

MÓDULO 12:

TÉCNICAS DE RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS

- 12.1 LUCHA CONTRA INCENDIOS Y SERVICIOS DE RESCATE**
- 12.2 SEGUIMIENTO Y CONTROL DE ÁREAS AFECTADAS**
- 12.3 CONFINAMIENTO Y EVACUACIÓN PARA EL PÚBLICO EN GENERAL**
- 12.4 APLICACIÓN DE PROFILÁXIS DE IODO ESTABLE, CONTROL DE ALIMENTOS ALIMENTICIOS Y AGUA POTABLE**
- 12.5 DESCONTAMINACIÓN Y ELIMINACIÓN DE DESHECHOS**

Profesor: D. Agustín Herrero Ordejón

PROINSA

12.1 LUCHA CONTRA INCENDIOS Y SERVICIOS DE RESCATE

Objetivos

El personal al que está dirigido este tema es, en primer lugar, el personal de respuesta ante emergencias y en segundo lugar, el personal médico y a los especialistas de laboratorio. El tema ofrece una visión general sobre la protección contra incendios en el interior del emplazamiento y proporciona instrucciones sobre lucha contra incendios, búsqueda y salvamento de personas y protección ante otros desastres. Se incluyen instrucciones para trabajar en un ambiente radiológicamente contaminado.

Contenidos

- Visión general de la protección contra incendios en centrales nucleares
- Requisitos generales de la planificación dentro del emplazamiento
- Entrenamiento del personal de extinción de incendios y rescate fuera del emplazamiento
- Coordinación entre servicios de rescate y extinción de incendios propios de la instalación y externos a la misma.

12.1.1. VISIÓN GENERAL DE LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN CENTRALES NUCLEARES

En relación a la seguridad de las centrales nucleares, el fuego es considerado como un peligro capaz de ser el origen de un modo de fallo de causa común, contra el que deben existir adecuados sistemas de seguridad y medidas de mitigación.

Los requisitos de diseño de seguridad generales de la planta en cuanto a los sistemas de seguridad y otros temas importantes para la misma deben ser tales que se disponga de medios para:

- Realizar la **parada segura** del reactor y mantenerlo en condiciones de parada segura tanto en operación normal y durante y después de que se produzcan condiciones de accidente.
- **Eliminar el calor residual** del núcleo del reactor después de la parada, incluso en condiciones de accidente.
- **Minimizar** el material radiactivo y garantizar que las emisiones están por debajo de los límites establecidos legales en condiciones de operación normal, y por debajo de límites aceptables en condiciones de accidente.

Para garantizar la protección contra incendios en una central nuclear, se aplicará un nivel adecuado de "defensa en profundidad". Los tres principales objetivos de la defensa en profundidad aplicada al riesgo de incendio son:

- la prevención de incendios,
- la detección y extinción de los incendios que se produzcan, y
- la prevención de la propagación de los incendios que no se hayan extinguido.

12.1.2. REQUISITOS GENERALES DE LA PLANIFICACIÓN DENTRO DEL EMPLAZAMIENTO

El titular debe definir por escrito la responsabilidad y las tareas de todo el personal que interviene en las actividades de prevención y en las medidas de mitigación de las consecuencias de un incendio.

Debe establecerse un retén permanente contra incendios que asegure la efectividad continua del equipamiento de protección contra incendios. La responsabilidad de la coordinación de las actividades contra incendios deberá estar asignada al jefe de bomberos de la central nuclear o a otro trabajador de alto nivel. Dicho coordinador de protección contra incendios que se designe debe informar directamente a la dirección de la instalación.

Ya en el diseño de las centrales nucleares se debe hacer todo lo posible para minimizar su riesgo de incendio. El equipamiento de protección contra incendios se centra en la prevención de los mismos mediante técnicas constructivas y en la automatización de los sistemas de detección y de alarma y de extinción de incendios. Estos sistemas de prevención deben complementarse con una unidad de lucha contraincendios en el propio emplazamiento, que normalmente forma parte de la organización de operación de la central nuclear.

La estructura de la organización de protección contra incendios dependerá de hasta que punto las actividades de protección contra incendios estén desarrolladas por un departamento dedicado exclusivamente a ello.

En los países de Europa Occidental el requisito mínimo normalmente es tener una unidad básica de salvamento en la organización del emplazamiento. Una unidad básica de rescate y contraincendios puede ser, por ejemplo, 1 + 5 (jefe de unidad + un mecánico y dos parejas de bomberos). En una emergencia real, esta unidad se complementará con personal procedente de diferentes grupos de la organización de emergencia de la central. En España, una brigada contra incendios está formada también por un jefe de brigada y unos 4 bomberos profesionales, asistidos por un experto en PCI.

Las tareas de la unidad de lucha contra incendios de la central son el rescate, la extinción de incendios y asegurar el funcionamiento de los sistemas pasivos.

El equipamiento y cualificación del personal de esta unidad de lucha contra incendios debe tener un alto nivel. El resto del personal de la organización que complementa el trabajo de esta unidad de la central deberá tener, al menos la misma cualificación de un bombero voluntario o a tiempo parcial, y la mayor parte del personal de apoyo

deberá disponer de cualificación acreditada como bombero. Es deseable que los bomberos locales certifiquen la competencia de estos componentes de la unidad contra incendios de la central.

Se deben realizar regularmente entrenamientos y ejercicios con fuego, y mantener registro del temario impartido o alcance de los ejercicios. Además, el personal de los turnos de operación deberá recibir un entrenamiento básico inicial en extinción así como un reentrenamiento periódico posterior.

12.1.3. ENTRENAMIENTO DE LOS SERVICIOS EXTERNOS DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS Y RESCATE

No existen recomendaciones internacionales unificadas que indiquen el nivel de preparación que han de tener los servicios de bomberos de las zonas cercanas a las centrales nucleares. La cantidad de personal y los tiempos de respuesta será tal que permita llevar a cabo con éxito la lucha contra incendios y los servicios de rescate necesarios para gestionar y contener el riesgo causado por el accidente.

El tiempo disponible desde el comienzo del accidente hasta que se produzca una potencial emisión de gran magnitud es del orden de unas pocas horas (el accidente de Chernóbil fue una notable excepción a esta regla). Gracias a los sistemas de mitigación de accidentes, este tiempo será probablemente mayor, las autoridades competentes necesitan asumir el tiempo mínimo como base de planificación.

Es importante considerar los sistemas de prevención y extinción de incendios disponibles para fijar los requisitos de preparación de las brigadas de bomberos externas a la central.

Disponiéndose de una unidad de bomberos en el emplazamiento y habiéndose cumplido estrictamente los requisitos de seguridad en relación a la prevención de incendios en la construcción de la central, el tiempo de respuesta del contingente inicial de lucha contra incendios podría fijarse en unos 30 minutos.

Los bomberos locales de la zona deben disponer de recursos suficientes para el envío de un contingente inicial básico, consistente por ejemplo, en un director de operaciones y en tres unidades de contraincendios y rescate. Debe tenerse planificado el envío de una dotación regional mayor (de aproximadamente tres veces la dotación local básica). El tiempo de respuesta de la dotación regional sería deseable que fuera menor a 60 minutos.

Es muy importante que el director de la emergencia sepa en todo momento la evolución del impacto del incidente en el entorno para tomar decisiones importantes para la población. Para ello, además de las instalaciones fijas, debe existir una o varias unidades de vigilancia compuestas por bomberos especializados que estén preparadas para iniciar las operaciones de muestreo y vigilancia de la contaminación al mismo tiempo en que actúan las unidades de extinción de incendios, y para proporcionar información al Director de Emergencia.

12.1.4. COORDINACIÓN ENTRE SERVICIOS DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS LOCALES Y LOS PROPIOS DE LA INSTALACIÓN

Responsabilidades del titular de la planta y del director de las operaciones de rescate

Los planes de emergencia interior y exterior deben garantizar la cooperación entre las autoridades externas a la instalación y la organización interior de respuesta en emergencia. La mejor manera de conseguir esta cooperación es mantener un canal de consultas y asesoramiento para todas las cuestiones relativas a la protección contra incendios, incluso en operación normal.

En caso de emergencia, la línea de mando no debe plantear ninguna duda. El director de emergencia de la central, al comienzo del accidente, será la autoridad que dirija la lucha contra incendios y las operaciones de rescate dentro del emplazamiento (los terrenos propiedad de la central nuclear). Cuando llegue el director de las operaciones de rescate de la organización externa, lo preferible es que tuviera autoridad legal para dirigir las operaciones. En lo relacionado a la seguridad nuclear y a la protección radiológica, en el emplazamiento, la autoridad para la toma de decisiones seguirá siendo en todo momento el director de la emergencia interior.

A la hora de llevar a cabo la aplicación de acciones protectoras fuera del emplazamiento la situación legal preferible es que el director de la emergencia exterior (Delegado del Gobierno, de la Comunidad Autónoma) no se vea limitado por fronteras administrativas. Las autoridades autonómicas y nacionales deben garantizar la cooperación en el uso de los recursos.

Lucha contra incendios y técnicas de rescate en campos de radiación y áreas contaminadas

Se tomarán las medidas apropiadas para proporcionar una protección adecuada al personal encargado de las operaciones de rescate en zonas con presencia de radiación o zonas contaminadas. El personal deberá estar entrenado y, en la medida de lo posible, haber previsto acciones en las que pudiera ser necesario llevar a cabo, actuaciones reales.

Se deben determinar y registrar las dosis recibidas por el personal que participa en las operaciones de emergencia. Cuando finalicen estas operaciones, se comunicará a los interesados la dosis recibida, y el consiguiente riesgo para su salud.

Los equipos modernos (casco, traje integral, botas de goma, guantes, dispositivos de respiración) utilizados por los bomberos proporcionan una protección adecuada contra la contaminación radiactiva. El personal de la planta deberá advertir a los bomberos sobre los lugares y los dispositivos que pueden provocar una alta exposición a la radiación. Deben señalizarse claramente las zonas y equipos que sean altamente radiactivos.

Las dotaciones que se ocupen de llevar a cabo la vigilancia radiológica ambiental durante un incidente, en caso de que tengan que permanecer durante un largo

periodo de tiempo en una zona altamente contaminada, tienen que estar provistos de vehículos adecuados (laboratorio móvil). Algunos países usan vehículos dotados de un sistema de sobrepresión respecto al exterior.

Límites de dosis en emergencia para el personal

Los niveles de dosis en emergencia son indicadores para asegurar la protección radiológica y facilitar el control radiológico del personal de intervención, en función de las tareas que tenga asignadas. El personal de salvamento que intervenga en el área afectada por una emergencia estará sometido, como el resto del personal de intervención, a **control dosimétrico** y a vigilancia sanitaria especial. El control dosimétrico se hará desde el momento en que comience su intervención y la vigilancia sanitaria especial se hará después de su intervención. Estas acciones se realizarán de acuerdo con los criterios específicos que establezcan respectivamente el CSN y las autoridades sanitarias.

El personal deberá ser informado sobre los riesgos de su intervención. El personal de intervención se clasificará, en función de las actuaciones que deba realizar, en los siguientes grupos:

a) Grupo 1.

El grupo 1 estará constituido por el personal que deba realizar acciones urgentes para salvar vidas, prevenir lesiones graves o para evitar un agravamiento de las consecuencias del accidente que pudieran ocasionar dosis considerables al público, en lugares en los que pudiera resultar irradiado o contaminado significativamente.

El director del PEN, asesorado por el CSN y el jefe del grupo radiológico, realizará todos los esfuerzos posibles para mantener las dosis de este personal por debajo del **umbral de aparición de efectos deterministas graves** para la salud, recogidos en la tabla 1:

Tabla 1. Umbrales de manifestación de efectos deterministas en caso de exposición aguda

Órgano o tejido	Dosis absorbida proyectada al órgano o tejido en menos de dos días (Gy)
Todo el organismo (médula ósea)	1
Pulmón	6
Piel	3
Tiroides	5
Cristalino	2
Gónadas	3

Con carácter excepcional y para salvar vidas humanas, se podrán superar estos valores. Estas personas podrían recibir dosis superiores a los límites de dosis individuales para trabajadores expuestos establecidos en el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, por lo que deberán ser voluntarios, y no podrán ser mujeres embarazadas.

b) Grupo 2.

El grupo 2 estará constituido por el personal involucrado en la aplicación de medidas de protección urgentes y otras actuaciones de emergencia.

