

Protección radiológica en Braquiterapia. Informe del grupo de trabajo de Braquiterapia de la SEFM

Radiation Protection in Brachytherapy. Report of the SEFM Task Group on Brachytherapy

José Perez-Calatayud^{1,8,*}, Eva Corredoira Silva², Vicente Crispín Contreras^{3,*}, Teresa Eudaldo Puell^{4,*}, Jesús de Frutos Baraja^{5,*}, Francisco Pino Sorroche^{6,*}, Mari Carmen Pujades Claumarchirant⁷, José Richart Sancho⁸

¹ Servicio Oncología Radioterápica. Hospital Universitario y Politécnico La Fe. Valencia.

² Servicio de Radiofísica-Radioprotección. Hospital Universitario La Paz. Madrid.

³ Fundación Instituto Valenciano de Oncología. Valencia.

⁴ Servei de Radiofísica i Radioprotecció. Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Barcelona.

⁵ Servicio de Oncología Radioterápica. Hospital Clínico. Valladolid.

⁶ Servicio de Radiofísica. Institut Català d'Oncologia Bellvitge. Barcelona.

⁷ Centro Nacional de Dosimetría. Valencia.

⁸ Servicio de Oncología Radioterápica. Clínica Benidorm. Benidorm (Alicante).

* Miembros del Grupo Braquiterapia de la SEFM

Este documento presenta el Informe del Grupo de Braquiterapia de la Sociedad Española de Física Médica relativo a los aspectos de Protección Radiológica involucrados en Braquiterapia. Este trabajo intenta recoger los principales aspectos de protección radiológica asociados a la práctica clínica, teniendo en cuenta el equipamiento actual en España.

Fundamentalmente, este informe se centra en los contenidos típicos asociados a tratamientos con Alta Tasa de Dosis, mediante ^{192}Ir y ^{60}Co , e implantes permanentes con semillas ^{125}I , ^{103}Pd y ^{131}Cs , que son las modalidades más actuales y extendidas. También se incluye la Braquiterapia oftálmica (COMS con ^{125}I , ^{106}Ru , ^{90}Sr) dada su disponibilidad en un notable número de hospitales españoles.

La intención de este informe es el servir de ayuda a los radiofísicos en el establecimiento del programa de Protección radiológica en la técnica de Braquiterapia, intentando resolver algunas ambigüedades en la aplicación de la legislación así como incluyendo recomendaciones a aplicar en la práctica.

Palabras clave: braquiterapia, protección radiológica, cálculo de barreras, planes de emergencia.

This document presents the report of the Brachytherapy Task Group of the Spanish Society of Medical Physics. It is dedicated to the radiation protection aspects involved in brachytherapy. The aim of this work is to include the more relevant aspects related to radiation protection issues that appear in clinical practice, and for the current equipment in Spain.

Basically this report focuses on the typical contents associated with high dose rate brachytherapy with ^{192}Ir and ^{60}Co sources, and permanent seed implants with ^{125}I , ^{103}Pd and ^{131}Cs , which are the most current and widespread modalities. Ophthalmic brachytherapy (COMS with ^{125}I , ^{106}Ru , ^{90}Sr) is also included due to its availability in a significant number of spanish hospitals.

The purpose of this report is to assist to the medical physicist community in establishing a radiation protection program for brachytherapy procedures, trying to solve some ambiguities in the application of legal requirements and recommendations in clinical practice.

Key words: brachytherapy, radiation protection, shielding, emergency procedures.

* Correspondencia

J. Perez-Calatayud, coordinador Grupo BT SEFM; perez_jos@gva.es

Tabla de contenido

1. Introducción y propósito	13
2. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia con fuentes de LDR de ^{137}Cs	15
3. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia con fuentes de HDR-PDR de ^{192}Ir y ^{60}Co	16
3.1. Cálculo de barreras en HDR-PDR	16
3.1.1. <i>Formulación y consideraciones prácticas en la aplicación de las recomendaciones actuales</i>	16
3.1.2. <i>Recomendaciones sobre la bibliografía a utilizar</i>	22
3.2. Plan de emergencia en HDR-PDR	23
3.2.1. <i>Recomendaciones de los fabricantes de equipos HDR-PDR</i>	23
3.2.2. <i>Consideraciones prácticas y modelo propuesto</i>	25
4. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia oftálmica	27
4.1. Descripción de la técnica y aplicadores utilizados	27
4.2. Adquisición y almacenamiento de las fuentes	28
4.3. Manipulación, preparación y gestión de las fuentes durante el implante	28
4.4. Aspectos a considerar en la hospitalización durante el implante	30
4.5. Plan de emergencia	31
5. Aspectos de Protección radiológica en la Braquiterapia permanente con fuentes de LDR de ^{125}I, ^{103}Pd y ^{131}Cs	31
5.1. Descripción de la técnica y equipos utilizados	32
5.2. Adquisición y almacenamiento de las fuentes	33
5.3. Manipulación, preparación y gestión de las fuentes durante el implante	33
5.4. Aspectos a considerar en la etapa postimplante	34
5.5. Recomendaciones en situaciones especiales	35
5.5.1. <i>Expulsión de fuentes</i>	35
5.5.2. <i>Cremación</i>	36
5.5.3. <i>Cirugía pélvica o abdominal</i>	36
5.6. Plan de emergencia	36
6. Estanqueidad de las fuentes	36
6.1. Legislación	36
6.2. Realización del control de hermeticidad	38
6.3. Reutilización de fuentes	38
7. Gestión de residuos	39
8. Personal gestante profesionalmente expuesto en Braquiterapia	40
9. Conclusiones	40
10. Agradecimientos	41
11. Listado de abreviaciones	41
Referencias	43
Anexo I. Información a incluir en el alta del paciente sometido a un implante de próstata en Braquiterapia permanente	46
A.I.1. Recomendaciones para el paciente	46
A.I.2. Información para el personal sanitario	47

1. Introducción y propósito

Desde principios del siglo XX, diversas organizaciones internacionales se han preocupado por los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos y han elaborado recomendaciones para la prevención de sus posibles consecuencias dañinas.

De entre ellos, la ICRP (*International Commission on Radiological Protection*), fundada en 1928, ha tenido como finalidad primordial desde sus inicios, el desarrollar, mantener, y elaborar el Sistema Internacional de Protección Radiológica, que ha sido usado como base común de las normas de radioprotección para elaborar legislación, guías y recomendaciones, programas y práctica de la Protección radiológica, en todo el mundo. La ICRP ha marcado las pautas y la filosofía del sistema de Protección radiológica mundial, y sigue siendo así, aún en nuestros días. El documento ICRP n° 26,¹ publicado en 1977, marca el punto de partida del sistema de Protección radiológica moderno, basado en tres principios fundamentales: “Justificación”, “Optimización” y aplicación de “Límites de dosis”. De entre las recomendaciones más recientes, destacan las de 1990, publicadas en el documento ICRP n° 60,² (que sustituyó al documento ICRP n° 26), y que han sido ya sustituidas a su vez por las recomendaciones de 2007, publicadas en el documento ICRP n° 103.³ Ambas publicaciones, dada la relevancia de sus contenidos, han sido traducidas al español y publicadas por la SEPR (Sociedad Española de Protección Radiológica), y divulgadas entre sus socios.

De igual modo, en Estados Unidos, se crea en 1964 la NCRP (*National Council on Radiation Protection and Measurements*), con los objetivos de elaborar recomendaciones sobre Protección radiológica, y definir y desarrollar magnitudes y unidades radiológicas, sobre todo las referidas a la Protección radiológica, en colaboración con otros organismos internacionales, particularmente, con la ICRP.

La IAEA (*International Atomic Energy Agency*), recogiendo las recomendaciones de estas organizaciones, publica los BSS (*Basic Safety Standards*), que son un sistema de principios fundamentales de seguridad, que establecen los requisitos que se deben cumplir para asegurar la protección de las personas y del medio ambiente contra los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes. Se redactan de modo que puedan ser de utilidad para ser incluidas en la legislación de cada país. Son la base para establecer un programa de seguridad y protección contra los efectos de las radiaciones en el organismo humano, en cualquier actividad que implique el manejo de radiaciones ionizantes.

Los BSS de 1996,⁴ tienen como objetivo establecer los requerimientos básicos para la protección contra los riesgos asociados a la exposición a las radiacio-

nes ionizantes y para la seguridad de las fuentes de radiación que producen tales exposiciones. Siguen las recomendaciones de la ICRP, y no son de obligado cumplimiento, sino que son guías de práctica para las autoridades públicas, organismos reguladores, empresas y trabajadores. Definen los principios básicos e indican los diferentes aspectos que debe cubrir un programa efectivo de Protección radiológica, incluyendo las exposiciones médicas.

En 2014, la IAEA ha publicado una versión revisada de los BSS.⁵ Como novedades, estos nuevos BSS recogen las recomendaciones del documento ICRP n° 103 y definen: situación de exposición planificada, situación de exposición de emergencia y situación de exposición existente. Las exposiciones médicas se incluyen dentro de las situaciones de exposición planificada. Para cada una de estas situaciones de exposición, los requerimientos se agrupan en los dedicados a la exposición ocupacional, a la exposición del público y a exposiciones médicas.

La IAEA tiene también otras publicaciones técnicas referidas a la implementación de programas, en particular, el TECDOC-1040,⁶ referente a la Radioterapia, que incluye todos los aspectos relativos a la seguridad y a la Protección radiológica.

La Unión Europea, ha implementado las recomendaciones de estas organizaciones internacionales en su legislación, a través de varias directivas. La llamada “BSS Directive” (Directiva 96/29 EURATOM),⁷ para la protección de la salud de los trabajadores y del público en general contra los peligros provenientes de las radiaciones ionizantes, y la llamada “MED”, explícitamente dedicada a la protección del paciente en las exposiciones médicas (Directiva 97/43/EURATOM).⁸

La más reciente es la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo de 5 de diciembre de 2013⁹ (también llamada “the new BSS”), que deroga la Directiva 96/29/EURATOM y las Directivas complementarias 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 97/43/EURATOM y 2003/122/EURATOM. Esta nueva directiva establece las normas básicas de seguridad aplicables a la protección sanitaria de los trabajadores, la población, los pacientes y otras personas sometidas a exposición médica frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes para su aplicación uniforme en todos los Estados miembros. Se aplicará a cualquier situación de exposición planificada, existente o de emergencia que implique un riesgo de exposición a radiaciones ionizantes que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la Protección radiológica en relación con la salud de los trabajadores, los ciudadanos, los pacientes y otras personas sujetas a exposición médica, o bien en relación con el medio ambiente.

La legislación española, ha implementado las directivas europeas, mediante la publicación de Reales Decretos. La transposición de la Directiva 96/29/

EURATOM, se realiza mediante la publicación del Real Decreto 783/2001,¹⁰ de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes, y que posteriormente ha quedado modificado por el Real Decreto 1439/2010.¹¹ Por su parte, la Directiva “MED” 97/43/EURATOM, se ha traspuesto mediante cuatro Reales Decretos,¹²⁻¹⁵ relativos al establecimiento de los criterios de calidad en Radiodiagnóstico, en Medicina nuclear, y en Radioterapia, y el último de ellos referente a la justificación de las exposiciones médicas. La nueva Directiva 2013/59/EURATOM está todavía pendiente de implementación, y es de obligada transposición a la legislación nacional en 2018.

El organismo regulador en España en materia de Seguridad nuclear y Protección radiológica, es el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear). Este organismo publica las “Guías de Seguridad”¹⁶ que contienen los métodos recomendados por el CSN, desde el punto de vista de la Seguridad nuclear y Protección radiológica, y su finalidad es orientar y facilitar a los usuarios la aplicación de la reglamentación nuclear española vigente. Además, el CSN legisla también mediante las llamadas “Instrucciones”, que se publican en el BOE, algunas de ellas referentes a la Protección radiológica en el ámbito sanitario.

Aparte de todas estas publicaciones citadas hasta ahora, y que constituyen un marco general para la Protección radiológica, las organizaciones internacionales de Protección radiológica han publicado también sobre temas muy específicos de diversos ámbitos. Así cabe resaltar las publicaciones de la ICRP sobre seguridad del paciente y prevención de accidentes en el uso de diversas técnicas o procedimientos de terapia con radiaciones,¹⁷⁻¹⁹ o las de la NCRP sobre diseño de instalaciones y cálculo de blindajes.²⁰⁻²³

Más específicamente, en el campo de la Braquiterapia, organizaciones científicas de reconocido prestigio internacional, como por ejemplo la AAPM (*the American Association of Physicists in Medicine*), también han publicado informes sobre diseño de instalaciones y cálculo de blindajes,²⁴⁻²⁵ y sobre controles de calidad y recomendaciones de seguridad en el manejo de técnicas y procedimientos específicos de Braquiterapia.²⁶⁻³⁰

Así pues, la Protección radiológica, en general y en particular en el tratamiento oncológico radioterápico con Braquiterapia, se basa en los tres principios anteriormente citados: justificación, optimización y limitación. Mientras los dos primeros claramente afectan a todas las personas expuestas, incluido el paciente, el tercero afecta exclusivamente a los trabajadores profesionalmente expuestos y al público en general.

Por tratarse de un uso médico de la radiación ionizante esta práctica se puede considerar justificada, siempre y cuando se contemplen dos niveles, uno

genérico para toda la práctica y otro individual para cada paciente. Asimismo, con el fin de limitar el riesgo radiológico asociado se deben tener en cuenta tanto las exposiciones normales como las debidas a situaciones anormales de fallo o de emergencia.

La Braquiterapia probablemente sea, si no la mayor, una de las prácticas médicas con radiaciones ionizantes que entraña mayor riesgo radiológico asociado. La optimización en Braquiterapia, una vez justificado su uso, consiste en administrarle la dosis absorbida prescrita al tumor y disminuyendo en lo posible la dosis absorbida en los tejidos sanos. Aunque ello no supone que las dosis a los profesionales sanitarios y al público sea menor, debe realizarse el esfuerzo para que este balance nos lleve a minimizar las dosis no deseadas al paciente, a los profesionales y al público.

Definitivamente la manera de disminuir este riesgo es mediante la aplicación de rigurosos programas de control de calidad en el proceso braquiterápico. Un correcto diseño de la instalación, un correcto diseño del flujo de trabajo y una adecuada gestión de las fuentes y equipos dan lugar a que, si el proceso de justificación y optimización se aplican correctamente, el principio de limitación de dosis pueda hacerse efectivo.

En este documento nos centraremos exclusivamente en el diseño de instalaciones y en una adecuada gestión de las fuentes y equipos en situación normal y de emergencia.

Dentro de las actividades previstas por el Grupo de Braquiterapia de la Sociedad Española de Física Médica, se ha creído interesante la realización de este informe relativo a los aspectos de Protección radiológica involucrados en Braquiterapia. Se intenta recoger en el informe los principales aspectos de Protección radiológica asociados a la práctica clínica teniendo en cuenta el equipamiento actual en España. No se incluye en el Informe la carga diferida manual con ¹³⁷Cs dado que, por lo que conocemos, no existe esta modalidad en España. Tampoco se incluyen las fuentes de ¹⁹²Ir de Baja Tasa de Dosis (LDR) dado el cese de su producción.

Fundamentalmente este trabajo se centra en los contenidos típicos asociados a tratamientos con Alta Tasa de Dosis (HDR), mediante ¹⁹²Ir y ⁶⁰Co, Tasa de Dosis Pulsada (PDR) con ¹⁹²Ir e implantes permanentes con semillas de ¹²⁵I, ¹⁰³Pd y ¹³¹Cs, que son las modalidades más actuales y extendidas. También se ha creído conveniente incluir la Braquiterapia oftálmica, por tratarse de una modalidad existente, aunque en menor medida, en hospitales españoles. Lógicamente, nos vamos a referir solamente al caso de fuentes encapsuladas que son las utilizadas en Braquiterapia.

La intención de este informe es disponer de un documento que sirva de ayuda a los radiofísicos en el establecimiento del manual de procedimientos de Protección radiológica en la técnica de Braquiterapia,

intentando resolver algunas ambigüedades en la aplicación de la legislación y recomendaciones en la práctica.

2. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia con fuentes de LDR de ^{137}Cs

Los implantes LDR con ^{137}Cs son siempre implantes temporales mediante sistemas de carga diferida automática. La irradiación se realiza de manera continua y, por tanto, el paciente está hospitalizado mientras se le administra la dosis absorbida prevista. El tratamiento puede durar desde varias horas hasta 6 o 7 días, dependiendo de la dosis absorbida administrada, el número de fuentes, y de su TKRA (Tasa de Kerma de Referencia en Aire) y disposición geométrica.

En cuanto a las fuentes, se comercializan con distintas formas y distintos valores de TKRA. Una amplia descripción de todas las fuentes comercializadas, y que incluye todos los datos de consenso para la dosimetría, puede encontrarse en el documento de consenso AAPM-ESTRO (*European Society of Therapeutic Radiation and Oncology*).³¹ Para cualquier fuente en Braquiterapia, antes de ser utilizada en la práctica clínica, debe medirse su TKRA y verificar que coincide (dentro de las tolerancias) con el valor del certificado de calibración. Para la medida de la TKRA ha de emplearse el instrumental adecuado y recomendado.³²

En el caso del ^{137}Cs , puesto que su período de semi-desintegración ($T_{1/2}$) es alto (30.07 años), no es preciso renovar las fuentes con frecuencia. Sin embargo, será imprescindible en este caso, hacer pruebas de estanqueidad, como se recoge en la sección 6.

Los proyectores automáticos de fuentes han supuesto una de las grandes revoluciones en la historia de la Braquiterapia, desde su aparición hacia la década de los 90, sobre todo por la innegable mejora que ofrecen desde el punto de vista de protección al personal y al público. Se evita toda manipulación del material radiactivo y permiten la atención al paciente sin irradiación en la sala.

Los equipos de carga diferida automática LDR se utilizan fundamentalmente para implantes ginecológicos, con fuentes de ^{137}Cs . Las fuentes de ^{137}Cs se almacenan directamente en un contenedor perfectamente blindado, dentro del propio aparato de carga diferida automática, situado en el interior de la habitación del paciente. El sistema se programa para que las fuentes se coloquen de manera automática en las diferentes guías o aplicadores que lleva colocados el paciente, en número y disposición de acuerdo con lo que se ha calculado previamente para que la distribución de dosis absorbida en el paciente sea la planificada.

Los dos sistemas más utilizados son:

1. El Selectron (Nucletron-Elekta), diseñado para Braquiterapia ginecológica, utiliza un conjunto de fuentes esféricas (*pellets*) de ^{137}Cs , de 2.5 mm de diámetro, de igual actividad (fuentes indistinguibles) juntamente con un conjunto de esferas de igual tamaño, inactivas, de acero inoxidable. Tiene 3 o 6 canales y puede almacenar hasta un total de 48 *pellets* (20 activos y 28 inactivos). Se componen trenes de fuentes con fuentes activas e inactivas para simular fuentes lineales de distintas longitudes, que se introducen de manera automática en los dos aplicadores vaginales y sonda uterina de la paciente, previamente insertados en el quirófano. Aunque el ^{137}Cs tiene un $T_{1/2}$ largo, y no sería necesario cambiar la fuente con frecuencia, la recomendación de la empresa suministradora era de cambiarlas cada 10 años, por problemas de desgaste mecánico de las fuentes, que podrían producir problemas de obstrucción en las guías. Actualmente ya no se comercializa.
2. El Curiatron (Bebig), utiliza fuentes de ^{137}Cs del tipo CSM 3, CSM 40 o CSM 11. El equipo dispone de cuatro canales. No admite composición de trenes de fuentes, en contraste con el equipo Selectron. Las fuentes son distinguibles y se elige de entre todas las disponibles cuál se va a cargar en cada canal. El sistema cuenta con una manivela para la retracción manual en caso de emergencia. Actualmente ya no se comercializa.

Ambos sistemas tienen en común que las fuentes se introducen y se sacan de los aplicadores de forma automática, y que tienen un mando situado en el exterior de la habitación, que permite controlar a voluntad la entrada y salida de las fuentes desde el contenedor hasta el paciente. Además, es obligatorio que incorporen un mecanismo de seguridad que retire las fuentes de manera automática hacia el contenedor, si se abre la puerta durante el tratamiento.

