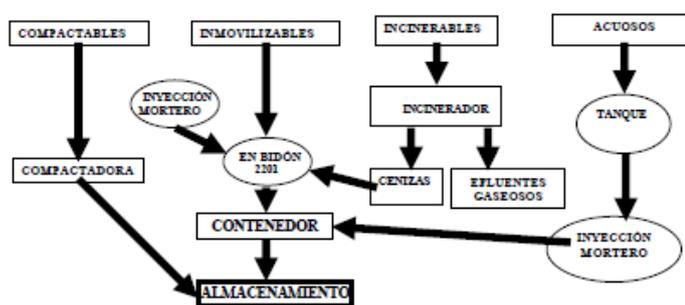


Figura 4. Esquema del tratamiento de los residuos radiactivos

1.5.4. Almacenamiento de residuos de baja y media actividad

Al ser el tiempo estimado de desintegración de 30 años, y al mantenerse confinados 300 años, los residuos se aíslan del medio tras tres barreras como se muestra en la Figura 5, la primera contiene el residuo y el contenedor, la segunda consiste en estructuras de ingeniería y la tercera es el terreno donde se emplaza el contenedor. En un periodo máximo de 300 años, lo que supone diez veces los periodos de semidesintegración de los radioisótopos más duraderos, reducirán su concentración hasta valores mil veces inferiores a las iniciales. Este tipo de aislamiento sólo se utiliza en los residuos de media y baja actividad [1].



Figura 5. *Diseño de las barreras de almacenamiento de residuos de baja y media actividad*

1.5.5. Almacenamiento de residuos de alta actividad

Los residuos de alta actividad, como se ha comentado antes, suponen el 85% del total de los residuos radiactivos producidos en España y son los restos del combustible gastado en las centrales nucleares.

Estos residuos deben incorporarse en una matriz sólida y dejarlos enfriar durante un tiempo hasta que son llevados a su depósito definitivo. Éste consiste en introducirlos en formaciones geológicas estables a gran profundidad para evitar dañar a los ecosistemas en caso de accidente o dispersión de los residuos (Figura 6).

Las formaciones geológicas aceptadas para el almacenamiento de este tipo de residuos son el granito, la cal y las arcillas, aunque también se podría considerar el depositarlos en formaciones de esquistos, margas arcillosas, tobas volcánicas y formaciones basálticas [1-2].



Figura 6. Almacenamiento geológico profundo

1.5.6. Datos operativos y radiológicos de El Cabril

Los datos operativos de los que se dispone de la gestión realizada en El Cabril, desde el 1 de enero 1986 hasta la última actualización de ENRESA del 31 de diciembre de 2010 (25 años), son los siguientes [1]:

- Ha recibido 31.764,14 m³de residuos radiactivos de baja y media actividad
- La ocupación es del 63.68%
- En 2008 se construyó una instalación específica para residuos de muy baja actividad, estando ocupada un 5.42% en 2 años
- No hay influencia radiológica en la instalación
- Existe una recogida de muestras anual de agua, aire, suelo, alimentos, caza, pesca y vegetación para vigilar los niveles de radioactividad ambiental

1.5.7. Almacenamiento en piscinas

Se utiliza para residuos de baja y media actividad en la propia central. Se utiliza agua por sus características, principalmente su alto coeficiente de transmisión del calor, su transparencia y bajo coste.

Las piscinas se construyen de acero revestido de hormigón armado, tienen entre 10 y 13 metros y presentan detectores de fugas y sistemas de refrigeración y de purificación (Figura 7) [1-2].



Figura 7. Piscinas de almacenamiento

1.5.8. El Almacén Temporal Centralizado (ATC) en España

Es una instalación creada para guardar todo el combustible de alta actividad gastado en las centrales nucleares. Se caracteriza por guardar los residuos en seco durante al menos 60 años para su posterior gestión. Se creó con la intención de optimizar los recursos y centraliza todos los residuos, facilitando su gestión y maximizando la seguridad [1].

