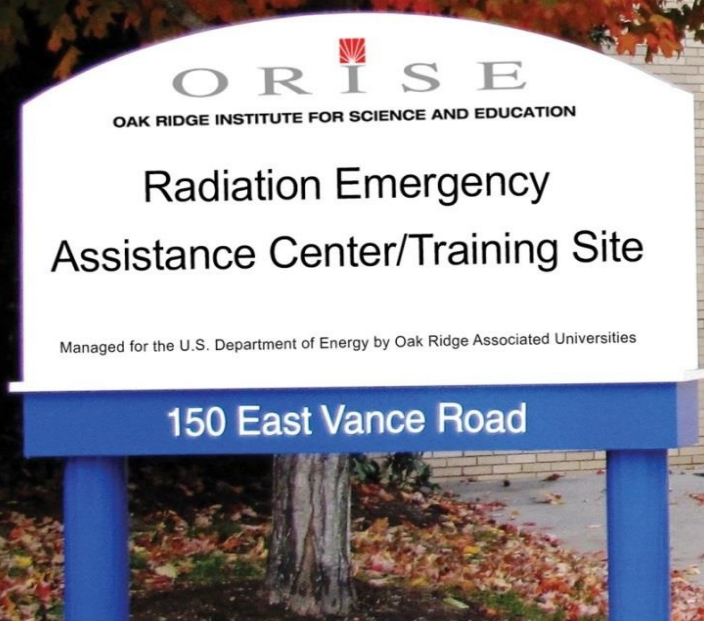




REAC/TS
Radiation Emergency Assistance Center/Training Site
Managed by ORAU for DOE

Aspectos médicos de los incidentes radiológicos

4^a edición

PO Box 117, MS-39 • Oak Ridge, TN 37831
Office: (865) 576-3131 • 24-hr Number: (865) 576-1005
www.orise.orau.gov/reacts

Instituto OAKRIDGE para la Ciencia y la Educación
Dirigido por ORAU para DOE

Centro de Asistencia de Emergencia Radiológica/Centro de Entrenamiento (REAC/TS)

ASPECTOS MÉDICOS DE LOS INCIDENTES RADIOLÓGICOS

4ª Edición

Traducido por:

Alegría Montoro (Dra. en CC. Biológicas), José Manuel Calatayud (Graduado en Física, Residente de Radiofísica Hospitalaria), Óscar Alonso (Licenciado en Medicina), Natividad Sebastià (Dra. en Tecnología de Alimentos, y Nutrición), José María Chimeno (Graduado en Física, Especialista en Radiofísica Hospitalaria), Juan Manuel Campayo (Dr. en CC. Químicas, Especialista en Radiofísica Hospitalaria), Juan Ignacio Villaescusa (Dr. en Física, Especialista en Radiofísica Hospitalaria, Jefe de Servicio de Protección Radiológica) y Luis Martí-Bonmatí (Dr. en Medicina, director del Área Clínica del Departamento de Imagen Médica del HUIP La Fe).

Hospital Universitario y Politécnico la Fe de Valencia (España)

El texto que aquí les presento es una traducción de la guía The Medical Aspects of Radiation Incidents, 4th Edition del Centro, Radiation Emergency Assistance Center/Training Site (REAC/TS) que pertenece al Instituto, Oak Ridge Institute for Science and Education (ORISE) de Estados Unidos de América.

El objetivo de esta traducción es proporcionar la información básica necesaria a los diferentes profesionales implicados en el manejo de pacientes afectados por radiaciones ionizantes.

Desde el 6 de junio de 2008 el Hospital Universitari i Politècnic La Fe de València tiene autorizado un Servicio de Atención para Irradiados y Contaminados (CAIC). Este tipo de centros están regulados por el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio por el que se aprueba el reglamento sobre protección sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, que en su artículo 46 sobre Vigilancia especial de los trabajadores expuestos, explicita que los Servicios de Asistencia a los lesionados y contaminados por isótopos radiactivos y radiaciones ionizantes han de ser autorizados por la autoridad sanitaria de las respectivas Comunidades Autónomas que integran el Estado Español, informando de dichas autorizaciones al Ministerio de Sanidad y Consumo y al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), como organismo regulador.

El CAIC posee los medios para la identificación y evaluación de los pacientes afectados por este tipo de agentes, pero se precisa de la participación de muchas otras especialidades sanitarias de un Hospital para el correcto tratamiento de sus lesiones y minimizar los riesgos radiológicos asociados.

La importancia de esta traducción radica en la necesidad de la constante preparación para afrontar emergencias por parte de los profesionales sanitarios.

CONSELLERIA DE SANIDAD UNIVERSAL
Y SALUD PÚBLICA

El Centro de Asistencia de Emergencia Radiológica/Centro de Entrenamiento (REAC/TS, por sus siglas en inglés) provee al *Department of Energy*¹ (DOE, “Departamento de Energía” de EEUU) experiencia en el manejo médico de incidentes radiológicos desde 1976. El REAC/TS mantiene una capacidad de respuesta ininterrumpida (24/7) ante emergencias radiológicas nacionales e internacionales, incluyendo al personal médico, de enfermería, paramédicos y personal de Radiofísica² con experiencia en el tratamiento de lesiones y enfermedades por radiación, evaluación de la dosis de radiación y descontaminación de personas. El Laboratorio de Biodosimetría Citogenética (CBL, por sus siglas en inglés) de REAC/TS tiene capacidad para realizar análisis de cromosomas dicéntricos, entre otros análisis cromosómicos, con fines biodosimétricos. El REAC/TS también mantiene un registro de accidentes radiológicos y de las reservas de DTPA/Azul de Prusia almacenadas para el DOE. Además, el REAC/TS proporciona formación médica continuada en este campo de especialización a través de cursos internos programados regularmente y de cursos especialmente diseñados para impartirse en abierto.

El REAC/TS es un recurso de respuesta médica ante emergencias radiológicas generado por el *U.S. Department of Energy / National Nuclear Security Administration* (DOE/NNSA, “Departamento de Energía / Administración Nacional de Seguridad Nuclear de EEUU”). El REAC/TS está capacitado para el tratamiento y asistencia continuada, las 24 horas del día, y puede contactarse a través del teléfono +1 8655763131 (cualquier día de la semana) o fuera de horario laboral a través del DOE *Oak Ridge Operations Center* al +1 8655761005.

El Instituto Oak Ridge para la Ciencia y la Educación (ORISE, por sus siglas en inglés) es una institución dependiente del DOE de EEUU, centrada en diversas iniciativas científicas para la investigación de los riesgos para la salud que puedan derivarse de exposiciones ocupacionales a radiaciones ionizantes. Incluye también la evaluación de la descontaminación medioambiental y la respuesta a emergencias médicas relacionadas con la radiación. Además, da soporte a la seguridad nacional para la preparación ante emergencias y para educar a la próxima generación de científicos. ORISE es administrada por la *Oak Ridge Associated Universities*.

Este documento ha sido elaborado a través del contrato DE-SC0014664 entre el Departamento de Energía de EEUU y las Universidades Asociadas de Oak Ridge por Stephen L. Sugarman, Wayne Baxter, Angie Bowen, A. Seaton Garrett, Ronald E. Goans, Mark Jenkins, Carol Iddins, Gordon K. Livingston, Adayabalam Balajee y Nicholas Dainiak.

Un especial agradecimiento al Departamento de Bomberos de la Ciudad de Oak Ridge y al paramédico Austin Keathley por su ayuda con las imágenes de demostración de la descontaminación.

¹N. del T.: El *Department of Energy* (DOE) es un gabinete del gobierno de los EEUU responsable de la política energética y de la seguridad nuclear.

²N. del T.: El término inglés “*Health Physicist*” se traduciría en España como “Radiofísico/a” o, en general, “personal de Radiofísica”, puesto que existe la denominación de la formación sanitaria especializada “Radiofísica Hospitalaria”, regulada por el Ministerio de Sanidad.

ASPECTOS MÉDICOS DE LOS INCIDENTES RADIOLÓGICOS

ÍNDICE

THE MEDICAL ASPECTS OF RADIATION INCIDENTS

Radiation Emergency Assistance Center/Training Site

REAC/TS

PO Box 117, MS-39

Oak Ridge, TN 37831

Office: (865)576-3131

24-hour Number: (865)576-1005

www.orise.orau.gov/reacts

Contenido

Sección 1 - Introducción y fundamentos de la radiación	4
Sección 2: Respuesta médica inicial.....	15
Sección 3 - Síndrome de Irradiación Aguda	19
Sección 4 - Tratamiento médico de las lesiones locales	26
Sección 5 - Gestión médica de la contaminación interna	28
Sección 6 - Técnicas de descontaminación	38
Sección 7 - Biodosimetría	43
Sección 8 - Efectos tardíos	49
Sección 9 - Apoyo psicológico y percepción del riesgo	53
Apéndice A – Información suplementaria.....	57
Apéndice B – Fuentes adicionales de respuesta	61
Apéndice C – Selección de referencias, informes y páginas webs	62

Sección 1 - Introducción y fundamentos de la radiación

Los servicios de asistencia médica deben prestar atención a los pacientes en multitud de escenarios. Uno de esos escenarios involucra al paciente que ha estado expuesto a la radiación o que se ha contaminado con materiales radiactivos. Este documento tiene como objetivo proporcionar a médicos y profesionales de la salud, la información básica necesaria para el correcto tratamiento médico de estos individuos.

La consideración más importante en la evaluación médica de las personas involucradas en un incidente radiológico es la estabilidad clínica de los sujetos afectados. También debe considerarse la magnitud relativa de la situación y los recursos necesarios para abordar la emergencia.

- **Los incidentes a pequeña escala** son aquellos que ocurren en laboratorios, hospitales y plantas de energía nuclear que involucran pequeñas cantidades de materiales radiactivos con posible exposición o contaminación de una o varias personas.
- **Los incidentes a gran escala** son aquellos que involucran cantidades relativamente grandes de materiales radiactivos y la posible exposición o contaminación de gran número de personas, como por ejemplo en ataques terroristas con detonación de armas nucleares y desastres a gran escala en centrales nucleares.

Las exposiciones agudas a niveles elevados de radiación ionizante externa representan, en general, el mayor peligro para la población. Los niveles bajos de contaminación con material radiactivo, tanto interna como externa, generalmente presentan bajo riesgo. Como en cualquier situación de respuesta a emergencias, la seguridad del personal que brinda la asistencia es la preocupación principal. Se debe evaluar cualquier lugar susceptible de haberse contaminado antes de permitir la entrada en el mismo y se debe informar al personal de asistencia para que limite su tiempo de estancia en las áreas con una elevada tasa de dosis. Existe un riesgo mínimo típicamente asociado con la asistencia de una víctima contaminada por radiación (Ver Sección 6 para obtener orientación relacionada con técnicas de descontaminación).

El Informe nº 138 (2001) del *National Council on Radiation Protection* (NCRP, “Consejo Nacional de Protección Radiológica”) sobre *Management of Terrorist Events Involving Radioactive Material* (“Gestión de atentados terroristas con material radiactivo”), analiza varios incidentes en los que puede existir exposición a la radiación o contaminación con materiales radiactivos por parte del personal. El Informe Nº 165 (2010) del NCRP *Responding to Radiological or Nuclear Terrorism: A Guide for Decision Makers* (“Respuesta a atentados terroristas radiológicos o nucleares: Guía para la toma de decisiones”), también es de interés. A continuación se presenta una clasificación frecuentemente aceptada de las diversas amenazas terroristas radiológicas.

- **Dispositivo de exposición a la radiación (DER o RED, por sus siglas en inglés):** material radiactivo en una fuente sellada o dentro de un contenedor destinado a exponer a una dosis externa elevada a las personas próximas al dispositivo. Algunos materiales empleados en equipos comerciales contienen fuentes radiactivas que podrían funcionar como un DER. Las fuentes de radiografía industrial del sector civil (como se muestra en la Figura, elemento inferior) podrían usarse como DER. También son comunes las fuentes de braquiterapia (como se muestra en la Figura, elemento superior).



- **Dispositivo de Dispersión Radiológica (DDR o RDD, por sus siglas en inglés):** cualquier dispositivo que cause una dispersión intencionada de material radiactivo sin una detonación nuclear. Un DDR puede causar una exposición interna por inhalación o ingesta de material radiactivo liberado o una exposición externa debido a la contaminación superficial. Un DDR que dispersara material radiactivo mediante el uso de un dispositivo explosivo causaría lesiones por la propia explosión y por el calor que se contaminarían con material radiactivo. Además, la contaminación del entorno probablemente complicarían la respuesta médica y/o la evacuación.
- **Dispositivo nuclear improvisado (DNI o IND, por sus siglas en inglés):** se define como un dispositivo diseñado por terroristas para producir una detonación nuclear. Con rendimiento total o parcial, un DNI es físicamente igual que un arma nuclear: la explosión, el calor y la radiación son tanto las formas de energía como la causa de las lesiones. Un DNI expone a las personas a traumatismos, elevados niveles de dosis externas, inhalación e ingesta de materiales radiactivos y contaminación de la piel. Si un DNI no detona correctamente, los explosivos pueden diseminar el material nuclear en el entorno, convirtiéndose a efectos prácticos en un DDR.

Planificación

La Agencia de Protección Ambiental de EEUU ha establecido unas RECOMENDACIONES para los límites de dosis basados en el riesgo específico de la misión que incluye actividades de salvamento. Esta guía se puede encontrar en EPA-400 / R-17/001, *PAG Manual: Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents* ("Guías de acción protectora y orientación de planificación para incidentes radiológicos") (enero de 2017). El manual establece que los trabajadores pueden recibir hasta 10 rem (0,1 Sv) para proteger bienes valiosos y hasta 25 rem (0,25 Sv) para salvar una vida. También afirma que se pueden recibir más de 25 rem (0,25 Sv) para salvar vidas si los participantes son voluntarios, incluyendo mujeres adultas no embarazadas, y plenamente conscientes de los riesgos existentes. Estas dosis de emergencia son para una exposición única en la vida y no se suman a la dosis ocupacional. La Publicación 103 de la ICRP recomienda no aplicar restricción de dosis para salvar vidas si el beneficio para otros supera el riesgo de la persona que interviene (voluntarios informados). Para otras operaciones de rescate urgente, las recomendaciones de dosis máximas son de hasta 1000 mSv (100 rem). Para otras operaciones de rescate se recomiendan límites de dosis inferiores a 100 mSv (10 rem).

Las intervenciones radiológicas pueden provocar que el personal reciba dosis de radiación o contaminación radiactiva suficiente para justificar la evaluación médica y la descontaminación. Se pueden también depositar cantidades significativas de material radiactivo en superficies después de la detonación de un arma nuclear, por el uso de un DDR o por un accidente en una planta nuclear.

Además, el personal puede estar expuesto a la radiación, contaminarse por accidentes relacionados con el almacenamiento o por el transporte de materiales radiactivos, por el uso de fuentes industriales o durante el desempeño de funciones rutinarias en la industria nuclear.

Tipos de radiación

Los cinco principales tipos de radiación son:

- **Partículas alfa (α):** son partículas cargadas, formadas por dos protones y dos neutrones, emitidas por núcleos pesados como U (uranio), Pu (plutonio) y Am (americio). Las partículas alfa no pueden viajar lejos (alrededor de unos 2 cm en el aire) ni penetrar más de unos pocos μm en la piel (básicamente, la capa muerta de la piel). La ropa fina, o incluso una hoja de papel, son barreras efectivas para estas partículas alfa. Los radionúclidos que emiten partículas alfa presentan, pues, un riesgo externo insignificante, pero pueden ser importantes en caso de inhalación o ingesta. Debido a su tamaño y carga relativamente grandes, las partículas alfa son eficientes produciendo ionizaciones, lo que aumenta el potencial de causar daño biológico. Por lo tanto, los límites reguladores sobre la ingesta de radionúclidos emisores de partículas alfa son típicamente mucho más restrictivos que para otros tipos de radiación.



- **Partículas beta (β):** son electrones emitidos por núcleos de isótopos como tritio y ^{90}Sr . Las partículas beta pueden penetrar unos pocos milímetros en el tejido y hasta un par de metros en aire. La mayoría de partículas beta pueden ser detenidas por una fina capa de plástico. La parte transparente de la pieza facial de un respirador de cara completa es un blindaje eficaz para muchas partículas beta. Si se depositan grandes cantidades de material radiactivo emisor beta sobre la piel puede dañarse la capa basal de la epidermis, incluso las capas más profundas, y causar quemaduras por radiación. Los emisores beta también son importantes si se inhalan o se ingieren.
- **Rayos gamma (γ):** es un tipo de radiación electromagnética emitida por varios tipos de radionúclidos, constituida por partículas sin masa llamadas fotones, con longitudes de onda más cortas que los rayos UV y capaz de producir ionizaciones. Los rayos gamma se originan en el núcleo, son muy enérgicos y pueden atravesar la materia fácilmente, no siendo muy eficientes para producir ionización (en comparación con las partículas alfa, por ejemplo). Los límites establecidos en caso de ingesta de radionúclidos emisores gamma suelen ser mucho menos restrictivos que los de los radionúclidos emisores de radiación alfa. Debido a su alta capacidad de penetración, la radiación gamma procedente de fuentes externas puede ocasionar una exposición de los órganos internos pudiendo dañarlos, por lo que constituyen una preocupación en el caso de la irradiación externa. Para el blindaje frente a los rayos gamma se precisa de materiales densos como el plomo.
- **Rayos X:** se diferencian de los rayos gamma solo en su origen. Los rayos X se originan fuera del núcleo en lugar de en su interior.
- **Neutrones:** son partículas sin carga que se emiten durante el proceso de fisión y en algunos procedimientos de ensayos no destructivos. No son tan comunes como los otros tipos de radiación comentados. Los neutrones pueden tener asociados de 3 a 20 veces más riesgo a largo plazo que los rayos gamma. Los neutrones son el único tipo de radiación, de las mencionadas, con capacidad de hacer que otro elemento se transforme en radiactivo (activación neutrónica).

Medios de Exposición

Un individuo puede recibir una dosis de radiación de fuentes externas, por material radiactivo libre depositado en la piel o en equipos, o por ingestión o inhalación de partículas radioactivas. La ingestión o inhalación de material radiactivo puede causar exposiciones internas en todo el cuerpo o en un órgano específico durante un período de tiempo, pero históricamente los niveles de dosis recibidos de esta manera no han sido habitualmente letales.

Irradiación vs. Contaminación

Una persona se irradia cuando se expone a la radiación ionizante, de la misma manera que una persona se expone a la luz cuando alguien la ilumina con una linterna. En el caso de la irradiación, no hay transferencia de material. Esto significa que un paciente irradiado no tiene material



radiactivo en él y no genera riesgos de exposición para el equipo asistencial.



Cuando una persona tiene materiales radiactivos sobre o dentro de ella, se dice que está contaminada por ese material. No debe considerarse que una persona esté contaminada, por ejemplo, con partículas alfa, pero sí con materiales como americio-241, ^{241}Am , que emiten partículas alfa. Una buena aproximación es imaginar un contenedor sellado con polvo de talco radiactivo que emita rayos gamma. Uno puede sostener el contenedor y exponerse a los rayos gamma que penetran a través de las paredes del contenedor que el polvo de talco manche sus manos. En caso de que se produzca una fuga y parte del material escape, la persona puede llegar a tener el polvo de talco en sus manos, produciéndose entonces la contaminación.