La habitación del paciente portador de material radioactivo, ha de contar con protecciones estructurales diseñadas en función de las características de los implantes: técnica, tipo de radionucleido, TKRA, factor de ocupación, utilización de las zonas contiguas, etc. La metodología y los datos necesarios para el cálculo de los blindajes adecuados están desarrollados en numerosas publicaciones.^{20,33} Valores actualizados de transmisión para diferentes materiales se presentan más adelante, en la sección 3, tabla 5. En algunos casos se dispone de pantallas plomadas a colocar alrededor del implante con el fin de disminuir el grosor del absorbente de la pared que están protegiendo.³⁴

La sala de hospitalización con habitaciones para Braquiterapia ha de disponer de un monitor de radiación portátil. Puesto que el paciente ha de estar confinado en la habitación mientras dura el tratamiento, habitualmente las habitaciones disponen de comunicación audiovisual con el control de enfermería.

En todas las instalaciones de Braquiterapia debe existir un plan de emergencia de la instalación que contemple los procedimientos de actuación en caso de alguna incidencia. El plan de emergencia debe contemplar aspectos tales como: actuación en caso de incendio, de inundación, de catástrofes naturales, etc. También ha de contemplar actuaciones en caso de indisposición repentina grave del paciente (hemorragia, infarto, parada respiratoria, etc.) o incluso fallecimiento del paciente.

En cuanto a los planes de actuación específicos con los equipos de carga diferida automática, generalmente el fabricante da sus recomendaciones de actuación en caso de que el equipo presente anomalías, y sobre todo en caso de atasco de alguna fuente, que es el incidente más relevante que puede darse con estos equipos. Todas estas recomendaciones han de incorporarse al plan de emergencia propio de la instalación.

En caso de incidencias graves, el usuario de la instalación debe hacer el correspondiente informe y comunicarlo a la autoridad siguiendo la normativa vigente.³⁵

3. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia con fuentes HDR-PDR de ^{192}Ir y ^{60}Co

Los equipos de HDR y PDR son los más extendidos y habituales en los hospitales; la mayoría de centros disponen de equipos de HDR ya sea con ^{192}Ir o, incorporado recientemente, ^{60}Co . En esta sección, se recogen los aspectos fundamentales para el establecimiento de los requerimientos de Protección radiológica asociados a estos equipos, que fundamentalmente son el cálculo de blindajes y el establecimiento del plan de emergencia. Aunque toda la sección se centra en equipos de HDR, los contenidos son aplicables al caso de PDR con las adaptaciones necesarias teniendo en cuenta su carga de trabajo y TKRA.

3.1. Cálculo de barreras en HDR-PDR

A continuación se recoge el procedimiento de cálculo de barreras para estas salas de HDR teniendo en cuenta tanto valores actualizados de los elementos y procedimientos de cálculo, así como consideraciones prácticas.

3.1.1. Formulación y consideraciones prácticas en la aplicación de las recomendaciones actuales

En el diseño y en el cálculo de las barreras de una sala de tratamiento para albergar un equipo de Braquiterapia de HDR (búnker) debe considerarse la utilización que se le va a dar a la sala teniendo en cuenta la técnica, el radionucleido, su TKRA, tipo de tratamientos, número de pacientes tratados y ocupación de las salas colindantes. Sin embargo, hasta la aparición de los documentos NCRP *Report* No. 155²² e IAEA *Safety Reports Series* No. 47³⁶ no existía una publicación que recogiera explícitamente el diseño de este tipo de instalación. Así en la Sección 1 de los documentos NCRP *Report* No. 147²¹ y NCRP *Report* No. 151²² se discuten las magnitudes y unidades, así como los objetivos del diseño de los blindajes y la dosis efectiva, sin dedicar ningún tema específico al diseño de instalaciones de Braquiterapia. La aparición de los documentos NCRP *Report* No. 155 e IAEA SRS 47 contribuye a orientar y facilitar el diseño de este tipo de instalaciones.

El diseño del blindaje para instalaciones de Radioterapia está basado en ecuaciones empíricas sencillas. El concepto básico es que una barrera estructural caracterizada por su factor de transmisión (B) protege una ubicación de una fuente de radiación que se encuentra a una determinada distancia (d), con un nivel de protección dado por un objetivo de protección (P). En Braquiterapia, todas las paredes, el suelo y el techo son barreras primarias. Para este tipo de barreras, el factor de transmisión que reduce el campo de radiación a un nivel aceptable viene dado por:

$$B = \frac{Pd^2}{WUT} \quad (1)$$

donde W es la carga de trabajo, U es el factor de uso y T es el factor de ocupación, que se describen a continuación.

Límites de dosis y objetivos de protección (P)

La intención al diseñar el blindaje de la sala de tratamiento es reducir el nivel de radiación en las zonas adyacentes, asegurando que la dosis que recibirá cualquier trabajador o miembro del público no exceda el correspondiente límite de dosis establecido. El Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, RD 783/2001,¹⁰ establece los límites de dosis efectiva recogidos en la tabla 1.

Los objetivos de protección son límites de dosis de utilidad práctica que sirven para evaluar la protección de las barreras, de modo que se asegure que no se

Tabla 1. Límites de dosis establecidos en el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, RD 783/2001.

Límite anual	Profesional expuesto	Estudiantes	Miembro del público
Dosis efectiva	100 mSv/5 años (máx. 50 mSv/año oficial)	6 mSv/año oficial	1 mSv/año oficial

sobrepasan los límites anuales de dosis efectiva. El NCRP²³ recomienda que el objetivo de protección para trabajadores expuestos sea una fracción del límite de dosis permisible anual. Se expresan como un equivalente de dosis, H , y, en general, en un intervalo de tiempo de una semana.

Los valores establecidos como objetivo en el diseño de blindajes recomendados por el NCRP^{21,23} se recogen en la tabla 2.

Tabla 2. Límites de dosis efectiva, E , y los objetivos de dosis correspondientes, P , recomendados por el NCRP.²³

NCRP		
Área	E , mSv/año	P , μ Sv/sem
Controlada	50	100
No controlada	1	20

Los valores objetivo se suelen expresar como valores semanales debido a que la carga de trabajo de las instalaciones, tradicionalmente, se da en formato semanal. Sin embargo, algunas normas de seguridad especifican un límite de equivalente de dosis por hora, en donde se contempla el número máximo de pacientes que podrían tratarse en una hora teniendo en cuenta el tiempo dedicado al posicionamiento. Por ejemplo, el NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) establece un límite de dosis efectiva para las zonas no controladas de 20 μ Sv en cualquier hora³⁷ y el IPEM (*Institute of Physics and Engineering in Medicine*) designa el tipo de área en función de si la tasa de dosis equivalente instantánea supera los 7.5 μ Sv/h.³⁸ El límite de 20 μ Sv en cualquier hora asegura una protección adecuada cuando la carga de trabajo es excesivamente baja.

En el NCRP 151 se recomienda que en el cálculo del blindaje se utilice el objetivo de dosis semanal y si con éste no se llega a cumplir el límite de dosis por hora que se desee, se incrementa el espesor de blindaje hasta conseguirlo.

Para el caso de mujer embarazada profesionalmente expuesta, el NCRP recomienda²³ que no se exponga a niveles que resulten ser más grandes que el límite de dosis equivalente mensual, H_T , de 0.5 mSv al embrión o feto de la trabajadora. Para alcanzar esa recomendación, el NCRP recomienda una dosis efectiva anual de 5 mSv (la mitad del valor de 10 mSv/año) y una dosis

equivalente semanal objetivo de diseño de 0.1 mSv. Para áreas controladas, este objetivo de diseño de blindaje permitiría que las trabajadoras profesionalmente embarazadas pudieran acceder a sus áreas de trabajo.

Distancia (d)

La distancia de la fuente al punto de interés a proteger se calcula a partir de la ubicación esperada de la fuente más cercana a la barrera, a un punto 30 cm más allá de la superficie exterior de la barrera. Se suele utilizar la ubicación de la mesa de tratamiento para determinar la posición esperada de la fuente. Puesto que la posición de la fuente en la sala puede ser variable, se recomienda estudiar la influencia de la posición de la fuente en la eficacia del blindaje y si fuera necesario delimitar una zona que restrinja la posición la fuente en la sala.

Carga de trabajo (W)

La carga de trabajo es la dosis absorbida en agua en el seno de aire a 1 m de la fuente por unidad de tiempo, y en general se obtiene para un intervalo de una semana. Para la evaluación de la carga de trabajo en instalaciones de Braquiterapia de HDR en el NCRP 155²³ se recomienda aplicar un concepto similar al que se propone en el NCRP 151,²² estimando valores típicos de la tasa de kerma en aire a 1 m de distancia de la fuente o de forma conservadora usando el valor máximo, junto con el número medio de pacientes tratados por semana y el tiempo promedio de duración del tratamiento por paciente, pudiéndose estimar como:

$$W = S_K \cdot n \cdot t \quad (2)$$

donde:

- S_K es el *Air Kerma Strength* dado en unidades U, donde $1 \text{ U} = 1 \mu\text{Gy m}^2 \text{ h}^{-1}$, y descrito en las recomendaciones del TG-43 de la AAPM³⁹ que coincide numéricamente con la Tasa de Kerma de Referencia en Aire (TKRA)³² aunque en ésta última sus unidades son $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ya que 1 m está incluido en su definición.
- n es el número medio de tratamientos por semana.
- t es la duración promedio de los tratamientos.

Tabla 3. Valores de la cargas de trabajo según diferentes autores para instalaciones de HDR ^{192}Ir .

Parámetro	Pujades (Ref. 44)	NCRP 155 (Ref. 23)	Glasgow (Ref. 43)	Glasgow (Ref. 45)
Carga de trabajo (Gy/semana a 1 m)	0.07 (máx. 0.14)	0.3	0.013	0.08

Además, la carga de trabajo también debe considerar exposiciones previstas para control de calidad, calibración de la fuente y otras mediciones.

La carga de trabajo está directamente relacionada con la TKRA de la fuente. En la actualidad las unidades equipadas con fuentes de ^{192}Ir albergan fuentes entre 41 000 U y 49 000 U, aunque varios fabricantes esperan disponer de fuentes de 62 000 U. En el caso de los equipos recientes con fuentes de ^{60}Co , la TKRA típica es 22 900 U.⁴⁰ Varios autores⁴¹⁻⁴² han explorado el uso de fuentes de ^{169}Yb y ^{170}Tm con posibilidad de alta actividad específica y emisión de fotones de baja energía. En general y para las fuentes tradicionales podemos encontrarnos con tasas de dosis absorbidas en agua de 5 Gy/h, por tanto el espesor de blindaje primario requerido es bastante superior a una unidad de Braquiterapia de LDR. Esto hace que sea poco probable que una habitación diseñada para LDR sea adecuada para HDR.

Existen pocas publicaciones que citen valores típicos para la carga de trabajo a considerar en el diseño de una instalación de Braquiterapia de HDR. En el NCRP 155²³ para una instalación con ^{192}Ir se estima en 0.3 Gy/semana a 1 m, considerando una tasa de kerma en aire típica de 39 000 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ a 1 m (tasa de dosis absorbida en agua en el seno de aire a 1 m de 43 000 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, donde la conversión de kerma en aire a dosis absorbida en agua se realiza a través de la razón de coeficientes de absorción de energía másicos promediados sobre los espectros existentes en agua y aire

$\left[\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right]_{\text{agua}}^{\text{agua}} \left[\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right]_{\text{aire}}^{\text{aire}}$), cuatro pacientes/día con un tiempo promedio de tratamiento de 20 minutos por paciente y un programa de tratamiento de 5 días/semana. En los estudios llevados a cabo por Glasgow et al.⁴³ y Pujades et al.⁴⁴ se ha evaluado la carga de trabajo real en centros de trabajo donde se emplea ^{192}Ir con un elevado número de aplicaciones, obteniendo valores inferiores (véase la tabla 3).

Una estimación realista y precisa de la carga de trabajo es de vital importancia para un diseño adecuado de la protección. La carga de trabajo empleada influye en el espesor de blindaje requerido. Así, por ejemplo, una variación en la carga de trabajo de 0.02 a 0.3 Gy/semana a 1 m, se puede traducir en una diferencia de espesor de hormigón de 16 cm.⁴⁴

Realizando los tratamientos habituales en una instalación de ^{192}Ir HDR, es suficiente considerar cargas

de trabajo del orden de 0.1 Gy/semana a 1 m para el diseño de la instalación, pero teniendo en cuenta criterios tanto conservadores como previsores, así como su impacto en el blindaje resultante, se puede considerar adecuado el valor de la carga de trabajo que aparece en las recomendaciones del NCRP 155²³ de 0.3 Gy/semana a 1 m.

En la actualidad no existen publicaciones en las que se haya realizado una evaluación realista de la carga de trabajo en instalaciones con equipos de HDR con ^{60}Co . Para ^{60}Co , el TKRA de las fuentes comercializadas es aproximadamente la mitad que para el ^{192}Ir , por lo que resulta un tiempo de tratamiento proporcionalmente mayor;⁴⁶ sin embargo, para las mismas dosis de prescripción y número de pacientes tratados la carga de trabajo será equivalente.

Factor de uso (U)

El factor de uso es la fracción de la carga de trabajo para la cual el haz útil está dirigido hacia el lugar considerado a proteger. En Braquiterapia, como las fuentes no están colimadas, se pueden considerar que el factor de uso es igual a la unidad para cualquier orientación.

Factor de ocupación (T)

El factor de ocupación tiene en cuenta el grado de ocupación relativo de la zona considerada proteger. Se define como la fracción promedio de tiempo en que la persona potencialmente más expuesta está presente en esa área mientras la fuente está en uso. En la tabla 4 se presentan los factores de ocupación que sugiere el NCRP 151.²²

Factor de transmisión (B)

El espesor requerido de un determinado material para obtener la transmisión *B* se determina a partir de las curvas de transmisión características de cada energía de radiación y del material atenuador. Es habitual encontrar las curvas de transmisión tabuladas en función de los valores de la capa hemirreductora (*HVL*) y décimorreductora (*TVL*). En la literatura, existen diferentes publicaciones que contienen información sobre las características de los materiales de protección más utilizados para los radionucleidos de interés en Braquiterapia: NCRP 49,²⁰ NCRP 155,²³ IAEA

Tabla 4. Valores del factor de ocupación sugeridos en NCRP 151.²²

Lugar	Factor de ocupación (T)
• Zonas controladas, zonas de ocupación completa como oficinas, recepción, salas de espera con personal, salas de planificación de tratamientos, enfermería.	1
• Salas de tratamiento adyacentes, salas de exploración de pacientes.	1/2
• Pasillos, áreas de descanso del personal.	1/5
• Puerta de la sala de tratamiento.	1/8
• Lavabos públicos, almacenes, áreas al aire libre con asientos, salas de espera sin personal, zonas de espera del paciente, áticos, conserjerías.	1/20
• Escaleras, áreas al aire libre peatonales, ascensores sin personal, áreas de circulación de vehículos, parking sin personal.	1/40

Report 47,³⁶ Papagiannis *et al.*,⁴⁷ Granero *et al.*⁴¹ Los datos de transmisión de las diferentes publicaciones presentan notables diferencias entre ellos, atribuibles a las diferentes hipótesis empleadas en el cálculo. En general, éstos deben combinar el efecto de atenuación y el efecto de acumulación para un cierto material en condiciones de haz ancho.

Siempre que estén disponibles, se recomienda la utilización de las curvas de transmisión, pero si no, se recomienda el uso de las capas décimorreductoras considerando por separado la primera capa décimorreductora (TVL_1) de las restantes, consideradas de equilibrio (TVL_e), para tener en cuenta los cambios que se producen en el espectro de radiación a medida que la radiación penetra en la barrera.²²⁻²³

El número de TVL_s (n_{TVL}) que producen un factor de transmisión B se puede expresar como:

$$n_{TVL} = \log_{10} \left(\frac{1}{B} \right) \quad (3)$$

Finalmente, el espesor (e) de la barrera requerido se calcula como:

$$e = TVL_1 + (n_{TVL} - 1) TVL_e \quad (4)$$

En la tabla 5 se presentan los valores de HVL y TVL para la primera capa y en el equilibrio de Papagianis *et al.*,⁴⁷ que son los recomendados por la ESTRO y resuelven indefiniciones/desacuerdos de publicaciones anteriores. El conjunto completo de datos de las curvas de transmisión que la ESTRO recomienda utilizar se pueden encontrar en: <http://www.uv.es/fballest/RadProt/>. Como continuación al trabajo de Papagianis *et al.* y ante la posible utilización de futuros radionucleidos, también existen métodos basados en resultados de cálculos Monte Carlo para obtener la curva de transmisión para cualquier haz de fotones de espectro conocido

basados en la superposición de los correspondientes datos de haces monoenergéticos.⁴⁸

Techos y aberturas

El techo y suelo tendrán siempre consideración de barreras primarias y se tratarán como tales. Las aberturas para instalaciones y aire acondicionado deberán hacerse siguiendo las recomendaciones similares al diseño de búnkeres en teleterapia.

Radiación dispersa y laberintos. Cálculo del blindaje de la puerta

La protección requerida para la puerta dependerá de si se ha construido un diseño con laberinto o no, y en caso de que lo haya, de la longitud y complejidad del mismo. El espesor requerido de la puerta de una sala de Braquiterapia se puede calcular una vez que se ha estimado el valor de la dosis absorbida en agua en la puerta y de ahí la reducción con blindaje necesaria. Si no se utiliza un laberinto, entonces el blindaje de la puerta debe ajustarse para satisfacer los requerimientos de una barrera primaria. Si se utiliza un laberinto, a menos que éste sea muy largo o que tenga múltiples giros, hay que evaluar la cantidad de radiación que llega a la puerta.

En las recomendaciones de NCRP 155²³ se consideran algunos de los aspectos del diseño de una instalación de BT. Sin embargo, no existen recomendaciones directas sobre cómo estimar la dosis absorbida en la entrada de una sala de Braquiterapia con laberinto. Así, la metodología empleada en la práctica para este propósito ha sido diversa: (a) teniendo en cuenta sólo la componente directa de la radiación en la puerta a través del laberinto; o (b) teniendo en cuenta la radiación dispersa que alcanza la puerta adaptando, con distintas interpretaciones, el método de cálculo aplicado en instalaciones de Radioterapia externa.

Tabla 5. Valores de *HVL* y *TVL* para el equilibrio y la primera capa extraídos de *Papagiannis et al.*⁴⁷ Los datos de los radionucleidos de LDR, no aparecen directamente en la publicación de *Papagiannis et al.*, pero pueden encontrarse en la web <http://www.uv.es/fballest/RadProt>. Todos los valores están expresados en mm. El dato del *HVL* del ¹²⁵I en oro se ha obtenido de *Astrahan*.⁴⁹

Radionucleido	Material	<i>HVL_e</i> (<i>HVL₁</i>) mm	<i>TVL_e</i> (<i>TVL₁</i>) mm
¹⁹² Ir	Hormigón	42 (70)	139 (180)
	Hormigón baritado	26 (28)	86 (88)
	Acero inoxidable	12 (18)	41 (48)
	Vidrio plomado	14 (6.4)	47 (24)
	Plomo	5.8 (2.8)	19 (11)
¹³⁷ Cs	Hormigón	48 (80)	161 (214)
	Hormigón baritado	32 (46)	105 (131)
	Acero inoxidable	14 (23)	48 (63)
	Vidrio plomado	12 (15)	41 (47)
	Plomo	6.2 (7.5)	20 (23)
⁶⁰ Co	Hormigón	63 (102)	210 (276)
	Hormigón baritado	46 (68)	151 (191)
	Acero inoxidable	20 (30)	65 (84)
	Vidrio plomado	22 (30)	74 (86)
	Plomo	12 (16)	40 (46)
¹²⁵ I	Oro	0.01 (—)	— (—)
	Hormigón	— (3.1)	— (10.3)
	Hormigón baritado	0.309 (0.330)	1.03 (1.12)
	Acero inoxidable	— (0.0943)	— (0.321)
	Vidrio plomado	0.0441 (0.0559)	0.147 (0.158)
	Plomo	0.0181 (0.0237)	0.0602 (0.0657)
¹⁰³ Pd	Hormigón	1.2 (1.2)	4.1 (4.1)
	Hormigón baritado	0.138 (0.138)	0.457 (0.461)
	Acero inoxidable	0.0393 (0.0393)	0.131 (0.131)
	Vidrio plomado	0.0203 (0.0254)	0.0674 (0.0727)
	Plomo	0.00853 (0.0108)	0.0283 (0.0307)
¹³¹ Cs	Hormigón	3.7 (3.9)	12.1 (12.4)
	Hormigón baritado	0.404 (0.409)	1.34 (1.36)
	Acero inoxidable	0.119 (0.119)	0.394 (0.394)
	Vidrio plomado	0.0518 (0.0666)	0.172 (0.187)
	Plomo	0.0216 (0.0282)	0.0716 (0.0783)

Las técnicas de cálculo en Radioterapia avanzan hacia cálculos de dosis absorbida cada vez más precisos basados principalmente en simulaciones de Monte Carlo (MC). En el futuro, las recomendaciones para diseño del blindaje probablemente se basen en este tipo de simulaciones, en particular para estimar de forma más precisa la dosis absorbida en la puerta en salas con formas no convencionales. De hecho, existen estudios que emplean simulaciones de Monte Carlo en evaluaciones de blindaje de salas de Braquiterapia,⁵⁰⁻⁵² en los que se observa que, dependiendo del búnker en cuestión, la adaptación de las recomendaciones para Radioterapia externa en comparación con el resultado de simulaciones MC, puede conducir a una infraestimación de la dosis absorbida en la puerta.