1.5.9. Procedimientos de gestión emergentes

Aparte de las técnicas tradicionales de estabilización / solidificación para la gestión de residuos radiactivos, están apareciendo y desarrollándose otro tipo de procesos, como son la transmutación y el amplificador de energía. Estos procesos consisten en el bombardeo neutrónico a los productos de fisión para transformarlos en otros isótopos, estos isótopos pueden ser radiactivos o no, en el caso de serlo, tienen periodos de semidesintegración más cortos que el original.

Para realizar la transmutación es necesario un flujo alto de neutrones con un espectro energético adecuado. También es necesario fabricar combustible o blancos, a partir de diferentes corrientes separadas en los procesos anteriores. Esto conlleva la construcción de instalaciones nucleares específicas donde realizar el proceso de transmutación.

Hasta ahora solo se han propuesto los reactores nucleares térmicos para llevar a cabo la transmutación, aunque se está considerando probarlo en los sistemas de aceleradores de partículas. El objetivo de éstas técnicas novedosas es el de reducir significativamente el volumen de residuos que hay que tratar posteriormente [2].

2. Procesos de inertización

2.1. Definición de estabilización/solidificación de residuos peligrosos

Según el documento “*Citizen’s Guide to Solidification/Stabilization*” de la Agencia de Protección Medioambiental (EPA), la estabilización/solidificación se refiere al grupo de métodos que evitan o reducen la liberación de contaminantes al suelo [19].

La estabilización utiliza distintos reactivos para reducir la peligrosidad del residuo, convirtiéndolo en un bloque para evitar el movimiento de contaminantes y su toxicidad.

Con la solidificación se consigue recubrir y encapsular el residuo en una matriz sólida para aumentar la resistencia y disminuir su comprensibilidad y permeabilidad. Para solidificar los residuos son necesarios los aglomerantes y los aditivos. Como aglomerantes se utilizan cementos, cal, hidróxido cálcico, yeso, puzolanas, polvo de hornos de cemento, cenizas volantes y escorias de combustión. Los aditivos se utilizan para potenciar las características de los aglomerantes, suelen ser materiales puzolánicos, cenizas volantes, polvo de silicatos, arcillas, gel de sílice, carbón activo, etc.

Los factores que se tienen en cuenta a la hora de seleccionar un tipo de proceso son: características del residuo, tipo de pretratamiento, destino final, requerimientos legales y aspectos económicos. En la Figura 8 se muestra un esquema del proceso seguido [2], [17], [20-21].

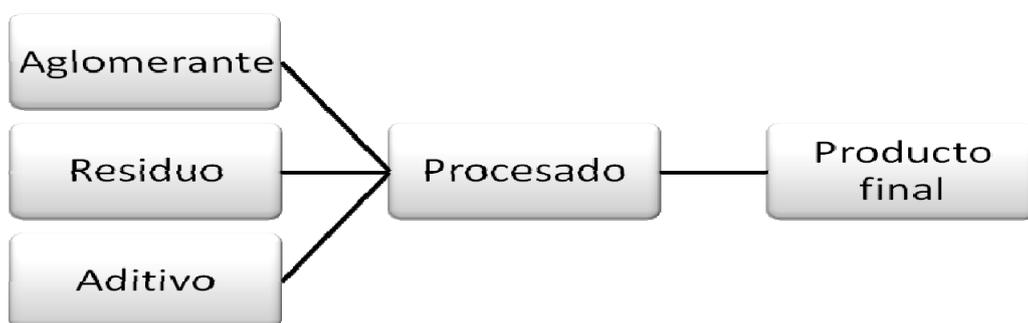


Figura 8. Diagrama de bloques del procedimiento de S/E

2.2. Clasificación de los procesos de estabilización/solidificación

Existen distintas clasificaciones para los procesos de estabilización/solidificación, los que se utilizan en el pretratamiento y acondicionamiento del residuo antes de su incorporación a la matriz estabilizadora suelen ser reacciones químicas consistentes en la neutralización de iones, formación de quelatos, reacciones redox, precipitaciones, formación de hidróxidos, silicatos o sulfatos. También se utiliza la absorción física o química y el intercambio iónico. Estas técnicas pretenden eliminar todo el contaminante que se puede transformándolo en compuestos menos o no peligrosos para su posterior tratamiento.