Controlar la contaminación radiactiva es muy similar al control del polvo de talco suelto. Se debe usar el sentido común para limitar la propagación del material. Esto se consigue generalmente mediante el uso apropiado de la ropa de protección, controlando la entrada y salida hacia y desde el área contaminada, minimizando la cantidad de material dispersado en el aire, y con una correcta supervisión del personal. Existen otros métodos que se pueden emplear para controlar la propagación de la contaminación (tales como el uso de presión negativa, evitar acciones que vuelvan a suspender el material y cubrir o eliminar elementos innecesarios del área). Normalmente, el control de la contaminación es un proceso importante que no es necesariamente complicado.

Unidades

La unidad básica de radiactividad utilizada en EEUU es el curio (Ci) y se define como $3,7 \times 10^{10}$ becquerelios (Bq). Un becquerel se define como una desintegración por segundo y se considera la unidad básica del SI (del francés *Système International d'unités*). Un Ci equivale a 37 gigabecquerelios (GBq) y un GBq a 27 milicurios (mCi). La actividad es un concepto utilizado para cuantificar la cantidad de material radiactivo presente. Las unidades convencionales, como los gramos, no deben utilizarse para cuantificar la cantidad de material radiactivo presente. Por ejemplo, un gramo de cobalto-60, ^{60}Co , es un poco más de 1.100 Ci (~ 40.000 GBq) mientras que un gramo de uranio-235, ^{235}U , es aproximadamente 2,1 μCi (~ 78 kBq).

Algunas conversiones útiles de actividad son:

Tabla 1 – Factores de Conversión de Actividad

1 terabecquerel	1 TBq	27 curios	$5,99 \times 10^{13}$ dpm
1 gigabecquerel	1 GBq	27 millicurios	$5,99 \times 10^{10}$ dpm
1 megabecquerel	1 MBq	27 microcurios	$5,99 \times 10^7$ dpm
1 kilobecquerel	1 kBq	27 nanocurios	$5,99 \times 10^4$ dpm
1 becquerel	1 Bq	27 picocurios	59,9 dpm
1 kilocurie	1 kCi	37 terabecquerels	$2,22 \times 10^{15}$ dpm
1 curie	1 Ci	37 gigabecquerels	$2,22 \times 10^{12}$ dpm
1 millicurie	1 mCi	37 megabecquerels	$2,22 \times 10^9$ dpm
1 microcurie	1 μ Ci	37 kilobecquerels	$2,22 \times 10^6$ dpm
1 nanocurie	1 nCi	37 becquerels	2220 dpm

Ver tabla 18 para más información sobre prefijos estándar para unidades de medida

Donde:

G = giga (1×10^9), M = mega (1×10^6), k = kilo (1×10^3)
m = mili (1×10^{-3}), μ = micro (1×10^{-6}), n = nano (1×10^{-9})

dpm: desintegración por minuto

El tiempo que necesita un elemento para disminuir la actividad a la mitad de su valor original se llama semivida, que no puede ser alterada por fuerzas externas.

La exposición se relaciona con el potencial de crear ionizaciones en el aire. Las unidades en EEUU son roentgen (R) y culombio por kilogramo en el SI. Estas unidades son para "ionización en el aire", por lo que no son útiles para el tratamiento médico de víctimas de incidentes radiológicos.

La dosis absorbida es una medida de la energía depositada en el tejido por la radiación ionizante. Su unidad en EEUU es el rad. Un rad es igual a 100 ergios (10^{-7} julios) de energía depositada en un gramo de tejido. La unidad del SI para la dosis absorbida es el gray (Gy), que representa un julio de energía depositada en un kilogramo de tejido. Para entender los efectos médicos agudos se suele considerar que la unidad más apropiada es la dosis absorbida (rad o Gy), ya que los efectos agudos (discutidos en las Secciones 3 y 4) se deben principalmente a la cantidad de energía depositada en un tejido en particular.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}; 1 \text{ centigray (cGy)} = 1 \text{ rad}$$

Las diferencias entre los diferentes tipos de radiación en el riesgo radiológico a largo plazo, como el riesgo de inducción de cáncer, se aproximan mediante el uso de un factor de calidad (Q ó QF, *Quality Factor*, QF³, utilizado en EEUU para el denominado *dose equivalent*⁴) o un

³ N. del T.: En España el factor de calidad se denota como Q, a diferencia de QF, como en los EEUU.

⁴ N. del T.: No se propone ninguna traducción para *dose equivalent* porque no existe ninguna magnitud definida de dicha forma en el ámbito internacional. En España se emplea el término "dosis equivalente"

factor de ponderación de la radiación (w_R , utilizado en el SI para la dosis equivalente). También pueden entenderse estas diferencias mediante la comparación entre la dosis de un tipo de radiación requerida para producir un efecto dado y la dosis de un tipo diferente de radiación requerida para producir el mismo efecto. La diferencia entre el *dose equivalent* (relacionado con el QF) y la dosis equivalente (dado por w_R) se encuentra en las definiciones utilizadas por diferentes informes de la ICRP. En términos sencillos, QF y w_R representan el riesgo asociado con un tipo de radiación frente al estándar (radiación gamma o rayos X, donde w_R y QF = 1). La dosis en Gy multiplicada por w_R da lugar a la dosis equivalente, medida en sieverts (Sv). La unidad correspondiente en EEUU para el sievert es el rem. El w_R para rayos X o radiación gamma es 1, por lo tanto, para la radiación gamma pura:

$$100 \text{ rad} \times 1 = 100 \text{ rem}, \text{ ó } 1 \text{ Gy} \times 1 = 1 \text{ Sv}$$

La w_R para la radiación alfa es 20, por lo que 1 mGy (100 mrad) de radiación alfa equivale a 20 mSv (o 2 rem); la radiación beta tiene un w_R de 1y para neutrones se encuentra entre 3 y 20, dependiendo de la energía de los neutrones.

Los límites de dosis ocupacionales, expresados en rem o Sv, están establecidos principalmente para la limitación del riesgo y se encuentran por debajo de los umbrales normales asociados con los efectos médicos agudos. Pueden también referenciarse los límites normativos como punto de comparación cuando se explica la magnitud de dosis que puede haber recibido un paciente o se comenta con otras partes interesadas.

Ver Tabla 19 y 20 para más información sobre Dosis Equivalente/ Factores de conversión de equivalente de dosis y Factores de conversión de dosis absorbida.

Tabla 2A – Límites de Dosis Anuales (U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC, Comisión Nuclear Reguladora de los EEUU)

Límites No Ocupacionales	rem	mSv
Miembro del público	0,1	1
Límites Ocupacionales	rem	mSv
Todo el cuerpo (interno + externo)	5	50
Cualquier órgano individual	50	500
Cristalino	15	150
Piel	50	500
Extremidades	50	500
Dosis fetal (embarazo declarado)	0,5	5

para hacer referencia a una magnitud limitadora de la exposición a la radiación ionizante de un determinado órgano y el término “equivalente de dosis”, que no tiene relación con ninguno de los términos en inglés *equivalent dose* ni *dose equivalent*, a la magnitud operacional, que puede ser ambiental, direccional o personal. Como se indica en el texto, la dosis equivalente es la magnitud análoga al *dose equivalent* de los EEUU, pero no hace referencia a la misma definición y por ello quedan denominadas de forma distinta.

Tabla 2B – Recomendaciones Generales. Publicación 103 ICRP

Límites No Ocupacionales	rem	mSv
Todo el cuerpo (interno + externo)	0,1	1
Cristalino	1,5	15
Piel	5	50
Límites Ocupacionales	rem	mSv
Todo el cuerpo (interno + externo)	2	20
Cualquier órgano individual	n/d	n/d
Cristalino	2*	20*
Piel	50	500
Extremidades	50	500
Dosis Fetal (embarazo declarado - resto del embarazo)	0,1	1

* Recomendado por OIEA, 2011

En EEUU muchos instrumentos de detección de la radiación, tales como el detector G-M (Geiger-Müller) o la cámara de ionización, usan la unidad roentgen (R) o un submúltiplo, como el mR. El R es una unidad de ionización en el aire. La cámara de ionización, por ejemplo, es un detector que contiene aire en su interior, por lo que la carga generada en el detector por la entrada de un evento ionizante se mide correctamente en roentgens. Para la radiación gamma, el culombio/kg (R), Gy (rad) y Sv son bastante próximos entre sí. Por lo tanto, aunque las unidades son diferentes, a menudo se usan indistintamente de forma coloquial. Para la radiación beta, generalmente se aplica un factor multiplicativo cuando se usa una cámara de ionización. El personal de Radiofísica puede ser de ayuda en estos aspectos.

Constante específica de radiación Gamma

La constante específica de radiación gamma para un isótopo es la tasa de exposición a rayos gamma. Se expresa en mSv por hora a una distancia de un centímetro desde una fuente puntual de 1 MBq (la conversión a R/h/mCi se realiza multiplicando por 3,7). Los tres radionúclidos de mayor interés para las organizaciones terroristas son ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs y ⁶⁰Co. La información de la constante específica de radiación gamma se puede encontrar en la Sección 2, Tabla 3.

Además de la evaluación médica, existen dos principios de suma importancia en el tratamiento médico del paciente irradiado: la pronta estimación de la magnitud del evento de la radiación o la contaminación, y la identificación de los radionúclidos implicados. Estos dos aspectos influyen de manera notoria en las decisiones del tratamiento.

Incidente

Un individuo entra en una zona de obras donde una fuente de ¹⁹²Ir de 3,7 TBq (100 Ci) se encuentra en el suelo. Esta fuente, habitualmente empleada para radiografía industrial, dejó involuntariamente por el operario. El paciente trabajó a 1 m de distancia de la fuente y estimó haber estado cerca de la fuente durante 15 minutos. ¿Cuál es su dosis estimada a cuerpo entero?

Solución

Una aproximación a la dosis recibida a partir de una fuente pequeña se calcula con la constante gamma multiplicada por la actividad de la fuente en el momento inicial y por el tiempo que se permaneció cerca de la fuente, y dividido por el cuadrado de la distancia entre la persona y la fuente expresada en metros (o cm, según corresponda). La constante específica de radiación gamma para el ^{192}Ir es 1,24 mSv / h a 1 cm de la fuente por MBq (las constantes específicas de radiación gamma de algunos radionúclidos se pueden encontrar en la Tabla 3).

$$\text{Dosis} = 1,24 \text{ mSv/h/MBq} \times 3,7 \times 10^6 \text{ MBq} \times 0,25 \text{ h} \times (1 \text{ cm}/100 \text{ cm})^2 = \sim 115 \text{ mSv}$$

Como se menciona en la Sección 3, este incidente no debería tener consecuencias médicas agudas para el paciente por lo que es recomendable tranquilizar al paciente respecto a las cuestiones médicas. Aunque se trata de un cálculo aproximado, tranquilizar al paciente es adecuado dada la incertidumbre habitual con la distancia exacta del individuo a la fuente y el tiempo que permanece cerca de ella. La tasa de dosis para una fuente puntual disminuye con el cuadrado de la distancia, por lo que la dosis sería sustancialmente menor a mayores distancias de la fuente. Esto se conoce como la “ley de la inversa del cuadrado de la distancia”, que establece que: “Al duplicar la distancia, la dosis disminuye a la cuarta parte”. Por lo tanto, es importante tanto minimizar el tiempo de exposición a una fuente radiactiva como maximizar la distancia respecto a ella. En el ejemplo anterior, la dosis sería:

$$\text{A } 1 \text{ m} \sim 120 \text{ mGy (12 rad)}$$

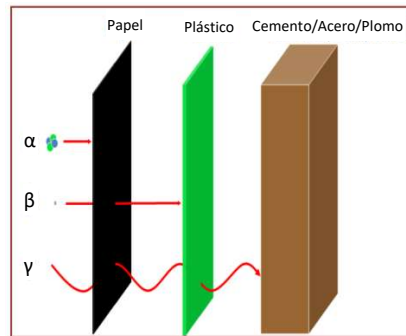
$$\text{A } 2 \text{ m} \sim 120 \text{ mGy}/2^2 = 30 \text{ mGy (3 rad)}$$

$$\text{A } 3 \text{ m} \sim 120 \text{ mGy}/3^2 = 13 \text{ mGy (1,3 rad) aprox.}$$

El personal médico y el personal de Radiofísica deben mantener una comunicación fluida para asegurar que los cálculos de dosis y los signos y síntomas clínicos son coherentes. En el caso de que los síntomas médicos no concuerden con la previsión correspondiente a la dosis calculada, las estimaciones de tiempo y distancia pueden ser erróneas. Se debe hacer un esfuerzo para resolver este tipo de cuestiones, ya que no es extraño que la investigación del incidente descubra nuevos datos o que las deducciones iniciales de un incidente cambien con el tiempo.

Protección del personal

El principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*, “tan bajo como sea razonablemente posible”) constituye la filosofía fundamental asociada a la protección de las personas contra las radiaciones ionizantes, por la cual las exposiciones a la radiación no deberían tener lugar sin que el beneficio supere el posible detrimento para la salud. El tiempo, la distancia y el blindaje son las principales variables que considerar para limitar las exposiciones. El REAC/TS agrega un cuarto elemento a la lista: la cantidad. Estos cuatro conceptos se deben tener en cuenta al mismo tiempo.



Por ejemplo, si se aumenta la distancia a una fuente radiactiva en realidad se agrega más blindaje en el sentido de que la distancia disminuye la dosis recibida de forma similar al blindaje. Al pasar menos tiempo en un área, uno se aleja de la fuente (es como si se incrementara la distancia y, por tanto, el blindaje). Cuando uno minimiza la cantidad de material radiactivo en un área es como si también se estuviera alejando la fuente. Como se puede ver, para protegerse de la radiación ionizante hay que emplear el sentido común: minimizar el tiempo alrededor de la fuente, aumentar la distancia a la fuente, interponer "materiales" entre el objetivo y la fuente y, simplemente, eliminar la fuente.

Se debe usar dosimetría personal apropiada para monitorizar las dosis externas recibidas con el fin de garantizar que se mantenga el principio ALARA. Los tipos de dosímetros incluyen dosímetro de película, dosímetros termoluminiscentes (TLD, por sus siglas en inglés) y dosímetros luminiscentes estimulados ópticamente (OSLD, por sus siglas en inglés). Además, hay disponibles dosímetros de lectura directa (DRD, por sus siglas en inglés). Mientras que los TLD, los OSLD y los dosímetros de película deben leerse con un equipo especial, los DRDs permiten al usuario controlar continuamente su dosis acumulada. Se deben investigar los tipos de dosimetría y seleccionar el tipo apropiado para las necesidades individuales.

Las áreas contaminadas podrían deberse no solo a fuentes radiactivas médicas o de la industria, sino también al uso de un DDR, a la detonación de un dispositivo nuclear y a otras razones. La contaminación externa por materiales radiactivos puede ocurrir cuando un individuo traspasa un área contaminada sin la ropa de protección adecuada. Si, por ejemplo, ocurre un incidente que dispersa los materiales radiactivos en el aire o si el individuo resulta herido mientras se encuentra en el área contaminada, muy probablemente se contamine internamente. Los pacientes contaminados con material radiactivo generalmente no representan un peligro de irradiación para el personal sanitario. Por lo tanto, el personal de asistencia sanitaria debe estar preparado para proporcionar un tratamiento rápido de las lesiones convencionales agravadas por la radiación ionizante o por la contaminación radioactiva.

La ropa protectora se usa para proteger al personal sanitario de la contaminación externa. El objetivo de la ropa de protección es simplemente mantener el material radiactivo fuera de la piel o la ropa personal. Los monos de papel, de tela y la ropa quirúrgica, por ejemplo, son formas aceptables de ropa protectora. Se debe tener en cuenta el agobio por calor, ya que la mayoría de personal no está acostumbrado a trabajar con capas adicionales de ropa. El

personal sanitario deber ser monitorizado por posible contaminación y, si es necesario, ser descontaminado después del tratamiento y de la descontaminación de los pacientes contaminados.

Las máscaras estándar protectoras de partículas (respiradores) ofrecen una excelente protección contra la inhalación e ingestión de la mayoría de materiales radiactivos. Dado que estos dispositivos de protección respiratoria están generalmente diseñados para filtrar partículas, el radón y el gas tritio pasarán a través de estos filtros. Sin embargo, las exposiciones cortas a estos radionúclidos generalmente no son médicamente significativas. Se debe tener en cuenta que las máscaras quirúrgicas no están diseñadas para la protección respiratoria.

Sección 2: Respuesta médica inicial

Respuesta médica inicial

Los pacientes deben evaluarse y tratarse según estándares actuales de cribado (triaje). Las intervenciones de primeros auxilios tienen prioridad sobre la contaminación (ver el algoritmo de tratamiento del paciente del REAC/TS en el Apéndice A). Se ha demostrado que si se aplican sistemas de prevención general por los profesionales sanitarios se mitigan los problemas de contaminación radiactiva. Un paciente no contaminado que solo se ha irradiado no presenta riesgos radiológicos para el profesional médico. Para preparar un plan efectivo de tratamiento, se necesita una estimación temprana de la magnitud de la dosis. El uso de la constante específica de radiación gamma apropiada es una manera rápida de estimar la dosis debida a una exposición a una distancia dada. Es necesario conocer la actividad de la fuente (A), el isótopo y la constante específica de radiación gamma correspondiente (Γ), la distancia (d) a la que la víctima estuvo de la fuente (m ó cm) y el tiempo de permanencia (t) en el área. La siguiente fórmula puede usarse para determinar la dosis a una distancia dada, manteniendo la coherencia de las unidades con respecto a las empleadas en EEUU y las del SI.

$$\frac{A \times \Gamma \times t}{d^2}$$

Los factores de conversión de dosis están disponibles también para ayudar a determinar las dosis en piel por la manipulación de una fuente radiactiva cuando se conoce el tiempo, el radionúclido y la actividad. La Tabla 3 proporciona información de la constante específica de radiación gamma junto con la dosis en piel a varias profundidades, asociadas con el contacto con las fuentes radiactivas enumeradas. Debe tenerse en cuenta que la información de dosis por contacto supone que la fuente radiactiva está encapsulada en acero inoxidable delgado.