El director del PEN, asesorado por el CSN y el Jefe del Grupo Radiológico, realizará todos los esfuerzos razonables para reducir la dosis a este personal por debajo del límite de dosis máximo anual para la exposición en un solo año, establecido en el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes en 50 mSv de dosis efectiva.

c) Grupo 3.

El grupo 3 estará constituido por el personal que realice operaciones de recuperación, una vez se haya controlado plenamente la situación tras el accidente y se hayan restablecido los servicios esenciales en la zona afectada.

Para proteger a este personal, se aplicará el sistema de protección radiológica asociado a las prácticas, y las dosis deberán mantenerse por debajo de los límites de dosis para los trabajadores expuestos establecidos en el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.

Entrenamiento y ejercicios

Es deseable que la organización contra incendios de la instalación y el servicio de bomberos exterior realicen ejercicios conjuntos, ya sea como una parte de un escenario accidental más extenso o con la finalidad específica de la práctica de las operaciones de rescate y extinción de incendios. Debe practicarse también la cooperación con otros parques de bomberos regionales.

Una forma eficaz de entrenamiento del personal contra incendios es realizar intercambios entre el personal exterior a la planta y los miembros de la plantilla. Otra práctica recomendable es que la central, solicite la presencia de bomberos externos para que participen en situaciones específicas de simulacro y así conozcan de primera mano las necesidades de la central en caso de incendio.

12.1.5. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe. Course Training Material.
2. Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra Radiaciones Ionizantes y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación. Safety Services Nº 115. OIEA, 1996.
3. Guía de seguridad 50-SG-D2 del OIEA. Protección contraincendios en centrales nucleares. 1992.
4. Borrador NS263 del OIEA. Protección contra incendios en la operación de una Central Nuclear.

12.2 VIGILANCIA Y CONTROL DE ÁREAS AFECTADAS

Objetivos

Este tema está dirigido, en primer lugar, al personal de respuesta en emergencias y en segundo lugar, al personal médico y a los técnicos de apoyo. Se ofrece una visión general de los objetivos y métodos de vigilancia y control de zonas afectadas en la fase temprana de contaminación ambiental.

Contenidos

- Equipos de vigilancia terrestres y marítimas
- Técnicas de vigilancia aéreas
- Vigilancia de la contaminación (cribado o triaje) de las personas que abandonan la zona afectada
- Vigilancia de la deposición y contaminación del suelo

12.2.1. INTRODUCCIÓN

La información relativa al nivel de contaminación puede obtenerse con simples monitores de tasa de dosis o con los más sofisticados equipos que representen en tiempo real mapas de contaminación y puedan transmitirlos a la dirección de la emergencia. En ambos casos debe asegurarse la calidad de los valores medidos.

Los estudios que se lleven a cabo posteriormente, mediante métodos específicos para la detección de radioisótopos de vida larga proporcionan estimaciones más exactas para la determinación de la dosis a largo plazo.

Como en todas las tareas relacionadas con emergencias, es esencial la formación avanzada en el uso de los equipos de medida. Junto a los equipos de medida monitores de tasa de dosis, dosímetros personales, etc, deben encontrarse los manuales y notas breves sobre su uso y mantenimiento. El personal de retén de los laboratorios debe disponer de manera inmediata de los dispositivos para la toma de muestras, así como de material para el embalaje y el registro de las muestras.

En el estudio de una zona contaminada, sin previo conocimiento de la extensión de la contaminación radiactiva, debe elaborarse un plan sistemático para la búsqueda de los puntos calientes (altas tasas de dosis) que se encuentren en la zona. Debe tenerse en cuenta la protección del personal que realiza la vigilancia y se debe informar al jefe de equipo antes de entrar en la zona afectada sobre el último pronóstico relativo al desarrollo de la situación.

Deben probarse los sistemas de comunicaciones entre el equipo encargado de la vigilancia radiológica y el equipo de gestión de la emergencia antes de entrar en la zona contaminada.

Los principios de protección radiológica que aplica al personal de vigilancia radiológica en emergencia son los mismos que aplican al resto del personal que participa en la emergencia. A lo largo de la fase aguda de la emergencia podrán clasificarse dentro del grupo 3 de los grupos de intervención, mientras que en la fase posterior a la emergencia sería deseable que se clasificaran como miembros del público.

12.2.2. EQUIPOS DE VIGILANCIA CON TERRESTRES Y MARÍTIMOS

Las redes nacionales y autonómicas de estaciones de medida de tasa de dosis pueden proporcionar una visión de conjunto de la situación radiológica. Sin embargo, ante un accidente esta información puede ser escasa.

Los grupos de vigilancia móviles se utilizan para completar los datos obtenidos en las estaciones fijas de medida. Por otra parte, un grupo dotado de instrumentación suficiente puede medir, además de la tasa de dosis externa, otras magnitudes que proporcionen información más detallada necesaria para evaluar la situación radiológica del área afectada, en particular, la concentración específica de radionucleidos en aire y depositados. También pueden recogerse muestras de alimentos, agua, vegetación y otras muestras ambientales y trasladarse a un laboratorio para un análisis más detallado.

A menos que el terreno sea abrupto y no haya carreteras suficientes, se pueden utilizar furgonetas para el transporte del personal y su equipamiento. Es conveniente que los vehículos que se utilicen como unidades móviles tengan las siguientes características por tener que permanecer en zonas contaminadas durante largos períodos de tiempo y para realizar todas las medias necesarias:

- Posibilidad de sobrepresurizar su interior mediante gas a presión.
- Instalación para protección respiratoria con conexiones en el interior y el exterior del vehículo.
- Compartimento de entrada / salida del vehículo aislado hacia el interior

El equipamiento del que debe disponer la unidad móvil debe incluir:

- Instrumentos de medida de radiación gamma y beta-gamma.
- Captadores de aire de alto volumen.
- Contenedores para toma de muestras de alimentos, agua, vegetación y otras muestras ambientales.
- Teléfonos móviles o equipos de comunicación por radio.
- Equipos de protección personal y dosímetros personales.

Los instrumentos de medida de radiación gamma incluirán equipos para la medida de tasa de dosis (radiómetro) y, si es posible, equipos para la identificación de radionucleidos (espectrómetro gamma). La tasa de dosis externa puede medirse utilizando dispositivos relativamente baratos y simples como un contador Geiger-Müller

(GM). Asimismo, también se utilizan normalmente cámaras de ionización para la medida de tasas de dosis gamma. Para la identificación de los radionucleidos se puede utilizar un espectrómetro de centelleo (con cristal de NaI (TI)) o con un detector de germanio (HPGe). Los espectrómetros de centelleo ofrecen una alta sensibilidad y, por lo tanto, son adecuados para labores de inspección de zonas. Los detectores de HPGe son menos sensibles pero ofrecen una resolución muchísimo mejor para la identificación de los distintos radionucleidos en función de sus energías específicas de emisión gamma.

En las primeras fases de un accidente, el mayor riesgo para la población generalmente es el causado por los halógenos gaseosos radiactivos (yodo) y por las partículas. La medida de la tasa de dosis externa no es un método sensible para evaluar la contaminación presente en el aire. El método cuantitativo y con la sensibilidad necesaria para la determinación de la concentración de radionucleidos en aire es la toma de muestras de partículas y/o radioyodos en aire a través de un filtro y/o cartucho de carbón, y el posterior análisis de esa muestra con un espectrómetro gamma de HPGe. Por lo general, las espectrometrías gamma se realizan en laboratorio, pero en una situación de emergencia puede no haber tiempo suficiente para el traslado de la muestra al laboratorio más cercano, por lo que, al menos uno de los grupos de vigilancia sería conveniente que estuviese equipado con un espectrómetro de HPGe con blindaje de plomo.

El detector de HPGe también se puede utilizar para la medida *in situ* de la concentración de radionucleidos en suspensión y presente en la deposición (húmeda o seca) reciente. Las determinaciones *in situ* proporcionan muchas ventajas en las primeras etapas de un accidente. De esta manera se detectan las concentraciones de actividad más elevadas de inmediato, se evitan problemas de muestreo y la medida en sí es fácil de realizar. En situaciones de emergencia grave, las tasas de conteo pueden ser muy altas, por lo que se consiguen precisiones estadísticas aceptables con periodos de medida muy cortos (incluso menores a 1 min.). El tiempo necesario para el análisis de un espectro puede limitar la velocidad de recogida de información. El análisis de los datos y la presentación de los informes pueden automatizarse con programas informáticos. Combinando el procesamiento automático de datos con una identificación geográfica automática del lugar de media, mediante un navegador GPS, hace que el sistema sea muy potente, permitiendo incluso la realización de medidas en continuo mientras el vehículo se desplaza siguiendo una ruta por la zona afectada.

Para poder realizar medidas *in situ* de la deposición, se necesita calibrar el equipo analizando previamente muestras de suelo de las zonas a vigilar, debiéndose registrar detalladamente toda la información sobre la muestra y el muestreo realizado. El dato más importante para poder calibrar el equipo en unidades de Bq/m² es la superficie de suelo a la que corresponde la muestra. Otros datos importantes que se deben registrar son la localización exacta del punto de muestreo, la profundidad de suelo muestreada, etc.. En el caso de que se analice la capa superior de la muestra por separado, es preferible fraccionar la muestra inmediatamente en el lugar del muestreo, a fin de evitar la mezcla de la muestra durante su traslado al laboratorio. En caso de que la contaminación se haya producido tiempo atrás, la calibración de un sistema de medida *in situ* debe considerar la distribución vertical de la contaminación

radiactiva en el suelo. Esta distribución puede determinarse dividiendo en capas las muestras de suelo según las distintas profundidades y analizándolas por separado.

Puede estudiarse la deposición radiactiva realizando únicamente análisis de muestras de suelo. Sin embargo, de esta manera el número de muestras necesarias para obtener una visión de conjunto sobre la deposición es muy alto, lo que daría lugar a numerosos análisis de laboratorio, que requerirían mucho tiempo.

En situaciones de emergencia, además de los datos específicos de cada radionucleido, también es relevante determinar la concentración de actividad beta total en aire. La concentración de actividad beta se puede medir con equipos sencillos. Es necesario un muestreador de aire y un contador beta. La sonda beta, normalmente un tubo Geiger equipado con una ventana fina, también es sensible a fotones X y γ . En la calibración y uso de estos equipos, se debe intentar diferenciar entre la actividad beta artificial y la natural (descendientes del Rn-222 y del Rn-220). La concentración de actividad beta de estos nucleidos en el aire es normalmente de 0,1 - 10 Bq/m³. Sin embargo, el corto periodo de semidesintegración de los descendientes del radón, de varios cuartos de hora o menos, hace posible estimar la actividad de los radionucleidos artificiales, de larga vida.

La transferencia de datos desde el grupo de vigilancia radiológica al centro de mando debe estar bien organizada. En una emergencia la comunicación de datos debe ser sencilla, fiable y sin ambigüedades.

Si la central nuclear se encuentra situada en la costa o cerca de una gran masa de agua, será necesario realizar medidas radiológicas en el agua, aunque el número de medidas puede ser bastante pequeño.

La dotación de equipos de medida radiológica y auxiliares a utilizar es la misma que la de los equipos terrestres. La embarcación que se utilice debe tener un equipo de navegación, preferentemente GPS, de manera que se pueda registrar la localización de los puntos de medida.

12.2.3. TÉCNICAS DE MEDIDA CON MEDIOS AEROTRANSPORTADOS

La medida de la contaminación radiactiva depositada en el suelo por medios aerotransportados es probable que sea más factible y útil en la fase intermedia de la emergencia que en la primera fase. Una vez que el penacho ha atravesado una zona, el riesgo de contaminación y el riesgo de encontrar repentinamente puntos con altas tasas de dosis se reducen en gran medida. Sin embargo, para medir niveles de radiactividad depositada se necesita instrumentación aerotransportada más sensible y sofisticada que los utilizados para el seguimiento del penacho.

Los sistemas de medida suelen utilizar detectores de NaI(Tl) de gran tamaño, que también proporcionan información acerca de los radionucleidos presentes en el material depositado. La técnica es útil para los estudios preliminares de las grandes áreas. En las zonas agrícolas, se necesitan estudios más detallados.

Cuando la deposición es reciente, de forma que pueden encontrarse decenas de productos de fisión con varios cientos de líneas de rayos gamma, la identificación de nucleidos y su estimación cuantitativa es extremadamente difícil con espectrómetros NaI(Tl) debido a su baja resolución en energía. Por este motivo, a la hora de planificar una emergencia, es fundamental contar con detectores HPGe. Los sistemas NaI (Tl) se pueden utilizar para elaborar un mapa radiológico de la deposición después de transcurridos 10-30 días, cuando los nucleidos de vida corta hayan decaído lo suficiente.