De los estudios mediante simulación, se observa que los espectros reales en la puerta de salas con laberinto se encuentran degradados en energía respecto a los espectros primarios emitidos por las fuentes. Para la obtención del espesor de plomo necesario en la puerta, el uso de datos de transmisión para los espectros reales en la puerta en lugar de los primarios, reduce el espesor de plomo aproximadamente en un factor cinco para ¹⁹²Ir y diez para ⁶⁰Co.⁵⁰ Esto reduce significativamente el espesor de la puerta y por lo tanto, simplifica los requisitos de construcción y operación del búnker.

Como solución práctica para la estimación de la dosis absorbida en la entrada del laberinto en instalaciones de HDR con ¹⁹²Ir y ⁶⁰Co se propone la adap-

tación del formalismo de NCRP 151²² siguiendo la solución realizada en el trabajo de Pujades *et al.*⁵⁰⁻⁵¹ que se incluye a continuación.

Al igual que en el formalismo de Radioterapia externa, se consideran las contribuciones de la radiación primaria que atraviesa la pared del laberinto y varias fuentes de radiación secundaria, realizando aproximaciones sobre la trayectoria media del haz, los coeficientes de dispersión y la energía media del espectro de la radiación dispersa. Por simplicidad, se representa el plano medio a una altura típica de la fuente sobre el suelo de 1 m y no se considera la contribución del techo ni la del suelo de la sala, aunque ésta puede llegar a ser no despreciable.⁵⁰ La aproximación para la trayectoria media del haz viene descrita en NCRP 15122 y se basa en la división de la pared del fondo del laberinto en dos secciones: el área que se ve desde la puerta y el resto de la pared, aunque también se pueden considerar otro tipo de divisiones en sectores más pequeños.⁵¹⁻⁵³

La radiación que alcanza la puerta al final del laberinto se descompone en: transmisión directa a través de la pared del laberinto (5), radiación dispersa por la pared del fondo del laberinto vista desde la puerta (6) y radiación dispersa por el resto de dicha pared (7):

$$\dot{K}_{puerta}^{Directa} = S_K \frac{B}{d_L^2} \quad (5)$$

$$\dot{K}_{puerta}^{A_1} = S_K \sum_i \frac{\alpha_1 \times (A_1)_i}{(d_{sec})_i^2 (d_{zz})_i^2} \quad (6)$$

$$\dot{K}_{puerta}^{A_0} = S_K \sum_i \frac{\alpha_0 \times (A_0)_i}{(d_h)_i^2 (d_r)_i^2} \frac{\alpha_z \times (A_z)_i}{(d_z)_i^2} \quad (7)$$

donde (véase la fig. 1):

- $\dot{K}_{puerta}$ es la tasa de kerma que alcanza la entrada del laberinto en el punto de interés, que normalmente estará situado en el plano de la puerta en la mitad de la anchura del laberinto y a la altura a la que esté colocada la fuente.
- S_K es el *Air Kerma Strength*, equivalente al TKRA.
- B es el factor de transmisión por el espesor de la pared del laberinto considerando incidencia perpendicular a la barrera.
- i representa cada una de las secciones en las que las paredes de interés se pueden dividir.
- A_0 es el área de la pared del fondo del laberinto que no es vista directamente desde la puerta.
- A_1 es el área de la pared del fondo del laberinto que es vista directamente desde la puerta.
- A_z es el área de la proyección de A_0 sobre la pared exterior del laberinto.
- d_L es la distancia de la posición de la fuente al punto de interés.
- d_{sec} es la distancia de la posición de la fuente al centro de la sección del laberinto en la pared A_1 .
- d_{zz} es la distancia desde la posición centro de la sección del laberinto en la pared A_1 al punto b .
- d_h es la distancia desde la posición de la fuente en perpendicular a la pared del fondo del laberinto A_0 . La proyección de la intersección de d_h en A_0 a través de la esquina interna del laberinto y en el punto medio del laberinto define el punto b .

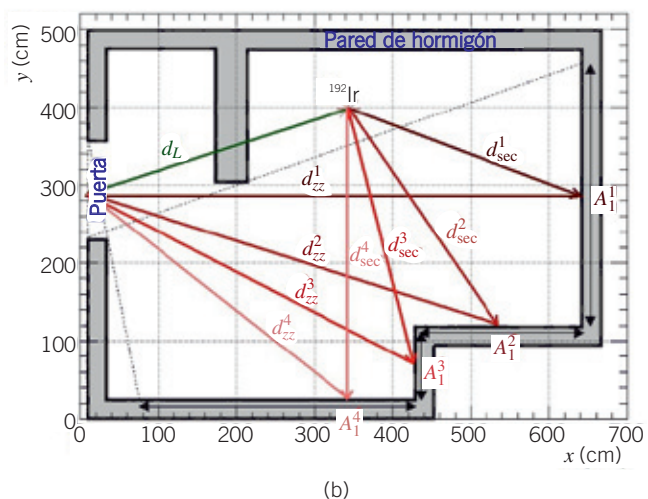
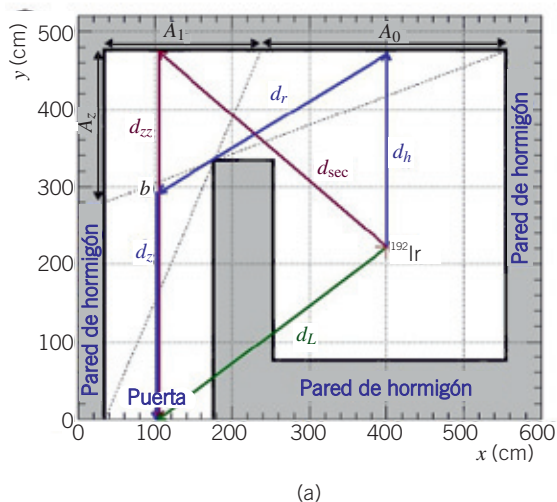


Fig. 1. (a) Ejemplo de búnker con forma convencional (extraído de los trabajos Ref. 50-52) (b) Ejemplo de un búnker con forma no convencional (extraído del trabajo de Pujades *et al.* Ref. 50).

Tabla 6. Coeficientes de albedo (α) para el hormigón ordinario. Datos para ^{60}Co tomados de las tablas 8a y 8b del Apéndice B del NCRP 151(Ref. 22). Datos para ^{192}Ir obtenidos por interpolación de los datos de las tablas mencionadas.

Ángulo de incidencia	Ángulo de dispersión	Coeficiente de albedo (α) $\times 10^{-3}$	
		^{192}Ir , 380 keV	^{60}Co , 1250 keV
0°	45°	20	6
45°	0°	29	9
45°	45°	26	11

- d_r es la distancia desde la pared del fondo del laberinto al punto b .
- d_i es la distancia desde el punto b al punto de interés.
- α_i es el coeficiente de reflexión o coeficiente de albedo en la superficie A_i . Para fotones monoenergéticos con energías entre 0.25 MeV y ^{60}Co , estos coeficientes pueden encontrarse en el NCRP 151.²² A destacar que estos valores están dados con una gran incertidumbre (del orden del $\pm 50\%$). Para fuentes con otras energías como el ^{192}Ir se pueden obtener por interpolación (véase la tabla 6).

En el caso de búnkeres con forma no convencional (véase la fig. 1b), puede haber ambigüedad en la definición de las distancias propuestas.

Para simplificar el cálculo, los ángulos de incidencia y de reflexión en las paredes, se pueden aproximar, ya sea como 0° (incidencia normal) o 45° según el caso. En la tabla 6 se presentan los coeficientes de reflexión de interés que pueden encontrarse en el NCRP 151.²² Por ángulo de incidencia se entiende el ángulo que forma el eje del haz incidente con la normal a la superficie, y el de dispersión el del eje del haz reflejado con la normal a la superficie.

Los resultados de esta adaptación dependen de la complejidad del laberinto: proporciona buenos resultados para búnkeres con un laberinto convencional (véase la fig. 1a, es decir, similar a los utilizados para aceleradores lineales para los que se desarrolló la metodología NCRP 151), con diferencias respecto a MC inferiores al 15%, pero falla para diseños menos convencionales, (véase la fig. 1b), con diferencias respecto a MC que pueden alcanzar el 70%.

Obtenido el kerma en la puerta, se puede evaluar el espesor de blindaje que requiere la misma aplicando la formulación del cálculo de blindajes. Si no se conoce el espectro de los fotones que alcanzan la puerta, se puede considerar la energía media del radionucleido. Se trata de una aproximación conservadora, ya que la degradación en energía al alcanzar la puerta puede dar como resultado valores medios del espectro de 110 keV para ^{192}Ir y de 130 keV para ^{60}Co .⁵⁰

Comprobaciones periódicas

Se recomienda que un experto cualificado realice inspecciones físicas de las instalaciones durante la construcción, así como que, posteriormente, se realicen comprobaciones periódicas de la integridad del blindaje, o siempre que se produzcan cambios importantes en la posición del equipo de carga diferida, variaciones significativas de la carga de trabajo u otras modificaciones en el blindaje estructural que pudieran tener repercusión en la protección.

3.1.2. Recomendaciones sobre la bibliografía a utilizar

La bibliografía más relevante y reciente en la que se basan las recomendaciones propuestas es:

- NCRP 151²² para la descripción del formalismo del cálculo de barreras, adaptando el formalismo de Radioterapia externa a Braquiterapia.
- NCRP 155,²³ que contempla los aspectos propios del blindaje en instalaciones de Braquiterapia de los que carece el NCRP 151.

Otra referencia importante que también contiene documentación sobre el cálculo de barreras, e incluso dedica una parte a las instalaciones de Braquiterapia es IAEA SRS N° 47.³⁶

En cuanto a bibliografía sobre curvas de transmisión, se recomiendan los trabajos de:

- Papagiannis et al.,⁴⁷ *Radiation transmission data for radionuclides and materials relevant to brachytherapy facility shielding*. El conjunto completo de datos de las curvas de transmisión se pueden encontrar en: <http://www.uv.es/fballest/RadProt/>
- Zourari et al.,⁴⁸ *Brachytherapy structural shielding calculations using Monte Carlo generated, monoenergetic data*.

Tabla 7. Valores de espesor típico de blindaje en Braquiterapia (MDR significa Tasa de Dosis Media).

Espesor requerido (cm)				
		Hormigón	Plomo	Referencia
¹⁹² Ir	HDR	40-60 40 44-51	5-7 5	NCRP 155 (Ref. 23) Nucletron (Ref. 54) IAEA SRS N° 47 (Ref. 36)
		31-36 20-25		IAEA SRS N° 47 (Ref. 36) Booklet ESTRO (Ref. 55)
		20	2.5	Nucletron (Ref. 54)
⁶⁰ Co	HDR	68-77		IAEA SRS N° 47 (Ref. 36)
¹³⁷ Cs	MDR	28-36		IAEA SRS N° 47 (Ref. 36)

A modo de ejemplo, y sin que sirva para evitar un cálculo individualizado de una instalación, en la tabla 7 se presentan algunos valores de espesor típico de blindaje en las distintas modalidades de Braquiterapia que aparecen en algunos documentos de referencia.

3.2. Plan de emergencia en HDR-PDR

El plan de emergencia es un documento general que debe estar adaptado a las condiciones particulares de cada instalación radiactiva, teniendo en cuenta los procedimientos y tratamientos de cada hospital, los aplicadores utilizados, el personal implicado, etc. Debe detallar el modo de actuar en cada caso concreto. Asimismo debe contemplar el caso de emergencias por acontecimientos como incendio, inundación, catástrofes naturales, etc., que si bien, a priori, no suponen emergencia radiológica, pueden conducir a ella en caso de afectar a la zona de Braquiterapia. Además debe estar aprobado por el CSN, constituyendo un documento de licenciamiento de toda instalación radiactiva. Este documento se ha de presentar en todos los casos cuando se solicita la Autorización reglamentaria de la instalación.⁵⁶ El plan de emergencia de la instalación debe estar incluido en el plan de emergencia general del edificio y compatible con el Plan Especial ante el Riesgo Radiológico, (PERR), de cada Comunidad Autónoma según vayan aprobándose en las diferentes Comunidades Autónomas).

En todo plan de emergencia debe quedar claramente establecida la línea de autoridad y responsabilidad. El plan debe someterse a los simulacros correspondientes que aseguran el entrenamiento y conocimiento adecuados del personal involucrado, que lógicamente requiere la formación adecuada, anotando los datos relevantes de los mismos en el Diario de Operación.³⁵

En relación con la notificación de sucesos e incidentes radiológicos, se seguirá lo establecido en la

Instrucción Técnica del CSN IS-18,³⁵ sobre los criterios para la notificación de sucesos e incidentes radiológicos en instalaciones radiactivas.

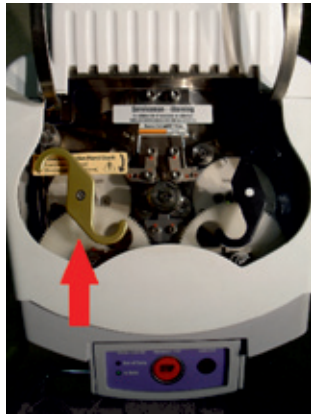
En este apartado, y en general los apartados de planes de emergencia en este informe, no se pretende que sirva como plan de emergencia como tal, sino que el propósito es proporcionar unas pautas generales que sirvan de ayuda para su elaboración, siendo cada servicio quien deberá particularizar el plan para su instalación.

En HDR-PDR, para disminuir la exposición del personal a la radiación en las operaciones de emergencia, es conveniente contar en la instalación con una mampara plomada móvil, que debe estar identificada en el estudio de seguridad.³⁵ A su vez es indispensable la disponibilidad de un monitor de radiación portátil.

3.2.1. Recomendaciones de los fabricantes de equipos HDR-PDR

Los equipos de Braquiterapia de HDR-PDR disponen de varios pulsadores o botones de emergencia sobre los que hay que actuar en el caso de la misma. Éstos, se suelen localizar a) en el exterior de la sala, uno en la consola y otro al lado de la puerta de acceso, y b) en el interior de la misma, uno en la entrada del búnker en la pared del laberinto y otro en la unidad donde está alojada la fuente en su posición de seguridad. Además, todos los equipos incorporan una manivela o palanca sobre la que actuar en el caso en que haya que hacer una retracción manual de la fuente (véase la fig. 2).

Los tres fabricantes actuales de equipos de HDR-PDR (Elekta, Varian y Bebig) incluyen en su documentación al usuario unos procedimientos recomendados para el caso de las diferentes emergencias.⁵⁷⁻⁵⁹ Todos ellos son semejantes, con las particularidades de dónde se encuentran en cada equipo los diferentes pulsadores



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Localización de la manivela de retracción manual: (a) microSelectron (Nucletron), (b) Varisource (Varian), cortesía de R. Tortosa y (c) Multisource (Bebig), cortesía de R. Colmenares.

de emergencia, así como las manivelas de retracción manual. En el caso de que hubiera una obstrucción a la hora de la retracción de la fuente a su posición de seguridad, hay algunas diferencias entre las recomen-

daciones de los distintos fabricantes que se comentan a continuación.

Como en general en todas las situaciones de emergencia en Radioterapia, la prioridad principal es el pa-

ciente. En este caso hay que liberar al paciente de su conexión al equipo, sacarlo de la sala lo antes posible y colocar la fuente o aplicador en el contenedor de emergencia.

Se consideran dos situaciones de emergencia posibles en las cuales la fuente no pueda retornar a su posición de seguridad. Por un lado, un fallo en el suministro eléctrico, y por otro, una obstrucción en el camino de regreso de la fuente.

En el primer caso, entraría a funcionar el sistema eléctrico de emergencia independiente, grupo electrógeno o baterías (dependiendo de cada configuración en particular), con lo que la fuente retornaría a su posición y la emergencia quedaría resuelta sin mayor incidencia.

El problema mayor vendría en el caso en que la fuente quedara retenida, no regresando a su lugar de almacenamiento. En este caso, los distintos fabricantes sugieren actuar sobre los distintos botones de emergencia y sobre la palanca de retirada manual. En el caso en que estas medidas fallaran, lo primordial es poder retirar el implante o la fuente del paciente lo antes posible para poder sacarlo de la sala de tratamiento e introducir el aplicador o la fuente dentro del contenedor de seguridad. En esta situación hay diferencias entre distintos fabricantes. Por ejemplo, Elekta⁵⁷ propone que un operador abra el indexador, sujete firmemente el conector del circuito donde se encuentra la fuente, y desconecte el resto de los tubos del tratamiento. Una vez hecho esto, se cerrará el indexador de nuevo, dejando únicamente conectado el tubo de transferencia donde se encuentre la fuente. Este fabricante, en su descripción, supone la entrada de un segundo operador quien se encargará de extraer, del paciente, únicamente el aplicador o aguja de tratamiento, en el que está la fuente. Seguidamente introducirá dicho aplicador o aguja en el contenedor de emergencia y cerrará la tapa. Por otro lado Varian⁵⁸ recomienda para sus equipos que se desconecten todos los conectores del cabezal de posicionamiento y se tire del equipo de carga diferida para alejarlo del paciente hasta que el cable quede visible en el cabezal de posicionamiento. Posteriormente y con ayuda de unas pinzas o alicates, se agarre el cable y se tire del mismo hasta extraerlo por completo del aplicador o catéter y finalmente se coloque el extremo activo del cable en el contenedor de emergencia.

3.2.2. Consideraciones prácticas y modelo propuesto

La forma de actuar ante cada situación de emergencia debe ser diferente y adaptada en cada caso particular, dependiendo de cada tipo de implante o aplicador utilizado, de su facilidad y rapidez de retirada y del personal involucrado. Hay situaciones donde es quizás

más rápido retirar del paciente el aplicador y colocarlo en el contenedor de emergencia, que empezar a actuar sobre las manivelas de emergencia o retirada manual. Este es el caso por ejemplo de los tratamientos superficiales como moldes o aplicadores Leipzig o Valencia. Incluso hay casos no superficiales en los que la desinserción del implante es más sencilla como ocurre con los cilindros vaginales tipo “dome” en tratamientos de pacientes de endometrio operado. Muy diferente es para el resto de casos con implantes intersticiales o endocavitarios complejos.

Un aspecto importante a considerar en el plan de emergencia, es si debe entrar una persona o debe ir acompañado de una segunda. En nuestra opinión, lógicamente debe decidirse en función del tipo de emergencia, tipo de implante y estado del paciente. Hay casos donde la actuación del operador es suficiente y otros casos donde se requiere de personal de enfermería, médico o incluso la intervención quirúrgica para retirar el implante.

Otro aspecto que debe fijarse en el plan de emergencia es el personal autorizado a actuar en caso de emergencia, siendo de designación específica en cada hospital en función de sus circunstancias. Teniendo en cuenta la diversidad de situaciones potenciales de emergencia, en nuestra opinión, el personal asignado debe tener conocimiento y competencia para la retirada total o parcial del implante.

Todo profesional que participe en una situación de emergencia debe estar entrenado y autorizado. El entrenamiento se garantiza mediante la realización de simulacros regularmente así como la comprensión y discusión de las diferentes posibilidades a la vista del plan de emergencia establecido. Lógicamente el/los intervinientes deben ser portadores de los sistemas de medida de dosis adecuados y reglamentarios, así como incluir referencias temporales y espaciales que permitan una evaluación realista de la magnitud a medir.