Tabla 3 – Factores de conversión de dosis

Tasas de dosis aproximadas en piel para una fuente sellada de 1 MBq – Simulación PHITS									
Radionúclido	Dosis en los primeros 0,07 mm				Dosis en el primer mm				
	Constante específica gamma Γ (mSv-cm ² /h-MBq)	Tasa de dosis debida sólo a fotones (mSv/h)	Tasa de dosis debida a electrones secundarios de <i>build-up</i>	Tasa de dosis total (mSv/h)	Tasa de dosis debida sólo a fotones (mSv/h)	Tasa de dosis debida a electrones secundarios de <i>build-up</i>	Tasa de dosis total (mSv/h)	Tasa de dosis a 1 cm de profundidad en tejido (mSv/h)	Tasa de dosis a 3 cm de profundidad en tejido (mSv/h)
¹³⁷ Cs	0,927	0,95	3,99	4,94	2,90	1,28	4,18	0,48	0,065
⁶⁰ Co	3,48	1,60	14,00	15,60	5,42	8,20	13,62	1,74	0,262
¹⁹² Ir	1,24	2,65	6,80	9,45	5,12	1,04	6,16	0,59	0,092
²²⁶ Ra	2,23*	2,15	11,30	13,45	5,30	4,80	10,10	1,28	0,157
⁷⁵ Se	0,548	1,95	4,61	6,56	2,43	0,47	2,90	0,21	0,022

- Los datos de 0,07 y 1 mm de *Improved Contact Dose Rate Conversion Factors and Secondary Electron Correction Factors for Encapsulated Gamma Sources*: Presentado por Ed. Wallter el 12/07/2017 – Raleigh, N.C. – Health Physics Society Annual Meeting – Session WAM-A.10 (Autor principal: Eric Heritage, University of Ontario, Institute of Technology)
- Los datos de 1 cm y 3 cm provienen de Ed Waller del 02/03/2016 vía correspondencia personal.
- Los datos de Cs, Co, Ir, Ra de 1 cm y 3 cm muy similares a los publicados en NCRP 40.
- Los datos para Se no disponibles en el NCRP 40.
- La información sobre la constante gamma se ha obtenido en *Exposure Rate Constants and Lead Shielding Values for 1.100 Radionuclides* (Smith, Stabin-Health Physics - 2012) – convertido a partir de unidades del sistema americano enumeradas en la referencia.
- *Convertido del NCRP 40 ((incluyendo las contribuciones de los radionúclidos descendientes).

Nota: Multiplicar mSv/h/MBq por 2,7 para conseguir R/h/mCi

Tabla adaptada por Steve Sugarman

Problemas médicos más importantes

- Las víctimas de un incidente radiológico requieren una rápida evaluación médica, diagnóstico y tratamiento de las lesiones relacionadas con la radiación. Es muy poco probable que los profesionales sanitarios reciban una dosis de radiación aguda que sea significativa a nivel clínico cuando atienden a víctimas con trazas radiactivas en heridas, siempre que se sigan los principios ALARA (ver página 12). La posibilidad de contaminación debe revisarse como procedimiento operativo estándar. La contaminación del personal sanitario es poco probable siempre que utilicen precauciones generales y sigan unas pautas adecuadas de control de la contaminación.
- Los signos y síntomas clínicos pueden usarse para estimar la dosis de radiación a un paciente, lo que se conoce como dosimetría biológica. Esto incluye el tiempo hasta el vómito y la disminución del recuento de linfocitos después de la irradiación.
- Se debe obtener un hemograma completo (CSC, Conteo Sanguíneo Completo; CBC, del inglés *Complete Blood Count*) basal de referencia al iniciarse los síntomas y repetir

cada 6-8 horas durante 48 horas. La disminución de linfocitos sigue una cinética de primer orden dependiente de la dosis de radiación penetrante.

- Los vómitos de repetición dentro de la primera hora después de la irradiación son indicativos de una dosis en el rango de 6-8 Gy. Si el tiempo transcurrido hasta el vómito es de aproximadamente 2 horas, es probable que la dosis efectiva recibida en todo el cuerpo sea probablemente de al menos 4 Gy. Un vómito a las 4 horas tras la irradiación es indicativo de una dosis en el rango de 2 Gy. La ausencia de vómitos no excluye una exposición significativa.
- En el tratamiento médico de los pacientes con exposición a la radiación, de forma aguda, y entre moderada a grave (dosis efectiva para todo el cuerpo > 2 Gy) debe administrarse rápidamente factores estimulantes de colonias (FEC o CSF, del inglés *colony stimulating factors*) para mejorar la recuperación hematopoyética. Todos estos compuestos disminuyen la duración de la neutropenia inducida por radiación y estimulan la recuperación de neutrófilos, aunque con cierta variabilidad.
- Actualmente, los únicos CSF hematopoyéticos aprobados por la FDA para el tratamiento de la neutropenia asociada al SIA (Síndrome de Irradiación Aguda; ARS, del inglés *Acute Radiation Syndrome*) son formas recombinantes del factor estimulante de colonias de granulocitos (G-CSF, Neupogen®) y la forma pegilada de G-CSF (Neulasta®). El factor estimulante de colonias de granulocitos y macrófagos (GM-CSF, Leukine®) y otros biosimilares están disponibles para su uso con la *Emergency Use Authorization* (EUA, “Autorización de Uso de Emergencia”) por la *Food and Drug Administration* (FDA⁵, Administración de Medicamentos y Alimentos de los EEUU). Las dosis recomendadas se dan en la Sección 3 (SIA).
- Se recomienda el cumplimiento de las guías actuales de la *Infectious Diseases Society of America* (IDSA, “Sociedad Americana de Enfermedades Infecciosas”) para el tratamiento de la neutropenia de alto riesgo en pacientes que desarrollen neutropenia febril inducida por la radiación.
- Las indicaciones para el uso clínico de citocinas y antimicrobianos (antibióticos, antifúngicos y antivirales) pueden encontrarse en la declaración de consenso de la OMS publicada en *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* (“Preparación en medicina de desastres y salud pública”, octubre de 2011).

El tiempo transcurrido hasta el inicio del vómito puede ser un indicador preliminar útil para estimar la dosis a cuerpo entero recibida por la víctima. El vómito tras una dosis de radiación es persistente y difícil de controlar. A dosis más bajas, los vómitos pueden no ocurrir, pero a dosis más altas la probabilidad de vómito se acerca al 100%.

⁵N. del T.: La *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) es el organismo del gobierno de los EEUU responsable de la regulación de alimentos, medicamentos humanos y veterinarios, cosméticos, aparatos médicos, productos biológicos y productos radiactivos.

Fármacos antieméticos recomendados:

Se recomiendan los antagonistas selectivos del receptor 5-HT3 para el vómito inducido por la radiación:

- Ondansetron; Zofran®, ZofranODT®
- También puede usarse antidopaminérgicos (metoclopramida)

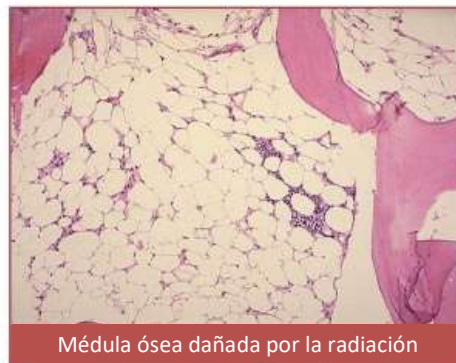
Tabla 4 - Clasificación rápida usando el momento de aparición del vómito

Dosis en Gray (Gy)	Aparición del Vómito (horas)	%de víctimas	Supervivencia DL 50/60
0	0	-	
1	N/D	19	
2	4,63	35	
3	2,62	54	
4	1,74	72	Con tratamiento intenso
5	1,27	86	
6	0,99	94	
7	0,79	98	
8	0,66	99	
9	0,56	100	
10	0,48	100	

Biodosimetría basada en la exposición aguda a fotones equivalentes; Waselenko, JK, *Medical Management of the Acute Radiation Syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group*, Ann Intern Med, 2004.

Sección 3 - Síndrome de Irradiación Aguda

Los cuidados médicos de urgencia dedicados a salvar la vida del paciente tienen preferencia ante actuaciones sobre irradiación y / o contaminación radiactiva. El Síndrome de Irradiación Aguda (SIA) es el resultado de la exposición externa a dosis de radiación mayores de 1 Gy administrada al cuerpo entero durante un corto período de tiempo, es decir, a una alta/elevada tasa de dosis. En este contexto se considera como cuerpo entero desde las rodillas hasta la cabeza incluyendo también esta última. En estas exposiciones se debe obtener un historial clínico y del suceso completo, incluidas las localizaciones y actividades durante el incidente radiológico, la enfermedad actual, el historial médico y la información radiológica disponible, así como un examen físico lo más completo posible. El personal de Radiofísica es un recurso crítico para gran parte de la historia relacionada con el incidente radiológico.



Fisiopatología

El daño celular inducido por la radiación se produce en los primeros microsegundos tras la exposición. El daño celular es generalmente mayor en las células que se reproducen más rápidamente. Así, las células madre en la médula ósea, las células de las criptas intestinales y la capa basal de la piel son particularmente susceptibles a las lesiones por radiación.

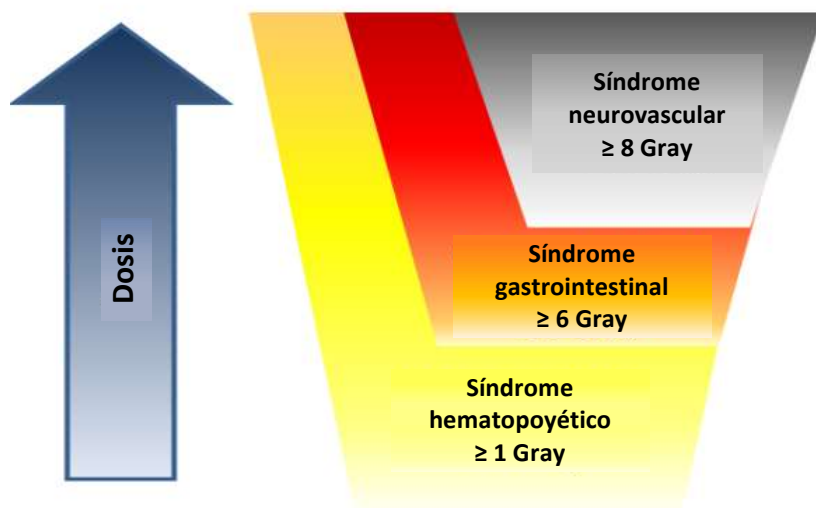
Síndrome de Irradiación Aguda y dosis

El SIA es una enfermedad aguda cuyas primeras manifestaciones clínicas aparecen desde pocas horas hasta semanas después de la irradiación. La enfermedad generalmente sigue un patrón de signos/síntomas prodrómicos, un período de latencia y un período de enfermedad manifiesta, seguida de recuperación o muerte. Cada fase varía en intensidad y duración en función de la dosis de radiación recibida y la susceptibilidad de la persona irradiada. La afectación de órganos y tejidos está relacionada con los umbrales de dosis de radiación, tal como se describe en la Figura 1.

Los signos y síntomas prodrómicos de la exposición a altos niveles de radiación incluyen la anorexia, náuseas y vómitos, diarrea y fiebre leve. Si se han irradiado los ojos, puede

presentarse conjuntivitis. El eritema cutáneo acompaña a las exposiciones agudas de todo el cuerpo.

Figura 1: Síndromes de Irradiación Aguda



El SIA incluye una fase subclínica (<1 Gy) y tres sub-síndromes resultantes de la irradiación de cuerpo entero o de una fracción significativa. Los síndromes clínicos que resultan de la exposición a la radiación ocurren dentro de un rango predecible de dosis después de una exposición corporal total o parcialmente significativa. Estos umbrales se pueden usar para hacer una aproximación de la dosis de radiación recibida en función de los signos y síntomas que presenta el paciente. A continuación se muestran los umbrales generales asociados con diversos umbrales de dosis de radiación.

La linfopenia, la neutropenia y posiblemente la pancitopenia provocadas por la aplasia de la médula ósea pueden provocar sepsis, hemorragia y muerte.

Síndrome Hematopoyético

Las células más radiosensibles del cuerpo humano son los linfocitos maduros, salvo las células de Sertoli de los testículos. Las células madre o progenitoras en la médula ósea también son radiosensibles. El umbral para el síndrome hematopoyético se considera que es >1 Gy, sin embargo hasta 2 Gy no es probable el desarrollo de una enfermedad hematológica relacionada con la exposición y clínicamente significativa. Las manifestaciones clínicas generalmente ocurrirán en unas pocas semanas. Para dosis superiores a 2-3 Gy, la complicación multiorgánica puede dificultar significativamente el manejo del paciente. La linfopenia, seguida de la disminución de otros marcadores sanguíneos, favorece la aparición de hemorragias e infecciones y conlleva una mayor morbilidad y mortalidad.

Los cuidados de apoyo actuales son capaces de aumentar la supervivencia en personas jóvenes y sanas que reciben una dosis letal (DL) $DL_{50/60}$ (Supervivencia del 50% de la población a los 60

días) de 3,5-4 Gy (sin atención médica) hasta 5-6 Gy con cuidados de apoyo, como el uso de transfusiones y antibióticos. Estos tratamientos están destinados a mantener al paciente hasta que se puedan estimular las colonias de células madre supervivientes y así reanudar la producción de células sanguíneas (neutrófilos y plaquetas). La adición de factores estimulantes de colonias (FEC o CSF, del inglés *colony stimulating factors*) a los cuidados intensivos pueden elevar la DL_{50/60} a 6-8 Gy. Las tasas de supervivencia se dan para dosis menores de 6 Gy y sin comorbilidades.

La necesidad de tratamiento hematológico puede ser prolongada e incluir marcadores sanguíneos, factores de crecimiento hematopoyéticos y antimicrobianos. Las lesiones combinadas (enfermedad por radiación aguda en presencia de trauma físico y / o quemaduras) aumentan la mortalidad.

Síndrome Gastrointestinal

Los síntomas gastrointestinales se pueden presentar aproximadamente a partir de 6 Gy. Para dosis alrededor de 8 Gy, el síndrome gastrointestinal se vuelve más sintomático, con aparición de náuseas, vómitos y diarrea severa. El tiempo de inicio de los signos y síntomas está relacionado con la dosis, donde un inicio más rápido indica una dosis más alta.

El síndrome gastrointestinal puede asociar problemas clínicos adicionales como cambios significativos en líquidos y electrolitos, malabsorción de nutrientes, hemorragia gastrointestinal y sepsis. Una vez que disminuyen las células epiteliales que recubren la luz del tracto gastrointestinal, las bacterias pueden acceder libremente al cuerpo, por lo que habitualmente se producirá una sepsis. También pueden presentarse hemorragias en las áreas denudadas, con desprendimiento del epitelio intestinal. Aunque la muerte por exposición a radiación en el rango de 8 Gy ha ocurrido históricamente varias semanas después del incidente, el período de supervivencia puede extenderse considerablemente con cuidados intensivos punteros actuales.

Aunque no está asociado con el síndrome gastrointestinal, cabe señalar que las dosis de radiación penetrantes en el torso en el rango de 6-8 Gy o mayores probablemente tengan efectos adversos también en el sistema pulmonar.

Síndrome neurovascular

El síndrome neurovascular (NVS, del inglés *neurovascular syndrome*) se produce para dosis del orden de 8 Gy o más. A partir de este rango se producen náuseas y vómitos en minutos y una incapacidad transitoria temprana. Después de esta incapacitación precoz, puede haber un breve período de remisión de algunos síntomas desde unas pocas horas hasta unos pocos días, seguido por un deterioro del estado del paciente, cuyos signos incluyen fiebre alta, postración, confusión y disminución de la presión arterial. Este cuadro irá probablemente seguido de disminución de la conciencia, inestabilidad vascular y muerte, pudiendo haber convulsiones. Durante la autopsia se observa habitualmente edema cerebral y patología orgánica múltiple. Debe tenerse en cuenta que si se presentan signos y síntomas neurológicos cuando se espera que las dosis no hayan excedido los 8 Gy, se debe buscar otra etiología para estos síntomas.

neurológicos, puesto que la radiación ionizante no causa daños neurológicos a dosis más bajas. El síndrome neurovascular agudo es irreversible a dosis >10 Gy y su mortalidad es cercana al 100%.

Lesiones a otros órganos

La radiación ionizante puede causar lesiones en los pulmones, el hígado, los riñones y otros órganos. El fallo multiorgánico (FMO o MOF, del inglés *Multi-Organ Failure*) es el resultado de la distribución anómala del flujo sanguíneo que ocurre después del síndrome de respuesta inflamatoria sistémica (SIRS, del inglés *Systemic Inflammatory Response Syndrome*). La patogénesis de este fallo multiorgánico se desconoce actualmente.

Tratamiento del SIA

El tratamiento de SIA se centra en el soporte y la recuperación del sistema hematológico. La aparición temprana de anorexia, náuseas, vómitos y malestar son indicaciones de dosis altas. Dos objetivos principales del tratamiento médico son los esfuerzos para prevenir la neutropenia y la sepsis, como advierte la fiebre. Una toma temprana de muestras de sangre para CBC, repetida cada 6-12 horas, permitirá el cálculo del recuento absoluto de (CAL o ALC, por sus siglas en inglés *Absolute Lymphocyte Count*) y el recuento absoluto de neutrófilos (RAM o ANC, por sus siglas en inglés *Absolute Neutrophil Count*); una disminución rápida y profunda en el recuento absoluto de linfocitos indica una dosis alta. A medida que la neutropenia empeora, el riesgo de infección aumenta, especialmente cuando el recuento absoluto de neutrófilos cae por debajo de $500/\text{mm}^3$. Los pacientes con inmunosupresión inducida por radiación a menudo tienen signos y síntomas clínicos mínimos o ausentes de una infección. Dolor débil periodontal, faríngeo, esofágico, perineal, periungueal, cutáneo u ocular pueden ser los únicos hallazgos clínicos.

El deterioro en la piel y la mucosa gastrointestinal permite el paso de bacterias y otros agentes infecciosos a la circulación donde se desarrollan rápidamente en el seno de una neutropenia y linfopenia severas. También se pueden reactivar infecciones virales previas (incluida la infección por virus del herpes y citomegalovirus). Agentes antimicrobianos se deben administrar de inmediato a las personas con neutropenia febril, neutropenia afebril con dolor sutil o signos clínicos de infección sin neutropenia.

Los pacientes de bajo riesgo (definidos por tener un recuento de neutrófilos absoluto esperado inferior a $500/\text{mm}^3$ durante ≤ 7 días, fiebre de $\geq 38,3$ grados centígrados, estabilidad hemodinámica y ausencia de comorbilidades médicas) deben recibir una profilaxis antibiótica oral (fluoroquinolona o amoxicilina+clavulánico), a menos que no se tolere la terapia oral. En presencia de vómitos o una infección comprobada, deben recibir antibióticos por vía parenteral, utilizando monoterapia apropiada.

Tabla 5 –Tratamiento Antibiótico Recomendado*

Profilaxis	Paciente de Bajo Riesgo	Pacientes Alto Riesgo
Antibióticos	Ciprofloxacino (Oral) o Amoxicilina+Clavulánico	IV monoterapia con Cefepime, Ceftazidime o Piperacillin/Tazobactam
Infección Bacteriana		Tratamiento a agregar a la profilaxis
Neumonía		Vancomicina/linezolid
Infección de piel / tejidos blandos (SSTI)		Ver últimas recomendaciones de la IDSA
Sepsis por Gram Negativos y/o Gram Negativa pneumonia		Aminoglicósido
Síntomas abdominales y/o sospecha C. Difficile		Metronidazol

* Las pautas de la *Infectious Diseases Society of America* ("Sociedad de Enfermedades Infecciosas de América") se deben seguir en pacientes con neutropenia inducida por radiación (<https://www.idsociety.org/Index.aspx>)

Los pacientes de alto riesgo se definen por tener un recuento absoluto de neutrófilos $\leq 100/\text{mm}^3$, inestabilidad hemodinámica y una o más de las siguientes patologías: mucositis grave, infección por catéter IV, infiltrado pulmonar, enfermedad pulmonar crónica o cambios en el estado mental. Estos pacientes deben recibir monoterapia que se ajuste según los hallazgos clínicos, de imagen médica y/o de cultivo específicos. La profilaxis y/o el tratamiento con antimicrobianos están indicados para las personas con riesgo de infecciones, por ejemplo, herpes, citomegalovirus, candidiasis. La selección de regímenes de tratamiento para las infecciones debe seguir las recomendaciones actuales de la Sociedad de Enfermedades Infecciosas de América. Se recomienda encarecidamente la consulta con un especialista en enfermedades infecciosas para ayudar en el tratamiento de estos pacientes.