Para realizar la vigilancia de la contaminación superficial desde el aire, la altitud de vuelo más habitual es de 50-100 m y la separación entre pasadas aproximadamente 100-150 m.

Dependiendo de la velocidad de la aeronave, se deben utilizar tiempos de muestreo muy cortos, incluso de tan sólo unos segundos. Por lo tanto, el análisis de los datos debe estar automatizado y, preferiblemente, combinado con un sistema de posicionamiento geográfico mediante navegador GPS.

12.2.4. VIGILANCIA DE LAS PERSONAS QUE ABANDONAN LA ZONA AFECTADA

En caso de que el equipo de mando del CECOP (Centro de Cooperación Operativa) considere necesario vigilar la contaminación de las personas cuando salgan de la zona afectada, está planificado que la población evacuada sea dirigida a las Estaciones de Clasificación y Descontaminación (ECDs), que deberán disponer de las siguientes capacidades:

- Equipamiento para la vigilancia del tiroides, en las que se pueda estimar la dosis al tiroides con medidas de geometría constante.
- Equipamiento para la medida de contaminación, mediante el que se pueda determinar la contaminación superficial beta y gamma en la piel y la ropa.
- Unidad móvil de medida de contaminación de cuerpo entero para la determinación de la contaminación interna en los casos especiales en que sea necesario.

La vigilancia de tiroides se puede realizar con detectores portátiles de tasa de dosis calibrados para este fin. La sensibilidad necesaria para llevar a cabo un control rápido de la contaminación del tiroides debe ser de alrededor de 1 kBq de I-131. En una situación de emergencia, la demanda de estas determinaciones puede ser grande por lo que la realización de estas medidas debe descentralizarse. El grupo social del que debe realizarse un seguimiento preferente de la contaminación del tiroides son los niños debido a su mayor sensibilidad al cáncer de tiroides radioinducido. Los hospitales son posibles lugares en los que se puede hacer la vigilancia del tiroides por disponer de personal capacitado para ello. La calibración de los equipos debe encontrarse centralizada por razones de aseguramiento de la calidad. En los planes de emergencia exteriores de las centrales nucleares españolas no se prevé realizar la vigilancia específica del tiroides a la población potencialmente afectada mediante equipos portátiles.

Los contadores de cuerpo entero contienen uno o más detectores de centelleo o de germanio para la exploración del cuerpo en geometría longitudinal o de silla. Con

estos equipos puede estimarse aproximadamente la distribución de los radionucleidos en el cuerpo. Estos sistemas pueden encontrarse en instalaciones fijas de laboratorio o en unidades móviles. Se requieren pesados blindajes, siendo el equipo relativamente caro y requiriendo personal especializado.

La población potencialmente afectada, mediante medidas radiológicas rápidas de clasificación, puede ser dividida en grupos de acuerdo con la necesidad o no de un mayor análisis o intervención médica. Se debe minimizar la posibilidad de que se desprenda la contaminación superficial potencialmente presente en las personas, sobre todo durante su clasificación inicial, mediante la planificación cuidadosa de la Estación de Clasificación y Descontaminación (ECD).

Para diseñar la vigilancia de la contaminación de grandes grupos de personas deberá considerarse la composición de la deposición radiactiva. Si además de contaminación debida a partículas emisoras de radiación gamma pueden haber otros contaminantes, debe complementarse la vigilancia con análisis de las muestras de la excreción (para detectar la posible contaminación alfa).

Los procedimientos de medida deben tener en cuenta muchas variables, de forma que se obtenga el mayor beneficio posible de los medios disponibles en términos de identificación de las personas sometidas a mayor riesgo y de determinación de los niveles de dosis recibida en general por la población contaminada.

PRINCIPIOS GENERALES DE LA CLASIFICACIÓN DE PERSONAS – CRIBADO (TRIAJE)

En otro módulo se describe la organización del Grupo Sanitario en caso de emergencia nuclear. Es necesario subrayar que, teniendo en cuenta la naturaleza repentina e imprevisible del suceso, la movilidad y el desorden en la afluencia de personas afectadas, la disminución progresiva en la disponibilidad de materiales y personal especializado, la escasez de vehículos y la dificultad de su movimiento, para tratar a la mayor cantidad de gente posible es indispensable llevar a cabo un diagnóstico y clasificación: es necesario hacer un "cribado".

El cribado, entendido como una inmediata y rápida selección de las personas afectadas basada en la gravedad de sus lesiones y en los riesgos a los que estén expuestas, ha de concentrar los esfuerzos en las personas que tienen más probabilidad mejorar su estado gracias a una atención adecuada.

Cuando el número de personas afectadas sea muy alto, el número de instalaciones no será suficiente para todos, por lo que es necesario seleccionar a las personas afectadas que tienen mayor probabilidad de sobrevivir si son tratados.

El cribado tiene como objetivo especial identificar aquellos afectados por síndromes asociados a fenómenos tóxicos, daños en la piel y vías respiratorias provocados por incendios, fracturas y daños por golpes.

La responsabilidad de la clasificación de las personas afectadas recae también en el personal que participa en la emergencia interior. El personal interviniente tendrá en cuenta los principios de prioridad de las patologías traumático-quirúrgicas convencionales mencionados anteriormente.

El rescate y la estabilización de heridos siempre se realizarán antes de cualquier traslado. La descontaminación de heridas y de la piel se considera una operación que no puede ser aplazada en el tiempo.

Durante las operaciones de rescate y clasificación, es fundamental, cuando sea necesaria, la protección de la salud de los técnicos y del personal auxiliar: la protección de la piel y membranas mucosas con dispositivos impermeables, la protección respiratoria por máscaras adecuadas, etc.

En presencia de radioisótopos de yodo es necesario que el personal tome de yodo estable (IK) para profilaxis radiológica.

12.2.5. DETERMINACIÓN DE LA DEPOSICIÓN Y DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO MEDIANTE MUESTREO

Si se realiza un muestreo continuo de la deposición, los periodos de muestreo deberían acortarse, y siempre que sea posible, las frecuencias de muestreo de material depositado deben ser las mismas que las de las estaciones cercanas de muestreo de aire a nivel de suelo.

De esta forma, se pueden determinar las velocidades de deposición a partir de los resultados de las determinaciones, lo que es muy útil para la caracterización del proceso de deposición.

El principal objetivo de las redes de muestreo de material depositado es la estimación de la contaminación superficial del suelo específica de cada radionucleido. La resuspensión, días después del paso del penacho, es un fenómeno importante de redistribución de la contaminación radiactiva, que causa una nueva deposición del material. La intensidad de la resuspensión disminuye rápidamente, y está relacionada directamente con la proporción de la superficie del suelo de la zona que se encuentra descubierta y fácilmente desprendible.

Las medidas del material depositado pueden necesitar complementarse si la red de muestreo no es lo suficientemente densa. La recogida de depósito seco y húmedo tras el paso del penacho puede completarse con diferentes muestras ambientales. Dependiendo de la estación, se pueden muestrear cuantitativamente la vegetación superficial, el suelo o la nieve de un área de superficie conocida. Las capas de material recogido de la superficie del suelo deben ser de espesor suficiente para contener toda la radiactividad depositada. El comportamiento en la nieve depende de su contenido de agua, ya que cuanto más agua contenga, más profunda y rápidamente se desplazará el material depositado.

Para el estudio de la contaminación a nivel regional, a veces es conveniente realizar el muestreo de suelos. La elección de los puntos de muestreo es esencial, ya que las muestras deben ser representativas. Se deben evitar las laderas y los lugares de acumulación del agua de lluvia, y deben eliminarse las posibilidades de que se produzca contaminación cruzada entre las muestras con la aplicación de técnicas de muestreo cuidadosas.

En la vigilancia radiológica de la fase temprana de la emergencia, las muestras deben incluir tanto a la vegetación superficial como unos pocos centímetros de la superficie del suelo. Es necesario conocer el área muestreada en cada muestra, ya que las concentraciones de radionucleidos por sí solas son de difícil aplicación para la estimación de la contaminación del suelo, y conviene expresar los resultados en términos de contaminación por unidad de superficie.

La incertidumbre de la información sobre contaminación del suelo normalmente aumenta si no se dispone de personal capacitado para estudiar toda la zona afectada y para recoger las muestras. En cualquier caso, se deben proporcionar instrucciones escritas y formatos de recogida de datos de las muestras a todos los muestreadores. Debe de revisarse en cuanto sea posible la documentación para evitar que ésta sea insuficiente, antes de que la persona responsable haya perdido la información sobre la muestra.

12.2.6. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-site Emergency Management in Central Eastern Europe. Course Training Material.
2. Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra las Radiaciones Ionizantes y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación. Safety Series Nº 115. OIEA, 1996.
3. Técnicas y Toma de Decisiones en la Determinación de Consecuencias Exteriores de un Accidente en una Instalación Nuclear. Safety Series Nº 86. OIEA, 1987.
4. Vigilancia Rápida de Grandes Grupos de Personas Contaminadas como Consecuencia de un Accidente Radiológico. TECDOC-746. OIEA, 1994.

12.3 CONFINAMIENTO Y EVACUACIÓN DEL PÚBLICO EN GENERAL

Objetivos

El grupo principal al que va dirigida esta conferencia es, en primer lugar, el personal de respuesta en emergencia y, en segundo lugar, el personal médico y especialistas de laboratorio. Este texto ofrece orientación sobre la aplicación práctica de las medidas de protección consistentes en el refugio o confinamiento y la evacuación del público en general.

Contenidos

- Procedimientos de alerta e información a la población.
- Confinamiento en casas y otros edificios.
- Aplicación de la evacuación.
- Atención a los evacuados.

12.3.1. PROCEDIMIENTOS DE ALERTA E INFORMACIÓN A LA POBLACIÓN

El Director del Plan de Emergencia Exterior tiene la autoridad para declarar la situación de emergencia y para ordenar la alerta general de la población, así como para decidir qué instrucciones se han de dar al público. La alerta general se realiza utilizando los equipos de megafonía instalados en las poblaciones cercanas a las centrales nucleares, así como sirenas y equipos móviles de alerta.

La información a la población se divide en tres etapas distintas:

1. información preventiva, en la que se comuniquen los posibles riesgos, el procedimiento de comunicación de alarmas y las medidas de auto-protección a tomar en caso de emergencia;
2. información a suministrar durante el incidente tras activarse las alarmas. En caso de accidente es muy importante informar al público lo más rápidamente posible. En la mayoría de los países de Europa occidental la radio y la televisión son el medio más importante para transmitir instrucciones al público. El Director del Plan de Emergencia Exterior, a través del Gabinete de Información y Comunicación, transmitirá las instrucciones oficiales a las emisoras de radio de la zona. De este modo se garantizará que las instrucciones puedan llegar a la población a través de los medios de comunicación con un mínimo de demora.
3. información a proporcionar después del incidente sobre el nivel de contaminación, la posibilidad de que pueda retornar la población evacuada, etc.

Cuando se declara una emergencia en el exterior de la instalación, se deberá establecer un Control del Acceso a la zona inmediatamente afectada con el fin de

permitir la entrada sólo a las personas que se necesitan en el rescate y otros trabajos planificados.

12.3.2. CONFINAMIENTO EN CASAS Y OTROS EDIFICIOS

El confinamiento es, como medida de protección en los accidentes nucleares, el aviso a la población para que busque refugio bajo techo, aplique medias de protección respiratoria y escuche las emisoras locales de radio o televisión para obtener información adicional. De esta forma se puede conseguir una reducción de la dosis efectiva a la población por irradiación externa del material radiactivo presente en el penacho o depositado en el suelo. El efecto del blindaje dependerá del tipo de edificio que se utilice como refugio.

En la planificación, se define el *factor de blindaje* como la relación entre la tasa de dosis al aire libre a un metro sobre el nivel del suelo y la tasa de dosis en el interior del refugio. Cuanto mayor sea el factor de blindaje, mejor será el edificio utilizado como refugio. En la práctica, para los cálculos es preferible utilizar el *factor de reducción*, que es la inversa del factor de blindaje. En la tabla 2 se incluyen factores de reducción aproximados para distintos tipos de edificios y otras estructuras que se pueden utilizar para el confinamiento.

Las autoridades responsables de la aplicación de las medidas de protección tendrán información previa sobre los tipos de edificios existentes en los alrededores de las instalaciones nucleares, a fin de poder estimar las dosis evitables mediante el confinamiento. En algunos casos, también puede ser posible identificar los posibles refugios de protección civil y otros edificios a los que la población se podría dirigir para lograr un mejor confinamiento.