Este grupo de trabajo ha estudiado los procedimientos de los distintos fabricantes así como los adoptados en diferentes hospitales. La discusión de los mismos ha resultado en el modelo fundamental propuesto a continuación con el ánimo de servir de guía para que, una vez modificado con las particularidades funcionales de cada servicio, pueda servir en el establecimiento del plan de emergencia en instalaciones HDR-PDR en Braquiterapia.

Como estrategia general, en nuestra opinión, el procedimiento debiera ser según la secuencia: 1) actuación sobre los pulsadores de emergencia; 2) uso de la manivela de emergencia y 3) retirada del aplicador.

En la actuación sobre los pulsadores de emergencia, el primero lógicamente es el de la consola, el segundo el de la puerta y a continuación se procedería a abrir la puerta; ya dentro de la sala se presionaría el pulsador del laberinto y tras éste el del equipo. Los equipos de

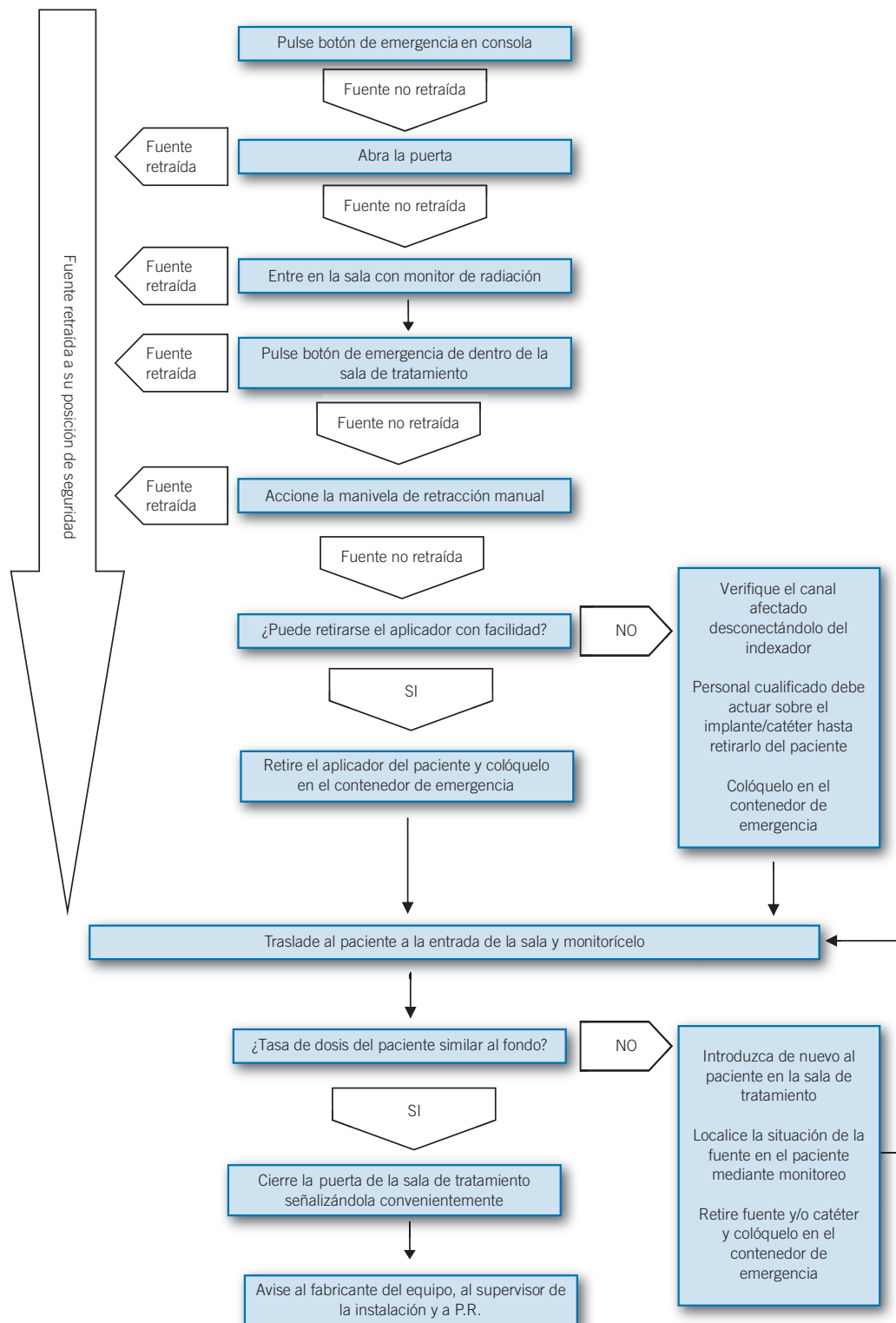


Fig. 3. Esquema de actuación ante situación de emergencia.

HDR-PDR disponen de un motor de emergencia que actúa ante una resistencia en la retracción de la fuente, motor de notable mayor intensidad que el normal en tratamientos. Estos motores también se activan con

los pulsadores de emergencia y apertura de puerta. En la fig. 3 se presenta el diagrama con el modelo de esquema de actuación en situación de emergencia en opinión de este grupo de trabajo.

Este modelo se aplicaría en el caso de que la fuente no regrese a su posición segura, ya sea por fallo eléctrico y de las baterías o por otro motivo.

La constatación de que la fuente está fuera del lugar seguro se observa por los indicadores de la consola y semáforos, y por la señalización del monitor ambiental fijo de la sala. Debe existir un detector portátil de radiación apropiado en la consola de esta sala para su uso en situaciones de emergencia, detector que debe comprobarse regularmente. Mediante ese detector se verifica independientemente tras la apertura de la puerta que el nivel de radiación es consecuencia de que la fuente no ha regresado a su lugar seguro de almacenamiento. También se utiliza para estimar la ubicación de la fuente en los casos que se crea necesario, así como para monitorizar al paciente a la salida de la sala.

4. Aspectos de Protección radiológica en Braquiterapia oftálmica

En esta sección vamos a recoger los aspectos relativos a la técnica especial de Braquiterapia ocular. Esta técnica está incorporada en diferentes hospitales y requiere consideraciones específicas para su correcta implementación. Tras una breve introducción y descripción de sus elementos, se intenta recoger todas aquellas medidas de Protección radiológica que debieran asociarse e incluirse en la documentación pertinente y en la práctica clínica.

En Braquiterapia oftálmica, al igual que en toda técnica en la que se emplean radiaciones ionizantes con manipulación de fuentes, se debe realizar una estimación de las dosis equivalentes, H_T , recibidas, sobre todo en manos,⁶⁰⁻⁶¹ por los distintos profesionales implicados en su realización, aunque en este caso que nos ocupa, así como en los implantes prostáticos de la sección 5, no plantea demasiados problemas dada las características de las fuentes y las TKRA empleadas.⁶² Existen relativamente pocas publicaciones que hacen referencia a aspectos concretos de la Protección radiológica en los implantes o las técnicas de Braquiterapia en la esfera ocular. Sin embargo, son de aplicación la mayor parte de las recomendaciones sobre Braquiterapia con carga diferida manual.

Como es bien sabido, es necesaria la consideración del criterio ALARA, tanto para los profesionales y el público en general, como para la familia. Con este fin se pueden tener en cuenta los factores que afectan a la irradiación externa como son la distancia, el tiempo y el blindaje. La distancia se tiene en cuenta manteniendo ésta lo máxima posible entre las fuentes y aplicadores con el empleo de pinzas largas. La reducción del tiempo de manipulación se logra cuando los profesionales

están suficientemente entrenados o son expertos. El blindaje se obtiene con el empleo de mamparas de protección, gafas plomadas, mandiles, etc., con espesores típicos de 0.25 mm equivalentes de plomo.

En la tabla 5 de la sección 3 se indican valores actualizados de transmisión para diferentes materiales que incluyen las fuentes de uso en Braquiterapia oftálmica.

4.1. Descripción de la técnica y aplicadores utilizados

La Braquiterapia se emplea en Oftalmología para tratar una serie de patologías que pueden ser de naturaleza tumoral sea benigna o cancerosa. Las patologías cancerosas propias de la Oftalmología susceptibles de tratarse con Braquiterapia son el melanoma (de coroides, de cuerpo ciliar) y otras localizaciones, como el retinoblastoma, tumores epidermoides o algunas metástasis coroides. En cuanto a las enfermedades de curso benigno se encuentran el angioma de coroides y otros tumores vasoproliferativos, la degeneración macular asociada a la edad, el pterigium, además de usarse para consolidar las trabeculectomías en el tratamiento quirúrgico del glaucoma y del hipema.

Los aplicadores para Braquiterapia epiescleral pueden englobarse en dos categorías generales según el $T_{1/2}$ del radionucleido empleado:

- $T_{1/2}$ largo, por ejemplo ^{60}Co , ^{106}Ru o ^{90}Sr , en cuyo caso el radionucleido está embebido permanentemente en el propio aplicador. Lógicamente en este caso no es posible optimizar la distribución del radionucleido.
- $T_{1/2}$ corto, por ejemplo ^{103}Pd , ^{131}Cs , y sobre todo ^{125}I , en cuyo caso las fuentes se pueden colocar cada vez que sea necesario con una configuración previamente definida en el aplicador,⁶³ por lo que es posible cierto grado de optimización.

Aplicadores no optimizables

Dentro de los aplicadores con distribución fija (no optimizable), aunque cronológicamente se emplearon primero los de ^{60}Co , y a pesar de que se siguen empleando todavía en algunos centros, en este trabajo se van a considerar fundamentalmente los de ^{106}Ru y ^{90}Sr , dado que son los más utilizados en la actualidad.

Aplicadores de ^{106}Ru

Estos aplicadores tienen forma completamente redonda o modificada para aplicaciones en lesiones cerca del nervio óptico o cerca de la córnea, con diáme-

tros que van desde los 12 a los 20 mm. El suministrador proporciona un certificado de calibración trazable al *National Institute of Standards and Technology* (NIST) a partir de detectores de centelleo.⁶⁴ Las actividades nominales dependen, generalmente, del diámetro de los aplicadores y van desde 7.4 MBq hasta 18.9 MBq.

En los aplicadores de ^{106}Ru , el radionucleido está encapsulado dentro de una hoja de plata pura con varias formas y tamaños, por lo que no es necesaria la manipulación de fuentes para preparar el implante.⁶⁴⁻⁶

El ^{106}Ru , se transforma en ^{106}Rh con un $T_{1/2}$ de 368.2 días. El ^{106}Rh decae con un $T_{1/2}$ de 2.2 horas en ^{109}Pd . El ^{106}Rh emite partículas β con energía máxima de 3.54 MeV.⁶⁷

Aplicadores de ^{90}Sr

Otro tipo de aplicadores, más antiguos, pero todavía en uso para algunos tipos de lesiones son los de ^{90}Sr .⁶⁶ El ^{90}Sr es un emisor β de energía máxima 546 keV. Decae a ^{90}Y con un $T_{1/2}$ de 29.12 años, quien a su vez decae con un $T_{1/2}$ de 64.1 horas emitiendo partículas β con energía máxima de 2.28 MeV.⁶⁷

Como en el caso anterior, el radionucleido está rodeado por plata u oro. El encapsulamiento absorbe virtualmente toda la radiación β de 0.54 MeV emitida por el ^{90}Sr y por lo tanto, actúa como barrera protectora. El ^{90}Sr está en equilibrio con el ^{90}Y , y es su emisión β de 2.28 MeV, la que se emplea terapéuticamente. Se ha propuesto que el ^{90}Sr sea substituido por ^{32}P , por su menor $T_{1/2}$ y de obtención más sencilla.⁶⁸

Aplicadores optimizables

Por lo que se refiere a los aplicadores con distribución de radionucleido personalizable, los más empleados en la actualidad son los que adoptó como propios el grupo COMS (*Collaborative Ocular Melanoma Study*) que consisten en una placa redonda de aleación de oro y un inserto de silicona donde van situadas las fuentes de ^{125}I , ^{106}Pd o ^{131}Cs , con diámetros de 12, 14, 16, 18 y 20 mm.⁶³ Estas placas se fabrican por la técnica de la cera perdida y los alojamientos de silicona incluyen una plantilla embebida en la superficie cóncava de la placa que es usada como alojamiento para las fuentes radiactivas.⁶⁹ El oro se eligió por ser biológicamente inerte y por presentar ventajas desde el punto de vista de la atenuación de la radiación.

El radionucleido más empleado en este tipo de aplicadores sigue siendo el ^{125}I , con los mismos tipos de fuentes que en los implantes de próstata pero con una TKRA significativamente mayor, de hasta 10 veces, alrededor de $7\text{--}8\text{ }\mu\text{Gy}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$.⁷⁰

Existe otro tipo de aplicadores comerciales, aunque de uso mucho menos extendido, son los que emplean

un acrílico para soporte de las fuentes y acero inoxidable como blindaje.⁷¹

4.2. Adquisición y almacenamiento de las fuentes

Los aplicadores más utilizados son los COMS con fuentes de ^{125}I . Estas fuentes llegan a la instalación dentro de viales de cristal o plástico que, a su vez están alojados dentro de contenedores plomados.⁷⁰

Como toda fuente en Braquiterapia, debe realizarse la medida de la TKRA y la comparación con el valor del suministrador antes de su uso clínico. En el caso de Braquiterapia oftálmica, el número de semillas suele estar en el rango 5-22 dependiendo del tamaño del aplicador a utilizar. La medida de la TKRA debe realizarse para cada una de las semillas, a diferencia de la inferencia estadística aplicada a los lotes en próstata, estériles y con un número significativamente mayor de semillas.

Para el radiofísico el procedimiento de medida de la TKRA de todas las fuentes, puede incrementar la dosis recibida, pero estrategias basadas en el blindaje, como el uso de mamparas y guantes plomados, en la distancia, empleando pinzas largas y el tiempo, realizando un entrenamiento previo al inicio del procedimiento, permite un control suficiente.⁷²

Como medios de protección suelen utilizarse guantes, mandil y protector tiroideo plomados (0.5 mm equivalente de Pb). En la mayoría de instalaciones existe una mampara protectora, bien vertical o bien en L, con espesor equivalente típico de 4 mm de Pb.

Respecto a los aplicadores no optimizables, el más frecuente como hemos comentado es el de ^{106}Ru .⁷³ Para desembalar el aplicador deben seguirse las instrucciones del suministrador, buscar posibles daños en el embalaje y aplicador, comprobando que toda la documentación es consistente. Todo el proceso debe realizarse colocando el aplicador con la zona convexa hacia el profesional, y por tanto con menos tasa de dosis, con el aplicador lo más alejado posible.

El aplicador debe guardarse en un contenedor adecuado. Lo más apropiado es almacenar el aplicador junto al resto de fuentes de la instalación, bajo llave controlada y en una habitación habilitada como gammateca. El contenedor comercial debe tener espesor suficiente para absorber la radiación de frenado producida o bien estar construido de forma que se minimice su producción.

4.3. Manipulación, preparación y gestión de las fuentes durante el implante

Distinguiremos entre aplicadores con implantación quirúrgica, optimizables (COMS) y no optimizables

(^{106}Ru) y el caso de aplicadores de ^{90}Sr en los que el tratamiento se realiza por contacto durante unos minutos.

Aplicadores implantables

Durante todo este proceso, las personas implicadas deben portar, al menos, dosimetría de solapa y de muñeca o de anillo. Debe estar accesible un monitor de radiación adecuado que permita localizar las fuentes rápidamente, en caso de pérdida temporal.

En el caso de los aplicadores optimizables, deben establecerse procedimientos adecuados para minimizar la exposición durante la preparación de las fuentes y su colocación en los aplicadores. Por ejemplo, una práctica que facilita su manipulación y proporciona algún tipo de identificación de las mismas, es el colocar las fuentes en pequeñas piezas de *styrofoam* que a su vez se colocan en varios contenedores de plomo. Para minimizar la dosis en el montaje de las fuentes en el aplicador, es conveniente que sólo esté descubierta la fuente que se vaya a colocar en su alojamiento, permaneciendo el resto protegidas por un blindaje. Para el montaje es conveniente seguir las instrucciones dictadas por los suministradores, empleando los mismos dispositivos protectores que en el desembalaje y la calibración.

Una vez montado, el aplicador se deposita en un contenedor apropiado que es el que va a servir para su transporte al quirófano, conservando las condiciones de esterilidad requeridas.

En cuanto a las fuentes embebidas en los propios aplicadores (aplicadores con carga fija, ^{106}Ru), el proceso es similar para todos los aplicadores y se refiere sobre todo al proceso de esterilización y transporte hasta el quirófano. El transporte se realiza en contenedores adecuados. La esterilización también se puede hacer en contenedores apropiados y en cualquier caso teniendo en cuenta las indicaciones del suministrador y los procedimientos del centro. Los suministradores suelen indicar la necesidad de esterilizar las fuentes antes de su primer uso. En cualquier caso, la preparación para la esterilización y la recogida, deben realizarlas profesionales debidamente preparados. Hay que tener en cuenta que si la tasa de dosis alrededor de la unidad esterilizadora es elevada, debe advertirse a los profesionales relacionados para que guarden la debida distancia a la misma.

Después de preparado el conjunto aplicadores-fuentes y ser trasladado al quirófano, llega el momento de la inserción. En este caso, el procedimiento es similar tanto para los aplicadores fijos como los personalizables, excluyendo el caso particular de ^{90}Sr . La técnica quirúrgica más extendida juega a favor de la Protección radiológica, puesto que es usual realizar todas las operaciones de colocación y centrado con

un aplicador simulado (localizador) pero con los puntos de sutura idénticos a los del aplicador real. Para la colocación quirúrgica del aplicador se realiza una disección de la conjuntiva perilímbica en los cuadrantes necesarios, se capturan los músculos rectos que limitan el cuadrante donde se encuentra el tumor, se expone el área de la esclera subyacente al mismo y en este momento con una fuente de luz fría se transilumina el globo proyectando la sombra del tumor, que se marca para delimitarlo. Una vez marcado se procede a la colocación de la placa localizadora, verificándose con una nueva transiluminación.⁷³ Después, se reemplaza de la forma más rápida posible el aplicador simulado por el radiactivo, suturando éste en las posiciones prefijadas. Las pinzas utilizadas son lo más largas posibles pero teniendo en cuenta la rapidez y seguridad en la ejecución del procedimiento. Los guantes de plomo son altamente recomendados pero, en ocasiones, el cirujano no los emplea por restar sensibilidad al tacto. Después del tratamiento se realiza la desinserción, también en el quirófano.

El cirujano principal y el ayudante llevan el mismo sistema de dosimetría personal que ya se ha comentado anteriormente. También, al menos, en los primeros implantes, es recomendable la monitorización de la intervención con un detector de radiación externa adecuado, registrando la tasa de dosis en los momentos más relevantes desde el punto de vista de la irradiación de los profesionales. Lógicamente el detector debe ser adecuado a la energía en cuestión, debiendo considerarse la potencial corrección frente a la energía de calibración. Según los procedimientos particulares de cada hospital, esta monitorización puede hacerse en todos los implantes. Además permite calcular las dosis de los profesionales que no son portadores de dosimetría personal, aunque es importante la medida de la dosis real más que cálculos teóricos basados en tiempos de exposición y distancia al paciente.

En el transcurso de las primeras aplicaciones y tras monitorizar el implante, debe fijarse la distancia a partir de la cual el riesgo es mínimo para los profesionales involucrados en el implante. Dicha distancia puede depender del procedimiento de cada instalación. Estas distancias van desde 1 a 8 cm en las manos del oftalmólogo que realiza la intervención, hasta los 10 cm de los ayudantes o 20 cm para la localización del dosímetro de solapa. El resto de trabajadores expuestos pueden colocarse a 1 m o más del implante.⁶⁰

Respecto a la dosis recibida por el cirujano,⁶⁰ las estimaciones permitirían, con la legislación actual, para irradiación superficial y de las manos, alrededor de 140 aplicaciones al año con ^{106}Ru y 67 con ^{125}I . El efecto en la glándula tiroides es menor. Se recomienda un factor de seguridad de 2 por lo que se aconseja limitar las intervenciones que se pueden llevar a cabo cada año a 70 con ^{106}Ru y 33 con ^{125}I . Si el número de interven-

ciones es superior por año, se puede conseguir una reducción de la exposición en manos mediante guantes plomados y un collarín para proteger la glándula tiroidea. También se puede conseguir reducir la irradiación alternando los profesionales que intervienen como cirujano principal y cirujano ayudante. Para ^{106}Ru hay que tener en cuenta que, si bien se elimina la componente beta de la radiación, aún permanece del 20 al 40% de componente de fotones.