Tabla 6 - Recomendaciones para la terapia Antifúngica y Antiviral*

Organismo	Serología	Profilaxis	Infección activa
Cándida	N/D	Fluconazol	Fluconazol, Voriconazol o Amfotericina B
Virus Herpes Simple	Tipo Positivo HSV I o II	Aciclovir o Valciclovir	
Citomegalovirus	CMV Positivo	Ganciclovir o Valciclovir	

* Las pautas de la *Infectious Diseases Society of America* (Sociedad de Enfermedades Infecciosas de América) se deben seguir en pacientes con neutropenia inducida por radiación (<https://www.idsociety.org/Index.aspx>).

Citoquinas

La administración de citoquinas es beneficiosa en pacientes con síndrome hematopoyético que han recibido una dosis absorbida en todo el cuerpo de <5 Gy. El Filgastrim (Neupogen®) y su compuesto más duradero, el Filgastrimpegilado (Neulasta®) están aprobados por la FDA para

para aumentar la supervivencia en pacientes con síndrome hematopoyético. El agente biosimilar Leukine requiere una Autorización de Uso en Emergencia/s (EUA) para este síndrome. Mientras que las inyecciones diarias de Filgrastim, comenzando dentro de las 24-72 horas, son necesarias, las inyecciones quincenales de la forma pegilada de este agente son suficientes para aumentar el recuento absoluto de neutrófilos. Un grupo de expertos en la materia que se reunió en la OMS, Ginebra, estableció pautas de consenso para el tratamiento del síndrome hematopoyético que incluyen el inicio con citoquina cuando el recuento absoluto de neutrófilos es $<500 / \text{mm}^3$ y la interrupción cuando alcance $1.000 / \text{mm}^3$ en ausencia de infección (Dainiak N et al., *Disaster Med Public Health Prep* 2011; 5: 202).

Para los pacientes de los que se espere que desarrollen una neutropenia severa, están disponibles las siguientes citoquinas:

- Filgrastim (G-CSF) 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ diariamente por vía subcutánea.
- Sargramostim (GM-CSF) 5-10 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{día}$ por vía subcutánea ó 200-400 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{día}$,
- Pegfilgrastim (pegG-CSF) dos dosis de 6 mg cada una por vía subcutánea con un intervalo de una semana.

Manejo clínico del Síndrome Gastrointestinal

El tratamiento del síndrome gastrointestinal incluye la administración de una fluoroquinolona (como ciprofloxacino) o antibióticos similares, de 2 a 4 días después de la exposición. Los antibióticos parenterales y la alteración de la flora intestinal con reducción de los microorganismos aerobios mientras se mantienen los anaerobios beneficiosos con agentes antimicrobianos orales pueden ser útiles. No se recomienda la descontaminación intestinal sin el uso concomitante de antibióticos por vía intravenosa. Los vómitos prolongados se deben tratar con un antagonista del receptor de la serotonina (5-HT₃). En casos graves, nutrición enteral o parenteral. La diarrea se puede controlar con loperamida. La sustitución de fluidos y electrolitos perdidos es esencial para un resultado favorable.

El síndrome neurovascular agudo e irreversible aparece a dosis $>10 \text{ Gy}$. Dado que la mortalidad se acerca al 100%, se recomiendan tratamientos paliativos con terapia antiemética, medicamentos anticonvulsivos, diuréticos (manitol y furosemida), ansiolíticos y analgésicos que pueden incluir medicamentos opiáceos a una dosis suficientemente alta para aliviar el dolor y proporcionar comodidad.

Problemas adicionales de gestión para SIA

- Agentes antibióticos, antivirales y antifúngicos
- Cirugía temprana y cierre de heridas
- Mantener los (microorganismos) anaerobios gastrointestinales
- Minimización de procedimientos invasivos
- Control ambiental estricto con precauciones neutropénicas
- Considerar los bloqueadores H_2 y los inhibidores de la bomba de protones para la profilaxis de las úlceras por estrés
- Beneficio potencial de control de la acidez gástrica (sucralfato)

- Si es posible, es preferible la alimentación oral a la IV(solo alimentos cocinados, sin tubérculos)
- Higiene meticulosa oral y de las uñas

Conclusión

El SIA temprano tras irradiación corporal total o parcial significativa requiere medidas de apoyo, cuidados intensivos, terapia con citoquinas y terapia antimicrobiana según lo indicado por el médico. Control de la neutropenia/febre neutropénica inminente, y seguimiento de las pautas de IDSA para la terapia con antibióticos cuando corresponda. Se deben considerar las consultas con un hematólogo/oncólogo, un especialista en enfermedades infecciosas, un médico de trasplante de médula ósea y las diferentes subespecialidades médicas quirúrgicas que puedan estar implicadas.

Para más información ver Tabla 17 - Umbrales aproximados para el síndrome de irradiación aguda.

Sección 4 - Tratamiento médico de las lesiones locales

Dosis y signos clínicos

Las lesiones agudas por irradiación local pueden ocurrir por separado o coexistir con el SIA. Esta es una lesión común en el sector civil donde se usan en la industria muchos dispositivos que utilizan radiaciones. Los efectos de la radiación asociados a un umbral de dosis se conocen como efectos deterministas. Estos umbrales de dosis varían entre las diferentes referencias bibliográficas consultadas. Los umbrales deterministas aproximados son los siguientes:

- **3 Gy: la caída de pelo (cabello y vello)** generalmente comienza 2-4 semanas después del incidente.
- **6 Gy: el eritema** a menudo transitorio que aparece poco después del incidente, con un eritema secundario 2-4 semanas después. La fisiopatología del eritema incluye la constricción arteriolar con dilatación capilar y edema local. El eritema puede ocurrir pocas horas después del accidente (eritema primario), luego desaparece y reaparece en la fase de enfermedad manifiesta.



- **10-15 Gy: la descamación seca** de la piel se observa aproximadamente a las 2-4 semanas tras el incidente. Hay una disminución de la actividad mitótica en las células de las capas basal y parabasal con adelgazamiento de la epidermis y descamación.
- **15-25 Gy: la descamación húmeda** es una lesión de espesor parcial que se observa al transcurrir 2-4 semanas después de la exposición, dependiendo de la dosis. Microscópicamente, se observa edema intracelular, ampollas macroscópicas formadas por coalescencia de vesículas y una superficie dérmica húmeda cubierta por fibrina. Puede desarrollarse radionecrosis a medida que aumenta la dosis.
- **>25 Gy: la radionecrosis** se manifiesta con ulceración secundaria al daño de las células endoteliales y a la necrosis fibrinosa de las arteriolas y vénulas en el área afectada. También han descrito la posible aparición de un síndrome cutáneo de alto grado en todo el cuerpo acompañado con lesiones más locales.

La historia clínica es particularmente importante en el diagnóstico de la extensión de la lesión parcial, ya que los signos y síntomas suelen demorarse días o semanas. Además, las fotografías

digitales seriadas y en color de la evolución cronológica son cruciales, preferiblemente si se fotografían sobre un fondo azul, junto con la medición precisa de la lesión para documentar su evolución.

En los EEUU el diagnóstico de lesiones por altas dosis en piel se realiza generalmente observando la evolución de los síntomas. Sin embargo, también se han utilizado herramientas de diagnóstico adicionales, como la dosimetría citogenética, la resonancia magnética (RM) y la ecografía de la lesión, y los perfiles de flujo Doppler o láser.

Tratamiento

Los principales factores del tratamiento de las lesiones cutáneas radioinducidas son el control de la infección, el cuidado avanzado de la herida y el control apropiado del dolor. Se debe consultar a un cirujano plástico, a un especialista en quemados o a un cirujano reconstructivo al inicio del procedimiento clínico.

La fibrosis cutánea y orgánica inducida por la radiación y la radionecrosis cutánea tardía son las complicaciones tardías que generalmente se consideran irreversibles. El tratamiento médico típico incluye tanto la eliminación de factores agravantes locales y generales, como el control de la inflamación aguda y crónica con esteroides tópicos.



El tratamiento de estas lesiones focales que producen descamación de la piel incluye corticoides tópicos de clase II-III, como la betametasona, antibióticos y antihistamínicos tópicos. También se pueden usar productos tópicos argénticos, como la crema de sulfadiazina. Las lesiones más graves (ulceraciones y necrosis crónicas) pueden requerir la extirpación quirúrgica del tejido lesionado seguida de la aplicación de injertos con piel y/o colgajos autólogos, piel artificial (como Integra®) y/o xenoinjertos. La terapia vascular con pentoxifilina (Trental®) y/o con oxígeno hiperbárico (HBO, del inglés *Hyper Baric Oxygen*) puede ser efectiva, además de que presenta un riesgo bajo. La inyección de células madre mesenquimales directamente en las lesiones reduce el dolor neuropático e intratable y parece promover la cicatrización de las ulceraciones. Se están llevando a cabo ensayos controlados que comparan los efectos del tratamiento con células madre mesenquimales frente a los de los procedimientos quirúrgicos tradicionales.

Para más información ver Tabla 16 - Umbrales aproximados de lesiones cutáneas vs dosis agudas.

Sección 5 - Gestión médica de la contaminación interna

Contaminación interna: evaluaciones precoces rápidas

La contaminación interna ocurre cuando el personal ingiere, inhala o presenta heridas contaminadas con material radiactivo. Las víctimas contaminadas externamente sin protección respiratoria deben también evaluarse por la posible contaminación interna. Ésta es más probable cuando hay contaminación significativa en la cara, alrededor de las fosas nasales, de la boca o de heridas abiertas.

Las dosis internas se evalúan de manera diferente respecto a las externas. Las dos diferencias principales son: 1) las dosis internas se calculan, no se miden; y 2) son dosis comprometidas. Las dosis internas se basan en la ingesta o, en general, en la cantidad de material radiactivo que penetra en el cuerpo. Así, por ejemplo, cuando se realiza un bioensayo puede determinarse la actividad en la orina en ese momento concreto. Posteriormente se realizarán cálculos para determinar la cantidad de actividad que se incorporó inicialmente en el cuerpo y que ha resultado en la concentración de material radiactivo medida en ese momento en la muestra de orina. Lo mismo se aplica a los recuentos en cuerpo entero, en pulmón o a otros métodos para la evaluación interna de la dosis.

El concepto de dosis comprometida se refiere al hecho de que las dosis internas se prolongan en el tiempo. La dosis comprometida es la dosis recibida durante un período de 50 años asociada a un radionúclido depositado internamente. Con fines regulatorios, una vez calculada la dosis que se recibiría en 50 años, se asigna para el año en que se produjo la ingesta. Cuando el material radiactivo se deposita en un órgano, permanece en éste, bien decayendo o hasta que el cuerpo lo elimine mediante procesos biocinéticos normales. Estos dos procesos funcionan de forma independiente. La semivida efectiva tiene en cuenta tanto el decaimiento radiactivo como la eliminación biológica. Se calcula mediante el producto de las semividas biológica y radiactiva, dividido por la suma de ambas.



Una forma rápida de estimar la magnitud de la dosis de radiación asociada a la inhalación de materiales radiactivos es mediante la evaluación con hisopos nasales. Las muestras deben tomarse frotando las fosas nasales con un hisopo de algodón, cada una por separado con hisopos diferentes. Se debe realizar este procedimiento tan pronto como sea posible después de la sospecha de inhalación, preferiblemente en la primera hora. Los retrasos en la obtención de hisopos nasales afectarán a la estimación de la inhalación, ya que la nariz limpia rápidamente los materiales extraños. Cada hisopo se debe medir con un detector de mano y las cuentas deben sumarse.

Cada hisopo se debe contar individualmente por cada fosa nasal, dado que la mayoría de las personas respira de manera uniforme por la nariz. Por tanto, una diferencia significativa en las tasas de conteo puede indicar contaminación cruzada, posiblemente por un dedo

contaminado, o una desviación del tabique nasal. Una vez que la tasa de conteo combinada se convierte a actividad, se considera que ésta representa el 10% de la inhalación inicial, puesto que para emisores β y γ generalmente se asume una eficiencia de conteo del 10% salvo si se verifica un valor diferente. Es por ello que la tasa de conteo se debe dividir entre 0,1. Dado que los límites regulatorios o Límites Anuales de Ingesta (ALI, del inglés *Annual Limits on Intake*) referenciados en el Informe de orientación federal de la EPA n.º 11 se basan en la ingesta, los ALI son un punto de referencia objetivo para comparar la ingesta estimada por el paciente (Sugarman, et al., *Health Physics*- junio de 2010). La estimación inicial para la toma de decisiones médicas se basa en los ALI de los EE.UU, aunque las recomendaciones internacionales sobre las limitaciones de la ingesta también se pueden utilizar para su evaluación comparativa.

Ejemplo: Se detecta contaminación facial en un individuo. Se toman rápidamente los hisopos nasales, cuya suma es de 150.000 dpm. Por lo tanto, la ingesta inicial se estima en $150.000 / 0,1 = 1.500.000$ desintegraciones por minuto (dpm) o, aproximadamente, 0,7 μCi (26 kBq). Supongamos que el contaminante es ^{137}Cs . El ALI de inhalación para ^{137}Cs es de 200 μCi (7,4 MBq). Nuestra estimación está significativamente por debajo del ALI de los EE.UU, por lo que se espera que esta ingesta no sea clínicamente significativa. Nuevamente, cabe incidir que el ALI, tal y como se usa aquí, es un límite reglamentario de los EE.UU pero no un límite médicamente validado. Sin embargo, constituye un buen punto de comparación para ayudar a guiar el tratamiento médico temprano.

En el caso de que se desconozca el radionúclido, si se puede determinar la emisión (α , β , γ) se podría hacer una suposición del isótopo que se trata. Por ejemplo, si se encuentra un emisor alfa desconocido, hasta que se pueda identificar el isótopo, se puede suponer que es Americio-241 que suele proporcionar una valoración conservadora de la dosis (ver Tabla 7). Aunque no siempre sea correcto, esta aproximación permite obtener una estimación correcta del orden de magnitud. Los ALI para isótopos comunes se presentan en las Tablas 7 y 8. De nuevo, este es un método para ayudar a determinar la magnitud de la dosis y, por lo tanto, es esencialmente una herramienta de clasificación. Dado que no se pretende determinar la dosis de radiación interna de forma precisa, las estimaciones deben verificarse mediante bioensayos apropiados.

Tabla 7 –Límites regulatorios anuales (ALI) de los EE.UU para la inhalación de los radionúclidos supuestos

Emisión	Radionúclidosupuesto	ALI y tipo de solubilidad	~ dpm
Alfa	Am-241	0,006 μCi /0,2 kBq - W	$1,3 \times 10^4$
Beta	Sr-90	4 μCi /0,148 MBq- Y	$8,9 \times 10^6$
Gamma	Cs-137	200 μCi /7,4MBq - D	$4,4 \times 10^8$

* Se enumeran los valores de ALI más restrictivos de FGR-11. Actividades μCi convertidas a MBq (ligeramente diferente a FGR-11)

Tabla 8 –Límites regulatorios anuales (ALI) de inhalación de los EEUU para Radionúclidos Específicos

Radionúclido	ALI y tipo de solubilidad	~ dpm
H-3	80.000 $\mu\text{Ci}/3 \text{ GBq}$ (Vapor de agua)	$1,8 \times 10^{11}$
Co-60	30 $\mu\text{Ci}/1,1 \text{ MBq}$ - Y	$6,7 \times 10^7$
U-235, 238	0,04 $\mu\text{Ci}/1,48 \text{ kBq}$ - Y	$8,9 \times 10^4$
Pu-239	0,006 $\mu\text{Ci}/0,2 \text{ kBq}$ - W	$1,3 \times 10^4$
Cf-252	0,02 $\mu\text{Ci}/0,74 \text{ kBq}$ - W	$4,4 \times 10^4$

* Se enumeran los valores de ALI más restrictivos de FGR-11. Actividades μCi convertidas a MBq (ligeramente diferente a FGR-11)

Muchos profesionales de protección radiológica pueden desconocer la Guía de Decisión Clínica (CDG, del inglés *Clinical Decision Guides*) incluida en el Informe n° 161 del NCRP, *Management of Persons Contaminated with Radionuclides* (2009). Esta guía puede utilizarse como una alternativa al ALI como punto de referencia cuando se evalúa la magnitud de la dosis interna. Su objetivo es proporcionar un dato cuantitativo que el médico puede utilizar para ayudarlo en la toma de decisiones con respecto a las recomendaciones sobre el uso de contramedidas médicas después de la ingesta de materiales radiactivos.

La guía mencionada considera el riesgo estocástico basado en la dosis efectiva durante 50 años para adultos y hasta los 70 años para niños. Los riesgos estocásticos considerados se encuentran en el rango de los riesgos asociados con las recomendaciones de dosis para el personal de urgencias que se encuentran en el Manual EPA PAG (*Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents*). En la guía CDG también se considera la dosis en médula y pulmón ponderada con el EBR (RBE, por sus siglas en inglés) para evitar efectos deterministas a los 30 días. Para el yodo radiactivo se define de forma algo diferente porque el órgano de riesgo principal es la glándula tiroides y la FDA ha provisto una guía específica para las dosis estimadas de tiroides considerando inhalaciones e ingestas y donde los resultados de los frotis nasales deben compararse con los de inhalación.

Para una definición más detallada de la guía y sus parámetros asociados de dosis puede consultarse el Informe NCRP n° 161. La Tabla 9 proporciona un ejemplo de la información provista en las tablas que se encuentran en la Parte C, Sección 11 de dicho informe.

Tabla 9 –Información seleccionada de la CDG del NCRP-161

Radionúclido	Vía de entrada	Forma	Actividad en orina (0 - 24 h) indicativo de 1 CDG (dpm)	Actividad sobre hisopos nasales poco después de la inhalación indicativa de 1 CDG (dpm)*
Co-60	Inhalación	Tipo M	$4,2 \times 10^7$	$1,1 \times 10^8$
Co-60	Inhalación	Tipo S	No recomendado	$4,4 \times 10^7$
Sr-90	Inhalación	Tipo F	$3,4 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$
Sr-90	Ingestión	Soluble	$3,0 \times 10^7$	N/D
Cs-137	Inhalación	Tipo F	$7,7 \times 10^7$	$1,7 \times 10^8$
Cs-137	Ingestión	Soluble	$7,6 \times 10^7$	NA
Pu-239	Inhalación	Tipo M	96	$2,3 \times 10^4$
Pu-239	Inhalación	Tipo S	3,8 (suplemento con dosis fecal)	$8,9 \times 10^4$
Am-241	Inhalación	Tipo M	$1,0 \times 10^3$	$2,8 \times 10^4$

* Se asume que el 5% de la ingesta se encuentra en los hisopos. El tiempo de muestreo posterior a la ingesta se define como "primeras horas después". NA: No aplicable. N/D: No disponible

Las heridas abiertas representan otra vía de la contaminación interna. El Informe NCRP n° 156, *Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment* ("Desarrollo de un modelo biocinético para heridas contaminadas con radionúclidos y procedimientos para su asistencia, dosimetría y tratamiento", 2006) permite calcular factores de conversión de dosis para varios radionúclidos y tipos de contaminantes usando el software de dosimetría interna *Activity and Internal Dose Estimates* (AIDE, "Estimaciones de la actividad y la dosis interna", Bertelli). Al dividir el límite de dosis reglamentario aplicable por el factor de conversión de dosis correspondiente se obtiene como resultado un nivel de referencia derivado (DRL, del inglés *Derived Reference Limit*), similar al ALI, que no está definido para heridas (Toohey et al., *Health Physics* - Mayo de 2011).