Los avisos para realizar el confinamiento deberán incluir siempre las instrucciones de cerrar las puertas, ventanas y entradas de chimeneas y desconectar la ventilación mecánica y los aparatos de aire acondicionado. Con estas medidas adicionales, el confinamiento reducirá también la dosis por inhalación durante el paso del penacho.

Se puede utilizar el concepto de *factor de filtro* para describir la fracción de los aerosoles retenidos por el camino hasta llegar al interior del refugio. Sin embargo, este efecto del filtrado no influye muy significativamente en la concentración en el interior del refugio, la cual está más influida por la tasa de renovación del aire del interior del refugio. Es decir, la velocidad a la que la concentración de material radiactivo aumenta en el interior del refugio normalmente está determinada por la tasa de ventilación (número de renovaciones de aire por hora).

La tabla 3 da una orientación acerca de la fracción de la dosis inhalada que puede evitarse mediante confinamiento.

Tabla 2. Factores de reducción de la radiación gamma procedente del penacho y del material radiactivo depositado en el suelo.

REFUGIO	FACTOR DE REDUCCIÓN	
	Dosis procedente del penacho	Dosis procedente de la deposición
Coches	1	0.4-0.7
Casas de madera de una o dos plantas, sin sótano	0.9	0.2-0.5
Sótanos de casas de madera	0.1-0.7	
Casas de ladrillo de una o dos plantas, sin sótano	0.4-0.7	0.04-0.4
Sótanos de casas de ladrillo	0.1-0.5	
Grandes edificios de oficinas o industriales	0.1-0.3	
Casas de tres o cuatro pisos y primera o segunda planta de sótanos		0.01-0.08 0.001-0.07
Plantas superiores y sótanos de edificios de muchas		0.001-0.02 0.001-0.015
Bunkers o centros de protección civil (con blindaje de hormigón o roca)	0.003	0.001

(Nota: para la dosis producida por la deposición, el suelo habitual ya proporciona un factor de reducción del 0,7, en comparación con un plano infinito liso).

Tabla 3. Factores de reducción de la dosis por inhalación en función del tiempo de paso del penacho y la tasa de ventilación.

Tiempo de paso del penacho	Tasa de ventilación (renovaciones por hora)	Factor de reducción
3 h	0.1	0.15
3 h	0.3	0.45
3 h	1.0	0.75
6 h	0.1	0.25
6 h	0.3	0.6
6 h	1.0	0.85

Los posibles daños o riesgos causados por ordenar el confinamiento en casa o en edificios de oficinas es insignificante. Sin embargo, el confinamiento durante más de aproximadamente 12 horas empezará a causar problemas sociales, médicos y de higiene. Por lo tanto, si las previsiones indican la necesidad de establecer un confinamiento de larga duración, puede ser conveniente llevar a cabo la evacuación ordenada de la zona, tras un período inicial de confinamiento.

Cuando el penacho radiactivo haya pasado, se debe avisar a la población para que abran puertas y ventanas y permitan una exhaustiva ventilación de los edificios.

12.3.3. APLICACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE LA POBLACIÓN

El momento ideal para poner en práctica la evacuación de la población es previamente a la llegada del penacho. Si la evacuación se lleva a cabo durante el paso del penacho, es posible que los evacuados reciban dosis más altas que si se quedaron en el interior de sus casas o edificios donde se puedan confinar.

Incluso en la fase de preemergencia debe considerarse que la evacuación requiere tiempo de preparación por lo que se deberían intentar hacer previsiones para el caso de que fuera necesaria. Con poco tiempo de aviso, sólo pueden ser evacuadas de manera ordenada comunidades relativamente pequeñas.

Los Planes de Emergencia Exterior deben incluir la planificación de la evacuación de la zona afectada. Cuando se estudia la conveniencia de realizar la evacuación de la población, el Director de la Emergencia debe contar con la siguiente información:

- La población estimada de la zona durante las horas laborables y no laborables y el número de personas en hospitales, escuelas, industrias, etc
- El número de ancianos desasistidos y minusválidos de la zona.
- La capacidad de transporte disponible considerando el número estimado de personas que abandonarían la zona en los vehículos particulares y los vehículos de transporte público necesarios.
- Las rutas de evacuación planificadas disponibles para dirigir los transportes hacia el exterior por el camino más rápido que evite las zonas potencialmente afectadas.
- Unos horarios para garantizar un flujo sin restricciones de la evacuación

La decisión del Director de la Emergencia de ordenar la evacuación de la población debe incluir los siguientes puntos:

- El área exacta a evacuar.
- El momento en que la evacuación se llevará a cabo.
- Los medios de transporte a utilizar.
- Los puntos de recogida y destinos de acogida.

La evacuación por lo general se limitaría a una distancia más pequeña de la planta o instalación que la que requeriría confinamiento. Si la zona cercana a la instalación está escasamente poblada, las circunstancias locales pueden favorecer una evacuación preventiva de esa zona. Puede ser posible combinar esta medida con la evacuación del personal de la planta que no se necesita para hacer frente a la emergencia interior.

La práctica habitual en Europa occidental es permitir el uso de automóviles privados para la evacuación, aunque en España está planificado que el Grupo de Apoyo Logístico aporte los vehículos para la evacuación de la población. No obstante, el plan de evacuación puede tener en cuenta que parte de la población abandone la zona por sus medios, pero se debe planificar la disponibilidad de medios de transporte públicos y todos los transportes de evacuación deben llevarse a cabo bajo la dirección del Director de la Emergencia.

Los lugares de recogida de la población a evacuar en los que deben esperar a los vehículos de transporte deben ser identificadas en el plan de emergencia en caso necesario. En los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas no se detalla la ubicación de dichos puntos de recogida. Si se dispone de centros de recogida con capacidad suficiente, los planes también pueden prever la utilización de estos centros para el alojamiento de los evacuados en caso de accidentes para los que la zona afectada y el número de evacuados sean pequeños.

La planificación de emergencia exterior también debe incluir las instalaciones necesarias para la vigilancia de la contaminación y para la descontaminación de personas y vehículos en caso de que la evacuación se lleve a cabo después de que haya empezado la emisión. En el caso de los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas, se planifica la utilización de las Estaciones de Clasificación y Descontaminación (ECD) situadas en, o en la ruta hacia, las poblaciones de acogida de la población evacuada, denominadas Áreas Base de Recepción Social (ABRS).

La evacuación conlleva un riesgo relativamente bajo, si está bien planificada y es llevada a cabo de manera eficiente. Sin embargo, en la práctica es previsible que pueda generar riesgos de entidad si se realiza de forma espontánea, por medios propios de la población. Debe prestarse especial atención a la evacuación de los grupos especiales, como los ancianos y los inválidos. El riesgo de accidentes de tráfico puede ser ligeramente superior al normal, pero el aumento no es probable que sea importante, con la posible excepción de casos de evacuación espontánea con medio propios.

Los costes de la evacuación pueden llegar a ser altos si se ven afectadas miles de personas. Los costes incluyen el alojamiento de acogida, la alimentación y el transporte.

La evacuación de personas de zonas agrícolas puede suponer la aparición de problemas relacionados con el cuidado de ganado bovino, ovino, aves de corral y otros animales domésticos.

En caso de evacuación de las escuelas se deben tener en cuenta otros problemas especiales. De hecho, además de ser los niños más vulnerables se produce otra complicación: Si se produce una situación de emergencia que ponga en peligro a sus hijos, los padres tienen un instinto innato de dirigirse a la escuela para recoger a los niños. En este caso será necesaria una información preventiva con el objetivo de convencer a los padres de que la eficacia de la planificación de emergencia en atender a las escuelas garantiza la salud de los niños.

12.3.4. ATENCIÓN A LOS EVACUADOS

Se debe disponer de instalaciones para controlar la propagación de la contaminación por los evacuados. Esto se puede hacer en lugares fijos previamente establecidos como son las Estaciones de Clasificación y Descontaminación (ECD) o en estaciones móviles. La descontaminación de las personas evacuadas y los vehículos deben llevarse a cabo lo más cerca de la zona contaminada que sea posible para minimizar la propagación de la contaminación. En los Planes de Emergencia Exterior de las

centrales nucleares españolas, está prevista la ubicación de varias ECD para cada plan, de las cuales se activarían aquellas que se considerase conveniente de acuerdo a las rutas de evacuación elegidas, estando situadas a distancias a las centrales nucleares de aproximadamente 30 km. Además, las Fuerzas Armadas disponen de estaciones móviles que podrían instalarse donde se considere necesario. El personal de dichas instalaciones debe ser capaz de identificar a las personas que necesitan tratamiento por exposición a la radiación, aunque estos pacientes no son de esperar entre el público en general.

Se necesita disponer de los medios necesarios para atender a los evacuados. La planificación de la evacuación deberá incluir los medios para el realojo de los evacuados. Los lugares de recepción de los evacuados estarán identificados y se comprobará la disponibilidad de alojamiento, suministro de agua y de alimentos, y de medios sanitarios y atención médica. En los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas están identificadas las Áreas Base de Recepción Social (ABRS) que dispondrán de un Plan de Actuación Municipal adecuado para el cumplimiento de sus funciones.

12.3.5. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-site Emergency Management in Central Eastern Europe. Course Training Material.
2. Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, por el que se aprueba el Plan Básico de emergencia Nuclear (B.O.E. nº 169, de 14/07/2004).
3. Planes de Emergencia Nucleares Exteriores de las Centrales Nucleares Españolas: PENBU, PENCA, PENGUA, PENTA y PENVA (B.O.E. nº 173 – suplemento, de 21/07/2006).
4. Planificación de la Respuesta Exterior frente a Accidentes Radiológicos en Instalaciones Nucleares. Safety Series Nº 55. OIEA, 1981.
5. La evacuación y el Confinamiento como Acciones de Protección contra Accidentes Nucleares con Emisiones Gaseosas. Informe EPA 520/1-78-001B. Agencia de Protección Ambiental de EEUU, 1978.

12.4 APLICACIÓN DE PROFILÁXIS RADIOLÓGICA, CONTROL DE ALIMENTOS Y AGUA

Objetivos

Proporcionar al alumno los conocimientos prácticos de cómo proteger a la población contra el yodo radiactivo en una situación de deposición, así como contra la presencia de otros radioisótopos en los alimentos y el agua potable.

Contenidos

- Riesgo por yodo radiactivo.
- Profilaxis radiológica con yodo estable.
- Disponibilidad de yodo estable.
- Instrucciones a los diferentes grupos de población.
- Dosis de yodo estable.
- Riesgo por otros radioisótopos presentes en alimentos y en agua potable.
- Contramedidas respecto a los productos alimenticios y productos agrícolas.

12.4.1. RIESGO POR IODO RADIATIVO

En un accidente nuclear, se pueden liberar al medio ambiente cantidades considerables de isótopos radiactivos de yodo. La deposición de dichos materiales puede ocasionar la exposición significativa del público a cientos de kilómetros del lugar del accidente. Durante el paso de la nube radiactiva, el yodo radiactivo puede causar la exposición interna por inhalación. A menos que la liberación del reactor sea prolongada o repetida, la exposición por inhalación tendrá una duración de menos de 12 horas.

Durante los días siguientes, el yodo radiactivo depositado en el suelo puede contaminar los alimentos y el agua potable y, por tanto, causar la exposición interna a través de la ingestión. La leche y los vegetales frescos son las fuentes más importantes.

El más importante de los isótopos de yodo es I-131, que tiene una vida media de 8 días. Los otros isótopos que contribuyen a la dosis tienen vidas medias más cortas. Por tanto, la exposición a través de la leche y vegetales puede continuar produciéndose durante unas semanas.

Una vez inhalado o ingerido, el yodo radioactivo se absorbe rápidamente en la glándula tiroidea. La cantidad absorbida depende de la ingesta diaria de yodo a través de los alimentos. En caso de carencia de yodo, como en zonas endémicas de bocio, la cantidad relativa de yodo radioactivo que puede ser absorbido es dos veces mayor que en otras zonas. Durante unos pocos días después al nacimiento, la absorción es muy eficaz, lo que hace de los recién nacidos un grupo de riesgo especial.

La mayor parte de la absorción de yodo se ha llevado a cabo durante las 12 horas siguientes de la ingesta. La cantidad que no se absorbe en el tiroides se excreta rápidamente por la orina.