Dado el nuevo límite anual para cristalino de 20 mSv, éste será el órgano limitante y el número de intervenciones debe evaluarse en consecuencia con este valor.

Aplicadores no implantables

Como hemos comentado, la terapia mediante aplicadores oculares de ^{90}Sr presenta un procedimiento muy diferente al caso de los aplicadores implantables. Este tipo de terapia se aplica a patologías específicas como el caso del tratamiento del pterigium⁷⁴ o las trabeculotomías.⁷⁵

Durante los tratamientos, un profesional sujeta el aplicador que está en contacto con la lesión durante unos pocos minutos. Suelen incorporar un disco de plástico para apantallar parte de la radiación que se recibe en la mano.^{68,76} La energía máxima beta del ^{90}Sr es de 2.27 MeV que también produce radiación de frenado al frenarse con los materiales. La cantidad de radiación de frenado producida depende del material del que esté construido el aplicador. Cuanto menor sea el número atómico efectivo, menos radiación de frenado produce y el plástico como no tiene un número atómico alto aparece como un material adecuado. Para la limpieza, esterilización y preparación del aplicador se puede construir una protección con plexiglás (lucita), siguiendo las recomendaciones del fabricante.

4.4. Aspectos a considerar en la hospitalización durante el implante

Las habitaciones donde se realice la hospitalización del paciente estarán autorizadas y serán adecuadamente clasificadas y señalizadas. Las habitaciones de hospitalización deberán tener los blindajes estructurales necesarios para que no se superen los límites de dosis legalmente establecidos para los trabajadores expuestos de la instalación o personas del público que puedan situarse en las diferentes zonas anexas. Es conveniente que las habitaciones dispongan de mamparas móviles.

Es importante que antes del tratamiento se dé información general sobre el mismo al paciente, a sus familiares o acompañantes que se vayan a encargar de su cuidado y al personal asistencial. Esta información

deberá incluir las recomendaciones e instrucciones para minimizar los riesgos de irradiación, y se deberán adaptar a las características culturales de cada paciente.

Si por alguna incidencia clínica, el paciente hubiera de ser atendido por especialistas distintos del servicio de Oncología radioterápica, se deberán disponer los procedimientos adecuados de información y actuación.

Vamos a distinguir entre implantes COMS y placa implantada de ^{106}Ru . En el caso de los aplicadores superficiales de ^{90}Sr el tratamiento se realiza por apoyo en la zona de interés con una duración de minutos no necesitando, lógicamente, hospitalización.

Aplicadores COMS con ^{125}I

La tasa de dosis al paciente depende del tipo de placa utilizada y de la localización de la lesión. Si se utilizan las placas tipo COMS, éstas disponen de una placa de oro de 0.5 mm de espesor, la capa hemirreductora para el ^{125}I en oro es de 0.01 mm (véase la tabla 5). En contacto con la placa, la tasa de dosis puede llegar a ser del orden de mSv/h.

La dosis típica en estos tipos de implante es de 85 Gy según el protocolo COMS;⁷⁷ este protocolo recomienda una tasa de dosis en el punto de prescripción entre 0.6 y 1.06 Gy/h, lo que implica un tiempo de hospitalización de 3.3 a 5.9 días.⁷⁷ Con el paciente en la habitación debe realizarse una dosimetría de área, que quedará documentada en el registro correspondiente. El paciente deberá ingresar en una habitación individual. El personal asistencial debe quedar informado del tipo de tratamiento, material radiactivo y riesgos asociados, así como de las medidas básicas de Protección radiológica.

Se dejarán al paciente unas gafas con cristales plomados, con protección frontal y lateral, similares a las utilizadas por médicos intervencionistas que trabajen con rayos X, que debe utilizarlas cuando entre personal sanitario en la habitación o cuando reciba visitas. El cristal plomado tiene un espesor entre 0.5 y 0.75 mm de plomo, la capa hemirreductora para ^{125}I en plomo es de 0.0181 mm (véase la tabla 5).

En general, y salvo que existan medidas individualizadas que justifiquen otras condiciones, se recomienda que las visitas permanezcan a una distancia superior a dos metros, ya que a esa distancia las dosis de radiación son equivalentes al fondo radiactivo natural. A no ser que fuese absolutamente imprescindible, no tendrán acceso a la habitación mujeres embarazadas ni niños menores de 16 años. En el caso de ser imprescindible la entrada de una mujer embarazada, esta se situará detrás de una mampara plomada y estará el menor tiempo posible. Siempre se dejará en la habitación un recipiente plomado por si hubiese que retirar la placa antes de lo previsto.

Tabla 8. Valores de espesor típico de blindaje en Braquiterapia (MDR significa Tasa de Dosis Media).

Distancia	$H_p(0.07)$ en $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{MBq}^{-1}$	
	Lado cóncavo (anterior)	Lado convexo (posterior)
10 cm	860	170
30 cm	95	13

Aplicadores de ^{106}Ru

Como se ha mencionado anteriormente, las fuentes de ^{106}Ru están encapsuladas en plata, con un espesor total de 1 mm, y la ventana de la parte cóncava, en contacto con la lesión tiene una ventana de 0.1 mm. La superficie de la parte convexa absorbe aproximadamente un 95% de la radiación beta. En el manual de uso⁷⁸ se indican unos valores de tasa de equivalente de dosis personal, $H_p(0.07)$, por MBq a dos distancias de la placa (véase la tabla 8).

La actividad de las fuentes dependen del modelo, pero como máximo es de 64.5 MBq, variando la actividad nominal entre 4 y 40 MBq. Por tanto, a 30 cm de distancia del lado convexo para una fuente de 40 MBq se recibiría una tasa de equivalente de dosis personal de 0.52 mSv/h.

Los aplicadores de ^{106}Ru se utilizan para el tratamiento de melanomas oculares y retinoblastomas, éstos últimos fundamentalmente pediátricos. Generalmente de espesor o profundidad de tratamiento inferior a 5 mm. El tiempo de tratamiento varía en función de la dosis absorbida prescrita y la actividad del aplicador, variando entre unas horas y cuatro días. El paciente debe permanecer en una habitación individual, donde se haya informado y se hayan dado normas de Protección radiológica escritas tanto al personal de enfermería como a los familiares.

El personal de enfermería conocerá que el tiempo de permanencia en la habitación será el mínimo necesario para la correcta atención del paciente. A los familiares, que deben permanecer en la habitación el menor número posible, se les indicará que se han de situar a una distancia de más de un metro, aunque, en el caso de pacientes pediátricos, pueden acercarse al niño para atenderlo cuando sea necesario. Se ha de restringir al máximo el acceso a la habitación de mujeres embarazadas y no deberán acceder a las mismas niños menores de 16 años.

4.5. Plan de emergencia

El plan de emergencia debe seguir la estructura y condiciones que sean de aplicación recogidas en el apartado 3.2.

Los incidentes que pueden ocurrir, y deben considerarse en el plan de emergencia, son los relativos a la pérdida accidental del material radioactivo.

Si durante la intervención cae una fuente radiactiva al suelo se procederá a localizarla con un detector adecuado, recogiendo siempre con pinzas. Se debe rastrear a todo el personal presente en el quirófano antes de abandonarlo, y se debe bloquear el acceso al quirófano hasta que se encuentre la fuente. Esta misma actuación aplica a la fase de hospitalización si existe una retirada no esperada del aplicador.

El paciente puede sufrir una indisposición que haga necesario avisar al personal médico del hospital, e incluso su traslado a la UCI. En el primer caso, se procederá a informar al personal médico de que el paciente tiene material radiactivo que hace que no se deba permanecer junto a él más que el tiempo imprescindible y estimándose la dosis recibida. En el caso de traslado a la UCI, se deberá retirar, lógicamente, la placa radiactiva.

Si se pierde una fuente u ocurre cualquier incidente con trascendencia radiológica, será notificado al Consejo de Seguridad Nuclear según se establece en la IS-18.³⁵ Igualmente se comunicará a la autoridad competente de la comunidad autónoma en un plazo máximo de 24 horas. La forma de notificación podrá ser mediante un primer contacto telefónico, y posteriormente dentro del plazo de 10 días por escrito.^{35,79}

5. Aspectos de Protección radiológica en la Braquiterapia permanente con fuentes LDR de ^{125}I , ^{103}Pd y ^{131}Cs

En esta sección van a considerarse los aspectos de Protección radiológica de los implantes permanentes de próstata; esta técnica ha experimentado un incremento notable en la última década y está implementada en numerosos hospitales españoles. Las fuentes habituales son de ^{125}I aunque algunos hospitales también realizan implantes con el radionucleido alternativo, ^{103}Pd . En la actualidad, se están introduciendo técnicas utilizando el radionucleido ^{131}Cs . La comunidad médica mantiene activa la discusión respecto a los

tres radionucleidos con estudios clínicos en progreso, siendo el criterio predominante el radiobiológico debido a la diferente distribución de la dosis absorbida con el tiempo transcurrido.

En la tabla 5 se presentan los datos actualizados de transmisión en diferentes materiales para los tres tipos de fuentes.

5.1. Descripción de la técnica y equipos utilizados

El tratamiento de próstata con semillas consiste en la implantación, en todo el volumen de tejido de la próstata, de un número variable de fuentes de pequeño tamaño (semillas) en una distribución tridimensional. Como hemos comentado anteriormente, actualmente se utilizan en España semillas de ^{125}I y ^{103}Pd , y se prevé que en un futuro también se utilizarán las semillas, ya disponibles, de ^{131}Cs . Este tipo de Braquiterapia se indica en los casos de estadios iniciales de carcinoma prostático en los que la enfermedad es incipiente y confinada a la glándula.

La dosis absorbida prescrita típica en la Braquiterapia de próstata es de 145-160 Gy en monoterapia y 110 Gy en sobreimpresión utilizando semillas de ^{125}I , y 125 Gy en monoterapia utilizando semillas de ^{103}Pd . Los valores de prescripción en monoterapia utilizando semillas de ^{131}Cs actualmente se están estudiando y se sugieren unos valores comprendidos entre 100-125 Gy.³⁰ Los cálculos de la dosis absorbida se realizan utilizando en el cálculo el formalismo TG43.⁸⁰

El número de semillas utilizadas en cada implante dependerá del volumen de la próstata y de la TKRA de las semillas. En un implante se utilizan habitualmente semillas de la misma TKRA. Como en todas las fuentes utilizadas en Braquiterapia, el usuario debe medir previamente su TKRA, que en el caso de las semillas de próstata se realiza para una muestra de las fuentes por inferencia estadística.⁸¹ Cada fabricante oferta un rango de TKRA de semillas a escoger por el usuario. Por ejemplo, para semillas de ^{125}I el rango está dentro de 0.4-1.0 $\mu\text{Gy/h}$ de TKRA por semilla. El $T_{1/2}$ del ^{125}I , ^{103}Pd y ^{131}Cs es 59.4 y 16.97 y 9.7 días respectivamente y el noventa por ciento de la dosis de tratamiento se suministra durante el tratamiento en 197, 56 y 32 días respectivamente.

Como norma general de Protección radiológica, las personas que estén presentes en el radioquirófano durante el implante serán las mínimas imprescindibles. La tasa de dosis a la que estará expuesto el facultativo que realiza el implante es relativamente baja, teniendo en cuenta la baja energía de las fuentes además de la propia atenuación del paciente una vez implantadas.

El implante es realizado por el oncólogo radioterápico (supervisor de IR), mediante unas agujas vectoras

paralelas. Estas agujas se insertan en el tejido en posiciones fijas predeterminadas previamente y utilizando una plantilla metálica con orificios distribuidos en forma de rejilla de 0.5 cm de paso. La posición de las agujas se controla por ecografía y opcionalmente con RX (fluoroscopia). La inserción de las semillas en las agujas, previamente esterilizadas, se puede realizar de forma manual o con equipos de carga diferida.

Sistemas de carga manual

Existen diferentes sistemas de carga manual, que se diferencian por la forma en que el proveedor suministra las semillas. La inserción de las semillas en las agujas se realiza con semillas sueltas (e.g. Bebig IsoSeed®, Theragenics AgX100®), o en trenes de semillas, unidas entre ellas por un material orgánico reabsorbible. Estos trenes de semillas son suministrados por los diferentes fabricantes en diferentes modalidades:

1. El fabricante suministra trenes de 10 semillas separadas 1 cm de centro a centro de semilla, o también puede suministrar trenes de semillas de longitud predefinida por el usuario igualmente separadas 1 cm de centro a centro de semilla (e.g. Bebig IsoStrand®, Oncura RAPIDStrand®).
2. El fabricante suministra un cartucho blindado con un tren de 75 semillas separadas 1 cm de centro a centro de semilla (e.g. Bebig IsoCord®).
3. El fabricante suministra semillas sueltas y separadores que permiten al usuario montar los trenes que mejor se adaptan al implante utilizando un mecanismo blindado (e.g. Bard SOURCELINK®).

Sistemas de carga diferida

Los sistemas de carga diferida (e.g. SeedSelectron de Elekta) disponen de un contenedor o cartucho auto-blindado donde vienen las fuentes preparadas para su uso. Eso significa que los cartuchos están adecuadamente blindados y que no es necesaria una especial precaución para manipularlos. En cualquier caso, suelen venir esterilizados con lo que no son necesarias medidas adicionales en este sentido. Para comprobar el número de fuentes que tiene el cartucho se puede realizar una placa radiográfica, o un escanograma en el TC o una adquisición con el sistema de imagen con el acelerador lineal si tiene la suficiente resolución.

Algunos sistemas adjuntan al lote de fuentes en el cartucho otra serie de fuentes del mismo lote, para la medida de la TKRA por el método de inferencia estadística. El nivel de radiación existente durante las medidas de la TKRA es lo bastante pequeño para que una distancia razonable de trabajo sea una medida

de protección suficiente, y se adoptarán las medidas habituales de Protección radiológica similares a las descritas en la sección 4.

Otro dispositivo que tienen los sistemas de carga diferida es el encargado de transportar las fuentes desde su posición en el cartucho hasta la posición de tratamiento. Estos dispositivos disponen, en la zona del sistema donde se conforman los trenes de fuentes-espaciadores, de material adicional de blindaje, de acero inoxidable, que con una distancia de trabajo razonable puede considerarse como protección suficiente para esta fase del proceso.

La conformación del tren de semillas se realiza impulsando las fuentes al interior de un alojamiento plomado, que se adapta al tubo guía. El sistema empuja las fuentes hasta su posición en el paciente sin que sea necesaria la manipulación manual de las agujas cargadas. Mediante el mismo mecanismo también es posible medir una fuente del cartucho antes de empezar el implante para reверificar el lote. En ambos casos, el factor que proporciona una protección adecuada es el mantenimiento de una distancia de trabajo razonable. Si es necesario, y en función de las características del personal que asista al implante, pueden emplearse protectores individuales, como serían delantales plomados, protectores de tiroides y gafas plomadas.

Finalmente, estos dispositivos de carga diferida tienen sistemas adicionales para completar el implante de forma manual en el caso de que no funcione el sistema automatizado. Estos sistemas suelen ser plomados para hacer mínima la exposición de la persona que conforme los trenes. En este caso se emplean fuentes sueltas y su proceso de manipulación se detalla en el apartado 5.3.

5.2. Adquisición y almacenamiento de las fuentes

El número de fuentes y su TKRA aproximada solicitado al proveedor, se determina en función de la volumetría (estimación del volumen de tratamiento) que se le suele realizar al paciente con anterioridad al tratamiento. La petición de semillas se realiza una vez previsto el día de tratamiento y con antelación suficiente a la realización del mismo.

Las fuentes se reciben en un contenedor de transporte, y al recibirlas, es necesario comprobar que el número de fuentes y la TKRA de cada una que se indica en la documentación del proveedor coinciden con la solicitud realizada. La recepción de las fuentes la ha de realizar personal capacitado en un área controlada y segura. Al abrir el embalaje que contiene las fuentes, es recomendable²⁶ examinar el contenido y determinar que no haya contaminación con un monitor de sensibilidad adecuada, sin necesidad de hacer un frotis, para

verificar que el paquete no se ha dañado durante el transporte.

Para cada contenedor de fuentes se suele elaborar una hoja de inventario donde constará el tipo de radionucleido, la fecha de calibración, la fecha de recepción, número de historia del paciente, número de fuentes usadas en el implante y número de fuentes residuales. Las semillas han de permanecer en su contenedor de transporte hasta su utilización y controladas en una zona de almacenamiento segura debidamente señalizada.

5.3. Manipulación, preparación y gestión de las fuentes durante el implante

Los sistemas de carga diferida no presentan problemas de Protección radiológica en el momento de la preparación de las fuentes radiactivas, ya que se realiza de forma automática en un recipiente blindado, como se ha comentado anteriormente.

En el caso de los sistemas de carga manual, la preparación de las fuentes radiactivas se realiza en el momento del implante y consiste en la preparación de los trenes con la longitud prevista en la planificación y su introducción en las agujas vectoras. Los trenes de semillas antes y después de su preparación se han de almacenar en recipientes blindados, minimizando el número de fuentes que el operador está manipulando. La manipulación de las semillas se realizará con pinzas, empleándose mamparas y delantales adecuados. Habitualmente, sólo son necesarias medidas de protección si se utiliza RX para apoyar la realización del implante. En este caso para protegerse es suficiente un delantal y protector tiroideo estándar equivalente a 0.5 mm de plomo, valorándose el uso de gafas plomadas. En las operaciones de preparación de las fuentes y en la realización del implante es conveniente el uso de dosímetros de muñeca, o de anillo.

Durante el implante, se debe realizar un control de las semillas que han entrado en la sala de operaciones y las semillas insertadas en el paciente. Después de implantar cada fuente, o trenes de fuentes, se verificará que no se ha quedado ninguna fuente en la aguja. Como medida redundante o en caso de duda se puede monitorizar la aguja después de implantada y retirada.

Al concluir el procedimiento, se realizará un recuento de las semillas que han sobrado, teniendo en cuenta también las posibles semillas evacuadas en la cistoscopia postimplante, si se realiza, y las fuentes que hayan podido ser desechadas por cualquier motivo durante el implante. Todas estas fuentes se retirarán en un recipiente plomado que asegure la protección de la persona encargada de su traslado hasta una zona controlada. En caso de pérdida de una de las fuentes, se procederá a su búsqueda utilizando un monitor de sensibilidad adecuada.

También es necesario monitorizar el agua sobrante de la cistoscopia, pues en ocasiones, sobre todo si ha sido algo agresiva, puede arrastrar alguna fuente. Si los valores medidos son significativamente distintos del fondo debe sospecharse que puede haber alguna fuente en dicho material. Si no se encuentra la fuente, todo el material debe considerarse residuo radiactivo.

Se deben evaluar los niveles de dosis alrededor del paciente cerca de la pelvis y en diferentes puntos a una distancia de 1 m alrededor de la zona del implante, así como en todas las dependencias involucradas en la preparación y realización del implante desde la recepción de material, medida, preparación, implante, hasta su ubicación en residuos, orina y habitación del paciente, que suele quedar hospitalizado un día tras el implante. Para ello es necesario un monitor de sensibilidad adecuada.

En el caso de sistemas de carga diferida, el cartucho puede opcionalmente ser radiografiado, o alternatively con escanograma en TC, para contrastar las fuentes restantes con las que hemos contabilizado y el cartucho queda clasificado como residuo radiactivo.

Las semillas que no han sido utilizadas se guardan en el contenedor de origen y se consideran residuo radiactivo.^{10,82} También se considera residuo radiactivo el resto de fuentes como las que se han utilizado para la medida de la TKRA o las encontradas en la cistoscopia.

5.4. Aspectos a considerar en la etapa postimplante

Medidas de Protección radiológica durante la hospitalización del paciente

Una vez realizado el implante, por motivos clínicos puede ser necesario mantener hospitalizado al paciente una noche. La habitación de hospitalización ha de estar señalizada adecuadamente. Mientras el paciente esté hospitalizado, se deben medir las bolsas de la sonda urinaria por si se elimina alguna semilla, con un monitor de sensibilidad adecuada. No es necesario adoptar medidas especiales de protección por parte del personal sanitario.