El DRL se puede utilizar como valor de referencia de la misma manera que se usó anteriormente el ALI. Para aplicar este concepto simplemente se obtiene un conteo temprano en las heridas, se convierte la tasa de cuentas en actividad (dpm), y se compara con el DRL apropiado. Hay que recordar que el hecho de que los niveles de contaminación sean más altos que el DRL no significa necesariamente que exista un problema médico importante, sino que los niveles de contaminación pueden resultar en una dosis interna cercana al límite reglamentario.

La Tabla 10 se basa en los límites de dosis de EEUU, mientras que los factores de conversión de dosis se basan en la dosis efectiva de guías internacionales. Esto no debe afectar el uso de esta tabla para la estimación de la magnitud de la dosis. Cabe recordar que el objetivo es determinar un valor con el que realizar comparaciones que luego pueden usarse para ayudar a guiar en las decisiones médicas. Las guías internacionales pueden emplear diferentes límites de dosis que resulten en diferentes DRL (20 mSv, o 2 rem, divididos por el DCF apropiado). Para más información se puede consultar el informe NCRP n° 156 o contactar con REAC/TS.

Tabla 10 - DRLs seleccionados para un Tipo de Solubilidad Definido (en dpm)

Isótopo	Basado en*	Débiles	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte
Co-60	DE	$1,54 \times 10^8$	$1,54 \times 10^8$	$1,65 \times 10^8$	$2,01 \times 10^8$
Sr-90	SO	$2,20 \times 10^7$	$2,20 \times 10^7$	$2,25 \times 10^7$	$2,38 \times 10^7$
Tc-99m	DE	$2,00 \times 10^{11}$	$2,56 \times 10^{11}$	$9,33 \times 10^{11}$	$8,78 \times 10^{11}$
I-131	Tir	$7,06 \times 10^7$	$8,01 \times 10^7$	$1,26 \times 10^8$	$3,46 \times 10^8$
Cs-137	DE	$2,20 \times 10^8$	$2,20 \times 10^8$	$2,23 \times 10^8$	$2,34 \times 10^8$
Ir-192	DE	$4,49 \times 10^8$	$4,66 \times 10^8$	$6,21 \times 10^8$	$1,69 \times 10^9$
U-235	SO	$8,23 \times 10^5$	$8,23 \times 10^5$	$8,29 \times 10^5$	$8,46 \times 10^5$
U-238	SO	$8,55 \times 10^5$	$8,55 \times 10^5$	$8,63 \times 10^5$	$8,78 \times 10^5$
Pu-239	SO	$1,81 \times 10^3$	$1,81 \times 10^3$	$1,85 \times 10^3$	$1,92 \times 10^3$
Am-241	SO	$1,65 \times 10^3$	$1,65 \times 10^3$	$1,68 \times 10^3$	$1,74 \times 10^3$
Cf-252	SO	$5,14 \times 10^3$	$5,15 \times 10^3$	$5,75 \times 10^3$	$7,96 \times 10^3$

* DE= Dosis Efectiva, SO = superficie ósea, Tir = tiroides; Punto de referencia DE = 5 rem (confirmado), Punto de referencia de dosis del órgano = 50 rem (confirmado).

Tratamiento médico de la contaminación interna

El tratamiento médico es específico y depende del isótopo, por lo que identificar el isótopo es crucial. Tanto la descomposición radiactiva como la eliminación biológica eliminan del cuerpo los materiales radiactivos. La combinación de ambas vías y sus tasas de eliminación proporciona la semivida efectiva, que siempre es más corta que la semivida radiológica o biológica. Se considera que el metabolismo y la cinética de eliminación de un análogo no radiactivo determinan la ruta metabólica del radionúclido. Las principales vías de ingesta son la inhalación, la ingestión, la absorción a través de una herida abierta y la absorción transdérmica. También se ha observado la disolución de uranio a partir de metralla con uranio empobrecido incorporado.

El manejo y tratamiento médico de la contaminación interna se divide en varias categorías principales:

- Reducción y/o inhibición de la absorción del isótopo en el tracto gastrointestinal. Ejemplos: azul de Prusia y sulfuro de bario.
- Bloqueo de la captación por el órgano diana. Ejemplo: En las 4-6 horas tras la exposición se administra yoduro de potasio (KI) para bloquear la captación de yodo radiactivo por la tiroides.
- Dilución isotópica. Ejemplo: Aumentar la hidratación para la contaminación interna de tritio.
- Alterar la química de la sustancia. Ejemplo: Alcalinizar la orina mediante el uso de bicarbonato de sodio para impedir la unión de los iones uranilos con las proteínas de superficie del túbulo renal.
- Desplazar el isótopo de los receptores. Ejemplo: Usar calcio para competir con el estroncio.
- Técnicas de quelación. Ejemplo: Administrar DTPA para eliminar plutonio interno.
- Eliminación temprana de radionúclidos de heridas para minimizar la absorción.

- Lavado broncoalveolar para casos severos de partículas inhaladas insolubles. Esta sería una técnica rara vez utilizada e indicada solo en el caso con una carga pulmonar importante de un emisor alfa insoluble como el plutonio.

Existen más de 8000 isótopos, pero solo 10-15 se consideran importantes en los sectores militar y civil, y con respecto al terrorismo y los accidentes industriales.

Ciertos isótopos se clasifican en categorías generales de interés tal como se indica a continuación:

- **"Los 5 universitarios"**: ^{14}C , ^{32}P , ^{125}I , ^{131}I , y ^{252}Cf : Utilizados para el etiquetado y guiado en laboratorios de bioquímica y medicina. El tritio también es común.
- **"Los 3 industriales"**: ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co : El ^{192}Ir se utiliza ampliamente en la radiografía industrial para fotografiar objetos grandes, como tuberías de aceite y alas de aviones. ^{137}Cs y ^{60}Co se utilizan en la industria debido al poder penetrante de su radiación gamma y se consideran agentes principales para incidentes terroristas.
- **"Los 5 militares"**: Tritio (^3H), ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu y ^{241}Am : Isótopos utilizados principalmente en complejos armamentísticos, tanto en el sistema DOE (*Department of Energy*) y en el militar.
- **Productos de fisión/activación**: se encuentran en una detonación nuclear, ya sea un dispositivo nuclear improvisado, DNI o IND, un arma, un accidente en un reactor o un incidente de transporte de residuos. Algunos son volátiles y, según la actividad, pueden suponer un riesgo significativo para la población.

El informe NCRP n° 65 (1980) se considera un documento de referencia importante para los médicos que necesitan emplear una terapia descontaminante en pacientes con contaminación interna de materiales radiactivos. El informe NCRP n° 161 (2010) proporciona información adicional y normas de física médica para el manejo de una contaminación interna. Introduce un término basado en dosis/riesgo, La Guía de Decisión Clínica se puede utilizar para ayudar a los médicos a decidir cuándo tratar o no tratar.

El informe NCRP n° 161 también aborda el uso de muestras de orina. Se debe tener cuidado al analizar las muestras de orina por varios motivos, entre los que se incluyen: 1) si ha transcurrido tiempo suficiente para que el radionúclido se vuelva sistémico y permita la excreción; 2) cuando se utiliza un contador manual para la medida de la muestra si éste permite detectar el tipo de radiación de interés; y 3) si la vía de excreción es la adecuada para el compuesto químico de interés. Los datos en las Tablas 11 y 12 están adaptados del Informe NCRP n.º 161.

Terapia para radionúclidos específicos

Esta sección proporciona recomendaciones para la terapia de descontaminación para radionúclidos específicos e información sobre medicamentos para el tratamiento. La Tabla 11 resume las recomendaciones de tratamiento en el manejo médico de la contaminación interna para varios radionúclidos de interés. La Tabla 12 proporciona esquemas de administración de fármacos o tratamientos. Como se establece en *Generis procedures for medical response*

during a nuclear or radiological emergency (“Procedimientos genéricos para respuesta médica durante emergencias nucleares o radiológicas”, OIEA, 2005), cuando se decide el tratamiento para la contaminación interna se debe hacer una comparación entre el beneficio de eliminar los contaminantes radiactivos utilizando modalidades asociadas con efectos secundarios significativos y los efectos en la salud a corto y largo plazo de los materiales radiactivos internalizados sin tratamiento.

Tabla 11. Recomendaciones de terapia de decorporación en EEUU sobre los radionúclidos que preocupan (Informe NCRP 161, 2010).

Radionúclidos	Tratamiento alternativo	Tratamiento preferente
Actinio (Ac)	Considerar DTPA	Considerar DTPA
Americio (Am)	DTPA	DTPA
Antimonio (Sb)	BAL, penicilamina	BAL
Arsénico (As)	BAL, DMSA	BAL
Bario (Ba)	Ba, Terapia con calcio	Ver NCRP 161
Berkelio (Bk)	DTPA	DTPA
Bismuto (Bi)	BAL, penicilamina, DMSA	DMSA
Cadmio (Cd)	DMSA, DTPA, EDTA	DMSA
Californio (Cf)	DTPA	DTPA
Calcio (Ca)	Ba, Terapia con calcio	Ver NCRP 161
Carbono (C)	No hay tratamiento disponible	N/D
Cerio (Ce)	DTPA	DTPA
Cesio (Cs)	Azul de Prusia	Azul de Prusia
Cromo (Cr)	DTPA	DTPA
Cobalto (Co)	DMSA, DTPA, EDTA, NAC	DTPA
Cobre (Cu)	EDTA, penicilamina, trientina	Penicilamina
Curio (Cm)	DTPA	DTPA
Einsteinio (Es)	DTPA	DTPA
Europio (Eu)	DTPA	DTPA
Productos de fisión (Mixtos)	El manejo depende de los isótopos predominantes presentes en ese momento. Tempranos: yodo; tardíos: estroncio, cesio y otros	
Flúor (F)	Hidróxido de aluminio	Hidróxido de aluminio
Galio (Ga)	Considerar penicilamina	Penicilamina
Oro (Au)	BAL, penicilamina	BAL
Indio (In)	DTPA	DTPA
Yodo (I)	Yoduro de potasio (KI) Propiltiouracil, metanizol	KI
Iridio (Ir)	Considerar DTPA, EDTA	Considerar DTPA
Hierro (Fe)	Deferoxamina (DFOA), deferasirox, DTPA, DFOA y DTPA juntos	DFOA
Lantano (La)	DTPA	DTPA
Plomo (Pb)	DMSA, EDTA, EDTA con BAL	DMSA
Manganeso (Mn)	DFOA, DTPA, EDTA	DTPA
Magnesio (Mg)	Considerar la terapia con estroncio	Considerar la terapia con estroncio
Mercurio (Hg)	BAL; EDTA; penicilamina; DMSA	BAL
Molibdeno (Mo)	Experiencia clínica limitada	
Neptunio (Np)	Considerar DFOA y/o DTPA	Considerar DFOA y/o DTPA
Níquel (Ni)	BAL, EDTA	BAL
Niobio (Nb)	DTPA	DTPA
Paladio (Pd)	Penicilamina, DTPA	Penicilamina
Fósforo (P)	Terapia con fósforo	Terapia con fósforo
Plutonio (Pu)	DTPA, DFOA, EDTA, DTPA Y DFOA juntos	DTPA
Polonio (Po)	BAL, DMSA, penicilamina	BAL
Potasio (K)	Diuréticos	Diuréticos

Tabla 11. Recomendaciones de terapia de decorporación en EEUU sobre los radionúclidos que preocupan (Informe NCRP 161, 2010).

Radionúclidos	Tratamiento alternativo	Tratamiento preferente
Prometio (Pm)	DTPA	DTPA
Radio (Ra)	Radioterapia con estroncio	
Rubidio (Ru)	Azul del Prusia	Azul del Prusia
Rutenio (Ru)	DTPA, EDTA	DTPA
Escandio (Sc)	DTPA	DTPA
Plata (Ag)	No hay terapia específica. Considerar lavado gástrico y purgantes	
Sodio (Na)	Dilución diurética e isotónica al 0,9% de NaCl	Dilución diurética e isotónica al 0,9% de NaCl
Estroncio (Sr)	Radioterapia con estroncio	
Sulfuro (S)	Considerar tiosulfato de sodio	Considerar tiosulfato
Tecnecio (Tc)	Perclorato de potasio	Perclorato de potasio
Talio (Tl)	Azul del Prusia	Azul del Prusia
Torio (Th)	Considerar DTPA	Considerar DTPA
Tritio (H)	Forzar fluidos	Diuresis con agua
Uranio (U)	Bicarbonato para alcalinizar orina	
Ytrio	DTPA, EDTA	DTPA
Zinc (Zn)	DTPA, EDTA, Sulfato de zinc como agente diluyente	
Zirconio (Zr)	DTPA, EDTA	DTPA

Tabla 12 – Registro Programa de Dosis para Medicamentos o Modalidad de Tratamiento

Droga o Modalidad de tratamiento	Dosis
Acetilcisteína (NAC)	La FDA no especifica la edad, IV 300 mg/Kg en 5% de dextrosa en agua durante 24 horas para una sobredosis de acetaminofeno
Deferoxamina (DFOA)	La FDA no especifica la edad, Deferoxaminamesilato inyectable (DFORA); es preferible IM, 1 g IM o IV (2 ampollas) lentamente ($15 \text{ mg kg}^{-1}\text{h}^{-1}$); Repetir como se indica, dosis de 500 mg IM o IV cada 4h durante 2 días, luego 500 mg IM o IV cada 12 horas durante 3 días.
Dimercaprol (BAL)	La FDA no especifica la edad; IM: 300 mg por vial para uso IM profundo. $2,5 \text{ mg}^{-1} \text{ kg}$ (o menos) cada 4 horas durante 2 días, luego 2 veces al día durante 1 día y luego diariamente durante 5-10 días.
Dietilentriaminopentaacetato (DTPA, calcio o zinc)	Adultos: 1 g en 5 ml, de inyección intravenosa lenta durante 3-4 minutos o inyección intravenosa durante 30 minutos diluido en 250 mL de dextrosa al 5% en agua, Lactato de Ringers o solución salina normal (NS). Niños menores de 12 años: $14 \text{ mg Kg}^{-1} \text{ IV}$ como indicado anteriormente, sin exceder 1 g IM: 1 g pudiéndose administrar con procaina para reducir el dolor (no aprobado por la FDA) Inhalación nebulizadora: 1 g en dilución 1:1 con agua estéril o NS (para el tratamiento del isótopo inhalado, considerar la enfermedad respiratoria pediátrica subyacente)
Edetato de Calcio disódico (EDTA)	La FDA no especifica edad: Ca-EDTA (Edetato de calcio disódico); 1000 mg m^{-2} al día agregado a 500 mL D ₅ NS infundido durante 8-12 horas.
Penicilamina	La FDA no especifica edad: Oral: 250 mg diarios entre comidas y antes de acostarse. Puede aumentarse a 4 o 5 g diarios en dosis individuales.
Terapia con fósforo, Fosfato de potasio, dibásico	Oral: 250 mg de fósforo por comprimido. Adultos: 1-2 comprimidos orales 4 veces al día con un vaso lleno de agua cada vez, con las comidas y antes de acostarse. Niños mayores de 4 años: 1 comprimido oral cuatro veces al día.

Tabla 12 – Registro Programa de Dosis para Medicamentos o Modalidad de Tratamiento	
Droga o Modalidad de tratamiento	Dosis
Yoduro de Potasio (KI)	Oral: comprimidos o líquido. La dosis de fármaco varía entre 16 mg y 130 mg diarios según edad el nivel de exposición de la tiroides y si la mujer está embarazada o en periodo de lactancia.
Bicarbonato de sodio (solo para Uranio)	Oral o IV para alcalinizar la orina
Terapia de Radio y Estroncio	Hidróxido de aluminio: PO: 60-100 mL una única vez 10% de suspensión de Cloruro de Calcio, Adultos: IV: de 200 mg a 1 g cada 1-3 días, IV lentamente, sin exceder 1 mL/min.
Succimer (DMSA) (Chemer®)	Dosis pediátricas aprobadas por la FDA: comience la dosis a 10 mg Kg ⁻¹ ó 350 mg m ⁻² cada 12 horas (dos tercios de la dosis diaria inicial) durante 2 semanas adicionales de terapia. Un curso de tratamiento dura 19 días.
Diuresis con agua	Oral: Fluidos de más de 3-4 L al día. ¹

Bloqueo de la tiroides por yoduro de potasio (KI)

Los niños son particularmente susceptibles a desarrollar cáncer de tiroides después de la exposición al yodo radiactivo. La absorción de yodo radiactivo se debe bloquear mediante la administración de yoduro de potasio (KI) oral en las 4 horas posteriores a la exposición. Algunas personas pueden ser alérgicas al KI, por lo que existen alternativas que deben discutirse con el médico de cabecera del individuo.

Algunas de las principales ciudades de los EEUU han considerado el aprovisionamiento de KI. Es probable que tras un accidente en un reactor nuclear se libere yodo radiactivo y el KI es una medida para impedir que el yodo radiactivo sea absorbido por la glándula tiroides. La concentración de yodo radiactivo en el aire depende parcialmente de la distancia a la planta nuclear, las condiciones atmosféricas, la dirección del viento y la velocidad de liberación.

La población más sensible incluye a los fetos y menores de 18 años, presentando las mujeres mayor sensibilidad que los hombres. Se han convocado paneles consultivos de expertos para determinar si la distribución previa y el almacenamiento de KI son eficaces para proteger la salud de los ciudadanos de una gran ciudad (Tabla 13).

Tabla 13 –Dosis recomendadas de Yoduro de Potasio

Adultos >40 años con exposición a tiroides ≥ 5 Gy (500 rad)	130 mg al día
Adultos de 18 – 40 años con exposición a tiroides ≥ 0.1 Gy (10 rad)	130 mg al día
Mujeres embarazadas y lactantes con exposición a tiroides ≥ 0.05 Gy (5 rad)	130 mg al día
Niños y adolescentes de 3–18 años con exposición a tiroides ≥ 0.05 Gy (5 rad)	65 mg al día
Niños de 1 mes – 3 años con exposición a tiroides ≥ 0.05 Gy (5 rad)	32 mg al día
Recién nacidos desde el nacimiento a – 1 mes con exposición a tiroides ≥ 0.05 Gy (5 rad)	16 mg al día

Los sistemas de ingeniería y seguridad de las plantas nucleares actuales de EEUU permitirían, en unas 48h, la preparación para una emergencia antes de que se produjera una liberación. Incluso bajo esa circunstancia, la inhalación de yodo radiactivo a niveles que requieran el uso de KI es casi imposible de alcanzar debido a la distancia de la planta y a la dispersión de la nube. El peligro para los residentes y visitantes reside casi en su totalidad a la cadena alimentaria, donde el yodo radiactivo puede depositarse en las verduras cultivadas y pasar a la leche a través de las vacas que consumen hierba contaminada. Las acciones de respuesta están diseñadas para evitar este peligro a través de un programa de prohibición de alimentos, que involucre la cooperación de la ganadería y la industria láctea. Los expertos han llegado a la conclusión, por razones exclusivamente científicas, de que la acumulación de KI, la distribución previa y/o la distribución de KI después de un accidente beneficia poco o nada la salud.