En una situación de deposición, la glándula tiroidea podría estar expuesta a dosis de radiación mucho más altas que cualquier otro órgano. La exposición puede causar cáncer de tiroides o, en caso de dosis muy altas, la insuficiencia tiroidea. En la práctica, la inhalación puede producir dosis que conduzcan a la insuficiencia tiroidea sólo cerca del lugar del accidente. Por el contrario, se puede producir un incremento significativo de padecer cáncer de tiroides a cientos de kilómetros del lugar del accidente. Esto se apreció después del accidente de Chernobyl, donde se produjo un fuerte incremento de la incidencia de carcinoma de tiroides en niños.

El riesgo de padecer cáncer de tiroides después de la exposición a la radiación depende en gran medida de la edad del individuo en el momento de la exposición ya que los niños pequeños presentan un mayor riesgo. Existe poca evidencia de que se produzca un incremento del riesgo en adultos. Según informes publicados, no se produce incremento alguno del riesgo de cáncer para individuos de más de 40 años en el momento de la exposición..

12.4.2. PROFILAXIS RADIOLÓGICA CON IODO ESTABLE

El yodo estable administrado antes o poco después de la incorporación de yodo radioactivo puede bloquear o reducir la acumulación de yodo radioactivo en la glándula tiroides. Una dosis única de yodo estable bloquea la absorción de yodo radioactivo en el tiroides por completo durante 24 horas. En las siguientes 24 horas la protección será parcial. La protección es virtualmente completa si se toma antes o inmediatamente después de la exposición. Si se toma 5 horas después de la exposición, el efecto de la protección se reduce en un 50%. Si se toma más de 12 horas después de la exposición, el efecto protector se pierde. Sin embargo, en una situación de exposición prolongada, se pueden lograr algunos efectos protectores si se administra yodo estable horas o incluso días después del inicio de la exposición.

La experiencia de Polonia durante el accidente de Chernóbyl demuestra que el riesgo de que se produzcan efectos secundarios graves por la administración de dosis únicas de yodo estable es mínimo. Para dosis únicas, por lo tanto, no hay necesidad de considerar los efectos secundarios a la hora de decidir la aplicación de la profilaxis. Sin embargo, las personas con alergias conocidas al yodo o con trastornos de tiroides en la actualidad o en el pasado no deben tomar yodo para protegerse del cáncer de tiroides.

La incorporación de yodo radioactivo por inhalación comienza cuando llega la nube radiactiva y continúa hasta que la nube haya pasado, o el yodo radioactivo se haya depositado en el suelo. Una dosis única de yodo estable es suficiente para proteger de la exposición por inhalación de la nube. se requiere que las acciones para la aplicación de profilaxis de yodo estable con el fin de reducir la dosis a la tiroides se realicen con prontitud. La decisión tendrá que ser tomada muy probablemente cuando aún no se disponga de datos sólidos para calcular la dosis potencial al tiroides.

La incorporación de yodo radioactivo a través de la ingestión de alimentos contaminados comienza más tarde, después de la deposición y la transferencia a las cadenas alimentarias. Esto da más tiempo para la adopción de decisiones sobre contramedidas, y la decisión puede basarse en mediciones de contaminación. La exposición continuará durante unas pocas semanas. Si no es posible proporcionar alimentos y leche de regiones no contaminadas, se puede utilizar la administración de yodo estable como contramedida. En este caso, para proporcionar una protección completa, la administración de dosis de yodo estable hay que repetirla todos los días durante el tiempo necesario. La frecuencia de aparición de efectos secundarios en el caso de administración de dosis múltiples sería superior a la de dosis únicas, pero la frecuencia no se conoce. Probablemente es baja en los niños, pero puede ser significativa en los adultos, especialmente en las zonas con deficiencia de yodo en la dieta.

El yodo estable se puede administrar como yoduro potásico o yodato potásico, ya sea en forma de tabletas o líquido. Las tabletas de yoduro de potasio son la forma más utilizada, ya que son fáciles de almacenar y distribuir y son menos irritantes para el estómago. El periodo de validez previo a la caducidad de los comprimidos almacenados de manera adecuada es de al menos cinco años. Para la administración a los lactantes y los niños pequeños, las tabletas pueden ser trituradas y mezcladas con zumo de fruta, mermelada, etc.

12.4.3. DISPONIBILIDAD DE YODO ESTABLE

Debido a que el momento de la aplicación de la profilaxis de yodo estable es muy importante, se debe asegurar la rápida disponibilidad de tabletas de yodo por parte de la población. En las cercanías de las centrales nucleares, debería considerarse seriamente la predistribución de yodo estable a los hogares. En los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas se dispone de tabletas de yodo estable en las ubicaciones en las que está previsto que presten servicio o transiten los actuantes, así como por parte de las organizaciones municipales y por el Grupo Sanitario estando previsto dentro de los Planes de Actuación Municipal en Emergencia Nuclear (PAMEN) que los actuantes municipales colaboren facilitando su distribución entre la población por parte del Grupo Sanitario. Junto con los comprimidos, deben proporcionarse instrucciones claras, incluyendo la advertencia de que deben ser utilizados como dosis únicas, y sólo en caso de recomendación oficial. Además, deben subrayarse las contraindicaciones (alergias conocidas al yodo, enfermedades presentes o pasadas de tiroides).

A mayores distancias desde el lugar de emisión es probable que haya algo más de tiempo para la toma de decisiones y la distribución de yodo estable. Los stocks de yodo estable deben almacenarse estratégicamente en puntos que pueden incluir escuelas, jardines de infancia, hospitales, farmacias, parques de bomberos, cuarteles de las fuerzas de orden público y centros de protección civil. Se recomienda el almacenamiento generalizado independientemente de la distancia al lugar del potencial accidente. El almacenamiento se debe realizar preferentemente en lugares donde sea un procedimiento normal la realización de controles de existencias. Los planes deben considerar áreas redundantes de distribución para minimizar los retrasos en la aplicación de la profilaxis.

Deben estar permitidas adquisiciones voluntarias de tabletas de yodo por el público en general de las farmacias. Sin embargo, la responsabilidad de la distribución de yodo estable y de instruir a la población sobre su utilización debe estar designada a las autoridades apropiadas en el marco de la planificación de emergencia nuclear. En los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas, la responsabilidad de realizar la administración de yodo estable es del Grupo Sanitario, contando con el apoyo de las organizaciones municipales.

Incluso en las zonas en las que la principal contramedida planificada es la evacuación junto con la administración de comprimidos de yodo estable, los planes deben incluir procedimientos para la distribución de tabletas de yodo estable a la población confinada en caso de que tal escenario se considere plausible. En el caso de los Planes de Emergencia Exterior de las centrales nucleares españolas, en principio, no se prevé realizar la evacuación directa de ninguna zona del entorno de la central en caso de emergencia. Los planes prevén la aplicación escalonada de las medidas de protección urgente en función de la dosis, a saber: confinamiento, profilaxis radiológica y evacuación. Por lo tanto y salvo casos excepcionales previamente a cualquier evacuación se administraría yodo estable a la población potencialmente afectada.

En caso de un incidente en el que no se requiriera la distribución de tabletas de yodo estable, el plan de emergencia exterior debería asegurar que el público sea informado de que no se ha emitido yodo radiactivo, y que las tabletas de yodo estable no necesitan ser administradas. Las autoridades sanitarias deben asegurarse de que los medios locales de información pública reflejan con exactitud su posición en relación con la administración de yodo estable.

Los médicos locales deben ser informados sobre el uso de tabletas de yodo estable. Esta información deberá ser revisada. Tienen que estar informados de que los médicos locales no intervendrán en la decisión de administrar los comprimidos y de que existen medios especiales a nivel local para la distribución en caso de que se produzca un incidente que suponga la liberación de yodo radiactivo.

12.4.4. INSTRUCCIONES A LOS DIFERENTES GRUPOS DE POBLACIÓN

Los diferentes grupos de población difieren con respecto a las dosis potenciales al tiroides, el riesgo asociado a la exposición, y los posibles efectos secundarios del yodo estable. Por lo tanto, es necesario tratar por separado a estos grupos.

Neonatos

Los recién nacidos son un grupo crítico con respecto a los riesgos de la exposición y los efectos secundarios del yodo estable. Durante los primeros días de vida una sobredosis de yodo estable puede causar un efecto de bloqueo de la función tiroidea.

Si es indicado, el yodo estable debería administrarse inmediatamente a todos los recién nacidos. Por lo tanto, en los hospitales de maternidad debería haber yoduro potásico disponible. La dosis no debería exceder el equivalente a 12,5 mg de yodo. Debe evitarse la repetición de la dosis por el riesgo de bloqueo de tiroides. En los lactantes a

los que se haya administrado yodo estable en la primera semana de vida, la función tiroidea debe ser objeto de seguimiento y se debe proporcionar la terapia en el caso que sea necesario.

Lactantes, niños y adolescentes

Estos grupos son de alto riesgo de exposición al yodo radioactivo, pero de muy bajo riesgo frente al yodo estable. La dosis de radiación al tiroides será generalmente varias veces más alta que en los adultos. Cuando es indicado, el yodo estable se debería administrar inmediatamente a todos los niños. Si la incorporación de yodo radioactivo por inhalación es prolongada, la dosis de yodo estable debe repetirse a diario, lo cual muy probablemente no causará daño. Sin embargo, en los niños que muestran reacciones en la piel a la primera dosis, ésta no debe repetirse.

Si no es posible realizar un control adecuado de los productos alimentarios, o pudiera dar lugar a una deficiencia de nutrientes esenciales como la leche, se pueden administrar a estos grupos dosis diarias de yodo estable durante el tiempo que sea necesario.

Mujeres embarazadas

Durante el embarazo, en caso de exposición al yodo radioactivo, es necesario administrar yodo estable para proteger a la propia mujer y, durante la última parte del embarazo, además de proteger el feto. No es esperable un efecto adverso tras una dosis simple. Sin embargo, el riesgo de un efecto de bloqueo sobre el tiroides del nonato debe tenerse en cuenta y, por tanto, deben evitarse la repetición de la dosis.

Mujeres lactantes

Se pueden administrar dosis únicas de yodo estable a las mujeres lactantes, si fuera necesario para proteger a la propia mujer. Sin embargo, como parte del yodo pasará a la leche, se debe evitar la repetición de la dosis para evitar una sobredosis de yodo estable para el bebé.

Adultos menores de 40 años

En los adultos jóvenes, el riesgo de padecer cáncer tiroideo radioinducido es bajo. Por otra parte, el riesgo de sufrir efectos secundarios con dosis únicas de yodo estable es también bajo. A este grupo de población se puede administrar yodo estable en dosis única para proteger del yodo radioactivo inhalado, pero los criterios para tomar la decisión de realizar esta intervención pueden estar situados en niveles considerablemente superiores a los de los niños. Es muy probable que no esté indicada su administración a largas distancias del lugar del accidente. Deben considerarse las contraindicaciones (alergias conocidas al yodo, enfermedades tiroideas presentes o pasadas, etc.). Su uso a largo plazo para la protección contra la ingestión de yodo radioactivo no está indicado en este grupo.

Adultos mayores de 40 años

El riesgo de padecer cáncer de tiroides radioinducido en este grupo es probablemente cercano a cero. El riesgo de sufrir efectos secundarios por la administración de yodo aumenta con la edad. Por tanto, no está indicado para este grupo de edad la administración de yodo estable para la protección frente al cáncer de tiroides. Sólo está indicada la profilaxis con yodo estable en las cercanías del lugar del accidente, si se considera que las dosis de tiroides pueden representar una amenaza para la función tiroidea.

12.4.5. DOSIS DE YODO ESTABLE

En la siguiente tabla se presenta la dosis única recomendada de yodo estable para los distintos grupos de edad.

Grupo de edad	Masa equivalente de yodo (mg)	Masa de KI (KIO ₃) (mg)	Dosis de tableta(*)
Adultos y adolescentes (mas de 12 años)	100	130 (170)	1/1
Niños (3-12 años)	50	65 (85)	1/2
Infantes (1 mes - 2 años)	25	32 (42)	1/4
Neonatos (hasta 1 mes)	12.5	16 (21)	(1/8)

(*)Considerando comprimidos que contienen 100 mg de masa equivalente de yodo.

12.4.6. RIESGO POR OTROS RADIOISÓTOPOS EN ALIMENTOS Y AGUA POTABLE

Las plantas pueden incorporar radionucleidos tanto por deposición directa desde la atmósfera como por absorción por la raíz desde el suelo. Los animales terrestres pueden incorporar radionucleidos ingiriendo alimentos contaminados y suelo. Los peces y otros organismos acuáticos pueden incorporarlos por absorción o por ingestión de agua o alimentos contaminados.