Tras este pretratamiento el residuo se puede mezclar con cemento, con polímeros orgánicos termoestables o con resinas plásticas. Los sistemas basados en cemento Portland, arcillas o cal son los más resistentes, la sílice presente en estos compuestos reacciona con el residuo y producen una matriz que puede ser cristalina o semicristalina de gran resistencia. Cuando se utilizan polímeros termoestables se forma un material polimérico y el uso de resinas es para cubrir el residuo con una cubierta inerte que cree una barrera física entre el residuo y el medio de deposición final.

Para finalizar el proceso de estabilización se puede inmovilizar el residuo con distintos métodos, algunos de ellos son la vitrificación, la encapsulación y la estructura en Ferrito, ésta última sólo se utiliza para metales pesados, las dos primeras son válidas para todo tipo de residuos. La vitrificación se produce cuando los residuos se mezclan con sílice, luego se someten a altas temperaturas y más tarde se dejan enfriar hasta que se consigue la apariencia de un sólido cristalino. La encapsulación consiste en recubrir o cercar una partícula tóxica o un residuo aglomerado con una nueva sustancia. Se puede diferenciar entre microencapsulación cuando son partículas individuales y macroencapsulación cuando se recubre con una capa impermeable una aglomeración de residuos o materiales microencapsulados [2], [20-21].

2.3. Aplicación de estas técnicas a los residuos peligrosos

De todos los sistemas de estabilización / solidificación definidos anteriormente, a los residuos radiactivos se les pueden aplicar los basados en cemento y en cal, en solidificación termoplástica y en polímeros orgánicos. En la Tabla 1 se van a describir cuales son las principales ventajas y desventajas de cada uno de estos sistemas [2].

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los procesos de E/S

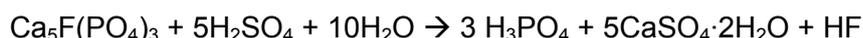
PROCESOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Basados en cemento	<ul style="list-style-type: none"> - Aditivos baratos. - Equipos sencillos. - La fuerza y permeabilidad del producto final se controla con la cantidad de cemento 	<ul style="list-style-type: none"> - Mezclas cemento-residuo vulnerables a ácidos.

	añadida. - Gran desarrollo de las técnicas de manejo.	
Basados en cal	- Aditivos baratos. - Equipos sencillos. - Reacciones cal/puzolanas conocidas.	- Aumento del peso final. - Problemas de fraguado por los contaminantes inorgánicos del agua.
Solidificación termoplástica	- Producto final resistente a soluciones líquidas. - Buena adherencia entre los materiales termoplásticos y el residuo. - Pocos lixiviados.	- Equipos caros. - Necesidad de mano de obra cualificada. - Los materiales termoplásticos son inflamables.
Polímeros orgánicos	- Se necesita poco aditivo. - El producto final tiene poca densidad comparado con otras técnicas de S/E.	- Algunos polímeros son biodegradables. - Es necesaria la colocación en contenedores tras el proceso.

En la gestión de los residuos radiactivos por parte de ENRESA, sobre todo el combustible gastado, se utilizan algunas de las técnicas anteriores. Lo más común es inertizar el residuo en una mezcla de cemento para posteriormente depositarlo en bidones. Estos bidones se almacenan en contenedores de hormigón que una vez llenos se inmovilizará con mortero. Los contenedores se depositan a continuación en celdas impermeabilizadas construidas en el entorno.