Medidas de Protección radiológica para familiares y miembros del público cercanos al paciente, después del alta hospitalaria

Los pacientes tratados con implantes permanentes no representan riesgo de radiación para el público. Existen trabajos⁸³ que muestran, para un gran número de casos, los niveles de equivalente de dosis alrededor de pacientes con implantes permanentes típicos. La tasa de equivalente de dosis media en la superficie anterior del paciente es de 37 $\mu\text{Sv/h}$ para ^{125}I y de

8 $\mu\text{Sv/h}$ para ^{103}Pd . A 30 cm se reducen a 6 $\mu\text{Sv/h}$ y 3 $\mu\text{Sv/h}$ respectivamente, disminuyendo a menos de 1 $\mu\text{Sv/h}$ a 1 metro. Un estudio reciente⁸⁴ obtiene unos valores de equivalente de dosis en la superficie anterior del paciente de 85.4 $\mu\text{Sv/h}$ y 44.3 $\mu\text{Sv/h}$ si está en posición supina o de pie para ^{125}I . A 30 cm se reducen a 12 $\mu\text{Sv/h}$ y 7.2 $\mu\text{Sv/h}$ respectivamente. Las diferencias con el estudio de *Dauer et al.* se pueden justificar por las diferencias en el peso medio de los pacientes seleccionados.⁸⁴

Los datos disponibles, derivados de medidas directas o de cálculos,⁴ indican que la dosis efectiva anual que recibe la familia o los miembros del hogar es claramente inferior a 1 mSv, y en ningún caso se superan los 5 mSv en el caso del personal cuidador que atiende a dichos pacientes. En general, es improbable que una misma persona (no profesionalmente expuesta) esté en contacto con un paciente de estas características más de una vez en un año, por lo que, la dosis efectiva sería inferior a la máxima en un año para los miembros del público.^{3,10}

Aunque existen prendas de ropa interior plomada para el paciente (e.g. Ref. 85), su uso no es estrictamente necesario ya que se considera que el paciente puede hacer una vida normal siempre que se mantengan unas mínimas normas, más por tranquilidad que por razones estrictas de Protección radiológica. Se recomienda que los niños no deberían estar sentados en el regazo de un paciente y el paciente debe evitar el contacto cercano con las mujeres embarazadas durante periodos significativos de tiempo (entendemos que más de 10 minutos, aunque no se especifica valor en el ICRP 97) dentro de los 2 primeros meses del implante cuando se utiliza ^{125}I y un tiempo menor para ^{103}Pd ,¹⁸ que que aplicando proporcionalidad serían unos 20 días.

Un estudio⁸⁶⁻⁸⁷ posterior a estas recomendaciones de la ICRP permite obtener unos periodos de tiempo personalizados para cada paciente, y que son menos restrictivos. La tabla 9 muestra un algoritmo adaptado de *Dauer et al.*⁸⁷ que puede aplicarse para el cálculo de estos periodos de tiempo. En éste se relaciona la tasa de equivalente de dosis calculada a 30 cm de la superficie de piel anterior de un paciente con un implante de próstata (entendemos que a una profundidad típica del periné) y el tiempo en el que han de mantener precauciones los compañeros y familiares para no superar el 50% de los límites de dosis mencionados anteriormente. Esta tabla se ha adaptado para la entrada con valores de equivalente de dosis, magnitud calculada, frente a los valores de exposición incluidos en el trabajo original; se ha utilizado el factor 0.00876 para obtener tasa de kerma (Gy/h) a partir de la tasa de exposición (R/h) y supuesta la tasa kerma igual a la tasa equivalente de dosis.

Utilizando los valores de tasa equivalente de dosis típicos a 30 cm del paciente⁸³ de 6 $\mu\text{Sv/h}$ y 3 $\mu\text{Sv/h}$

Tabla 9. Algoritmo para determinar el tiempo de precaución en días, $t(d)$, necesario para cada escenario de exposición para mantener las dosis efectivas por debajo de un 50% de los límites, basado en la medida de la tasa de equivalente de dosis $\dot{H}_{30\text{ cm}}$ ($\mu\text{Sv/h}$) a 30 cm de los pacientes con implante de próstata (Ref. 87). Si el resultado de $t(d) \leq 0$, no es necesario adoptar ningún tiempo de precaución.

Escenario de exposición	Tiempo de precaución para ^{125}I , $t(d)$	Tiempo de precaución para ^{103}Pd , $t(d)$
Compañero de trabajo	0	0
Adulto que no duerme con el paciente	0	0
Adulto que duerme con el paciente	$85.54 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 181$	$24.47 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 106$
Embarazada que duerme con el paciente	$85.54 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 43$	$24.47 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 67$
Niños que conviven con el paciente y se sientan en el regazo periódicamente	$85.54 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 85$	$24.47 \times \ln(\dot{H}_{30\text{ cm}}) - 79$

para ^{125}I y ^{103}Pd respectivamente, todos los tiempos para los casos contemplados en la tabla 9 se reducen a 0 con excepción de, en el caso ^{125}I , de embarazada que duerme con el paciente y niños que se sientan en el regazo periódicamente que resultan 110 días y 68 días respectivamente. Estos resultados son muy próximos a los obtenidos por *Dauer et al.*⁸⁷

5.5. Recomendaciones en situaciones especiales

En esta modalidad de implante permanente se pueden presentar situaciones especiales como la expulsión por la orina de fuentes o la realización de cirugías posteriores que afecten a la zona del implante. Además se está presentando la situación en la que se plantea la cremación en el fallecimiento del paciente. Estas situaciones se van a considerar a continuación.

5.5.1. Expulsión de fuentes

Aunque es poco probable, puede suceder que el paciente expulse alguna semilla a través de la orina después del implante. Es necesario distinguir entre las semillas libres o sueltas y las semillas en configuración ligada.

En el caso de un implante con semillas sueltas, éstas se pueden expulsar por la orina los primeros días.⁸⁸ Por lo tanto, es recomendable filtrar la orina con un colador los 3 primeros días¹⁹ después del implante, y el resto de tiempo hasta los 2 meses (^{125}I) o 20 días (^{103}Pd) observar que no se expulsa ninguna semilla, debiendo recogerla si es el caso.

Si el paciente o un miembro de la familia encuentran una semilla, no la deben tocar. Utilizarán una cuchara o unas pinzas para colocar la semilla en un contenedor

que se le habrá entregado previamente al paciente, o bien en un recipiente con agua. Este contenedor puede ser uno de los que recibe el hospital con los cartuchos de semillas. El paciente llamará al teléfono indicado en las instrucciones que se le habrán entregado y devolverá el contenedor o el recipiente con agua al hospital lo antes posible. En el caso muy poco probable de expulsión posterior, igualmente se procederá a la recogida de la semilla y ésta se devolverá al hospital siguiendo el procedimiento explicado anteriormente.

En este último punto hay diferencias entre países, ya que en algunos no es necesaria su recogida y se pueden eliminar por el sistema de saneamiento, haciendo correr suficiente agua. En España es obligada su recogida y entrega al hospital.

En el caso de utilizar semillas ligadas en el implante, es recomendable filtrar la orina mientras el paciente permanezca hospitalizado después de la realización del implante. Una vez dado de alta, se puede producir alguna expulsión varias semanas después, al disolverse la ligadura. Como se ha comentado anteriormente, estas semillas se devolverán al hospital.

Aunque generalmente se recomienda el uso de preservativo en las relaciones sexuales las primeras 2-3 semanas después del implante, parece más apropiado recomendar su uso en las primeras cinco eyaculaciones, independientemente del tiempo que haya pasado desde la realización del implante.¹⁹ Las relaciones sexuales durante la primera semana después del implante se deben evitar.

En el caso poco probable de que las semillas atraviesen el tracto gastrointestinal, el sistema de aguas residuales ofrece suficiente protección.¹⁹

Como se ha indicado anteriormente, para el caso de las fuentes expulsadas debe procurarse que se lleven al hospital y se gestionen como residuos. En el caso no poco probable de pérdida de una fuente de baja ener-

gía tras un implante de próstata, este hecho no debe ser objeto de la comunicación oficial al CSN ya que se trata de fuentes ya utilizadas.

5.5.2. Cremación

La cremación de pacientes a los que se les ha realizado un implante con semillas plantea una serie de cuestiones relacionadas con: 1) la actividad remanente en las cenizas del paciente, responsable potencialmente de la irradiación del personal del crematorio y miembros de la familia, y 2) la presencia de partículas en el aire, potencialmente responsable de la inhalación de partículas radiactivas por el personal del crematorio y los miembros del público.

La cremación se realizará sin ninguna precaución especial en el caso que hayan transcurrido 12 meses desde el implante de semillas de ^{125}I , o 3 meses para el ^{103}Pd .¹⁹

Si no ha transcurrido este tiempo, se recomienda:¹⁹ extraer la próstata del cuerpo y almacenar la próstata (y las semillas) de acuerdo con la regulación nacional. Por ejemplo, en Japón⁸⁹ se recomienda almacenar la próstata durante 1 año después del implante de ^{125}I como residuo radiactivo bajo responsabilidad del hospital en el que se realizó el implante. Un estudio realizado en Japón por *Satoh et al.*⁹⁰⁻⁹¹ recoge la experiencia obtenida siguiendo las recomendaciones japonesas desde 2003 a 2010 con 15427 pacientes con implantes de semillas, de los que un 0.28% fallecieron durante el primer año después del implante.

En el caso de haberse realizado la cremación con las semillas, no se deben dispersar las cenizas hasta que no haya transcurrido un mínimo de 10 periodos de $T_{1/2}$ ²⁶ desde el implante (unos 20 y 6 meses para el ^{125}I y ^{103}Pd respectivamente).

5.5.3. Cirugía pélvica o abdominal

En algunos casos excepcionales, puede ser necesario realizar una resección transuretral limitada después del implante debido a la retención urinaria. Esta operación la ha de realizar un cirujano experimentado con conocimiento de la técnica de implantación de Braquiterapia.

Cuando sea posible, no se debe realizar esta resección antes de los 6 y 2 meses del implante de semillas de ^{125}I ¹⁹ y ^{103}Pd respectivamente. En este proceso, las semillas deben colocarse en un contenedor o en un recipiente con agua, y retornarlas al hospital en el que se realizó el implante.

En algunos otros casos puede ser necesario realizar una cirugía abdominal o pélvica (sin ninguna relación con el cáncer de próstata) después de la Braquiterapia de próstata. Para evitar cualquier problema, el paciente debe llevar consigo las recomendaciones para el per-

sonal sanitario que expliquen que es portador de un implante y en las que se proporcionará el número de teléfono del hospital para pedir la información oportuna (véase el Anexo I).

5.6. Plan de emergencia

El plan de emergencia debe seguir la estructura y condiciones que sean de aplicación recogidas en el apartado 3.2.

Las posibles incidencias radiológicas asociadas a este tratamiento son: la pérdida de alguna de las semillas, o la rotura de una de ellas con la consecuencia de posible contaminación.

La rotura de una fuente se puede producir durante su manipulación. Si se produce, se procederá a delimitar la zona y se realizará la descontaminación siempre por "vía húmeda" para evitar la dispersión del radionucleido al ambiente, utilizando agua y descontaminante (*Extran* o *Decom*) o agua jabonosa. Con un monitor de contaminación adecuado y calibrado para el ^{125}I se medirá la actividad (Bq/cm^2), hasta conseguir valores menores a los de exención. Todo el material utilizado en la descontaminación se tratará, en principio, como residuo radiactivo. Si la zona sigue contaminada, se cubrirá la parte afectada con papel de filtro o material plástico y se señalizará la zona.

6. Estanqueidad de las fuentes

En esta sección vamos a considerar los aspectos relativos a las verificaciones de la estanqueidad de las fuentes en Braquiterapia, todas ellas encapsuladas, contemplando la legislación existente, recomendaciones, detectores, valores límite y situaciones especiales como es el caso de reutilización de las fuentes.

6.1. Legislación

El Real Decreto 1566/1998,¹⁴ por el que se establecen los criterios de calidad en Radioterapia, hace referencia al control de fugas y estanqueidad en fuentes y equipos de Braquiterapia, que debe ajustarse al valor especificado en la legislación vigente en materia de Protección radiológica.

Actualmente existe una Instrucción de 22-10-2010 del CSN,⁹² nº IS-28, sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de 2ª y 3ª categoría, donde se indica la obligatoriedad de realizar las pruebas de hermeticidad de las fuentes radiactivas encapsuladas. Esta, aplica a las fuentes encapsuladas que contengan un radionucleido emisor β o γ de actividad mayor de 3.7 MBq o un radio-

nucleido emisor α de actividad mayor de 0.37 MBq, cuando tengan un $T_{1/2}$ superior a 30 días. Este sería el caso de las placas de ^{106}Ru y ^{90}Sr utilizadas en Braquiterapia oftálmica y en algún caso de fuentes de ^{125}I utilizadas también en Braquiterapia ocular dependiendo de su TKRA.

Esta instrucción también se aplica a las fuentes de alta actividad, cuya definición está recogida en el RD229/2006⁸² como aquellas que contienen un radio-nucleido cuya actividad sea igual o superior a 4×10^9 Bq en el caso de ^{60}Co y a 1×10^{10} Bq en el caso de ^{192}Ir . Por tanto serían las fuentes de ^{192}Ir y ^{60}Co de los equipos de HDR-PDR. Pueden existir casos puntuales en los que el Consejo de Seguridad Nuclear estime expresamente que no es necesario llevar a cabo pruebas de hermeticidad periódicas sobre determinadas fuentes radiactivas, como es el caso de las fuentes de ^{192}Ir que, debido a su corto $T_{1/2}$, se recambian cada 3 meses, por lo que las pruebas de hermeticidad resultan innecesarias.

Según establece el CSN,⁹³ la periodicidad no debe superar un año excepto en los tres supuestos que se recogen a continuación:

- Fuentes estáticas incorporadas a equipos fijos; en este caso se realizarían con una periodicidad no superior a dos años.
- Fuentes encapsuladas en un equipo en desuso, que se realizaría cuando dicho equipo vaya a ponerse en funcionamiento.
- Fuentes que se recambien en periodos superiores a un año e inferiores a dos, en cuyo caso se realizará cuando se proceda al cambio de fuente.

En los equipos de HDR con fuente de ^{60}Co ⁹⁴ el control de hermeticidad se debe realizar anualmente. El control de fugas también es obligatorio tras cualquier incidente que pudiera afectar a la integridad de cualquier fuente radiactiva.

Por tanto, en el caso de equipos proyectores de fuentes automáticos tanto de LDR como HDR-PDR es obligatorio realizar frotis una vez al año, excepto cuando se utilizan fuentes de ^{192}Ir en que no es necesario, aunque sí aconsejable en cada cambio de fuente.

En el caso de placas de ^{106}Ru y aplicadores de ^{90}Sr es obligatorio realizar el frotis una vez al año, y para las semillas oculares de ^{125}I no es obligatorio realizarlo, aunque si es aconsejable medir el líquido de lavado si se van a reutilizar para evitar contaminaciones.

En el caso de fuentes utilizadas en implantes permanentes de próstata no es obligatorio realizar las pruebas de estanqueidad por parte del usuario.

Las fuentes radiactivas encapsuladas utilizadas en Braquiterapia deben adquirirse con un certificado emi-

tido por el fabricante que indique que se han superado los controles de hermeticidad, como recoge la Revisión 1 de la guía de seguridad nº 5.3 del CSN.⁹³ Este control y la emisión del certificado deben realizarse con carácter previo a la comercialización dentro de los seis meses anteriores a su suministro al usuario; generalmente está recogido en el certificado de calibración de la fuente.

A la vista de la legislación comentada previamente y teniendo en cuenta la eficiencia en la práctica, las conclusiones son:

- Todas las fuentes recibidas en el hospital para su uso en Braquiterapia deben disponer de un certificado de hermeticidad emitido por el suministrador, y es documentación obligada en la aceptación de las mismas.
- En equipos de HDR de ^{60}Co debe realizarse la prueba de hermeticidad anualmente. Esto conviene que lo realice la casa comercial encargada del mantenimiento del equipo.
- En equipos de HDR-PDR de ^{192}Ir no es obligada la realización de la prueba de hermeticidad, y es conveniente que ésta venga incluida en el protocolo de mantenimiento asociado al cambio de fuente, por parte del suministrador.
- Para el caso de las semillas ^{125}I , ^{103}Pd y ^{131}Cs a utilizar en implantes permanentes, no es necesaria la realización del control de hermeticidad.
- Para el caso de las semillas ^{125}I a utilizar en aplicadores oftálmicos, si son para un solo uso no es necesaria la realización del control de hermeticidad. Si se utilizan un número mayor de veces se entiende que no superando los dos meses, que es lo más habitual, tampoco es necesario el control de hermeticidad. Lógicamente esto aplica a fuentes en las que no se sospecha ningún daño como consecuencia de su manipulación.
- Para el caso de aplicadores de ^{106}Ru con uso inferior al año no es necesaria la realización de pruebas de hermeticidad. Lógicamente esto aplica a aplicadores en los que no se sospecha ningún daño como consecuencia de su manipulación.
- Para el caso de aplicadores de ^{90}Sr es necesario un control de hermeticidad anual.
- En todos los casos, se recomienda la monitorización de los embalajes de recepción de las fuentes con un detector de sensibilidad adecuada. En EEUU se ha reportado un caso de contaminación detectado en este tipo de control.

6.2. Realización del control de hermeticidad

Las pruebas de hermeticidad las debe realizar una entidad autorizada por el CSN. Un Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, en caso de disponer de los medios necesarios, puede solicitar al CSN la autorización para realizar el control de la hermeticidad y ausencia de contaminación de fuentes radiactivas encapsuladas en uso, de acuerdo con la metodología descrita en la Guía de Seguridad nº 5.3.⁹³

Para la realización del frotis, como medida de Protección radiológica, se deben manejar las fuentes como si éstas estuvieran realmente contaminadas, utilizando elementos de protección personal, como batas, guantes y pinzas. El personal técnico que realice o supervise las pruebas de hermeticidad debe disponer de una formación adecuada en materia de Protección radiológica y ser trabajador expuesto portador de dosímetro personal. Es recomendable que además utilice dosímetro de lectura directa.

Antes de realizar las pruebas de hermeticidad, debe conocerse el nivel de actividad, tipo de encapsulamiento y riesgos radiológicos de la fuente e inspeccionarla visualmente para detectar posibles corrosiones, grietas o abolladuras.

En el caso de fuentes encapsuladas alojadas en el interior de equipos o dispositivos, la inspección visual debe incluir todos los elementos que sirven para aislar y proteger a la fuente frente al daño mecánico y frente a la entrada de polvo o sustancias corrosivas. Si no se observan defectos en las fuentes, se procederá a realizar un frotis.

Se utilizará un material absorbente, y el más efectivo, siempre que se pueda; se trata de un frotis húmedo utilizando un líquido que no ataque la superficie del encapsulamiento, generalmente alcohol o agua destilada con un algodón o papel de filtro. Se deben utilizar pinzas por motivos lógicos de Protección radiológica. En el caso de emisores β como las placas de ^{106}Ru se debería utilizar papel de filtro y esperar a que se seque antes de medirlo.

Una vez realizado el frotis, la muestra debe introducirse en una bolsa o recipiente de plástico limpio, cerrarse y etiquetarse adecuadamente con la identificación de la fuente, la fecha de la toma de muestra, el nombre de la persona que lo realiza e indicación de si el frotis se realiza sobre la propia fuente o sobre una superficie equivalente. Debe realizarse una medida previa de la muestra in situ utilizando un monitor de radiación o contaminación adecuado. Posteriormente se debe estimar cuantitativamente la actividad recogida.

Si la fuente está incorporada a un equipo, y existe un riesgo excesivo de radiación para el personal que realiza la prueba de hermeticidad, como en los equipos de HDR-PDR, el frotis se debe llevar a cabo en una superficie equivalente de dicho equipo. Para detectar

posibles contaminaciones, se mide en cámaras de pozo o equipos con detectores de centelleo sólido, y por supuesto las partes que han estado en contacto con la fuente como aplicadores o tubos de transferencia. También se puede realizar un frotis del cable de chequeo, en este caso se necesita la ayuda del servicio técnico para que éste no se retraiga al abrir la puerta.⁵⁵

Como valores de referencia, el límite para la declaración de existencia de fuga es de 185 Bq (5 nCi) si el frotis es directo sobre la fuente, y 10 veces inferior, 18.5 Bq (0.5 nCi) en la prueba sobre superficie equivalente. Valores superiores a estos implicarían que se debe considerar la fuente como no estanca.