Sección 6 - Técnicas de descontaminación

Seguridad del personal sanitario

Los pacientes con contaminación radiactiva generalmente no representan un peligro para el personal sanitario. El uso de medidas de seguridad generales es una acción efectiva para la protección contra la contaminación, como se demostró durante la respuesta médica en el suceso de contaminación de Alexander Litvinenko. El peligro por exposición a la radiación de una víctima contaminada radiológicamente será probablemente mínimo, por lo que no debe retrasarse el tratamiento médico o quirúrgico necesario por causa de una posible contaminación.



Manejo inicial

El manejo inicial de un paciente contaminado por materiales radiactivos implica realizar todas las acciones urgentes para salvar la vida del paciente sin tener en cuenta la contaminación.

La descontaminación no debe interferir con la atención médica y no se debe prohibir la entrada a un centro médico a las víctimas contaminadas si dicha entrada es necesaria para recibir atención médica que pueda salvarle la vida. Las víctimas que son ingresadas en un centro médico después de un incidente radiológico se deben considerar como contaminadas, a menos que se verifique que no lo estén. Un examen general preliminar (con los medios de detección adecuados) debe proporcionar pruebas suficientes de la presencia o ausencia de contaminación grosera. Generalmente, este examen se puede realizar mientras el personal médico evalúa la estabilidad médica del paciente. La descontaminación radiológica, es decir, la eliminación de materiales radiactivos de las superficies, a menudo exige una cantidad importante de recursos y puede llevar un tiempo considerable.

Técnicas de descontaminación

La contaminación radiactiva general suele detectarse con bastante facilidad mediante una exploración rápida del paciente con la instrumentación adecuada. La descontaminación radiológica se realiza de manera muy similar a la descontaminación química típica. La principal diferencia está en el tiempo: La descontaminación química a menudo es una emergencia, mientras que la descontaminación radiológica no lo es. La descontaminación debe seguir un criterio básico de sentido común. A diferencia de los productos químicos, los materiales radiactivos no se pueden "neutralizar". Solo se pueden mover de un punto a otro. La descontaminación radiológica debe realizarse teniendo esto en cuenta. Por lo tanto, el desafío

es eliminar el material radiactivo de un área y transferirlo a otra (acondicionada para su almacenamiento) sin distribuirlo entre los puntos intermedios.

La principal prioridad es garantizar que el paciente esté médicamente estable.



Una vez que el paciente ha sido estabilizado médicamente, el primer paso es quitar la ropa. Es lógico que la ropa cubra, (por lo general), un gran porcentaje del cuerpo, por lo que quitar la ropa adecuadamente probablemente reducirá significativamente la cantidad de material radiactivo con el que el personal asistencial tiene que lidiar. Esto se hace cortando, no rasgando, la ropa en una dirección en sentido opuesto a las vías respiratorias del paciente y enrollándola hacia fuera alejándola de la piel del paciente, atrapando el material en la ropa. Si el paciente quiere, se le puede poner un protector contra salpicaduras.



Una vez cortada la ropa se puede utilizar un procedimiento de lateralización (*log-roll*) del cuerpo para quitar la ropa. En la siguiente imagen, se han colocado varias sábanas en la cama. La sábana superior se pliega sobre la ropa creando una superficie limpia sobre la cual se puede hacer rodar al paciente. El paciente luego se gira hacia el otro lado donde la sábana se enrolla sobre la ropa y luego se le retira de la cama, haciéndola rodar hacia los pies. Una vez retirada la sábana, se puede realizar un estudio radiológico rápido de la espalda en busca de cualquier área evidente de contaminación. En este punto, los niveles generales de contaminación deberían reducirse significativamente. Hay que asegurarse de introducir en una bolsa la ropa/sábana superior y enviarla para el muestreo. De esta manera se dispone de información

para determinar los tipos de materiales radiactivos que pueden generar una contaminación interna.



Las prioridades de descontaminación son 1) heridas, 2) orificios corporales alrededor de la cara y 3) piel intacta. Para tratar la herida contaminada se debe preparar el área para la descontaminación. La piel intacta inmediatamente adyacente a la herida debe descontaminarse rápidamente con una toallita húmeda, limpiando la herida. De esta forma se minimiza cualquier contaminación que pueda transferirse nuevamente a la herida y se garantiza que la contaminación en esta área no se confunde con el conteo real en la herida.



Finalmente, se debe cubrir el área con paños estériles para evitar la propagación de la contaminación a las áreas no contaminadas. Después de que se hayan cubierto correctamente, puede comenzar la (descontaminación) de las heridas. Debe limpiarse suavemente la herida con solución salina estéril o algo similar. El objetivo de la limpieza inicial es intentar eliminar la mayor parte de la contaminación, por lo que no debe ser demasiado agresiva para evitar salpicaduras y la posible propagación de la contaminación. El residuo líquido debe dirigirse a un receptáculo, por ejemplo un cubo de basura revestido. También puede ser una buena idea tratar de recoger el residuo líquido en el sitio de la herida mediante el uso de compresas absorbentes. Todos los residuos generados deben mantenerse en un lugar determinado previamente para su posterior recogida y eliminación.



La supervisión de la contaminación se debe repetir para determinar la efectividad de los intentos por descontaminar. La herida debe cubrirse a medida que se retiran los paños y debe colocarse una compresa absorbente limpia debajo del área afectada antes de volver a supervisar.



Si la herida todavía está contaminada, el proceso debe repetirse hasta que no se consiga ninguna mejoría. Si los niveles de contaminación continúan siendo elevados y la mejoría de la descontaminación es demasiado lenta o inexistente, el médico que lo asiste debe explorar la herida en busca de cuerpos extraños. Puede llegar a ser necesario un desbridamiento menor. Cabe tener en cuenta que las heridas aún deberán limpiarse antes de cerrarlas para controlar las infecciones. Esto puede eliminar la contaminación remanente. En general, si quedan pequeñas cantidades de contaminación en una herida, éstas no eximen del control de la infección y del efecto estético.

La descontaminación de los orificios corporales en la cara y alrededor de ella plantea un desafío, ya que los métodos sencillos de aplicar son limitados. Muchas veces se pueden descontaminar las fosas nasales simplemente haciendo que el paciente se suene la nariz. Antes de la limpieza de las fosas nasales, se debe considerar el riesgo de forzar la entrada de más material radiactivo en el cuerpo a través de la orofaringe como resultado de este procedimiento. Los métodos habituales utilizados para limpiar los ojos son aceptables, pero se

debe tener cuidado de asegurar que el residuo líquido se dirija lejos de la nariz/boca y de evitar que penetre en los oídos.

Al descontaminar la piel hay que evitar irritarla. La abrasión de la piel puede permitir la entrada de materiales radiactivos depositados en su superficie. Al realizar la descontaminación siempre es mejor comenzar con el método más simple disponible. Una buena opción, que genera muy poco desperdicio, es el uso de toallitas húmedas. Si las toallitas húmedas no funcionan, se pueden tomar medidas más agresivas, procurando preservar la integridad de la piel. Otra opción es lavar suavemente con un paño suave, agua tibia y jabón.

El movimiento de limpieza debe ir desde el exterior hacia dentro, como limpiar una caída de pintura. El objetivo es minimizar el área de contaminación, no extenderla hacia afuera. Puede ser útil cubrir el área con paños estériles y colocar un depósito de recolección, como se hace al descontaminar una herida, si se van a usar grandes cantidades de líquido para la limpieza.



Si el cabello se contamina, puede lavarse, teniendo cuidado de no permitir que el agua de lavado o enjuague corra por la cara. En áreas con pelo como el tórax lo mejor es no afeitar ya que se pueden provocar abrasiones en la piel. Es mejor opción cortar el pelo, pero solo si es necesario. Tenga en cuenta que el paciente puede ser reactivo a que le corten el pelo.

La piel sin pelo y el cabello deben lavarse a fondo y, si es práctico, el líquido del lavado debe ser recogido y desechado de manera adecuada. La escisión quirúrgica de heridas es apropiada cuando esté indicado quirúrgicamente. Los contaminantes radiactivos en las superficies de la herida probablemente se eliminarán con el tejido.

Sección 7 - Biodosimetría

La Biodosimetría es el uso de la respuesta biológica como un indicador de dosis de radiación. La biodosimetría citogenética se considera el *gold standard* para la determinación de la dosis de radiación del paciente a cuerpo entero. Para consultas sobre biodosimetría, se aconseja contactar con el REAC / TS en el +1 (865) 576-3131.

Biodosimetría multiparamétrica para respuesta temprana.

Ningún ensayo es lo suficientemente robusto como para abordar todos los posibles escenarios radiactivos, incluido el manejo de víctimas a gran escala y el diagnóstico para el tratamiento médico inicial. Las recomendaciones para el uso en los primeros actuantes y los primeros afectados implican una estrategia basada en priorizar una biodosimetría de ensayo-múltiple. El Comentario n.º 19 de NCRP (NCRP, 2005) recomienda la determinación de un triaje multiparamétrico (es decir aparición de los vómitos, cinética de depleción de linfocitos y otros indicadores biodosimétricos y bioquímicos) como la mejor evaluación biodosimétrica inicial de la dosis absorbida de una víctima. La biodosimetría no pretende reemplazar la estimación de dosis física, sino proporcionar información adicional sobre la dosis biológica de un individuo. La dosis biológica complementa otros métodos de evaluación de la dosis, como la estimación rápida de la dosis y la reconstrucción oficial de la dosis.

De la Tabla 14, resulta evidente que el vómito dentro de 1-2 h puede ser particularmente grave, mientras que una disminución en el recuento de linfocitos a 1/2 ó 1/3 de los valores basales en 24 h indica una situación potencialmente letal. Después de 24 h, se confirma por los aumentos en la amilasa sérica. Como se señala a continuación, se espera que una dosimetría citogenética temprana, de rápido despliegue, de alto rendimiento y conectada a Internet sea muy valiosa para el cribado (triaje) de un gran número de personas. Por el contrario, a partir de los datos del tiempo de vómito, si un paciente no ha vomitado en las primeras 8-10 h, entonces es muy probable que la dosis sea inferior a 1 Gy y que se le pueda trasladar a instalaciones para pacientes ambulatorios.

Tabla 14 – Biodosimetría multiparamétrica

Dosis, Gray (Gy)	Porcentaje de personas con vómito	Inicio medio del vómito (horas)	Contaje absoluto de linfocitos; % de lo normal en las primeras 24 h	Número de dicéntricos en 50 metafases
0	-	-	100	0,05-0,1
1	19	-	88	4
2	35	4,6	78	12
3	54	2,6	69	22
4	72	1,7	60	35
5	86	1,3	53	51
>6	90-100	1,0	< 47	-

Biodosimetría basada en exposiciones agudas equivalentes a fotones; Waselenko, JK, *Medical Management of the Acute Radiation Syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group*, Ann Intern Med, 2004.

Las pautas biodosimétricas recomendadas por REAC / TS incluyen la documentación de:

- Signos y síntomas clínicos
- Evaluación de los niveles de radiactividad
- CBC total y diferencial para el cálculo de los recuentos de linfocitos y neutrófilos absolutos
- Recuento de plaquetas
- Encuesta personal sobre contaminación y dosimetría de área
- Citogenética

Otras pruebas que pueden proporcionar información complementaria que se han recomendado en las pautas de consenso incluyen:

- Evaluación de la dosis basada en resonancia paramagnética de electrones (EPR, del inglés *Electronic Paramagnetic Resonance*) de dientes, uñas y cabello.
- Niveles de amilasa circulante, proteína C reactiva (CRP, del inglés *C-reactive protein*), ligando FLT-3 y citrulina.

Las pruebas que se encuentran en desarrollo incluyen perfiles de expresión génica, metabolitos y proteínas.

Biodosimetría Citogenética

La biodosimetría citogenética se ha utilizado durante décadas para estimar la dosis en función de las aberraciones cromosómicas inducidas por la radiación en los linfocitos circulantes. Es aplicable principalmente a exposiciones recientes y agudas a todo el cuerpo. Debido a la baja frecuencia basal de los cromosomas dicéntricos en los linfocitos, la sensibilidad del ensayo es comparativamente alta, con una dosis umbral para todo el cuerpo de 0,1 Gy (basada en el análisis de 1000 células), y muestra una fuerte dependencia con la dosis hasta 5 Gy para

exposiciones agudas con fotones. La reproducibilidad, la especificidad relativa de los cromosomas dicéntricos a la radiación y su sensibilidad a dosis agudas por debajo de una significación clínica importante han permitido que el ensayo se convierta en el "*gold standard*" de la biodosimetría por radiación. Una desventaja es que el método estándar de análisis de extensiones de unas 500-1000 metafases requiere aproximadamente de 4 a 5 días, incluido el transporte apropiado al laboratorio, el procesamiento y el análisis de la muestra, así como la estimación de la dosis. Por lo tanto, la mayoría de los analistas, no podrán evaluar más de ~300 células en metafase al día. Los estudios en REAC/TS, sin embargo, han demostrado que los analistas "remotos", en distintas localizaciones, pueden utilizar la conexión a Internet para compartir la carga de trabajo, superar el "cuello de botella" inherente en el análisis de células, y por lo tanto reducir el tiempo necesario para las estimaciones de dosis.

Muchos laboratorios tienen analizadores automáticos de metafase en su uso rutinario que aceleran el proceso, al encontrar rápidamente las células analizables. Además, los ejercicios de triaje han demostrado que el análisis de tan solo 50 células por muestra puede producir estimaciones de dosis dentro de $\pm 0,5$ Gy de la dosis real, 9 de cada 10 veces. Este nivel de precisión generalmente se considera suficiente como orientación en las decisiones iniciales de tratamiento clínico.

Tabla 15. Guía de elección de Método Biodosimétrico

Rango de dosis (Gy)	Método Dosimétrico recomendado	Síntomas Clínicos
0,1 - 1	Ensayo de Dicéntricos	De ninguna a ligera disminución en el hemograma.
1,0 – 3,5	Cinética de depleción de linfocitos/dicéntricos	Daño leve a severo en la médula ósea.
3,5 – 7,5	Cinética de depleción de linfocitos /Condensación prematura de cromosomas (PCC)	Pancitopenia, daño gastrointestinal (GI) leve a moderado.
7,5 – 10,0	Cinética de depleción de linfocitos /PCC	Daño en la médula ósea y GI
> 10,0	PCC	Daño GI, neurológico y cardiovascular.

Actualmente se utilizan otros métodos en la dosimetría citogenética, tales como micronúcleos con bloqueo de la citocinesis, translocaciones cromosómicas y los ensayos de condensación prematura de cromosomas (PCC, del inglés *Premature Chromosome Condensation*). El test de micronúcleos requiere menos habilidad en el análisis, pero también tiene una frecuencia basal más variable, dependiente de la edad y el sexo del donante de linfocitos. Al igual que los dicéntricos, los micronúcleos son aberraciones inestables que desaparecen con el tiempo. Además, muchos productos químicos pueden inducir micronúcleos, por lo que el ensayo no es específico de la radiación. A menudo se usa como prueba de cribado toxicológico general.

El ensayo de translocaciones se usa principalmente para estimar la dosis de exposiciones retrospectivas. A diferencia de los dicéntricos y los micronúcleos, que se eliminan de la sangre

periférica en un tiempo relativamente corto, se ha demostrado que las translocaciones persisten durante décadas. Las translocaciones son detectables mediante el uso de un método citogenético molecular denominado "pintado " cromosómico o hibridación fluorescente in situ (FISH, del inglés *Fluorescence In Situ Hybridization*). En numerosos estudios se ha demostrado que la frecuencia de las translocaciones está fuertemente influenciada por la edad del donante de linfocitos.

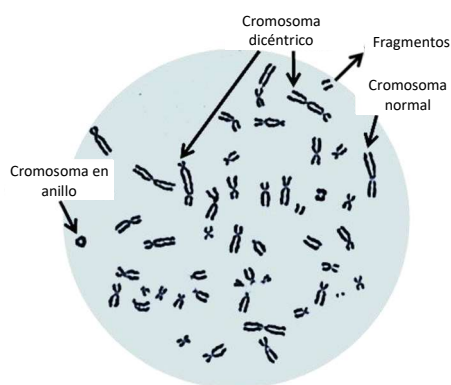
La condensación prematura de cromosomas (PCC) ocurre cuando las células en la etapa de interfase del ciclo celular se tratan para inducir a que los cromosomas se condensen prematuramente en el aspecto habitual de los cromosomas en la metafase. Después de que las células se hayan fijado y teñido, los cromosomas se analizan en busca de fragmentos que indiquen roturas cromosómicas. El ensayo de PCC permite la observación directa del daño inducido por la radiación de forma prematura cuando las células deben ser estimuladas para alcanzar la mitosis antes de la preparación de los cromosomas. Como se muestra en la Tabla 15, el ensayo de PCC puede detectar dosis mayores que las estimadas con el ensayo de dicéntricos, pero el método aún requiere una mayor validación.

Análisis de Dicéntricos

Los cromosomas dicéntricos se forman cuando los segmentos rotos de dos cromosomas irradiados son mal reparados, formando un cromosoma con dos o más centrómeros. El número de cromosomas dicéntricos se correlaciona bien con la dosis absorbida. En el ensayo de dicéntricos, los linfocitos estimulados se detienen, se fijan y se dejan caer sobre portaobjetos de vidrio durante la fase de metafase de la mitosis, donde los cromosomas se condensan y son visibles bajo el microscopio. Las imágenes se pueden luego capturar electrónicamente y compartir través de Internet, permitiendo que múltiples "lectores" analicen en las extensiones de metafases la presencia de cromosomas dicéntricos.

Se puede hacer una estimación de la dosis según el número de dicéntricos detectados por célula a partir de las curvas de calibración de exposiciones *in vitro*. Este ensayo generalmente se acepta como el método más específico y sensible (0,1 Gy) para determinar las dosis a cuerpo entero de exposiciones recientes a radiación ionizante (es decir, de unos días a ~3 meses). Además, existen métodos estadísticos que pueden determinar si el cuerpo recibió una distribución de dosis homogénea o si la dosis se recibió de manera no homogénea en los casos en que las dosis son iguales o superiores a 2 Gy. La utilidad de este ensayo se reduce en gran medida al estimar dosis recibidas 3 meses antes del ensayo debido a la semivida inestable (es decir, a la regeneración) de los linfocitos, y por tanto a la pérdida de cromosomas dicéntricos.

Los cromosomas dicéntricos inducidos por la radiación son mecánicamente inestables durante la mitosis y, por lo tanto, se eliminan a medida que se regenera la reserva de linfocitos. Por el



contrario, las translocaciones cromosómicas son estables durante la división celular y pueden medirse usando FISH. En este método citogenético-molecular, se pueden usar sondas de ADN marcadas con fluorocromos que son típicamente específicas de tres pares de cromosomas para detectar intercambios mediante microscopía de fluorescencia. Se ha demostrado que la estabilidad de las translocaciones cromosómicas permanece elevada durante décadas. Este método se ha utilizado para analizar de nuevo la dosimetría de los supervivientes de la bomba atómica de la Segunda Guerra Mundial y en los accidentes civiles por radiación que ocurrieron hace décadas.