3. Los fosfoyesos: estudio bibliográfico

Los fosfoyesos se obtienen mayoritariamente como subproducto tras la obtención del ácido fosfórico por la acidificación de la roca fosfatada con al menos un 70% de contenido en sulfúrico según la siguiente reacción:



La cantidad de fosfoyesos producida siempre es mayor que la del producto porque la proporción es de 5.5 toneladas de fosfoyeso por tonelada de ácido fosfórico (material seco) [22].

Como cualquier residuo radiactivo, los fosfoyesos irradian radioactividad, siendo la principal la radiación gamma, sin embargo, también tienen elementos que irradian radioactividad alfa que puede lixivarse y bioacumularse en plantas y animales, así como

en el ser humano; los materiales que se pueden lixiviar son el polonio y el uranio y es necesario controlar las concentraciones presentes en la vegetación cercana al depósito de fosfoyesos para evitar la contaminación radiológica [23].

Las propiedades del fosfoyeso dependen de la naturaleza del fosfato usado, del tipo de proceso de humidificación, la eficiencia de la planta y la localización del lugar donde se deposita. El fosfoyeso es un material que se presenta en forma de polvo compuesto mayormente por sulfato de calcio dihidratado y fluorosilicato de sodio. Morfológicamente, el fosfoyeso tiene una estructura cristalina, romboide y hexagonal, repartidas de forma homogénea; además puede presentar trazas de otros metales, según la zona en la que se produzca.

Existen muchos estudios de cómo eliminar los elementos radiactivos de los fosfoyesos mediante técnicas de fitorremediación. Éstas consisten en la implantación de vegetación especializada en incorporar materiales pesados a su organismo y sintetizarlos para eliminarlos del suelo.

La gestión de los fosfoyesos es un problema a nivel mundial ya que sólo el 15% se recicla, el restante se mantiene almacenado cerca de su origen ocasionando daños en el entorno. Diversos estudios muestran que el polonio y el radio son susceptibles de inhalarse cuando se encuentran en la atmósfera. Existen distintos métodos utilizados para reducir la radioactividad de los fosfoyesos. Los métodos físicos o químicos pueden ser por ejemplo la mezcla del fosfoyeso con ácido cítrico acuoso en una concentración del 3-4%; otro método es la purificación con agua en proporción 1:3 para eliminar impurezas o su incorporación en la producción de cementos usando aditivos estabilizantes ácidos y básicos. También es posible aplicar los fosfoyesos a la industria constructiva y a la industria cementera, en la primera se expone el fosfoyeso a elevadas temperaturas para producir anhídrido que se usará posteriormente como aditivo. En la fabricación de cementos se añade en la fabricación del cemento Portland para mejorar sus propiedades físicas de resistencia [22].

La producción mundial anual de fosfoyesos está sobre las $200-280 \cdot 10^6$ toneladas, debido a las implicaciones negativas del almacenamiento en los ecosistemas de este producto es necesario una valorización y reciclado del material para evitar los impactos ambientales. Como alternativa al reciclado se pueden utilizar los fosfoyesos como fertilizantes en agricultura, enmiendas para suelos y como aditivo estabilizador en la fabricación de cementos.

Como alternativa al reciclado se propone la estabilización del fosfoyeso en un polímero de azufre, que tiene una alta resistencia a la corrosión. Nos centraremos en esta técnica para desarrollar su procedimiento a partir de los experimentos realizados en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) en conjunto con la Universidad de Huelva [24].

El azufre presenta dos formas según a la temperatura a la que se encuentre, la forma ortorrómbica es estable a 96°C y la monoclinica a temperatura ambiente. Para conseguir un polímero de azufre es necesario añadirle como aditivo polifenol al azufre elemental, que aumente su resistencia, lo que da como resultado un cemento polimerizado de azufre (SPC), y es este material el que se utiliza para microencapsular el fosfoyeso.