El pico de la contaminación se producirá muy rápidamente en las hortalizas, a los pocos días en la leche de las vacas que pasten en zonas contaminadas y después de unas pocas semanas para la carne, los peces y los alimentos de origen acuático. Para el caso de la incorporación de la contaminación a través de la raíz de las plantas, se producirá la máxima concentración en la planta cuando la contaminación se produzca alrededor de un mes antes de la cosecha. La contaminación de los peces y otros alimentos de origen acuático es menos probable que constituya un problema en el caso de las aguas costeras, pero en el caso de masas de agua continentales se pueden acumular en los peces niveles de concentración significativos de isótopos de cesio.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda la intervención restringiendo un alimento concreto en el caso de que la dosis individual pueda reducirse en más de 10 mSv/año. Esta recomendación se aplica cuando está disponible el suministro de alimentos nutricionalmente adecuados. La ICRP indica,

además, que los Niveles de Intervención Operativa (OIL) para alimentos estaría en el rango de 1000 - 10000 Bq/kg para los radionucleidos más importantes tales como el cesio-137 y yodo-131.

Hay Reglamentos de la CEC que especifican niveles de intervención para contaminación radiactiva en alimentos comercializados y piensos animales, que se reproducen en la siguiente tabla para los radionucleidos más importantes. Estos niveles son jurídicamente vinculantes en la Unión Europea a raíz de un posible accidente.

Isótopos	Niveles de intervención, Bq/kg				
	Alimentos para bebés	Productos lácteos	Alimentos menores	Otros alimentos	Alimentos líquidos
Estroncio (Sr-90)	75	125	7 500	750	125
Iodo (I-131)	150	500	20 000	2 000	500
Emisores alfa (Pu)	1	20	800	80	20
Cesio y otros nucleidos (Cs-137)	400	1 000	12 500	1 250	1 000

ALIMENTOS DESTINADOS A ANIMALES	Niveles de intervención, Bq/KG
Cerdos	1 250
Aves de corral, terneros y corderos	2 500
Otros	5 000

El agua potable se puede contaminar en un accidente, ya sea por la liberación directa de radionucleidos a una masa de agua o después de que los procesos ambientales hayan depositado materiales radiactivos o lixiviados en masas de agua después de la liberación a la atmósfera.

12.4.7. CONTRAMEDIDAS REFERENTES A PRODUCTOS ALIMENTARIOS Y PRODUCTOS AGRÍCOLAS

Si en un accidente se contaminan zonas de producción de alimentos, la prohibición de la producción es sólo una de las contramedidas que se pueden adoptar. Las técnicas que se puedan aplicar dependerán de los radionucleidos presentes, las prácticas agrícolas y la extensión de la zona contaminada.

Al prohibir el suministro de agua contaminada por encima de un cierto nivel de intervención, las dosis individuales se verán limitadas, en especial si hay personas que obtienen la mayor parte de su agua potable de una sola fuente.

12.4.8. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-site Emergency Management in Central Eastern Europe. Course Training Material.
2. Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, por el que se aprueba el Plan Básico de emergencia Nuclear (B.O.E. nº 169, de 14/07/2004).
3. Planes de Emergencia Nucleares Exteriores de las Centrales Nucleares Españolas: PENBU, PENCA, PENGUA, PENTA y PENVA (B.O.E. nº 173 – suplemento, de 21/07/2006).
4. Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents. Rubery E, Smales E. Proceedings of a joint WHO/CEC Workshop. July 1988. Pergamon Press, 1990.
5. Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents. World Health Organization, Regional Office for Europe, Environmental Health Series No. 35, 1989.
6. Guidance on Restriction on Food and Water Following a Radiological Accident. Documents of the NRPB, Volume 5 No. 1. National Radiation Protection Board, 1994.
7. Principles for intervention for protecting of the public in a radiological emergency. ICRP. ICRP publication 63. Annals of the ICRP 22, no. 4, 1993.
8. Manual on Public Health Action in Radiation Emergencies. World Health Organization. European Centre for Environment and Health, Rome Division.
9. Jacob P et al. Thyroid cancer risk to children calculated. Nature 392: 31-31, 1998.
10. CEC Council Regulation (Euratom) No. 3954/87 laying down the maximum permitted levels of radioactive contamination of foodstuffs following a nuclear accident or any other case of radiological emergency (amended by Council Regulation 2218/89). Off. J. Eur. Comm. L211/1, 1989.
11. CEC Council Regulation (EURATOM) No. 944/89 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination in minor foodstuffs following a nuclear accident or any other case of radiological emergency. Off. J. Eur. Comm. L101/17, 1989.

12.5 DESCONTAMINACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS

Objetivos

Tras el curso, los participantes conocerán la base de los posibles métodos de descontaminación de zonas rurales y urbanas y de la eliminación de desechos.

Contenidos

- Selección de métodos de descontaminación.
- Áreas rurales.
- Áreas urbanas.
- Transporte y eliminación de residuos de descontaminación.

12.5.1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de los accidentes nucleares pueden resultar contaminadas grandes zonas por la deposición radiactiva. Un accidente grave puede contaminar miles de kilómetros cuadrados con una actividad inicial incluso mayor que 10 MBq /m². Este tipo de accidentes pueden ser: a) la fusión del núcleo y/o la explosión e incendio en una central nuclear, b) la explosión o el incendio en un almacenamiento de residuos de media y alta actividad, y c) un accidente con armas nucleares. Después de la deposición de materiales radiactivos, la población humana puede estar expuesta a irradiación externa y/o interna. La irradiación externa se produce normalmente a causa del suelo contaminado y otras superficies contaminadas. La irradiación interna se puede producir por inhalación o ingestión de alimentos que pueden estar contaminados directa y/o indirectamente.

Las áreas contaminadas tienen que ser limpiadas para proteger a la población de los riesgos radiológicos. La limpieza incluye la *descontaminación*, *estabilización* (o *fijación*) o *aislamiento* de la contaminación, junto con el transporte y la eliminación de los residuos resultantes de la limpieza. Por *descontaminación* se entiende la retirada de los materiales radiactivos de la zona contaminada para reducir el nivel de radiactividad residual en o sobre los materiales, las personas o el medio ambiente. En el caso de la *estabilización*, la contaminación se fija en la superficie para disminuir su movilidad. La radiactividad también puede ser *aislada* cubriéndola con una capa de material limpio como hormigón o tierra mediante el arado profundo para eliminar la contaminación de la capa superior del suelo. La mayoría de las medidas de descontaminación generan residuos radiactivos, que han de eliminarse de una forma segura.

La limpieza de grandes superficies contaminadas como consecuencia de un accidente grave en una instalación nuclear podría costar cientos de millones de Euros y podría causar riesgos y molestias para el público. El detrimento a la salud y la vida social resultante de este tipo de intervención sería inferior al que resultaría de exposiciones adicionales que se producirían en caso contrario, pero deben utilizarse todos los medios razonables para reducir al mínimo los costes y los perjuicios a los seres

humanos derivados de dicha limpieza. La mejor manera de hacerlo es asegurando que las actividades que se realicen en todas las fases sean adecuadamente planificadas, coordinadas y gestionadas. La preparación de la descontaminación y la eliminación de residuos se puede dividir en dos fases: la planificación preliminar que se realiza antes de que ocurra el accidente y una detallada evaluación y planificación que se inicia en el momento del accidente.

La primera tarea en la definición de las prioridades de limpieza es elaborar un mapa detallado de la naturaleza, mezcla, concentración y distribución espacial de los radionucleidos liberados y relacionar estos datos con las características de la zona afectada, especialmente la densidad de población, el uso de la tierra, los tipos de edificios, etc. Con esta información, se puede tomar la decisión acerca de las zonas que deben limpiarse primero.

La publicación del OIEA Technical Report Series N° 300 constituye una guía sobre la planificación y la gestión de la descontaminación de las zonas extensas.

12.5.2. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN

Las técnicas de descontaminación se evalúan en términos de su eficacia para reducir la exposición a la radiación. El término *factor de descontaminación* (FD) se utiliza para describir la eficiencia del método de descontaminación en cuanto a la retirada de la radiactividad. Los valores de FD no hacen referencia a posibles reducciones en la exposición a la radiación. Por ejemplo, la reducción de la contaminación radiactiva de una superficie a la mitad puede expresarse utilizando un FD de 2 o como la fracción o porcentaje eliminado, es decir, 0.5 o el 50%, respectivamente.

Para lograr un buen factor de descontaminación (FD), se debe elegir un proceso de descontaminación tomando como base consideraciones específicas del lugar contaminado y teniendo en cuenta una amplia variedad de parámetros tales como:

- el nivel de contaminación
- el tipo de depósito (seco o húmedo)
- características del material depositado (solubilidad, aerosoles, productos de fisión, etc.)
- tipo de material y superficie contaminados (metal, hormigón, suelo, áspero, poroso, etc.)
- factor de descontaminación requerido
- eficiencia de cada proceso de descontaminación.

Otros factores, que son importantes en la selección del método y el equipo de descontaminación, son los siguientes:

- la disponibilidad, coste y complejidad de los equipos necesarios
- la necesidad de acondicionar los residuos secundarios generados
- las dosis a los trabajadores expuestos y al público en general resultantes de la descontaminación
- otros problemas de seguridad, medioambientales y sociales
- la disponibilidad de personal

- la cantidad de trabajo y la dificultad de descontaminación de los equipos utilizados para la limpieza.

Antes de que comience un proceso de descontaminación, es importante que quede claro cuál es el objetivo que se intenta alcanzar. Los objetivos pueden ser a) reducir a un cierto nivel la dosis externa media a los miembros de público, b) reducir hasta un nivel prefijado la contaminación de los productos agrícolas como la carne, los cultivos, etc, c) obtener un cierto factor de descontaminación para una superficie especial, d) aplicar procedimientos de recuperación tales que el coste por cada Sievert-persona evitado no exceda una cierta cantidad de dinero, o e) invertir una suma fija de dinero en la descontaminación de una determinada área y conseguir la máxima reducción posible en Sievert-persona para esa suma de dinero. También es posible que el objetivo sea una combinación de algunas de las opciones descritas anteriormente.

A menudo es importante iniciar rápidamente la descontaminación, pero también puede ser beneficioso esperar. En el caso de una zona de césped sería importante actuar con rapidez para evitar que la contaminación se extienda. En otros casos, como en el medio forestal o zonas menos utilizadas, es beneficioso esperar hasta que los isótopos de corta vida hayan desaparecido.

12.5.3. ÁREAS URBANAS

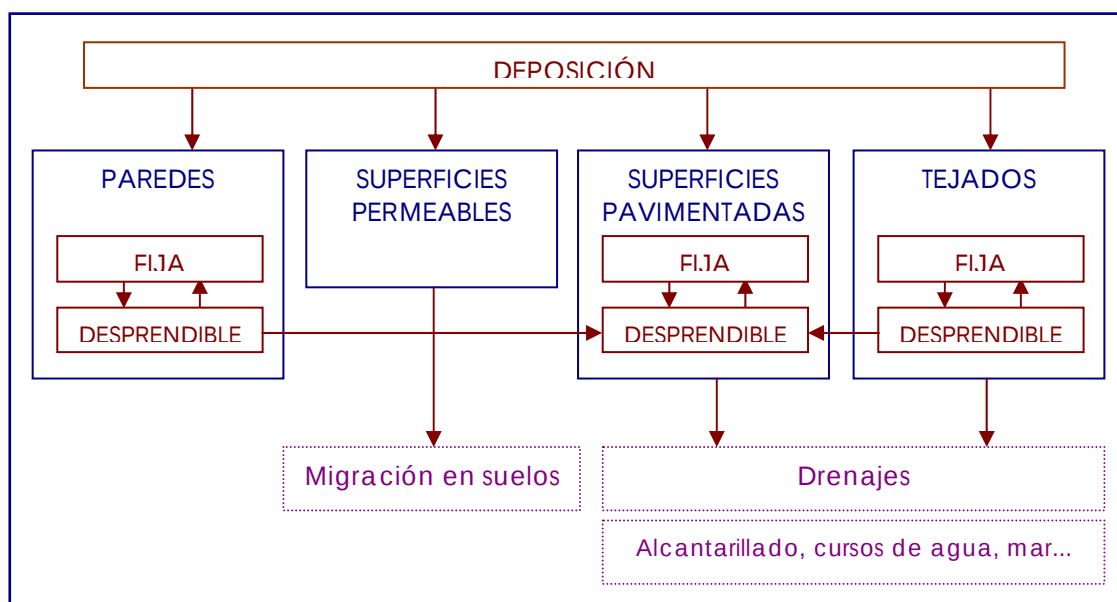


Figura 1. Modelo de deposición en la zona urbana.(Moring 1997).