El equipo de medida del frotis debe tener un límite de detección de 3.7 Bq (10^{-4} μCi) con una incertidumbre igual o inferior al 10%. Para la detección de radiación β se utilizan tubos Geiger de 2 mg/cm² de densidad superficial de ventana, contadores proporcionales o sustancias orgánicas de centelleo. Para radiación γ se utilizan detectores de centelleo de cristal de yoduro de sodio activado con talio. En los resultados de la medida se debe conocer la geometría del conjunto muestra-detector, y la eficiencia del detector de radiación para la energía problema así como la autoabsorción de la muestra. Debe realizarse siempre conteo de fondo y determinar el tiempo de conteo de forma que la actividad mínima detectable sea inferior a 18.5 Bq, que es el 10% del criterio de aceptación. En caso de detectarse fuga, la fuente deteriorada se retirará de uso y se almacenará en un lugar seguro.

Estas medidas deben quedar reflejadas en el diario de operación de la instalación y debe emitirse un certificado de hermeticidad que recoja los datos de la entidad autorizada por el CSN que realiza la prueba, los técnicos que han realizado el ensayo y han interpretado la medida, datos del usuario de la fuente y de la fuente (radionucleido, actividad nominal y TKRA, nº de serie y fecha de fabricación, tipo de emisión y forma físico-química).

Si la fuente está instalada en un equipo, se deben indicar los datos del equipo, el tipo de prueba realizada, la incertidumbre asociada y la fecha de realización del frotis, así como los resultados de la inspección visual. También se deben indicar los equipos de medida utilizados.

La persona responsable de la revisión y firma de los certificados de hermeticidad debe disponer de una licencia que lo acredite como supervisor de instalación radiactiva o como jefe de Protección radiológica.

6.3. Reutilización de fuentes

Un caso especial es el relativo a la reutilización de fuentes, lo que es habitual en el caso de Braquiterapia oftálmica.

Los aplicadores beta, como el caso de los de ^{106}Ru o ^{90}Sr se reutilizan hasta que se alcanza el tiempo fijado por las especificaciones del fabricante. En el manual de instrucciones⁶⁴ de las placas oculares de ^{106}Ru se indica que se pueden emplear como máximo 18 meses y que se permiten hasta 50 ciclos de esterilización. El encapsulamiento de estos aplicadores suele tener en su zona cóncava un adelgazamiento notable, pues es la zona que está en contacto con la lesión que se pretende tratar. Por este motivo, después de su uso conviene realizar una inspección visual de toda la superficie del aplicador, buscando posibles desperfectos, abolladuras o zonas rayadas.

Si se van a reutilizar, en el momento de la limpieza se puede sumergir la placa en la solución de limpieza y determinar la actividad del líquido para comprobar la estanqueidad, o bien realizar un frotis húmedo para verificar la ausencia de contaminación superficial, y después seguir las indicaciones del fabricante para la esterilización.

En el caso de reutilización de las fuentes oftálmicas de ^{125}I , ésta debe limitarse para no superar 6 meses desde la fecha de producción. Como medida de estanqueidad, se pueden realizar pruebas de inmersión. Si se utilizan con las placas COMS, con inserto de silicona, no es necesario esterilizar las semillas, ya que no tienen contacto directo con el ojo del paciente.

En el caso de las fuentes de ^{125}I , es conveniente conocer que el radionucleido se presenta de forma volátil, ya que el encapsulamiento, normalmente, consta de una única y delgada capa de titanio, por lo que su manipulación debe ser muy cuidadosa.

7. Gestión de residuos

En los hospitales que disponen de servicios de Radioterapia con una unidad de Braquiterapia se generan residuos radiactivos sólidos en forma de fuentes encapsuladas de muy poco volumen pero de actividad media. Las instalaciones radiactivas no tienen autorización para la evacuación de residuos radiactivos. La retirada de las fuentes del servicio se realizará bien por el suministrador o bien por la empresa nacional autorizada (Empresa Nacional de Residuos, ENRESA), según acuerdo preceptivo firmado entre ENRESA y la instalación radiactiva considerada, debiendo además estar las fuentes recogidas en la Autorización de la instalación radiactiva. Esto aplica tanto a las fuentes cambiadas de HDR-PDR, como a las semillas sobrantes de los implantes o las expulsadas por el paciente.

En la nueva Directiva 2013/59/EURATOM⁹ se contempla la posibilidad de otro tipo de gestión para las semillas, pero de momento, hasta que no se transponga dicha Directiva a legislación nacional, la descrita es la única vía de gestionar las semillas sobrantes.

En el caso de que la retirada se lleve a cabo por la empresa suministradora, siempre deberá tenerse en cuenta que algunas de estas semillas pueden tener contaminación biológica. En el procedimiento de retirada por el fabricante, éste puede obligar a que la fuente radiactiva esté exenta de contaminación biológica. Aunque pudiera considerarse que la fuente se esteriliza a sí misma, debido a su propia exposición a la radiación, es recomendable para las fuentes de baja tasa con posible contaminación biológica que antes de proceder a la retirada del hospital, se realice un tratamiento adecuado para su esterilización.

Si la fuente quedase insertada en las agujas desechadas del implante una vez utilizadas en el paciente, siendo imposible su separación, este material no podrá ser retirado por la empresa suministradora, y debe ser retirado por ENRESA.

En el caso de una fuente no autorizada, es decir, en el caso de una fuente huérfana, para que ENRESA pueda retirarla, el titular de la instalación debe solicitar al CSN una autorización de transferencia de dicha fuente a ENRESA como residuo radiactivo.

En la Guía del CSN GS-05.3 Rev. 1,⁹³ hay un apartado “Medidas a tomar en caso de falta de hermeticidad”, que indica:

- Si se pone de manifiesto que una fuente radiactiva ha perdido su hermeticidad, se deberán llevar a cabo las acciones necesarias para que la fuente deteriorada sea retirada del uso, introducida en un contenedor hermético y almacenada en un lugar seguro, para prevenir así la dispersión de la contaminación. La fuente debe permanecer almacenada en esas condiciones hasta el momento que sea retirada por el suministrador, o si esto no fuese posible, hasta que sea transferida a ENRESA.
- Si la magnitud de la fuga detectada es 100 veces superior a los límites indicados anteriormente, deben acotarse todas aquellas zonas que estén próximas a la fuente o al equipo o dispositivo en el que esté alojada y en las que haya existido riesgo de contaminación, para comprobar posteriormente si la zona o el equipo están contaminados y proceder a la descontaminación que corresponda por personal cualificado.
- Cuando en la inspección visual se observen defectos que previsiblemente puedan derivar en fugas futuras, se deberían tomar las acciones oportunas para garantizar su seguridad. Cuando estos defectos hagan sospechar la existencia real de riesgos potenciales de fuga se deberá intensificar el control sobre la fuente con objeto de determinar si esta ha perdido su hermeticidad. Una posibilidad es repetir la prueba en un intervalo de tiempo corto.

8. Personal gestante profesionalmente expuesto en Braquiterapia

Una situación especial en Protección radiológica en Braquiterapia, es el caso de trabajadoras en estado de gestación. Como norma general, la condición de embarazo de una profesional expuesta no presupone su retirada del trabajo. Lo que sí es necesario, es revisar las condiciones del mismo para cumplir con la normativa vigente.

El RD 298/2009⁹⁵ de 6 de marzo modifica el RD 39/1997⁹⁶ de 17 de enero, aprobándose el Reglamento de los servicios de prevención, que incluye la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud en el trabajo de la trabajadora embarazada, que haya dado a luz, o en periodo de lactancia. En éste se indica que la trabajadora embarazada no podrá realizar actividades que supongan riesgo de exposición a los agentes o condiciones de trabajo cuando, de acuerdo con las conclusiones obtenidas de la evaluación de riesgos, ello pueda poner en peligro su seguridad o su salud o la del feto.

Por otra parte, y de acuerdo con lo establecido en el artículo 10 del RD 783/2001,¹⁰ de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, tan pronto como una mujer embarazada comunique su estado al responsable de la instalación, la protección del feto deberá ser comparable a la de los miembros del público. Por ello, las condiciones de trabajo de la mujer embarazada serán tales que la dosis equivalente al feto sea tan baja como razonablemente sea posible, de forma que sea improbable que esa dosis exceda de 1 mSv, al menos desde la comunicación de su estado hasta el final del embarazo. La aplicación de este límite a la práctica se correspondería con un límite suplementario de equivalente de dosis personal, $H_p(0.07)$ de 2 mSv en la superficie del abdomen de la mujer durante el resto del embarazo.

En cumplimiento de las disposiciones del Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes,¹⁰ las trabajadoras expuestas gestantes deberán estar sometidas a una vigilancia específica. Al no ser factible la determinación directa de la dosis absorbida recibida por el feto, ésta se estimará mediante un dosímetro individual que se colocará a la altura del abdomen de la mujer. En el caso de que la trabajadora tuviera que utilizar mandil plomado en el transcurso de su actividad laboral, el dosímetro de abdomen deberá colocarse siempre debajo de dicho mandil.

El dosímetro de abdomen deberá tener iguales características que los utilizados para la determinación de las dosis recibidas por los trabajadores expuestos y para facilitar el registro y archivo de las dosis obtenidas a partir de su lectura. Dichas dosis se computarán separadamente de las correspondientes a los dosímetros corporales bajo el epígrafe “dosis abdomen”.

No obstante, con el objeto de evitar elementos de discriminación laboral hacia las mujeres en edad fértil, es necesaria una evaluación de las condiciones en las que se desarrolla el trabajo de la trabajadora gestante y de los riesgos a los que está expuesta; para esta evaluación, deberá existir una coordinación total entre el Servicio de Prevención de Riesgos Laborales correspondiente, el director o supervisor de la instalación y el responsable de Protección radiológica.

De acuerdo con la legislación española, los Servicios de Protección Radiológica (SPR) y las Unidades Técnicas de Protección Radiológica (UTPR) autorizadas expresamente por el CSN, son las entidades encargadas de llevar a cabo la evaluación de las condiciones de trabajo y proporcionar asesoramiento específico en Protección radiológica.

En los servicios de Radioterapia y en el ámbito de las unidades de Braquiterapia sirvan como guía las siguientes consideraciones del documento del CSN, “La protección de las trabajadoras gestantes expuestas a radiaciones ionizantes en el ámbito hospitalario”:⁹⁷

- *Braquiterapia automática.* Dadas las condiciones de funcionamiento de este tipo de equipos, es muy improbable que por las condiciones de trabajo, la dosis equivalente en la superficie del abdomen exceda de 2 mSv, por lo que la trabajadora podría seguir desarrollando su trabajo habitual. La trabajadora expuesta gestante **no podrá** participar en los planes de emergencia de la instalación.
- *Braquiterapia manual.* Una trabajadora expuesta gestante **no podrá** participar en la manipulación de fuentes para las técnicas de Braquiterapia manual. Asimismo tampoco **deberá** participar en tareas relacionadas con el cuidado de pacientes. La trabajadora expuesta gestante **no podrá** participar en los planes de emergencia radiológica de la instalación.

Estando de acuerdo completamente con estas recomendaciones convendría matizar y añadir, en nuestra opinión, el caso de equipos de Braquiterapia de HDR. La trabajadora expuesta **no debería** participar en las tareas habituales en las unidades de Braquiterapia de HDR, ya que en este tipo de tratamientos no es improbable que exista una situación de emergencia en la que pueda superarse el equivalente de dosis personal en la superficie del abdomen de 2 mSv, si bien la probabilidad de que se produzca esta situación de emergencia es muy baja.

9. Conclusiones

La modalidad de Braquiterapia requiere medidas de Protección radiológica específicas. Este trabajo ha

intentado recoger los principales aspectos de Protección radiológica asociados a la práctica clínica teniendo en cuenta el equipamiento actual en España, en opinión del Grupo de Braquiterapia de la SEFM.

Se ha incluido una descripción de la legislación aplicable así como las recomendaciones de sociedades internacionales de prestigio. Para el caso de los equipos de carga diferida automática más extendidos, HDR, se han presentado procedimientos detallados y prácticos para el cálculo de blindajes y para el establecimiento del plan de emergencia.

La Braquiterapia permanente de próstata y la Braquiterapia oftálmica son las modalidades en la que mayor actuación manual se realiza. Se han presentado análisis, discusiones, recomendaciones y consideraciones prácticas para las diferentes etapas de estos tipos de tratamiento, incluyendo las recomendaciones e información específica para el paciente y personal sanitario después de la realización del implante permanente en próstata.

La intención de este informe ha sido el servir de ayuda a los radiofísicos en el establecimiento del programa de Protección radiológica en la técnica de Braquiterapia; intentando resolver algunas ambigüeda-

des en la aplicación de la legislación y recomendaciones en la práctica.

10. Agradecimientos

Este grupo de trabajo quiere expresar su agradecimiento a determinadas personas e instituciones que han contribuido con su información y revisión en determinados contenidos del mismo:

A Carmen Álvarez García y Arturo Pérez Mulas, del Consejo de Seguridad Nuclear por su exhaustiva revisión del documento y su aportación clarificando importantes aspectos legales del mismo.

A Facundo Ballester, de la Universidad de Valencia por su revisión del contenido.

A Montserrat Ribas, del Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, por su importante colaboración en la descripción del marco legislativo y recomendado en el ámbito de la Braquiterapia.

A Rafael García Mollá (Hospital Provincial de Castellón), Ricardo Tortosa ((IMED. Elche) y Rafael Colmenares (Hospital Ramón y Cajal. Madrid) por su ayuda proporcionando material diverso en este trabajo.

11. Listado de abreviaciones

ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
SEPR	Sociedad Española de Protección Radiológica
NCRP	<i>National Council on Radiation Protection and Measurements</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
BSS	<i>Basic Safety Standards</i>
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
AAPM	<i>American Association of Physicists in Medicine</i>
ESTRO	<i>European Society of Therapeutic Radiation and Oncology</i>
LDR	<i>Low Dose Rate</i> , Baja Tasa de Dosis
HDR	<i>High Dose Rate</i> , Alta Tasa de Dosis
TKRA	Tasa de Kerma de Referencia en Aire
PDR	<i>Pulsed Dose Rate</i> , Tasa de Dosis Pulsada
<i>B</i>	Factor de transmisión
<i>d</i>	Distancia
<i>P</i>	Objetivo de protección
<i>W</i>	Carga de trabajo
<i>U</i>	Factor de uso
<i>T</i>	Factor de ocupación
<i>E</i>	Dosis efectiva
<i>S_K</i>	<i>Air Kerma Strength</i>
U	Unidad de SK 1 U = 1 µGy m ² h ⁻¹

n	Número medio de tratamientos por semana
t	Duración promedio de los tratamientos
$\left[\frac{\mu_{en}}{\rho} \right]_{\text{aire}}^{\text{agua}}$	Razón de coeficientes de absorción de energía másicos promediados sobre los espectros existentes en agua y aire
HVL	<i>Half Value Layer</i> , capa hemirreductora
TVL	<i>Tenth Value Layer</i> , capa decimorreductora
TVL_1	Primera capa decimorreductora
TVL_e	Capa decimorreductora de equilibrio
n_{TVL}	Número de TVL
e	Espesor de la barrera
$\dot{K}_{\text{puerta}}$	Tasa de kerma que alcanza la entrada del laberinto
A_0	Área de la pared del fondo del laberinto que no es vista directamente desde la puerta
A_1	Área de la pared del fondo del laberinto que es vista directamente desde la puerta
A_Z	Área de la proyección de A_0 sobre la pared exterior del laberinto
d_L	Distancia de la posición de la fuente al punto de interés
d_{sec}	Distancia de la posición de la fuente al centro de la sección del laberinto en la pared A_1
d_{ZZ}	Distancia desde la posición centro de la sección del laberinto en la pared A_1 al punto de interés
d_h	Distancia desde la posición de la fuente en perpendicular a la pared del fondo del laberinto A_0 . La proyección de la intersección de d_h en A_0 a través de la esquina interna del laberinto y en el punto medio del laberinto define el punto b
d_r	Distancia desde la pared del fondo del laberinto al punto b
d_Z	Distancia desde el punto b al punto de interés
α_i	Coefficiente de reflexión o coeficiente de albedo en la superficie A_i
MDR	<i>Medium Dose Rate</i> , Tasa de Dosis Media
COMS	<i>Collaborative Ocular Melanoma Study</i>
SALEM	Sala de emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear
$\dot{H}_{30 \text{ cm}}$	Tasa de equivalente de dosis ambiental ($\mu\text{Sv/h}$) a 30 cm de un paciente con implante de próstata
SPR	Servicio de Protección Radiológica
UTPR	Unidad Técnica de Protección Radiológica
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
IPEM	<i>Institute of Physics and Engineering in Medicine</i>
IR	Instalación radiactiva
$T_{1/2}$	Periodo de semidesintegración
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
MC	Monte Carlo

Referencias

1. International Commission on Radiological Protection. ICRP 26. ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3).
2. International Commission on Radiological Protection. ICRP 60. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
3. International Commission on Radiological Protection. ICRP 103. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
4. International Atomic Energy Agency. IAEA-Safety Series 115. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the safety of radiation sources. (BSS). 1996.
5. International Atomic Energy Agency. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.
6. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1040. Design and implementation of a radiotherapy programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects. 1998.
7. Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 30 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Diario oficial nº L 159 de 29/06/1996 p. 0001-0114.
8. Directiva 97/43/Euratom del Consejo de 30 de junio de 1997 relativa a la protección de la salud frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes en exposiciones médicas, por la que se deroga la Directiva 84/466/Euratom. Diario Oficial nº L 180 de 09/07/1997, p. 0022-0027.
9. Directiva 2013/59/Euratom del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom. Diario Oficial nº L 13 de 17/01/2014, p. 1-73.
10. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes. Publicada en el BOE nº 178/2001 de 26 de julio de 2001, p. 27284.
11. Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio. BOE nº 279/2010 de 18 de noviembre de 2010, p. 96395.
12. Real Decreto 1976/1999, de 23 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en radiodiagnóstico. BOE nº 311/1999 de 29 de diciembre de 1999, p. 45891.
13. Real Decreto 1841/1997, de 5 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en medicina nuclear. BOE nº 303/1997 de 19 de diciembre de 1997, p. 37137.
14. Real Decreto 1566/1998, de 17 de julio, por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia. BOE nº 206/1998 de 28 de agosto de 1998, p. 29383.
15. Real Decreto 815/2001, de 13 de julio, sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas. BOE nº 168/2001 de 14 de julio de 2001, p. 25591.
16. Consejo de Seguridad Nuclear. www.csn.es
17. International Commission on Radiological Protection. ICRP 86. ICRP, 2000. Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30 (3).
18. International Commission on Radiological Protection. ICRP 97. ICRP, 2005. Prevention of High-dose-rate Brachytherapy Accidents. ICRP Publication 97. Ann. ICRP 35 (2).
19. International Commission on Radiological Protection. ICRP 98. ICRP, 2005. Radiation Safety Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer using Permanently Implanted Sources. ICRP Publication 98. Ann. ICRP 35 (3).
20. National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and evaluation for medical use of x-ray and gamma rays of energies up to 10 MeV. NCRP report 49. 1976 ISBN 0-913392-31-6.
21. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 147. Structural Shielding Design for Medical X-ray Imaging Facilities, 2004. ISBN 0-929600-83-5.
22. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 151. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005. ISBN-13: 978-0-929600-87-1.
23. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 155. Management of radionuclide therapy patients. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, 2006. ISBN-13: 978-0-929600-92-5.
24. Glasgow G, Bourland J, Grigsby P, Meli J, Keith A. Weaver. Remote Afterloading Technology. A Report of AAPM Task Group No. 41. 1993.
25. Biggs P. Radiation Shielding for Megavoltage Therapy Machines in the Post-NCRP 49 Era. AAPM Refresher Course. 2001.
26. Nath R, Anderson L, Meli J, Olch A, Stitt J, Williamson J. Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. Med Phys 1997;24:1557-98.
27. Kubo H, Glasgow G, Pethel T, Thomadsen B, Williamson J. High dose-rate brachytherapy treatment delivery: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 59. Med Phys 1998;25:375-403.
28. Yub Y, Anderson L, Li Z, Mellenberg D, Nath R, Schell M, Waterman F, Wu A, Blasko J. Permanent prostate seed implant brachytherapy: Report of the American Association of Physicists in Medicine Task Group No. 64. Med Phys 1999;26:2054-76.
29. Pfeiffer D, Sutlief S, Feng W, Pierce H, Kofler J. AAPM Task Group 128: Quality assurance tests for prostate brachytherapy ultrasound systems. Med Phys 2008;35:5471-89.
30. Nath R, Bice W, Butler W, Chen Z, Meigooni A, Narayana V, Rivard M, Yu Y. AAPM recommendations on dose prescription and reporting methods for permanent interstitial brachytherapy for prostate cancer: Report of Task Group 137. Med Phys 2009;36:5310-22.