Las proporciones de elementos del SPC se señalan en la siguiente tabla (Tabla 2) y para comprobar la efectividad de esta técnica, se utilizaron dos muestras, una con fosfoyesos y otra sin ellos. La microencapsulación se realiza mezclando fosfoyeso con SPC a una temperatura de 130°C durante 4 horas para después subir hasta 140°C durante unos minutos y asegurar así la correcta adhesión entre el SPC y el fosfoyeso. Después se introduce la mezcla en un molde y se deja enfriar. En el estudio se realizaron 5 mezclas con diferentes proporciones de fosfoyeso para comprobar cuánto es posible estabilizar con la misma cantidad de SPC.

Tabla 2. Proporción de los elementos en las muestras

Samples	Elementalsulfur	Gravel	Sand	Phosphogypsum	Modified sulfur STX	Ratio sulfur/PG
SPC-21 (reference)	21.00	23.10	46.14	0	2.10	0.70
SPC-17-10	17.00	23.77	47.53	10.00	1.70	1.70
SPC-19-20	19.00	19.70	39.40	20.00	1.90	0.95
SPC-21-30	21.00	15.63	31.27	30.00	2.10	0.70
SPC-26-40	26.00	10.47	20.93	40.00	2.60	0.65
SPC-30-50	30.00	5.67	11.33	50.00	3.00	0.60

Respecto a la concentración de radionucleidos, se observó que la mayor actividad radiactiva era la del Radio y la de sus productos de semidesintegración, tras ellos, se encuentra el Uranio, esto se muestra en la Tabla 3. En la Figura 9 se observa la dependencia lineal entre la concentración de Radio respecto al porcentaje de fosfoyeso añadido. Tras medir la radiactividad de las muestras microencapsuladas se observó que la más efectiva para reducir la radioactividad emitida de los fosfoyesos encapsulados es la que contiene fosfoyeso y SPC a partes iguales.

Tabla 3. Concentración de radionucleidos en las muestras

Code	SPC-21	SPC-17-10	SPC-19-20	SPC-21-30	SPC-26-40	SPC-30-50	PG
% PG	0	10	20	30	40	50	100
²¹⁰ Pb	8.0 ± 0.6	70 ± 5.0	143 ± 9.0	219 ± 13.0	264 ± 16.0	340 ± 20.0	624 ± 37.0
²³⁸ U(²³⁴ Th)	12 ± 2.0	21 ± 2.0	12 ± 2.0	38 ± 3.0	50 ± 4.0	60 ± 4.0	97 ± 6.0
²³² Th(²¹² Pb)	9.1 ± 0.6	9.4 ± 0.7	8.6 ± 0.6	8.1 ± 0.5	5.9 ± 0.4	5.8 ± 0.4	8.2 ± 1.0
²²⁶ Ra	7.4 ± 0.5	63 ± 4.0	115 ± 7.0	179 ± 11.0	226 ± 13.0	282 ± 17	589 ± 34.0
²²⁸ Th	8.8 ± 0.8	8.7 ± 0.7	<6	6.8 ± 0.7	7.3 ± 0.6	6.1 ± 0.6	7.8 ± 0.7
²²⁸ Ra(²²⁸ Ac)	8.2 ± 0.8	8.6 ± 0.8	8.8 ± 0.8	6.9 ± 0.7	<4	<4	8 ± 1.0
⁴⁰ K	580 ± 30.0	528 ± 32.0	394 ± 24.0	347 ± 21	239 ± 15.0	143 ± 10.0	<18

