

01177  
2



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROPUESTA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS  
ESPECIALES EN INSTITUTOS Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN.  
CASO: INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO. EN INGENIERÍA  
(AMBIENTAL)**

**P R E S E N T A:  
I.Q. VÍCTOR ALCÁNTARA CONCEPCIÓN**

**EJEMPLAR UNICO**

**DIRECTORA DE TESIS: DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**MÉXICO, D.F.**

**2003**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**A**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Dedicada:**

**AL PUEBLO DE MÉXICO POR DARME  
LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

B

**Agradecimientos:**

**A LA UNIDAD DE GESTIÓN AMBIENTAL, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.  
EN ESPECIAL A LA MAESTRA IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA Y A LA  
DOCTORA ELVIRA SANTOS SANTOS.**

**POR SU INVALUABLE AYUDA EN MI FORMACIÓN PROFESIONAL**

**A LA DOCTORA GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGOMEZ.**

**POR EL GRAN APOYO QUE ME HA BRINDADO DESDE MI LLEGADA AL  
POSGRADO**

**A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE DIRECTA E INDIRECTAMENTE HAN  
CONTRIBUIDO A LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ÍNDICE

Lista de Tablas	i
Lista de Figuras	ii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>Capítulo 1</b>	
<b>LOS RESIDUOS RADIATIVOS</b>	
1.1 Antecedentes históricos	2
1.2 Los isótopos y los isótopos radiactivos	4
1.3 La fisión y la fusión	4
1.4 Dosimetría	5
1.5 Radiaciones	7
1.5.1 Radiaciones no ionizantes.	7
1.5.2 Radiaciones ionizantes.	7
1.6 Usos de la radiación	11
1.6.1 Agricultura y alimentación	11
1.6.2 Hidrología	12
1.6.3 Medicina	12
1.6.4 Energía eléctrica	13
1.6.5 Ambiente	13
1.6.6 Industria e investigación	13
1.7 Residuos radiactivos	14
1.8 Clasificación de los residuos radiactivos	14
1.9 Peligros de la energía nuclear	16
1.10 Efectos a la salud	17
1.11 Accidentes nucleares	18
<b>Capítulo 2</b>	
<b>MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS EN EL AMBITO INTERNACIONAL</b>	
2.1 Manejo de residuos radiactivos	20
2.2 La gestión de los residuos radiactivos	22
2.3 Tratamientos existentes para los residuos radiactivos	23
2.3.1 Tratamiento de líquidos	23
2.3.2 Tratamiento de sólidos	26
2.3.3 Tratamiento de gases	26
2.4 Almacenamiento de residuos de baja, media y alta actividad	27
2.5 Transporte de residuos radiactivos	29
2.6 Situación del manejo de los residuos de baja y media actividad	31

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Capítulo 3

### LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD

3.1 Organismos internacionales	36
3.1.1 Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA	36
3.1.2 Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP	36
3.1.3 Agencia de Energía Nuclear, AEN (OCDE)	37
3.1.4 Agencia Europea de Energía Nuclear, NEEA	37
3.1.5 EURATOM	37
3.2 Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, México	38
3.3 Marco legal en México	39

## Capítulo 4

### EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LOS MATERIALES Y RESIDUOS RADIATIVOS EN EL INSTITUTO DE FISIOLÓGÍA CELULAR

4.1 El Instituto de Fisiología Celular de la UNAM	43
4.2 Metodología de evaluación del manejo de materiales y disposición de residuos. Prácticas seguras en el laboratorio, protección a la salud y al ambiente	46
4.3 Diagnóstico en el manejo de los materiales radiactivos	48
4.3.1 Listas de verificación	48
4.3.2 Revisión de documentos de generación de residuos radiactivos	48
4.4 Resultados	50
4.4.1 Experimentos con material radiactivo	50
4.4.2 Generación de residuos radiactivos	50
4.4.3 Generación por laboratorio de residuos radiactivos	53
4.4.4 Tipos de materiales y residuos radiactivos	66
4.4.5 Manejo de materiales	68
4.4.5.1 Problemática del personal ocupacionalmente expuesto	68
4.4.5.2 Condiciones de trabajo en los laboratorios	69
4.4.5.3 Manuales y planes de emergencia	72
4.4.5.4 Controles en el manejo de material y residuos radiactivos	72
4.4.5.5 Mecanismos de minimización	72
4.4.5.6 Bitácoras de manejo de materiales y residuos	73
4.4.5.7 Reportes de actividad en los residuos	73
4.4.5.8 Separación de residuos	73
4.4.5.9 Recipientes, envases y códigos de colores	74
4.4.6 Almacén de residuos radiactivos	74
4.4.6.1 Procedimiento de almacenamiento	75
4.4.7 Costos de operación	76
4.5 Resumen del estudio	77

## Capítulo 5

### PROPUESTA PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE MATERIALES Y RESIDUOS RADIATIVOS EN EL INSTITUTO DE FISIOLÓGÍA CELULAR