12.5.4. DISTRIBUCIÓN DE LA DEPOSICIÓN HÚMEDA Y SECA

La contaminación atmosférica, ya sea en forma de gases o partículas, llega a la superficie de la tierra por deposición seca (en ausencia de precipitaciones) o deposición húmeda (en presencia de precipitaciones). También podría llegar en

condiciones de niebla. La distribución de la deposición radiactiva entre los distintos componentes de un complejo urbano (por ejemplo, el césped, las paredes, los tejados, las calles, las zonas pavimentadas y los árboles) dependerá en gran medida del proceso de deposición.

En ausencia de precipitaciones, la cantidad de radiactividad depositada en superficies rugosas permeables como el césped, puede ser alrededor de un orden de magnitud superior a la depositada sobre superficies lisas impermeables como el asfalto y el hormigón. La deposición sobre los árboles puede aumentar el total de la deposición en las zonas urbanas, ya que los árboles capturan partículas de los aerosoles de manera más eficiente que las otras superficies. Los árboles podrían ser una importante fuente de radiación externa para las personas que se encuentren al aire libre en sus proximidades inmediatamente después de la deposición. Las paredes interceptan poca deposición por unidad de superficie, las zonas pavimentadas algo más, mientras que los tejados interceptan alrededor de un orden de magnitud más que las zonas pavimentadas horizontales.

La **deposición húmeda** incluye gases y partículas que se depositan con la precipitación. La tasa de deposición se modeliza normalmente utilizando el *coeficiente de lavado*, que describe el arrastre por la lluvia de los gases y partículas de una nube radiactiva. El coeficiente de lavado depende principalmente de la distribución de tamaño de los aerosoles y de las gotas de agua. La deposición húmeda por la lluvia fina es diferente de la deposición húmeda por lluvias fuertes debido a la diferencia en la cantidad de agua de escorrentía que se produce. En el caso de lluvia poco intensa se produce poca escorrentía superficial del agua por lo que la mayor parte del material depositado se mantiene retenido en las superficies. Si la cantidad de lluvia es superior, el transporte y eliminación de material radiactivo de las superficies duras por el arrastre de la escorrentía será mayor. La deposición húmeda en las paredes también depende de la velocidad y dirección del viento. La deposición húmeda en los árboles no aumentará la cantidad total de material depositado por unidad de superficie.

En la Tabla 4 se presentan las velocidades de deposición de radiocesio sobre diversas superficies urbanas respecto a la correspondiente a la hierba, para una precipitación de 5 mm.

Tabla 4. Velocidades de deposición estimadas para superficies urbanas relativas a la correspondiente a la hierba (Roed 1990).

Superficie	Deposición seca	Deposición húmeda
Hierba	1	1
Superficies de suelo impermeable, arenoso y duro	0.16	0.4
Tejados	0.65	0.6
Paredes	0.023	0.02
Árboles	1.63	1

Los fenómenos meteorológicos como la lluvia, el viento, las heladas, etc., así como actividades humanas como la limpieza de calles y el tráfico, intervienen en distintos fenómenos como la resuspensión, la eliminación por arrastre y la infiltración a través del suelo de los materiales depositados. Los fenómenos meteorológicos tienden a desplazar el material radiactivo adsorbido. Por ejemplo, se asume que para las zonas pavimentadas la eliminación por arrastre de escorrentía será del 100% después producirse una lluvia acumulada de 3 mm.

Métodos de descontaminación

Se han probado varios métodos para retirar físicamente la contaminación radiactiva de las superficies urbanas. Las técnicas relativamente eficaces, fáciles de llevar a cabo y de bajo costo que se pueden utilizar tanto a gran como a pequeña escala son: el barrido y la aspiración, el manguedo, el cortado del césped la excavación y arado. Otros métodos más caros son la tala de árboles y arbustos, el chorreado, la eliminación de la capa superficial del asfalto de los viales, la retirada de la capa superficial del suelo, el lavado con reactivos especiales, etc.

El **barrido y el barrido con aspiración** son las técnicas normales de limpieza de calles, cuya eficiencia depende en gran medida de la carga de polvo, el tamaño de las partículas, la naturaleza de la superficie y el tiempo transcurrido antes de que se apliquen técnicas. La eliminación mecánica del polvo contaminado de la calle puede reducir notablemente la contribución a la tasa de dosis de las superficies que tienen una alta carga de polvo, pero el efecto que cabe esperar en el caso de una baja carga de polvo es pequeño o ninguno.

El **manguedo** puede ser eficiente si se hace razonablemente poco después de la deposición, especialmente en el caso de que la deposición haya sido seca. Sin embargo, a menudo el manguedo simplemente traslada la contaminación a otro lugar del que podría ser aún más difícil de eliminar. En el caso del manguedo de los tejados, la contaminación se eliminaría principalmente a través de los drenajes, junto con el agua aplicada.

El **cortado del césped** con un cortador que recoja la hierba cortada es un método eficaz de descontaminación cuando se lleva a cabo en los primeros días después de la deposición. El proceso de transporte de las partículas radiactivas desde la hierba hasta el suelo se ha estimado que tarda una media del orden de 7-18 días.

La **excavación** de pequeños jardines hasta una profundidad de unos 20 cm puede reducir los niveles de radiación en la superficie del suelo. Este es un método atractivo, ya que se puede realizar fácilmente y no requiere herramientas especiales.

El **arado** de grandes jardines hasta una profundidad de 30 cm puede suponer un buen factor de reducción de dosis. Sin embargo, los posteriores arados que se realicen puede devolver a la superficie gran parte de la contaminación radiactiva. El arado profundo, hasta una profundidad de 45 cm o más, puede reducir en un factor 20 la tasa de dosis en la superficie del suelo.

La **tala** de árboles y arbustos produce una gran cantidad de residuos. También puede generar problemas de resuspensión. Por ejemplo, para obtener la reducción del 90% de radiocesio en los árboles se debe utilizar una cubierta sobre el terreno cuando son talados.

La **eliminación** de la capa superficial del **asfalto** de los viales, es un método muy efectivo para la retirada de la contaminación, pero es bastante caro y no es una manera muy rápida de descontaminación. Al eliminar una fina capa de asfalto de la superficie de una vía utilizando la maquinaria adecuada es posible lograr un factor de descontaminación de más de 100.

La **retirada de una capa de suelo** se puede llevar a cabo con niveladoras, excavadoras y escarificadoras. Eliminando aproximadamente los primeros 5 cm de suelo se logran reducciones de la dosis de alrededor del 80-90%. Una desventaja de la retirada de suelo como medio de descontaminación es la generación de grandes cantidades de residuos radiactivos.

En la Tabla 5 se presenta el rango de eficiencias de descontaminación (radiocesio) de algunas técnicas.

Tabla 5. Rango de eficiencias de descontaminación de diferentes técnicas (Moring 1997).

Técnicas de descontaminación	Superficie	Actividad retirada (%)
Barrido y barrido con aspiración	Superficies pavimentadas Superficies permeables	20-90 67-90
Manguedo y flaseado	Superficies pavimentadas Tejados Paredes	45-95 25-90 0
Retirada de superficies	Capa superior de suelos Superficie de viales Sustitución de cubiertas	75-90 98-100 100
Cortado de césped		25-90
Tala de árboles		90-98
Arado (15-30 cm)	Parques y zonas ajardinadas	25-98
Excavación	Jardines	83
Chorroado	Edificios	40-100

En general, antes de la descontaminación, las zonas ajardinadas y los árboles son los principales contribuyentes a la dosis por deposición seca. Los tejados también parecen ser importantes, sobre todo en zonas de casas bajas. Las calles se hacen más importantes en las zonas de alta densidad de población.

En el caso de deposición húmeda, las contribuciones a la dosis más importantes son la deposición en jardines y calles. La única recuperación de las zonas ajardinadas en general supone una reducción de la dosis en un factor de aproximadamente 4.

12.5.5. ZONAS RURALES

Planificación de la descontaminación de zonas rurales

Cuando se planifica la descontaminación de zonas rurales, es importante seleccionar los métodos de limpieza de terreno que menos afecten a la viabilidad del terreno para producir cultivos y que reduzcan al mínimo los daños ecológicos al suelo, la flora y la fauna. La selección de los métodos más adecuados de descontaminación de grandes extensiones de terreno y de restauración de sus usos productivos se ve complicada por factores tales como:

- la topografía de la zona
- el gran número de ecosistemas naturales y usos de la tierra posibles.
- el gran número de tipos de vegetación y las características de las distintas clases de suelo
- el complejo comportamiento de los radionucleidos en los diferentes suelos.

El método elegido debe reducir la radiación beta/gamma a niveles aceptables, prevenir la entrada de los radioisótopos en la cadena alimentaria y tener el menor impacto ecológico posible. Además, los métodos deben ser seguros, prácticos y rentables económicamente debido a los problemas logísticos y los enormes costes asociados a la limpieza de esas grandes zonas y a la necesidad de gestionar los residuos generados.

En el medio agrícola, la época del año en que se produzca la deposición tendrá una gran influencia en las consecuencias. La deposición se puede producir sobre el suelo desnudo, o sobre las superficies del vegetal cultivado o en suelo subyacente. La cantidad de material depositado interceptado por el cultivo dependerá de factores como si la deposición ha sido húmeda o seca y de la cantidad y la intensidad de la lluvia o de otro tipo de precipitación. La deposición en tierras de pastoreo tendrá mayor impacto en las épocas del año durante las que los animales normalmente pastan al aire libre.

El tipo de suelo afectará fuertemente al comportamiento de los radioelementos más móviles y, por tanto, más importantes radiológicamente, en particular el radiocesio y el radioestroncio. En el caso del cesio, se ha demostrado que su transferencia suelo-planta aumenta con la cantidad de materia orgánica en el suelo. La transferencia suelo-planta del estroncio está gobernada principalmente por la presencia de calcio en el suelo.

La transferencia de radioisótopos a los animales y a los productos de origen animal depende de las prácticas de gestión que se realicen. En las zonas cultivadas, la transferencia de radiocesio a los animales es baja en comparación con la transferencia que se produce en terrenos no productivos o a animales salvajes. Sin embargo, la tasa de la producción de alimentos es mayor en las áreas cultivadas. Por tanto, se deben comparar las tasas de transferencia y de producción.

Métodos de descontaminación en suelos agrícolas y cultivos

En el caso de deposición radiactiva, existen medios disponibles para la reducción del nivel de radiación en los terrenos y de la transferencia de nucleidos radiactivos a la cadena alimentaria, tanto a corto como a largo plazo. Los métodos y actividades de descontaminación podrían ser:

- A. Retirada de los vegetales cultivados
- B. Retirada de la capa superior del suelo
- C. Arado
- D. Contramedidas agroquímicas tales como fertilización con potasio y la aplicación de cal.

La **retirada de los vegetales cultivados** se lleva a cabo durante el año en que se ha producido la deposición y los costes son los de la realización de una cosecha normal. La retirada de los cultivos contaminados es una manera de reducir el nivel de contaminación. La potencial eficacia depende del tipo y etapa de desarrollo del cultivo. Un cultivo denso puede interceptar del 25 al 50% de la deposición húmeda y, a veces, incluso más de deposición seca. Este método genera residuos radiactivos que deben ser almacenados o eliminados.

La **retirada de la capa contaminada superior del suelo** es la forma de descontaminación más eficaz y tal vez la más aceptada públicamente. La retirada de una capa de 5-10 cm de suelo en terrenos de alta calidad, cuya fertilidad y permeabilidad no deberían ser reducidas, es una medida eficaz pero muy cara. Las desventajas de este tipo de descontaminación son los enormes problemas logísticos y de gestión de los residuos generados. Una capa de 5 cm de suelo de una superficie de una hectárea tiene un volumen de 500 m³ y un peso de alrededor de 1000 toneladas. Además, este tipo de descontaminación requiere un cierto tiempo para su organización y puesta en marcha.