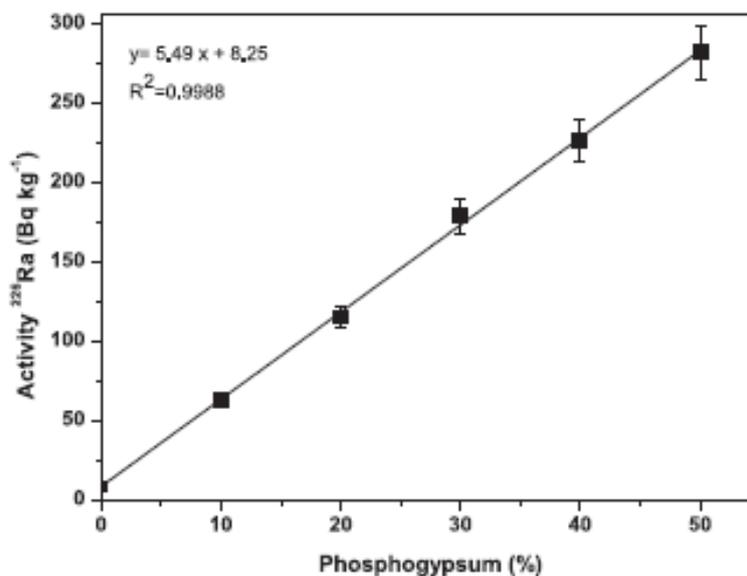


Figura 9. Variación de la concentración de Radio según el contenido en fosfoyeso

La estabilización y solidificación de los fosfoyesos que presentan una radioactividad baja usando SPC en proporción 50% - 50% reduce significativamente el impacto negativo del depósito de fosfoyesos, lo que disminuye la contaminación. Esta mezcla de SPC-fosfoyesos se puede utilizar también como cemento ya que tiene buenas propiedades mecánicas y las concentraciones de radionucleidos están dentro de las aceptadas para los materiales de construcción (370 Bq/kg) [24].

Como ejemplo tomaremos el depósito de fosfoyesos en la zona de Huelva. Todo el fosfoyeso producido en la zona de Huelva, se lleva acumulando más de 40 años en pilas cerca de un ecosistema acuático. Según muchos estudios, este fosfoyeso acumulado no es susceptible de dañar los ecosistemas ni las poblaciones locales con radiación, sin embargo, sí podría suponer un riesgo para los trabajadores de la planta.

El polígono industrial que produce este subproducto está situado cerca del estuario formado por los ríos Tinto y Odiel, depositándose los fosfoyesos en esta zona (Figura 10). El riesgo radiactivo de los fosfoyesos radica en la alta actividad del ²²⁶Ra que acaba desintegrándose en ²²²Rn [8].

En esta zona se ha utilizado como método para tratar la contaminación de fosfoyesos y disminuir así la concentración de radionucleidos la desorción para eliminar el Radio. Sin embargo, diversos estudios muestran que es posible la limpieza natural de la zona ayudándose sólo de medios físicos como es la dilución de los fosfoyesos antes de sedimentarlos [25].

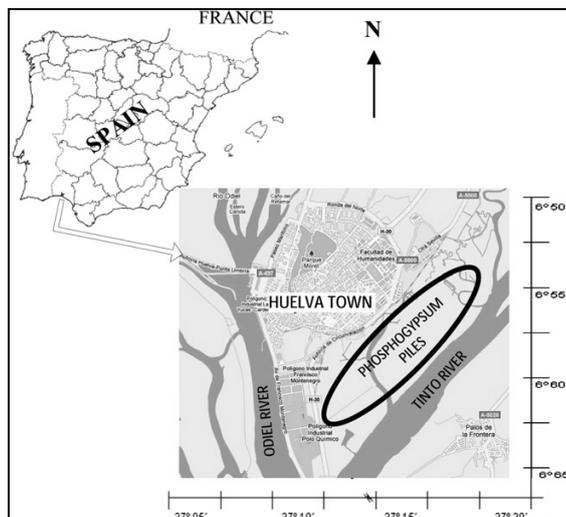


Figura 10. Localización de los fosfoyesos en Huelva

La encapsulación de los fosfoyesos es una buena técnica basada en la mezcla de los residuos con cemento para luego aislarlos en bidones sellados que impidan cualquier lixiviado de material radiactivo y proporcionar una barrera segura entre el residuo y su destino final.