Ensayo de micronúcleos con bloqueo de la citocinesis

El ensayo de micronúcleos con bloqueo de la citocinesis es otro método útil de dosimetría biológica. Al contrario que el análisis directo de los cromosomas, la prueba de micronúcleos es un método indirecto para evaluar el daño cromosómico y se realiza en las células en la etapa de interfase del ciclo celular. Los micronúcleos se caracterizan por ser estructuras pequeñas, de redondas a ovaladas, ubicadas dentro del citoplasma de una célula, pero físicamente distintas y separadas del núcleo principal. Debido a que se parecen al núcleo principal en forma, textura y propiedades de tinción, y además contienen ADN, los micronúcleos se detectan fácilmente como marcadores de cromosomas dañados, es decir, rotos. El análisis de micronúcleos requiere menos destreza, es de procesamiento rápido, especialmente con equipos automatizados normalmente que incluyen muestras de 1.000 células o más. El test se ha mejorado significativamente mediante la introducción del método del bloqueo de la citocinesis y se ha demostrado que es sensible a dosis tan bajas como 0,1 Gy. El inconveniente, a diferencia del ensayo de dicéntricos, es que la edad y el género son factores que afectan la frecuencia basal. Los estudios *in vitro* han demostrado que se puede estimar una dosis de 1 Gy con una incertidumbre de 0,2 Gy. En estudios *in vivo* se ha demostrado que el nivel de detección más bajo es de aproximadamente 0,3 Gy.

Condensación prematura de Cromosomas

Una limitación de los ensayos que requieren estimulación de linfocitos es que las células que reciben dosis más altas de radiación también experimentan retraso del ciclo celular y pueden no alcanzar la mitosis. Esto puede provocar una gran subestimación de la dosis absorbida. Sin embargo, los cromosomas pueden verse obligados a condensarse prematuramente al fusionar los linfocitos humanos con células mitóticas de ovario de hámster chino (CHO, del inglés *Chinese Hamster Ovary*) en presencia de polietilenglicol (PEG).

El ensayo de PCC también puede inducirse químicamente incubando los linfocitos con un inhibidor de la proteína fosfatasa (por ejemplo, ácido okadaico), adenosintrifosfato y un factor promotor de la mitosis, que evita la necesidad de mantener los cultivos de células CHO. El ensayo PCC permite la observación directa del daño cromosómico y aún más pronto cuando se estimula la mitosis de las células. El límite inferior de detección del ensayo no es tan bajo como el del ensayo de cromosomas dicéntricos. Es sensible para dosis más altas que las detectables con el ensayo de aberraciones cromosómicas de dicéntricos.

Resonancia paramagnética electrónica (EPR)

La EPR a veces se denomina resonancia electrónica de espín (ESR, del inglés *Electron Spin Resonance*), que no debe confundirse con la tasa de sedimentación del eritrocito. La exposición de los seres vivos a la radiación ionizante da lugar a cambios radioinducidos medibles y, dependiendo de la dosis absorbida, cuantificarse. El uso de EPR para biodosimetría se basa en la capacidad de dicha técnica para proporcionar mediciones específicas y sensibles de electrones no apareados en el tejido sólido que se crean en proporción a la dosis absorbida. La vida útil de estos electrones es muy corta (del orden de nanosegundos) en sistemas acuosos, como la mayoría de los tejidos biológicos, pero puede ser extremadamente estable en medios no acuosos, tales como dientes, huesos, uñas o cabello. La EPR se ha utilizado para análisis *in vitro* de dientes extraídos para medir dosis en poblaciones de Japón y de la antigua Unión Soviética. La efectividad de la EPR se ha demostrado adecuadamente.

Marcadores moleculares en fluidos corporales y tejidos

Los marcadores moleculares (biomarcadores) representan cambios subyacentes en la fisiología derivados del daño físico (por ejemplo lisis celular y liberación de proteínas intracelulares en la circulación, subproductos de la oxidación o rotura del ADN), cambios subyacentes en la bioquímica (por ejemplo presencia de nuevos metabolitos o cambios en los niveles de productos genéticos clave) y/o cambios en la composición celular de los tejidos. Estos marcadores incluyen moléculas tan diversas como proteínas y metabolitos de moléculas pequeñas.

En cuestión de minutos u horas después de la exposición a la radiación ionizante, las proteínas se modifican y se activan, y se producen cambios a gran escala en los perfiles de expresión génica que implican una amplia variedad de vías de procesos celulares. Actualmente hay aproximadamente 90 proteínas conocidas que muestran cambios en la expresión o se someten a modificaciones post-traduccionales después de la exposición a la radiación ionizante. Algunos de estos cambios dependen de la dosis. El uso de marcadores bioquímicos en un ensayo multiparamétrico representa un nuevo e interesante desarrollo en la dosimetría de la radiación.

Sección 8 - Efectos tardíos

Los efectos tardíos de la exposición a la radiación incluyen carcinogénesis radioinducida, retraso mental en la descendencia después de la exposición en el útero, efectos tardíos en órganos (normalmente cambios vasculares, fibrosis, atrofia y disfunción tiroidea), cataratas e infertilidad.

Complicaciones pulmonares

La lesión pulmonar por radiación debida a exposiciones agudas es un aspecto importante y de difícil evaluación desde un punto de vista médico en los incidentes a altas dosis de radiación dado que puede retrasarse hasta varios meses después de la exposición. La zona más radiosensible del pulmón es el complejo alveolar/capilar, y la lesión pulmonar temprana inducida por la radiación a menudo se describe como daño alveolar difuso. Estas complicaciones pueden surgir debido a dosis agudas en los pulmones a más de 6-8 Gy. Las especies reactivas del oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés *Reactive Oxygen Species*) generadas por el daño por la radiación son directamente tóxicas para las células pulmonares e inician una cascada de eventos moleculares que alteran el entorno de las citoquinas de su microambiente, creando un ciclo autosostenido de inflamación y estrés oxidativo crónico. En la lesión pulmonar se ven implicadas varias citoquinas como indicadoras o mediadoras.

El evento definitivo es la transformación del parénquima pulmonar por tejido fibroso normal debida a la fibrosis. Dependiendo de la dosis o tasa de dosis y del volumen de pulmón irradiado, se puede desarrollar una neumonitis por radiación aguda, caracterizada por tos seca y disnea. La fibrosis pulmonar, que causa más disnea, es una posible complicación tardía.

Estudios sobre los efectos a largo plazo de la radiación

El Comité 7 de los Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (*Biological Effects of Ionizing Radiation*, BEIR) de la Academia Nacional de Ciencias de los EEUU, en un informe reciente (BEIR VII, 2006), consideró ampliamente los modelos matemáticos de dosis de riesgo actualmente en uso. El comité BEIR VII concluyó que el mejor modelo para el riesgo de efectos retardados sigue siendo el modelo lineal sin umbral (*Linear Non-Threshold model*, LNT). El modelo LNT implica que el riesgo de un efecto retardado es nulo cuando la dosis es también nula y aumenta linealmente con el aumento de la dosis.

El Sistema de Dosimetría 2002 (*Dosimetry System 2002*, DS02) es la última reconstrucción dosimétrica de los incidentes armamentísticos de Hiroshima y Nagasaki. Desde 1945 se ha seguido a una gran cohorte de supervivientes por la radiación y se observa evidencia estadísticamente significativa de todos los tipos de leucemia inducida por radiación, excepto la leucemia linfocítica crónica (LLC). Además, el carcinoma inducido por radiación se ha notificado en mama, tiroides, colon, estómago, pulmón y ovario. Por otra parte, se han notificado resultados inconsistentes o en el límite de significación estadística para el carcinoma

de esófago, hígado, piel, vejiga, sistema nervioso central (SNC), mieloma múltiple y linfoma inducido por radiación.

Riesgo de cáncer

El personal médico en todos los niveles de atención debe comprender la angustia psicológica que experimentan los pacientes con respecto a los efectos retardados de la exposición a la radiación. Según los datos disponibles de la Sociedad Americana del Cáncer (*US Mortality*, 2006 http://www.cancer.org/docroot/stt/stt_0.asp?from=fast, presentación de 2009) se espera que en EEUU el cáncer sea la causa de muerte del 23,1 % de la población.

Comprender el exceso de riesgo de cáncer mortal requiere un conocimiento general del riesgo inicial del cáncer mortal. Por lo indicado anteriormente, en una población de diez millones de personas, se espera que 2,31 millones mueran de cáncer. De acuerdo con el informe NCRP N°. 115 (1993), el exceso de riesgo de cáncer mortales de 4% por Sv (0,04 % por rem) para una población trabajadora y 5% por Sv (0,05% por rem) para la población general. Si esta misma población recibiera una dosis total en exceso de 0,1 Sv (10 rem) a lo largo de su vida, habría un exceso de riesgo de 50.000 muertes por cáncer (calculada a partir de (10.000.000 de personas) $\times$ (0,0005 muertes por persona por rem) $\times$ (10 rem) = exceso de 50.000 muertes por cáncer). Por lo tanto, el número total de cánceres mortales en una población de diez millones de individuos con una exposición a 0,1 Sv (10 rem) se incrementa de 2,31 millones a 2,36 millones.

Un aumento similar en el riesgo global de cáncer exige una comprensión del riesgo basal de cáncer. De nuevo el exceso de riesgo de desarrollar cáncer a lo largo de toda la vida es extremadamente pequeño: Según las estimaciones de la *American Cancer Society* (Sociedad Americana del Cáncer), uno de cada dos hombres y una de cada tres mujeres desarrollarán cáncer. Esto es comparable a que aproximadamente el 42% de la población total desarrolle cáncer a lo largo de su vida. BEIR VII estima que a 43 de cada 100 personas en los EEUU se les diagnosticará cáncer durante su vida. También estima que una única exposición a 10 rem (0,1 Sv) por encima del fondo natural puede producir aproximadamente un cáncer por cada 100 personas (~1%), lo que implica que la tasa de cáncer inducido por radiación es de aproximadamente del 10 % por Sv.

El lector debe tener en cuenta que las estimaciones de riesgo entre varias agencias federales, grupos asesores y comités internacionales varían ligeramente (BEIR V y VII, IAEA, NCRP, EPA, UNSCEAR, etc.), pero todas se encuentran en general en los rangos anteriormente mencionados.

Los recursos que pueden ser útiles en la consulta médica con pacientes irradiados son:

- La página web: *Health Physics Society: Ask the Experts* (<https://hps.org/publicinformation/ate/>)
- Informes de BEIR V, VII y UNSCEAR 1988, 2000
- Varios informes de NCRP e ICRP, como NCRP 115 e ICRP 60 y 103

- La página web de la Sociedad Americana del Cáncer (<http://www.cancer.org/research/index>)

Efectos no cancerígenos

La radiación también causa efectos tardíos distintos al cáncer. Estos incluyen cataratas, hiperparatiroidismo, y una disminución tanto de la inmunidad mediada por células T como de la respuesta humoral de células B. Los supervivientes de la exposición en el útero también han experimentado microcefalia infantil, retraso mental, retraso en el crecimiento y desarrollo, menor coeficiente intelectual y bajo rendimiento escolar.

Las cataratas inducidas por radiación están bien documentadas, sobretodo algunos tipos como cataratas subcapsulares posteriores. Las cataratas seniles o relacionadas con la edad son nucleares en su posición. Los neutrones son particularmente eficaces en la formación de cataratas. La dosis umbral para la formación de cataratas es de aproximadamente 0,5 Gy (mayor con dosis fraccionadas). Para una dosis de 40 Gy en el ojo, aproximadamente en el 100% de los casos se producirían cataratas. El período de latencia varía entre 2 meses y 35 años. En general, al aumentar la dosis en el ojo el período de latencia disminuye.

Radiación y embarazo

El embarazo causa preocupación por los posibles efectos adversos en el feto tras la exposición a la radiación. La edad gestacional de un feto se calcula desde el final de la última menstruación (FUM) y tiene un promedio de 280 días, divididos en tres trimestres. Durante las dos primeras semanas posteriores a la ovulación, los eventos biológicos sucesivos incluyen la fertilización, la formación del blastocito libre, el tránsito por la trompa de Falopio y la implantación. No se han observado efectos estadísticamente significativos de importancia clínica antes de la concepción.

Si se produce la irradiación durante el paso del blastocito por la trompa de Falopio, generalmente se observa un efecto de "todo o nada". Si la implantación tiene lugar, el embarazo generalmente tiene éxito/prospera. Durante el primer trimestre del período de organogénesis el embrión es sensible a los efectos de retraso del crecimiento debido a la criticidad de la división celular y la alta proporción de células radiosensibles.

Para dosis uterinas >0,5 Gy, los efectos predominantes han sido el retraso en el crecimiento, las malformaciones congénitas graves y la microcefalia. Es curioso que, no haya habido ningún informe donde una irradiación externa induzca una malformación morfológica en un feto a menos que también presente retraso en el crecimiento o una anomalía del SNC.

El mayor riesgo de retraso mental en el feto se produce por la irradiación durante el período de mayor migración neuronal (8 a 15 semanas) y la incidencia depende de la dosis. Con una dosis fetal de 1 Gy, aproximadamente el 75% experimentará retraso mental. Por el contrario, a las 16-25 semanas de gestación, el feto no muestra un aumento en el retraso mental a dosis fetales <0,5 Gy.

La exposición a altos niveles de radiación es claramente un factor de riesgo para el desarrollo de leucemia infantil. Los supervivientes adultos japoneses de la bomba atómica, tuvieron un riesgo 20 veces mayor de desarrollar leucemia aguda (excepto LLC), por lo general 6-8 años de la exposición. Los estudios sobre la exposición en el útero y la exposición infantil a bajos niveles de radiación muestran resultados no concluyentes.

Sección 9 - Apoyo psicológico y percepción del riesgo

No debe pasarse por alto la importancia del reconocimiento temprano de los signos de estrés y otros problemas psicológicos. Por lo tanto, se debe considerar la participación temprana de los profesionales de salud mental, la Iglesia, etc. Dado que la percepción del riesgo es un concepto muy personal, puede ser difícil tratarla ansiedad en una población a la que se asocia con un incidente radiológico real o ficticio. Hay que tener en cuenta que muchas fuentes tergiversan los peligros asociados con la radiación.

De acuerdo con *The Medical Basis for Radiation-Accident Preparedness III, The Psychological Perspective* (Ricks, et al., 1990), no es suficiente con transmitir información. El éxito en la comunicación con respecto a los incidentes por radiación es multifacética, y algunos problemas se han abordado de manera inadecuada. Por ejemplo:

- Los medios de comunicación cubren a menudo puntos de vista, no la verdad.
- Para un científico, la objetividad significa adherirse a los hechos en la búsqueda de la verdad.
- Para un periodista, puede significar simplemente un equilibrio entre hechos.
- La política parece estar más interesada en los aspectos de interés mediático que en los de interés científico.
- Las declaraciones sobre riesgos radiológicos parecen tener mayor reclamo periodístico que las de reivindicación por la seguridad.

Además, los medios de comunicación profesionales no son la única fuente de información que da forma a nuestras opiniones. Los libros y los programas de televisión de ficción vinculan la exposición a la radiación y la contaminación radioactiva con el concepto de "brillar en la oscuridad", la "enfermedad por radiación" inmediata y grave después de la exposición a la radiación, mutaciones que conducen a múltiples partes extra en nuestro cuerpo, efectos genéticos que conducen a malformaciones en la descendencia y anomalías funcionales. Estos estereotipos engañan al público sobre la naturaleza esencial de la radiación y su riesgo.

Miedo y respuesta psicológica inmediata

Las autoridades deben "alertar a la población cuando debe ser alertada y tranquilizarla cuando deban ser tranquilizada." (Sandman, *Explaining Environmental Risk*, 1986). La ansiedad y el miedo del público asociados a las emergencias radiológicas son a menudo desproporcionados respecto al grado de los efectos en la salud inducidos por la radiación (OIEA, 2005). Así, los síntomas de la enfermedad por radiación en solo unas pocas personas desinformadas pueden producir efectos psicológicos devastadores en toda una comunidad o en todo un grupo de profesionales sanitarios. Puede desarrollarse ansiedad aguda que, a su vez, conduzca a estrés emocional y a un rendimiento deficiente.

Se debe tener cuidado para evitar factores estresantes innecesarios. El OIEA recomienda que puede ser beneficioso poner a disposición materiales educativos así como terapeutas en los centros de acogida, adecuándolos a las costumbres religiosas, culturales y sociales mientras se

presta atención, como por ejemplo examinando y descontaminando a los pacientes y separando a los miembros de la familia. La experiencia obtenida en REAC/TS es que la ansiedad frecuentemente produce síntomas prodrómicos de SIA, como náuseas e incluso vómitos. Es importante que los primeros actuantes se den cuenta de que las víctimas pueden tener miedo y que ello genere estos síntomas clínicos.

Efectos psicológicos a largo plazo

Los efectos psicológicos a largo plazo pueden manifestarse años después de una exposición real o percibida a la radiación. Aquellos que han estado expuestos o piensan que podrían haberlo estado pueden experimentar sentimientos de vulnerabilidad, estrés postraumático, ansiedad crónica y pérdida de control. El paciente también puede experimentar miedo por la seguridad de su futura generación.

Los individuos afectados parecen encajar en uno de estos tres grupos:

- Aquellos que están angustiados
- Aquellos que muestran cambios de comportamiento
- Aquellos con alto riesgo de desarrollar enfermedades psiquiátricas

Entre las reacciones comunes que se manifiestan se incluyen la tristeza, el enfado, el miedo, la dificultad para dormir, la incapacidad para concentrarse e incredulidad o, incluso quejas somáticas inespecíficas. Esta condición a menudo se refiere denominada Síntomas Físicos Idiopáticos Múltiples (MIPS, del inglés *Multiple Idiopathic Physical Symptoms*).

Los resultados varían ampliamente: La mayoría de las personas mejoran con el tiempo, pero algunas pueden desarrollar a largo plazo necesidades psicosociales. Los médicos y psicólogos deben recordar que, después de una exposición a la radiación, las personas que no tienen antecedentes de disfunción psicosocial son vulnerables a las enfermedades psiquiátricas. No solo las víctimas, sino también el personal asistencial sanitario, incluidos los primeros actuantes en el lugar del incidente, los que los reciben en el hospital y otros cuidadores pueden desarrollar disfunción psicosocial.

Tratamiento

Después de un incidente radiológico, las personas que sospechen que han estado involucrados probablemente consulten al personal sanitario o personas de confianza sobre información y orientación. Por tanto, el personal sanitario desempeñará un papel clave en el cuidado y la vigilancia médica a largo plazo para dar respuesta a las personas tras un incidente radiológico. Es aconsejable que el personal sanitario general pueda atender a estos pacientes con una información adecuada sobre los posibles efectos a largo plazo del daño por radiación, derivando a los afectados que así lo requieran a servicios psiquiátricos o psicológicos.