31. Perez-Calatayud J, Ballester F, Das R, DeWerd L, Ibbot G, Meigooni A, Ouhib Z, Rivard M, Sloboda R, Williamson J. Dose Calculation for Photon-Emitting Brachytherapy Sources with Average Energy Higher than 50 keV: Full Report of the AAPM and ESTRO. *Med Phys* 2012;39:2904-29.
32. Perez-Calatayud J, Arrans R, De Frutos J, Guisasaola A, Macías J, Valverde J. Calibración, Matrices de Dosis y Control de Calidad en Braquiterapia: Informe del Grupo de Trabajo de Braquiterapia de la SEFM. *Rev Fis Med* 2000; 1:1-49.
33. Institute of Physics and Engineering in Medicine. The design of radiotherapy treatment rooms facilities. IPEM report 75. 1997.
34. Parry J, Kehoe T, Sutton D. "Radiotherapy: brachytherapy" en "Practical Radiation Protection in Health Care". C.J. Martin y D.G. Sutton (Editors). Oxford University Press. 2002.
35. Instrucción IS-18 del CSN sobre los criterios para la notificación de sucesos e incidentes radiológicos en instalaciones radiactivas. Publicada en el BOE nº 92 de 16 de abril de 2008. <http://www.csn.es>
36. International Atomic Energy Agency. Safety Reports Series No. 47. Radiation Protection In The Design Of Radiotherapy Facilities, 2006.
37. Nuclear Regulatory Commission. Standards of Protection against Radiation, 10CFR20, US Office of the Federal Register, Washington, DC, 1991.
38. Institute of Physics and Engineering in Medicine, Medical and Dental Guidance Notes, IPEM, York, 2002.
39. Nath R, Anderson L, Luxton G, Weaver K, Williamson J, Meigooni A. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. *Med Phys* 1995;22:209-34.
40. Eckert & Ziegler BEBIG GmbH. Certificado fuente HDR Co-60. 2014.
41. Granero D, Perez-Calatayud J, Ballester F, Bos A, Venselaar J. Broad-beam transmission data for new brachytherapy sources, Tm-170 and Yb-169. *Rad Prot Dosimetry* 2005; 118:11-5.
42. Lymperopoulou G, Papagiannis P, Sakelliou L, Georgiou E, Hourdakakis C, Baltas D. Comparison of radiation shielding requirements for HDR brachytherapy using Yb-169 and Ir-192 sources. *Med Phys* 2006;33:2541-7.
43. Glasgow G, Rusu I, Albuquerque K. Workloads for high dose rate brachytherapy facilities. 50th AAPM Annual Meeting, Houston 2008; Abstract ID: 9292.
44. Pujades MC, Perez-Calatayud J, Ballester F. Estudio de la carga de trabajo a aplicar en el cálculo de blindajes en instalaciones de braquiterapia HDR con Ir-192, Radioprotección 2011;69:30-4.
45. Glasgow G. Brachytherapy Facility Shielding. AAPM Summer School. Shielding Methods for Medical Facilities: Diagnostic Imaging, PET, and Radiation Therapy. 2007. St. John's University, Collegeville, MN.
46. Andrassy M, Niatetsky Y, Perez-Calatayud J. Co-60 frente a Ir-192 en braquiterapia de alta tasa de dosis: comparación científica y técnica. *Rev Fis Med* 2012;13:125-30.
47. Papagiannis P, Baltas D, Granero D, Perez-Calatayud J, Gimeno J, Ballester F, Venselaar J. Radiation transmission data for radionuclides and materials relevant to brachytherapy facility shielding. *Med Phys* 2008;35:4898-906.
48. Zourari K, Peppas V, Ballester F, Siebert FA, Papagiannis P. Brachytherapy structural shielding calculations using Monte Carlo generated, monoenergetic data. *Med Phys* 2014; 41: 043901. doi: 10.1118/1.4868456.
49. Astrahan M. Improved treatment planning for COMS eye plaques. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005;61:1227-42.
50. Pujades MC, Granero D, Vijande J, Ballester F, Perez-Calatayud J, Papagiannis P, Siebert FA. Air-kerma evaluation at the maze entrance of HDR brachytherapy facilities. *J Radiol Prot* 2014;34:741-53.
51. Pujades MC, Perez-Calatayud J, Ballester F. Propuesta de metodología para estimar la dosis absorbida en la entrada del laberinto en instalaciones de braquiterapia HDR con Ir-192, Radioprotección 2012;70:30-4.
52. Perez-Calatayud J, Granero D, Ballester F, Casal E, Crispin V, Puchades V, León A, Verdú G. Monte Carlo evaluation of kerma in an HDR brachytherapy bunker. *Phys Med Biol* 2004;49:389-96.
53. Colin J, Sutton D. Practical Radiation Protection in Healthcare. 1 ed. OXFORD University Press; 2002.
54. Nucletron. Comunicación personal. Cálculo blindajes HDR-PDR. 2014.
55. Venselaar J, Perez-Calatayud J. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment. ESTRO Booklet Nº 8 2004. ISBN 90-804532-8.
56. Guía de Seguridad 5.2 (Rev. 1). Documentación técnica para solicitar la autorización de funcionamiento de las instalaciones de manipulación y almacenamiento de fuentes encapsuladas (2ª y 3ª categoría). Madrid, 6 de julio de 2005.
57. Documento de Información al Cliente. Simulacro de Emergencia. Referido a Sistemas de carga diferida de alta tasa de dosis (mHDR Classic y mHDR) y de carga diferida pulsada (mPDR). Elekta Medical Systems. 2008.
58. Varisource iX. Manual de Usuario. Varian Medical Systems. 2007.
59. Multisource. Instrucciones de Funcionamiento. Rev 10. Ecker & Ziegler 2007.
60. Laube T, Fluhs D, Kessler C, Bornfeld N. Determination of surgeon's absorbed dose in I-125 and Ru-106 ophthalmic plaque surgery. *Ophthalmology* 2000;107:366-9.
61. Escalada C, Cutanda F, Pifarré X, Valcarcel F, Valverde S, Paredes M. Dosis en manos de profesionales que realizan implantes oculares de iridio con fines terapéuticos. *Radio-protección* 1996; nº extraordinario: 92-3.
62. De Frutos-Baraja J, Saornil-Álvarez M, Pérez-Calatayud J, del Castillo-Belmonte A, López-Lara-Martín F. Estado actual y tendencias en investigación en la dosimetría de la braquiterapia epiescleral. *Revista de Física Médica* 2004;5:5-17.
63. Astrahan M, Luxton G, Jozsef G, Kampp T, Liggett P, Sapozink M. An interactive treatment planning system for ophthalmic plaque radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1990;18:679-87.
64. Bebig. Ru-106 ophthalmic plaques. Product information. Documentación técnica. 2003.
65. Bebig. Instructions for use. Ru-106 eye applicators. Tech. Doc. 2001.
66. Jones C, Dermentzoglou F. Practical aspects of Sr-90 ophthalmic applicator dosimetry. *Br J Radiol* 1971;44:203-10.
67. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 72. Dosimetry of Beta Rays and Low-Energy Photons for Brachytherapy with Sealed Sources. 2004.

68. Choi C, Han H, Son K, Park U, Lee J, Wee W, Ha S, Kim I, Ye S. Dosimetry of a new P-32 ophthalmic applicator. *Med Phys* 2011;38:6143-51.
69. Luxton G, Astrahan M, Liggett P, Neblett D, Cohen D, Petrovich Z. Dosimetric Calculations and Measurements of Gold Plaque Ophthalmic Irradiators using Iridium-192 and Iodine-125 Seeds. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1988;15:167-76.
70. Bebig. Iso Seed I-12 (I25. S16) Instruction for use. Tech Doc. 2009.
71. Karolis C, Amies C, Frost R, Billson F. The development of a thin stainless steel eye plaque to treat tumours of the eye up to 15 mm in diameter. *Australas Phys Eng Sci Med* 1998; 12:172-7.
72. De Frutos-Baraja J, del Castillo-Belmonte A, Hernando-González I, Sánchez-Carmona G, Cid-Galache A, Barrio-Lazo F, Pereda-Barroeta N, Giraldo-Arguello A, Saornil-Alvarez M, López-Lara-Martin F. Dose to professionals in episcleral brachytherapy, en Irpa 11 Abstracts ISBN: 84-87078-05-2. Madrid 2004.
73. Bebig. Dummies for Ru-106 eye applicators. User manual. Tech doc. 2011.
74. Nakamatsu K, Nishimura Y, Kanamori S, Koike R, Tachibana I, Nishikawa T. Randomized Clinical Trial of Postoperative Strontium-90 Radiation Therapy for Pterygia. Treatment Using 30 Gy/3 Fractions vs. 40 Gy/4 Fractions. *Strahlenther Onkol* 2011;187:401-5.
75. Lai J, Poon A, Tham C, Lam D. Trabeculectomy with beta radiation. Long-term follow-up. *Ophthalmology* 2003; 110:1822-6.
76. Ali M, Khan F. Determination of surface dose rate from a Sr-90 ophthalmic applicator. *Med Phys* 1999;17:416-21.
77. Nag S, Quivey J, Earle J. The American Brachytherapy Society recommendations for brachytherapy of uveal melanomas. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;56:544-55.
78. Bebig. Ru-106 Eye Applicators. Beta Radiation for Eye Tumour Treatment. Technical Documentation. 2014.
79. Guía de Seguridad 7.10. Plan de Emergencia Interior en instalaciones radiactivas. Consejo de Seguridad Nacional. 2009.
80. Rivard M, Coursey B, DeWerd L, Hanson W, Huq M, Ibbott G, Mitch M, Nath R, Williamson J. Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. *Med Phys* 2004;31:633-74.
81. Butler W, Bice W, DeWerd L, Hevezi J, Huq M, Ibbott G, Palta J, Rivard M, Seuntjens J, Thomadsen B. Third-party brachytherapy source calibrations and physicist responsibilities: report of the AAPM Low Energy Brachytherapy Source Calibration Working Group. *Med Phys* 2008;35:3860-5.
82. RD229/2006 de 24 de febrero, sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas. BOE nº 50 de 28 de febrero de 2006.
83. Dauer L, Zelefsky M, Horan C, Yamada Y, St Germain J. Assessment of radiation safety instructions to patients based on measured dose rates following prostate brachytherapy. *Brachytherapy* 2004;3:1-6.
84. Hanada T, Yorozu A, Kikumura R, Ohashi T, Shigematsu N. Assessing protection against radiation exposure after prostate I-125 brachytherapy. *Brachytherapy* 2014;13:311-8.
85. Radiation Guard, Florida (USA).2014. <http://www.radiation-guard.com>
86. Cosset J. Prostate brachytherapy patients are (almost) normal people! *Brachytherapy* 2010;9:112-3.
87. Dauer L, Kollmeier M, Williamson M, St Germain J, Altamirano J, Yamada Y, Zelefsky M. Less-restrictive, patient-specific radiation safety precautions can be safely prescribed after permanent seed implantation. *Brachytherapy* 2010;9:101-11.
88. Merrick G, Bulter W, Dorsey A. Seed fixity in the prostate/periprostic region following brachytherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2000;46:215-20.
89. Japanese Society for Therapeutic Radiology and Oncology, Japanese Urological Association and Japan Radiological Society, 2003. Guidelines for Safety Control of Brachytherapy with Permanently Implanted Sealed Seed Radiation Sources for Prostate Cancer. Japan Radioisotope Association, Tokyo. In Japanese.
90. Satoh T, Yamanaka H, Yamashita T, Aoki M, Egawa S, Saito S, Sakata S, Shibuya H, Sugiura N, Takahashi Y, Nishimura T, Hamada T, Miki T, Yorozu A, Dokiya T. Deaths within 12 months after I-125 implantation for brachytherapy of prostate cancer: an investigation of radiation safety issues in Japan (2003-2010). *Brachytherapy* 2012;11:192-6.
91. Dauer LT. Globalization, implantation, cremation... Oh, my! *Brachytherapy* 2012;11:197-8.
92. IS-28 sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría. BOE nº 246 de 11 de octubre de 2010.
93. Revisión 1 de la GS-05.03 CSN guía de seguridad nº 5.3 sobre Control de la hermeticidad de fuentes radiactivas encapsuladas. Madrid, 27 de febrero de 2013.
94. Eckert & Ziegler BEBIG GmbH. Equipo de carga diferida HDR Multisource. Manual del usuario. TD09-107/Rev.01/10.2011.
95. Real Decreto 298/2009, de 6 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, en relación con la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y la salud en el trabajo de la trabajadora embarazada, que haya dado a luz o en periodo de lactancia. BOE nº 57, de 7 de marzo de 2009. Sec I, p. 23288-92.
96. Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. BOE nº 27, de 31 de enero de 1997. Sec I, p. 3031.
97. Documento elaborado por el grupo de trabajo en el marco del Foro sobre Protección Radiológica en el Medio Sanitario, creado en el CSN en 2001, y del que forman parte el CSN, la Sociedad Española de Física Médica y la Sociedad Española de Protección Radiológica. El documento se puede encontrar en las páginas web del CSN, SEFM y SEPR. SDB-04.05 La protección radiológica en el medio sanitario. 2011.

Anexo I. Información a incluir en el alta del paciente sometido a un implante de próstata en Braquiterapia permanente

Al dar de alta al paciente tras el implante de próstata con semillas, es necesario incluir una documentación específica sobre medidas de Protección radiológica destinadas al paciente y sus cuidadores, así como una información añadida destinada al personal sanitario que atienda al paciente posteriormente.

Las recomendaciones dirigidas al paciente y sus cuidadores/familiares deben incluir las recomendaciones detalladas anteriormente en los apartados 5.4 y 5.5.

La información para el personal sanitario las ha de llevar el paciente consigo cuando acuda a un hospital, y en ellas figurará información relativa al implante del paciente, recomendaciones sobre cómo actuar en caso de encontrar alguna fuente y un número de teléfono de contacto del hospital.

Un ejemplo de un documento con las mínimas recomendaciones sobre Protección radiológica que se deben incluir, se detalla a continuación.

AI.1. Recomendaciones para el paciente

Este documento contiene una breve descripción de la naturaleza de la radiación que emiten las semillas que le han sido implantadas en su próstata y su relación con prácticas de Protección radiológica para Ud. y sus familiares. Por favor guarde una copia de este documento en su cartera durante un año a partir de hoy y prsntesela a cualquier médico que le visite.

Usted ha recibido un implante de fuentes radiactivas de ^{125}I con una intensidad muy baja, que no debe preocuparle, siempre que siga estrictamente las recomendaciones dadas a continuación:

- La mayor parte de la radiación emitida por las semillas implantadas en la próstata será absorbida por su cuerpo. Además, la actividad de las semillas disminuye con el tiempo; las semillas de ^{125}I pierden el 50% de su actividad cada 2 meses y las semillas de ^{103}Pd pierden el 50% cada 17 días. En consecuencia, no es peligroso para nadie que le abrace brevemente, le bese, le de la mano, o esté en la misma habitación con ellos. Para mayor tranquilidad, se recomienda que no ponga a los niños pequeños en su regazo o se siente cerca de ellos durante los primeros 2 meses después del implante de ^{125}I a no ser que se utilicen prendas de protección especiales.
- El material radiactivo que emite radiación está contenido en una cápsula sellada (semilla), por lo

que la radiactividad no circula en la sangre, orina o cualquier fluido corporal. Por lo tanto, no se puede contaminar nada ni nadie. Esto significa que la ropa, vajilla, platos, y aseo podrán ser utilizados por otras personas sin tomar ninguna precaución especial. Por otra parte, las semillas no interfieren con los marcapasos o los hornos de microondas ni cualquier otro tipo de aparato electrónico.

- Si su pareja o un familiar vive con usted y está embarazada, debe informar a su oncólogo radioterápico. Esta situación puede requerir precauciones adicionales, tales como dormir con una almohada entre ambos, o usar camas separadas hasta que nazca el bebé.
- Alguna semilla puede pasar a la orina. Aunque esto ocurre raramente, se recomienda comprobarlo usando un colador al orinar durante 3 días después del procedimiento. Si usted encuentra una semilla en el colador, no debe tocarla con los dedos o las manos. Utilice una cuchara o pinzas para recogerla y colocarla en un pequeño contenedor tapado o en un recipiente con agua. Debe llamar al hospital para seguir sus instrucciones.
- Se recomienda no reanudar la actividad sexual durante 1 semana después del implante. Use un preservativo por lo menos durante las cinco primeras eyaculaciones, y más veces si usted ya ha perdido una semilla de esta manera. Si pierde una semilla durante una eyaculación, utilice una cuchara o pinzas para recogerla y colocarla en un pequeño contenedor tapado o en un recipiente con agua.
- En el caso improbable de que usted muera en los primeros 12 meses después del implante, la cremación de su cuerpo puede ser peligrosa y sus familiares deben buscar asesoramiento en la Unidad de Braquiterapia en el número de teléfono proporcionado en su alta tras el implante.
- Si se le recomienda someterse a una operación de próstata, incluso varios años después del implante, debe informar a su cirujano para que pueda obtener asesoramiento sobre cómo deshacerse de las semillas que se retiran.
- Si usted necesita someterse a cirugía abdominal o pélvica en el primer año después del implante, sigue existiendo un pequeño riesgo de irradiación de los dedos de su cirujano. Por lo tanto, debe informarle acerca del implante de semillas, y le muestre la "Información para el personal sanitario" que le dieron en el alta hospitalaria.

- Algunos monitores de seguridad muy sensibles pueden detectar los bajos niveles de radiación que emite el cuerpo en los primeros meses después de la implante. Estos instrumentos de seguridad son capaces de detectar la radiación a niveles muy inferiores de los que son motivo de preocupación para la salud. Estos monitores de radiación se encuentran normalmente en la entrada/salida de las centrales nucleares, centros de investigación nuclear, algunas áreas de eliminación de desechos, y algunas fábricas de chatarra. Además, ahora también pueden encontrarse en los aeropuertos o en el paso de fronteras; en algunas ciudades, los agentes de policía están equipados con este tipo de monitores. Si se dispara la alarma de un monitor de este tipo, muestre la “Información para el personal sanitario” que le dieron en el alta hospitalaria.

AI.2. Información para el personal sanitario

- Identificación precisa del paciente: nombre, apellidos, fecha de nacimiento
- Tipo de implante (^{125}I o ^{103}Pd).
- Fecha del implante y órgano (próstata).
- Hospital que está a cargo, con la dirección y el número de teléfono en el que se puedan obtener detalles específicos 24 h al día.

imagine

...el doble de láminas al doble de velocidad



Con Agility™, esto es realidad.

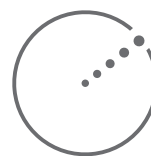
El MLC más avanzado para la radioterapia actual, Elekta Agility esculpe con precisión la radiación gracias a 160 láminas de gran resolución en un campo de 40 cm × 40 cm. Con capacidad de gestionar el abanico de terapias más amplio, Agility también dispone de un movimiento de lámina ultrarrápido, con una fuga extraordinariamente baja para maximizar el potencial de técnicas avanzadas tales como SRS (sistema de radiocirugía estereotáctica), SRT (sistema de radioterapia estereotáctica) y VMAT (arcoterapia modulada volumétrica).

La licencia de Agility no se comercializa en todos los mercados. Para obtener más información, póngase en contacto con el representante local de Elekta.

4513 371 0993 03:12



Experience the Elekta Difference
Más información en: elekta.com/imagine



ELEKTA