En la actualidad la fracción orgánica de residuos de procedencia domiciliar e industrial representa un porcentaje elevado, del 40 al 70%, variando su cantidad y composición en función del nivel de desarrollo de cada país. En concreto, más de la mitad de la fracción orgánica de los residuos municipales va a vertedero, únicamente el 19% se recoge separadamente y se obtiene un compost de calidad, por lo tanto, la fracción que se recoge mezclada sin separación selectiva y se procesa en plantas da como resultado un producto denominado “material bioestabilizado” que prácticamente no se puede utilizar en la agricultura y no posee salida comercial.

La presencia de residuos orgánicos en vertederos tiene efectos muy negativos en el medio ambiente, tales como emisiones de metano, lixiviados y olores, por ello, desde la normativa ambiental se ha definido el concepto de biorresiduo y la necesidad de realizar una gestión ambiental adecuada.

En este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica para abordar el estudio de los residuos orgánicos o biorresiduos. En un principio se han estudiado aquellos de ámbito domiciliario o comerciales asimilables a éstos, aunque los de origen industrial también pueden ser aprovechados de forma similar. Inicialmente se realizó una búsqueda bibliográfica analizando el concepto de biorresiduo, que no aparece en instituciones oficiales como la RAE. Además se recopiló información sobre el origen y generación, así como de las cantidades producidas y la gestión de los mismos, estudiando la problemática ambiental asociada a una incorrecta gestión. Finalmente, a modo de ejemplo se muestran diferentes tipos de tratamientos que pueden ser de utilidad para aprovechar el potencial de los mismos, por su alto contenido en carbono, o para realizar un aprovechamiento energético o valorización.

Conclusiones

- Del estudio bibliográfico realizado se ha detectado que en el campo de la sanidad los residuos radiactivos se generan como consecuencia de los tratamientos derivados de la Medicina Nuclear, como son la Radioterapia y la Radiología. Los residuos suelen ser fuentes encapsuladas con una vida corta que pueden ser gestionadas en el mismo centro. Los procedentes de los laboratorios dedicados a la investigación suponen un volumen menor y asimismo, se pueden gestionar en el centro productor. Se ha comprobado que el sector industrial es el que genera un mayor porcentaje de residuos radiactivos, y su principal problemática ambiental radica en que se suelen depositar en los ecosistemas al no emitir una radiación alta.
- Al estudiar la información disponible sobre las formas de tratamiento y gestión de los residuos radiactivos se ha comprobado que todos los residuos que no se generan a partir del combustible nuclear gastado son susceptibles de gestionarse en el mismo centro, pero es necesario una estabilización de los mismos para evitar fugas y una posterior solidificación y encapsulación para obtener un aislamiento total del residuo con el medio.
- Dentro de las numerosas técnicas estudiadas de estabilización / solidificación de residuos peligrosos, se ha detectado que las que más se adecúan a la gestión de los residuos radiactivos son las basadas en cementos y otros materiales inertes ya que no se degradan con el paso del tiempo (como ocurre en las poliméricas) y ofrecen una mayor resistencia y estabilidad a los residuos tratados con estos procedimientos.
- El caso de estudio seleccionado ha sido la producción de fosfoyesos y tras la recopilación bibliográfica del tema se ha determinado que la encapsulación en cemento es la mejor técnica de estabilización / solidificación aplicable a este tipo de residuo debido al gran volumen que se genera en la industria para la obtención del ácido sulfúrico y su problemática de depósito en ecosistemas viables.

Agradecimientos

M.D. Murcia fue beneficiaria de la beca Juan de la Cierva de MICINN.