Las consecuencias psicológicas particulares de los incidentes radiológicos con gran cantidad de víctimas requieren de la disponibilidad de primeros auxilios psicológicos (PFA, del inglés,

Psychological First Aid) para facilitar el manejo del estrés, la depresión y otras reacciones emocionales y físicas graves que puedan ocurrir. Estos primeros auxilios incluyen el compromiso activo con las personas que muestren llanto espontáneo, labilidad emocional, confusión, aumento de la ansiedad, sensación de impotencia y otros signos de una capacidad fallida para hacer frente a las pérdidas. Es esencial establecer confianza mediante una comunicación fluida con información precisa, escucha activa y muestras de respeto, para lo que se recomienda el uso de un tono de voz suave, preguntas simples y una postura abierta. Los primeros auxilios psicológicos tienen como objetivo la seguridad, tranquilidad, conexión (mantener a las familias y amigos juntos) y la autoeficacia (empoderamiento de los supervivientes con sugerencias prácticas). Cuando se necesite derivar a alguien, debe asegurarse la ayuda dirigiendo a las personas a los servicios necesarios.

Puede que las estimaciones iniciales de la dosis de radiación estén disponibles con bastante rapidez, pero es normal que pase algo de tiempo antes de que estén disponibles los resultados finales. Durante este período de tiempo, se debe asegurar un consenso entre los expertos y, por lo tanto, un mensaje común, que puede ayudar a reducir el miedo y el enfado del paciente.

Impactos en el personal sanitario y de actuación

Se requieren esfuerzos coordinados de colaboración entre equipos de gestión de materiales peligrosos (*HAZMAT*, del inglés *HAZardous MATerials*), de apoyo civil, regional y estatal para reducir al mínimo las pérdidas de vidas. Asimismo, estos mismos grupos deberán coordinar las actividades de respuesta inicial y temprana, incluido el transporte a las áreas de recepción clínica para la evaluación radiológica y triaje o los hospitales de campaña para el manejo médico. Se espera que un incidente radiológico a gran escala tenga efectos importantes en los sistemas de salud, ya que los trabajadores de los hospitales y de los servicios de urgencias se convertirían en los primeros receptores y proporcionarían la mayor parte de la atención médica a los supervivientes. En los hospitales se deberá implementar un sistema de control de incidentes para coordinar la gestión y el control del incidente. Además, deberán imponer un sistema de informe inusual al personal que preste atención médica. Tanto de manera individual como colectiva, se espera que estos eventos produzcan estrés, ansiedad y problemas personales para actantes y proveedores de atención médica. El personal involucrado en la gestión del accidente de Goiânia mostró gran impacto al investigar y gestionar un gran volumen de víctimas.

El 30 de septiembre de 1987, en Goiânia, Brasil, se produjo un incidente radiológico a gran escala debido a que unos individuos retiraron un dispositivo de radioterapia ^{137}Cs de una clínica abandonada y rompieron la cápsula de la fuente. Estos individuos desconocían los riesgos de la radiación y de la contaminación radiactiva. Pasaron aproximadamente 2 semanas y media antes de que se descubrieran las implicaciones radiológicas del incidente, que causó la muerte a cuatro personas. Se puede encontrar más información en el informe del OIEA *The Radiological Accident in Goiânia* (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub815_web.pdf).

El impacto más grande se observó en el personal que trabajó durante los primeros 2 meses tras el incidente realizando encuestas, clasificando a los pacientes y llevando a cabo la atención médica. Prácticamente todos estos trabajadores mostraron síntomas psicosociales que incluían culpa, pena y sensación de impotencia, en comparación con aquellos que trabajaron los siguientes 4 y 5 meses, donde solo el 50 % de los trabajadores mostraron estos sentimientos.

Las condiciones de trabajo de los primeros actuantes les produjeron un daño psicológico de gran impacto: Trabajaban de 12 a 15 horas al día en condiciones desconocidas e incómodas (contaminación radiactiva, ropa de protección necesaria, etc.) con altas temperaturas, de hasta 38 °C. El temor de la población y el miedo absoluto a veces dieron lugar a enfrentamientos inesperados. El caos en las primeras fases de una respuesta a una emergencia a gran escala agravó los problemas (Ricks, et al., 1990). Muchos de los actuantes informaron que notaron cambios de comportamiento en sus compañeros de trabajo, como un mayor consumo de alcohol y un comportamiento agresivo. También podían observarse otros signos de estrés. Estos problemas de comportamiento en el personal involucrado en la gestión del incidente deben abordarse de la misma manera que la recomendada para manejar los problemas psicosociales en los pacientes:

- Prestar de primeros auxilios psicológicos para establecer confianza y facilitar el manejo de la situación.
- Animar a los trabajadores a hablar sobre su estrés (descompresión). Puede aliviarse mediante catarsis.
- Prestar atención a los cambios de comportamiento y tratar de comprender las razones subyacentes.
- Proporcionar asistencia a los responsables de los equipos cuando tomen decisiones con respecto a las asignaciones de los trabajos para (ayudar a) garantizar que la persona asignada sea la adecuada para el trabajo y que el trabajo (y la dosis de radiación) se distribuya de manera equitativa y justa.
- Considerar realizar una evaluación y clasificación psicológica y de personalidad previa al incidente.

Apéndice A – Información suplementaria

REACT/TS, El Centro de Asistencia de Emergencia Radiológica/Centro de Entrenamiento, Dirigido por ORAU para DOE, Tratamiento del Paciente por Radiación, Versión 3, Agosto 2016.

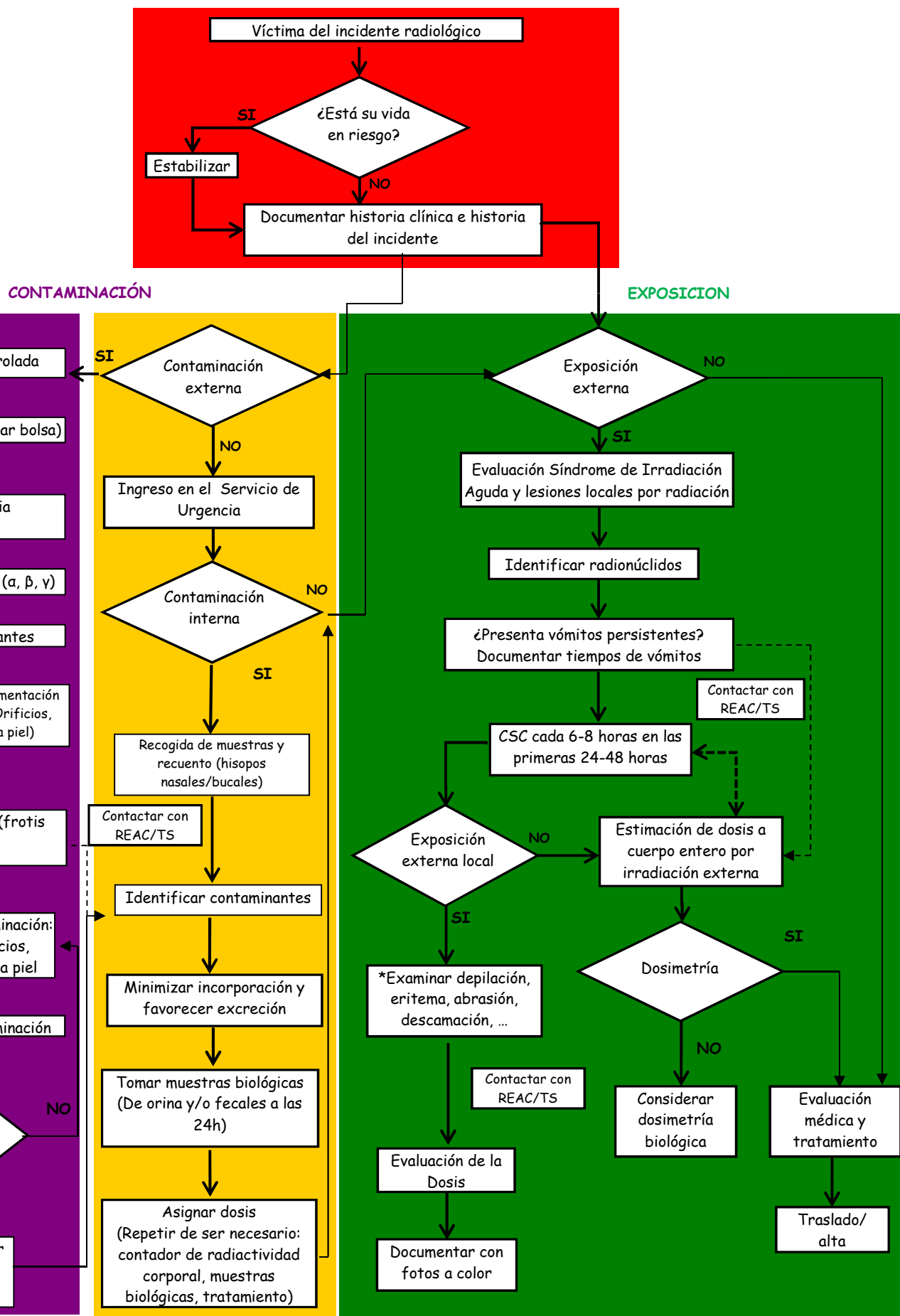


Tabla 16 - Umbrales aproximados de lesiones cutáneas vs dosis agudas

Dosis aproximada	Efecto esperado	Tiempo post exposición*
300 rads (3 Gy)	Depilación	2-4 semanas
600 rads (6 Gy)	Eritema	Temprano, de 2-4 semanas después
1000-1500 rads (10-15 Gy)	Descamación húmeda	2-4 semanas
1500-2500 rads (15-25 Gy)	Descamación seca	2-4 semanas
> 2500 rads (> 25 Gy)	Ulceración profunda/ Necrosis	Depende de la dosis

* Con dosis más altas, el tiempo de aparición de los signos / síntomas puede reducirse.

Tabla 17 - Umbrales aproximados para el síndrome de radiación aguda

Dosis	Síndrome	Signos/ Síntomas potenciales*
0-100 rads (0-1 Gy)	NA	Generalmente asintomático, con un potencial leve descenso de los linfocitos a mayores dosis (cerca de 1 Gy)
≥ 100 rads (≥ 1 Gy)	Hematopoyético	Anorexia, náuseas, vómitos, granulocitosis inicial y linfocitopenia
≥ 600 rads (≥ 6 Gy)	Gastrointestinal	Náuseas tempranas graves, vómitos, diarrea acuosa, pancitopenia
≥ 800 rads (≥ 8 Gy)	Neurovascular	Náuseas / vómitos en las primeras horas, postración, ataxia, confusión

* Con dosis más altas, el tiempo de aparición de los signos / síntomas puede reducirse.

Tabla 18 - Prefijos estándar para unidades de medida

Múltiple	Prefijo	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10^1	deka	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

Tabla 19 – Factores de conversión de dosis equivalente y *dose equivalent*

1 sievert	1 Sv	100 rem
1 milisievert	1 mSv	100 milirem
1 microsievert	1 μ Sv	100 microrem
1 rem	1 rem	10 milisievert
1 milirem	1 mrem	10 microsievert
1 microrem	1 μ rem	10 nanosievert

Tabla 20 – Factores de conversión de dosis absorbida

1 gray	1 Gy	100 rad
1 miligray	1 mGy	100 milirad
1 microgray	1 μ Gy	100 microrad
1 rad	1 rad	10 miligray
1 milirad	1 mrad	10 microgray
1 microrad	1 μ rad	10 nanogray

Tabla 21 – Acrónimos

CAL (ALC)	Contaje absoluto de linfocitos (<i>Absolute Lymphocyte Count</i>)
ALI	Límites Anuales de Ingesta (<i>Annual Limits on Intake</i>)
RAN (ANC)	Recuento absoluto de neutrófilos (<i>Absolute Neutrophil Count</i>)
SIA (ARS)	Síndrome de Irradiación Aguda (<i>Acute Radiation Syndrome</i>)
BAT	Herramienta de asesoramiento biodosimétrico (<i>Biodosimetry Assessment Tool</i>)
BEIR	Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (<i>Biological Effects of Ionizing Radiation</i>)
Bq	Becquerel
CSC (CBC)	Hemograma completo, Conteo Sanguíneo Completo (<i>Complete Blood Count</i>)
Ci	Curio
LLC	Leucemia Linfocítica Crónica
CPM	Cuentas por minuto
CRP	Proteína C reactiva (<i>C-reactive protein</i>)
FEC (CSF)	Factor estimulante de colonias (<i>Colony-Stimulating Factors</i>)
DPM	Desintegraciones por minuto
DLDs (DRD)	Dosímetros de lectura directa (<i>Direct Read-out Dosimeter</i>)
DTPA	Ácido dietilentriaminopentaacetato
DU	Uranio empobrecido (<i>depleted uranium</i>)
EDTA	Edetato de calcio disódico
FDA	Administración de Medicamentos y Alimentos (<i>Food and Drug Administration</i>)
FISH	Hibridación fluorescente in-situ (<i>Fluorescent In-Situ Hybridization</i>)
G-CSF	Colonia estimuladora de granulocitos (<i>Granulocyte Colony-Stimulating Factors</i>)

GI	Gastrointestinal
G-M	Geiger-Müller
GM-CSF	<i>Granulocyte-macrophage colony - stimulating factors</i> (colonia estimuladora de granulocitos y macrófagos)
Gy	Gray
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica (<i>International Commission on Radiation Protection</i>)
IDSA	Sociedad de Enfermedades Infecciosas de América (<i>Infectious Disease Society of America</i>)
DNI (IND)	Dispositivo Nuclear Improvisado (<i>Improvised Nuclear Device</i>)
KI	Yoduro potásico
DL	Dosis Letal
NA	No aplicable
NCRP	Comisión Nacional de Protección Radiológica y medidas (<i>National Council on Radiation Protection and Measurements</i>)
N/D	N/D: no disponible (N/A: <i>not available</i>)
PCC	Condensación Prematura de Cromosomas (<i>Premature Chromosome Condensation</i>)
Q (QF)	Factor de calidad (<i>Quality Factor</i>)
DDR (RDD)	Dispositivo de Dispersión Radiológica (<i>Radiation Dispersal Device</i>)
REAC/ TS	Centro de Asistencia a Emergencias Radiológicas/ Centro de Entrenamiento (<i>Radiation Emergency Assistance Center/ Training Site</i>)
Sv	Sievert
UNSCEAR	Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>)
WBC	Recuento de glóbulos blancos (<i>White Blood Count</i>). A veces Recuento de cuerpo entero (<i>Whole Body Count</i>)

Apéndice B – Fuentes adicionales de respuesta

- **DOE – National Nuclear Security Administration – NNSA – <https://nnsa.energy.gov/>:** La Administración Nacional de Seguridad Nuclear (NNSA) garantiza que existan capacidades para responder a cualquier emergencia de la NNSA o del Departamento de Energía (DOE) de los EEUU. También es la primera institución en los EEUU en dar respuesta a cualquier incidente nuclear o radiológico dentro de los EEUU o en el extranjero y proporciona planificación operativa y capacitación para contrarrestar el terrorismo nuclear tanto nacional como internacional. <https://nnsa.energy.gov/>
- **Armed Forces Radiobiology Research Institute – AFRRI – <https://www.usuhs.edu/afri/>:** La misión del AFRRI (En castellano, Instituto de Investigación en Radiobiología de las Fuerzas Armadas) es preservar la salud y el rendimiento del personal militar de los EEUU y proteger a la humanidad a través de investigaciones que mejoren la comprensión de los efectos de la radiación ionizante. Con estos fines, el instituto colabora con otras instituciones gubernamentales, instituciones académicas y laboratorios civiles en los Estados Unidos y otros países para investigar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Además, proporciona formación médica y respuesta a emergencias para gestionar incidentes relacionados con la exposición a la radiación. El AFRRI elaboró una guía de bolsillo similar (*Medical Management of Radiological Casualties*, 3ª edición, 2009) para ayudar en la orientación de las operaciones médicas militares.
- **International Atomic Energy Agency (IAEA⁶) – IAEA’s Response System – <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/iaea-response-system.asp>:** Los principales objetivos del Sistema de Respuesta del OIEA son facilitar (1) el intercambio de información oficial en tiempo real entre Estados u organizaciones internacionales relevantes; (2) la prestación de asistencia o asesoramiento a los Estados u organizaciones internacionales relevantes que lo soliciten; y (3) el suministro de información pública pertinente, oportuna, veraz, coherente y apropiada. REAC/TS es miembro de la Red de asistencia de respuesta del OIEA (RANET). <https://www.iaea.org/>
- **World Health Organization (WHO⁷) – Radiation Emergency Medical Preparedness and Assistance Network (REMPAN):** La red está diseñada para brindar/prestar/proporcionar? asistencia médica de emergencia y de salud pública a personas sobreexpuestas a la radiación. También facilita la atención a largo plazo y el seguimiento de las víctimas de accidentes por radiación y realiza investigaciones en medicina por emergencia radiológica, radioterapéutica, biodosimetría y epidemiología radiológica. REAC/TS es un centro en colaboración con la OMS/REMPAN. http://www.who.int/ionizing_radiation/a_e/rempan/en/
- **Center for Disease Control and Prevention (CDC⁸), Emergency Preparedness and Response:** Página web del gobierno de los EEUU destinada a aumentar la capacidad del país para prepararse y responder a emergencias de salud pública, incluidos incidentes radiológicos. <http://emergency.cdc.gov/radiation/>

⁶ En castellano, OIEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica).

⁷ En castellano, OMS (Organización Mundial de la Salud).

⁸ En castellano, Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades, Preparación para Emergencias y respuesta.

Apéndice C – Selección de referencias, informes y páginas webs

- Comunicación pública ante una emergencia radiológica o nuclear – <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/8889/Communication-with-the-Public-in-a-Nuclear-or-Radiological-Emergency>
- Procedimientos genéricos para la respuesta médica durante emergencias nucleares o radiológicas – http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-MEDICAL-2005_web.pdf
- NCRP Report 128 – *Radionuclide Exposure to the Embryo/Fetus* (1998) (Exposición a radionúclidos en embrión/feto)
- NCRP Report 138 – *Management of Terrorist Events Involving Radioactive Material* (2001) (Gestión de atentados terroristas con material radiactivo)
- NCRP Report 160 – *Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States* (2009) (Exposición a la radiación ionizante de la población de los Estados Unidos)
- NCRP Report 161 – *Management of Persons Contaminated with Radionuclides: Handbook* (2008) (Gestión de personas contaminadas con radionúclidos: Libro de Bolsillo (2008))
- NCRP Report 165 – *Responding to a Radiological or Nuclear Terrorism Incident: A Guide for Decision Makers* (2010) (Respuesta a atentados terroristas radiológicos o nucleares: Guía para la toma de decisiones)
- NCRP Report 166 – *Population Monitoring and Radionuclide Decorporation Following a Radiological or Nuclear Incident* (2010) (Monitorización de la población y descontaminación de radionúclidos después de un incidente radiológico o nuclear)
- NCRP Report 174 – *Preconception and Prenatal Radiation Exposure: Health Effects and Protective Guidance* (2013) (Exposición prenatal y pregestacional a la radiación : efectos sobre la salud y orientación para la protección)
- Rapid Internal and External Dose Estimation – <http://orise.orau.gov/files/reacts/rapid-internal-external-dose-magnitude-estimation.pdf> (Estimación rápida de la dosis interna y externa)
- Radiation Emergency Assistance Center/Training Site (REAC/TS) – <http://www.orise.orau.gov/reacts> (Centro de Asistencia a Emergencias Radiológicas/ Centro de Entrenamiento)
- USG DHHS *Radiation Event Medical Management* – REMM – <http://www.remm.nlm.gov/> (USG DHHS Gestión médica de incidentes radiológicos).