Hay distintos tipos de **arado** que pueden considerarse métodos de descontaminación:

- a) arado normal o de vertedera que voltea los 20 o 30 cm superiores del suelo,
- b) arado profundo que voltea los 50 o 100 cm superiores del suelo y
- c) arado tipo "skim-and-burial" (arado superficial y enterramiento profundo). La disponibilidad inmediata de arados normales significa que, poco después de la contaminación, se suprimirá cualquier problema de resuspensión. La desventaja de este método es que el arado que se realice en los años siguientes tendería a devolver la contaminación de nuevo a la superficie. El arado profundo ocasiona que prácticamente toda la contaminación sea incapaz de acumularse en los vegetales cultivados y en las hierbas. Sin embargo, se destruye el drenaje del terreno y se puede perder la capa fértil superior del suelo. Los arados de tipo "skim-and-burial" se pueden ajustar para que retiren la capa superior de 5-10 cm y la coloquen como una capa discreta a una profundidad de unos 50 centímetros por debajo de una capa de suelo no invertida. El arado profundo y el arado tipo "skim-and-burial" tienen un coste estimado tres veces superior al de un arado normal, para una velocidad de arado moderada y con unos equipos de calidad media.

La fertilización extra con potasio y la aplicación extra de cal puede emplearse si se dispone de cal y fertilizantes. La incorporación de radiocesio y radioestroncio a través de la raíz está fuertemente influida por la presencia en el suelo de potasio y calcio, respectivamente. La influencia de estos análogos estables puede ser utilizada frecuentemente para reducir la absorción a través de la raíz de radioisótopos de estos elementos.

En la Tabla 6 se presenta un ejemplo de la relación coste-beneficio de los diferentes métodos de descontaminación de suelos estudiados en los países nórdicos, en el supuesto de una deposición de 1 MBq/m² de Cs137.

Tabla 6. Relación coste-beneficio de diferentes medidas relacionadas con los suelos estudiados en países nórdicos suponiendo la deposición de 1 MBq/m² de Cs137 (Strand 1997).

Método de Descontaminación del suelo	Producto	% reducción en Sievert-persona	Coste (Euro/ - Sievert-persona)
Retirada de una capa de 5 cm de suelo	Grano panificable	95	40000
	Patatas	95	2100
	Leche	95	4100
Arado tipo "skim-and-burial"	Grano panificable	90	7300
	Patatas	90	400
	Leche	90	760
Fertilización anual con potasio	Grano panificable	39	94000
	Patatas	50	4000
	Leche	67	2200

12.5.6. ANIMALES

Las prácticas de gestión dependen de la magnitud de la transferencia de la radiactividad a los animales y a los productos animales. La transferencia de radiocesio a los animales es baja en las zonas cultivadas, frente a la transferencia a los animales salvajes. Sin embargo, la tasa de la producción de alimentos es mayor en las zonas cultivadas. Por lo tanto, se debe prestar atención tanto a los animales domésticos como a los salvajes.

Hay disponibles una gran variedad de contramedidas para la reducción de la ingesta de radionucleidos por parte de la población a través de productos animales. Los tres grupos principales son:

- restricción de los productos alimenticios de consumo humano.
- La administración de aditivos a los animales para reducir la absorción intestinal de radionucleidos
- La gestión de los animales

En el segundo grupo, se pueden usar **absorbentes de radiocesio**, como la bentonita y AFCF (un derivado del hexacianoferrato) en la alimentación animal (en forma de polvo) o puede incorporarse a la sal que se administra como complemento alimenticio. La utilización de la bentonita en forma de polvo proporciona una reducción de alrededor del 50% en la concentración de actividad en radiocesio tanto en la leche como en la carne. El AFCF es más eficaz (80-90% de reducción), pero también más caro. Los resultados de reducción en el uso incorporado a la sal son mucho más variables, porque cada animal la utiliza de manera diferente. Sin embargo, para los animales salvajes es casi la única manera de reducir la concentración de actividad en la carne.

No existen productos adsorbentes de radioestrancio de alta eficacia. El incremento del contenido en Calcio de la dieta de los animales es el mejor aditivo disponible actualmente como medida contra el radioestrancio.

En el primer grupo, **prohibir productos alimentarios contaminados**, es la medida de protección más drástica, pero también muy cara y socialmente desestabilizadora. La difusión de **consejos sobre la dieta y la preparación de los alimentos** puede ser importante para grupos de población especiales, como los cazadores, que tienen una alta tasa de consumo de carnes de animales silvestres.

En el tercer grupo, **proporcionar al ganado alimentación no contaminada o retirar los animales**, se puede realizar hasta que las concentraciones de actividad en la vegetación de las zonas contaminadas se hayan reducido a niveles suficientemente bajos.

En ciertas especies animales los niveles de contaminación de radiocesio varían mucho según la estación. Por lo tanto, cambiar el momento normal de sacrificio puede tener un efecto acusado sobre la ingesta de radiocesio por los seres humanos. En el caso de los animales salvajes, una posible contramedida importante es cambiar la época de la temporada de caza. El cambio de las estrategias de producción, dejando de producir leche para producir carne puede reducir la contaminación del producto final más del 90% en el caso de radioestrancio y hasta un 35% para radiocesio.

La reducción de la dosis a través de los animales implica que las contramedidas deben aplicarse todos los años, ya que ninguna de las medidas descritas tiene efecto alguno a largo plazo.

12.5.7. TRANSPORTE Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS DE DESCONTAMINACIÓN

Transporte de los residuos recogidos

La limpieza de zonas contaminadas puede generar grandes volúmenes de suelos, asfalto, vegetación, líquidos, etc. que necesitan ser gestionados en condiciones de seguridad. Como no es deseable la existencia de un gran número de lugares para su eliminación, estos residuos tendrían que ser transportados a un lugar de eliminación. La carga y transporte normalmente se realiza utilizando equipos convencionales de movimiento de tierras utilizados en la industria de la construcción. Esta gran operación tendría que ser bien planificada.

La protección del personal de operaciones y del medio ambiente han de ser tenidos en cuenta al realizar la carga y transporte. Al cargar la tierra, puede ser necesario realizar la pulverización con agua para evitar la dispersión de polvo. Durante el transporte, se deben tomar medidas para prevenir la dispersión del material contaminado. Se deben acondicionar lugares para la limpieza y medida de los transportes. También sería necesario un plan de respuesta en emergencia en caso de accidente durante el transporte.

Eliminación de grandes volúmenes de residuos

El objetivo de la gestión de los residuos es confinar los radionucleidos presentes en los residuos hasta que dejen de suponer un riesgo inaceptable para la población y el medio ambiente. Un repositorio de residuos radiactivos debería:

Limitar la dispersión por vías acuática o aérea de los radionucleidos contenidos en los residuos.

Proteger los residuos de los procesos de deterioro de la superficie, tales como la erosión, la intrusión por seres humanos, animales o vegetación de raíces profundas.

Los radionucleidos de interés a más largo plazo después de un accidente, son principalmente Cs-137 y Sr-90, ambos con una vida media de alrededor de 30 años. Después de unos 300 años, la actividad de los residuos será de alrededor de 0,1% de la actividad inicial tras del accidente. Esto significa que una instalación de almacenamiento debe ser capaz de contener estos residuos durante varios cientos de años.

El tipo de instalación seleccionada depende de muchos factores, incluyendo la disponibilidad de equipamiento para desplazar los residuos, el volumen a desplazar, la distancia, la disponibilidad de lugares de eliminación, naturales o tales como canteras, minas o depresiones, y la geología e hidrogeología de la zona. Los factores básicos a considerar son:

- la cantidad y naturaleza de los residuos
- las características de ingeniería incorporadas al diseño
- las características del emplazamiento
- el período de tiempo durante el que se puede ejercer el control institucional.

Es necesario realizar una evaluación de seguridad que estudie la evolución futura del repositorio, los escenarios de liberación, los mecanismos de transporte de los radionucleidos, y, por último, las estimaciones de dosis al hombre, de forma que sea posible juzgar la aceptabilidad del método de eliminación frente a los criterios de seguridad utilizados. Las descripciones de los métodos utilizados para realizar evaluaciones de seguridad se pueden encontrar en la literatura, por ejemplo, en el documento del OIEA Technical Reports Series N ° 216.

Existe una serie de diseños genéricos para la eliminación o almacenamiento a largo plazo de los grandes volúmenes de residuos que se pueden generar en la

descontaminación en caso de accidente nuclear grave. Los que se presentan a continuación proceden del documento del OIEA Technical Reports Series N ° 300:

Depresiones o valles naturales. En el caso de los valles, se necesitaría cerrar la salida del valle para convertirlo en una depresión cerrada. Lo ideal sería que estos depósitos se encontraran situados en la cabecera de una zona de drenaje natural. Se podrían construir alrededor de la zona canales de desviación de los flujos de agua para controlar a largo plazo la erosión y las filtraciones.

Fosas excavadas. Si no se dispone del transporte adecuado, puede que sea necesario cavar a nivel local cierta cantidad de fosas más pequeñas. Sin embargo, es preferible utilizar un número pequeño de fosas grandes, tanto para ejercer el control de los repositorios, como para un mejor uso de la tierra y una mejor elección de las características del emplazamiento y de las tecnologías a utilizar. Se pueden construir grandes fosas o pozos utilizando la tecnología aplicada para el almacenamiento de los residuos del procesamiento del mineral de uranio o las tecnologías utilizadas en la construcción de vertederos de otros tipos de residuos, como los urbanos.

Canteras y minas a cielo abierto. La posibilidad de utilizarlas depende del clima, de la profundidad y la variabilidad de las aguas subterráneas, de la permeabilidad del terreno, de la susceptibilidad del vaso a sufrir inundaciones, etc. Si se desea utilizar alguna cantera en particular, se pueden reducir algunos de los problemas mencionados mediante adecuaciones ingenieriles como la impermeabilización del vaso y del cubrimiento de los residuos mediante materiales artificiales o el revestimiento con arcilla.

Minas subterráneas. Algunos residuos pueden ser depositados en minas subterráneas agotadas. La utilidad de este enfoque dependerá de muchos factores, como la profundidad y el movimiento de aguas subterráneas a través de la mina y de la susceptibilidad de sufrir inundaciones. Estos aspectos podrían ser difíciles de caracterizar en breve plazo.

Grandes montones o diques, que serían impermeabilizados mediante arcilla, etc.

En la literatura existe información detallada de los métodos de construcción de este tipo de instalaciones para grandes volúmenes de residuos radiactivos de baja actividad.

Si fuera necesario, la instalación podría ser recubierta con arcilla u otras barreras impermeables para reducir al mínimo las fugas. Situar la instalación de eliminación en una zona Geológica de arcillas impermeables eliminaría la dependencia de la integridad la instalación respecto al recubrimiento ingenieril con arcilla u otro material impermeable. La infiltración de la precipitación en los residuos se puede controlar utilizando una cubierta impermeable, como la arcilla, e instalando el drenaje adecuado. La intrusión por el hombre, los animales o las plantas puede ser minimizado utilizando una capa de cobertura de escollera y/o una cubierta gruesa.

La selección del lugar y método de eliminación depende de muchos factores, incluido el coste y la disponibilidad de emplazamientos para el depósito, y las características de los mismos. El coste de la carga y el transporte de los residuos puede influir significativamente en la elección del lugar de eliminación.

Idealmente, el proceso de selección de emplazamientos consiste en: el desarrollo de los planes y criterios generales y la revisión de los datos básicos, la selección de zonas potencialmente favorables, la selección de emplazamientos posibles y la confirmación de la aceptabilidad final del emplazamiento o emplazamientos. Los detalles del proceso de selección se pueden encontrar en la literatura como, por ejemplo, en el documento del OIEA Technical Reports Series N ° 216.

12.5.8. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-site Emergency Management in Central Eastern Europe. Course Training Material.
2. Descontaminación de zonas extensas contaminadas como consecuencia de un accidente nuclear. Technical Report Series N° 300. OIEA. 1989
3. Strand P., Skuterud L. and Melin J., Reclamation of Contaminated Urban and Rural Environment Following a Severe Nuclear Accident. Nordic Nuclear Safety Research, BER 6, 1997.
4. Roed J. Deposition and removal of radioactive substances in an urban area. Final Report of the NKA-245 Project AKTU-245, October 1990.
5. Moring M, Markkula M-L. Cleanup techniques for Finnish urban environments and external dosis from Cs-137 – modelling and calculations, STUK-A140, Helsinki 1997.
6. Brown J, Cooper J, Jones J, Flaws L, McGeary R, Spooner J. Review of Decontamination and Clean-up Techniques for Use in the UK following Accidental Release of Radioactivity to the Environment. NRPB-R288, CChilton 1996.
7. Lehto J. Cleanup of Large Radioactive-Contaminated Areas and Disposal of Generated Waste, Final Report of NKA KAN2 Project, Copenhagen 1994.
8. Investigation for Repositories for Solid Radioactive Waste in Shallow Ground. Technical Reports Series No. 216, IAEA, Vienna, 1982.