4. Bibliografía

- [1] <http://www.enresa.es/>. Accedido en Marzo de 2014.
- [2] <http://www.foronuclear.org/>. Accedido en Marzo de 2014
- [3] Irabien A., Rodríguez J.J. (1999). Los residuos peligrosos: caracterización, tratamiento y gestión. Madrid: Síntesis.
- [4] <http://www.minetur.gob.es/>. Accedido en Abril de 2014
- [5] Tobarra González B. (2000). Gestión interna de Residuos Sanitarios: Gestión de residuos radiactivos. Gestión de residuos e higiene de centros sanitarios: libro de ponencias / III Jornadas Nacionales sobre Avances en Medicina Preventiva, 4 y 5 de mayo de 2000. (2000). Murcia : s.n. pp 103-110
- [6] López Iturrate J., Javier Aguirre Orcajo, J., Pilar Olivas Hernández, P. (1994) *Residuos sanitarios*. Vitoria-Gasteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 1ª edición.
- [7] *Manual de gestión interna para residuos de centros sanitarios.* (1992). Madrid: Instituto Nacional de la Salud. 2ª edición.
- [8] Dueñas C., Cañete S., Fernández M.C., Pérez M. 2010. Radiological impacts of natural radioactivity from phosphogypsum piles in Huelva (Spain). *Radiation Measurement* nº 45: pp 242-246.
- [9] http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull031/Spanish/0310510192_2_es.pdf. Accedido en Mayo de 2014
- [10] http://sociedadnuclear.org.mx/wp-content/uploads/2012/02/tema-7_16feb2012.pdf. Accedido en Mayo de 2014.
- [11] García Alvarez A., Ibáñez Martí J. J., Pérez-González A. (1993) Centrales nucleares e impacto ambiental en el medio edáfico. *Ecología* nº7, pp 19-25, ICONA
- [12] <http://www.juntadeandalucia.es/>. Accedido en Mayo de 2014
- [13] <http://www.textoscientificos.com/fisica/radiactividad/riesgos-medioambientales>. Accedido en Mayo de 2014
- [14] <http://www.boe.es> Accedido en Abril de 2014
- [15] <http://noticias.juridicas.com> Accedido en Abril de 2014
- [16] http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/. Accedido en Abril de 2014.
- [17] Curso de supervisores de instalaciones radiactivas (IR) del Consejo de Seguridad Nuclear. Accedido en Mayo de 2014. Disponible en :

http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/995299789_1572009114211.pdf

- [18] Guía de seguridad No. WS-G-2.7: Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente. Gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación.
- [19] *Citizen's Guide to Solidification/Stabilization*. Agencia de Protección Medioambiental. Accedido en Marzo de 2014. Disponible en: http://www.epa.gov/superfund/action/spanish/pdfs/es_solid_stab.pdf
- [20] Jesús Rosario Ortiz Mejía J.R. (2004). *Estudio de la estabilización y solidificación de metales pesados mediante la técnica de cementación*. Universidad de México. Accedido en Marzo de 2014. Disponible en : http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/ortiz_m_jr/capitulo4.pdf
- [21] Díaz Blanco M. J. *Técnicas de tratamiento de la contaminación ambiental*. Universidad de Huelva. Accedido en Marzo de 2014. Disponible en: <http://www.uhu.es/sevirtual/ocw/politecnico/tecnicas-tratamientocontaminacion/material/006.pdf>
- [22] Alguacil F.J., Choura M., López F.A., López-Delgado A., Tayibi H. (2009) Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management* n° 90 pp 2377-2386
- [23] Boryło A., Skwarzec B., Olszewski G. *The radiochemical contamination (²¹⁰Po and ²³⁸U) of zone around phosphogypsum waste heap in Wiślinka (northern Poland)*. EDP Sciences (2013)
- [24] Alguacil F.J., Bolívar J.P., García-Díaz, I., Gázquez M., López F.A., López-Coto I. (2011). Microencapsulation of phosphogypsum into a sulfur polymer matrix: Physico-chemical and radiological characterization. *Journal of Hazardous Materials* n° 192 pp 234-245.
- [25] García-Tenorio R., Hurtado S., Manjón G., Mantero J., Mosqueda F., Vaca F., Villa M. (2009). Contamination and restoration of an estuary affected by phosphogypsum releases. *Science of the Total Environment* n°408 pp 69-77.