5.1 Cadena de custodia de los materiales y residuos radiactivos	84
5.2 Procedimientos, material, equipo y medidas de seguridad adecuadas en los laboratorios de acuerdo con los radioisótopos encontrados	85
5.3 Segregación de residuos radiactivos	88
5.4 Procedimientos para la recolección de residuos radiactivos	89
5.5 Material para la recolección de residuos radiactivos	92
5.6 Actualización de la información acerca del manejo y disposición de residuos	93
5.7 Almacenamiento temporal de residuos y desclasificación	93
5.8 Plan de emergencia y descontaminación	96
5.9 Revisión periódica del cumplimiento de la normatividad nacional	99
5.10 Estimación de los costos de implantación y operación del programa de manejo de materiales y residuos radiactivos	99
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	101
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	104
<b>Artículos</b>	106
<b>Recursos de Internet</b>	106
<b>Anexos</b>	
<b>Anexo 1.</b> Historia de la radiactividad	109
<b>Anexo 2.</b> Pruebas nucleares y accidentes trascendentes en el Mundo	111
<b>Anexo 3.</b> Hojas internas. Solicitud de desechos radiactivos	113
<b>Anexo 4.</b> Manifiestos de desechos radiactivos. ININ	114
<b>Anexo 5</b> Disposiciones legales a cumplir por un instituto o centro de investigación que utilice radiaciones ionizantes	115
<b>Anexo A.</b> Listas de Verificación	116
<b>Anexo B.</b> Hojas de datos de seguridad de materiales radiactivos del IFC	122
<b>Anexo C.</b> Propuesta de bitácora de trabajo de materiales radiactivos	132
<b>Anexo D.</b> Propuesta de etiquetas de control en el manejo de residuos radiactivos	133
<b>Anexo E.</b> Propuesta de listas de espera para la recolección de residuos radiactivos	
Parte 1: Líquidos	134
Parte 2: Sólidos	135
<b>Anexo F.</b> Propuesta de hojas de control de residuos radiactivos para el departamento. de compras	136
<b>Anexo G.</b> Propuestas de hojas de registro para el almacén temporal de residuos	137
<b>Anexo H.</b> Propuesta de etiquetas de desclasificación de residuos radiactivos	138

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Factores de calidad	6
Tabla 1.2 Cuadro conceptual de unidades	6
Tabla 1.3 Isótopos usados en medicina	12
Tabla 1.4 Criterios para elaborar la clasificación de los residuos radiactivos	14
Tabla 1.5 Clasificaciones en Europa de residuos radiactivos	15
Tabla 1.6 Formas de penetración de radiaciones en el organismo	16
Tabla 1.7 Efectos probables de la irradiación total del organismo	17
Tabla 2.1 Métodos de tratamiento de residuos sólidos radiactivos de bajo nivel	26
Tabla 2.2 Métodos de retención y separación	27
Tabla 2.3 Métodos de inmovilización	28
Tabla 2.4 Sitios cerrados o en proceso de clausura	31
Tabla 2.5 Situación del manejo de residuos radiactivos en el mundo	33
Tabla 3.1 Áreas de acción de ICRP	36
Tabla 3.2 Áreas de acción de AEN	37
Tabla 3.3 Áreas de acción a futuro de EURATON	38
Tabla 3.4 Normas Oficiales Mexicanas en materia de energía nuclear	40
Tabla 3.5 Instrumento de gestión, ININ y CADER	41
Tabla 3.6 Síntesis de la normatividad en México	42
Tabla 4.1 Personal académico del Instituto de Fisiología Celular, UNAM	44
Tabla 4.2 Nivel de radiación de los residuos radiactivos sólidos generados en el IFC, 2001-2002	51
Tabla 4.3 Nivel de radiación de los residuos radiactivos líquidos generados en el IFC, 2001-2002	52
Tabla 4.4 Relación de datos de los residuos sólidos de $^{14}\text{C}$ , 2001-2002	53
Tabla 4.5 Relación de datos de los residuos sólidos de $^{125}\text{I}$ , 2001-2002	54
Tabla 4.6 Relación de datos de los residuos sólidos de $^{35}\text{S}$ , 2001-2002	55
Tabla 4.7 Actividad de residuos sólidos de $^3\text{H}$ , 2001-2002	56
Tabla 4.8 Actividad de residuos sólidos de $^{32}\text{P}$ , 2001-2002	57
Tabla 4.9 Relación de datos de los residuos sólidos de $^{86}\text{Rb}$ , 2001-2002	60
Tabla 4.10 Relación de datos de los residuos líquidos de $^{35}\text{S}$ , 2001-2002	61
Tabla 4.11 Relación de datos de los residuos líquidos de $^{125}\text{I}$ , 2001-2002	62
Tabla 4.12 Relación de datos de los residuos líquidos de $^{86}\text{Rb}$ , 2001-2002	62
Tabla 4.13 Relación de datos de los residuos líquidos de $^{32}\text{P}$ , 2001-2002	63
Tabla 4.14 Relación de datos de los residuos líquidos de $^3\text{H}$ , 2001-2002	64
Tabla 4.15 Relación de laboratorios y materiales radiactivos utilizados	67
Tabla 4.16 Relación de laboratorios y Equipo de seguridad utilizado	70
Tabla 4.17 Costos de envío de residuos radiactivos al ININ	77
Tabla 4.18 Conclusiones finales del manejo de materiales y residuos radiactivos en el IFC - UNAM	78
Tabla 5.1 Guía propuesta para la creación de programas de manejo adecuado de materiales y residuos radiactivos de Institutos y Centros de Investigación en México	80
Tabla 5.2 Equipo de seguridad recomendado para los radioisótopos manejados en el IFC	87
Tabla 5.3 Materiales radiactivos del IFC clasificados de acuerdo a sus tiempos de vida media	93
Tabla 5.4 Criterios de descalcificación de residuos radiactivos líquidos	94
Tabla 5.5 Niveles de dispensa para los residuos sólidos radiactivos	95
Tabla 5.6 Costos fijos estimados.	99
Tabla 5.7 Costos de operación estimados	100

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Longitud de trayectoria $p$ y profundidad de penetración $t_f$ , para una partícula	8
Figura 1.2 Decaimiento $\alpha$	9
Figura 1.3 Decaimiento $\beta$	10
Figura 1.4 Decaimiento	10
Figura 2.1 Ciclo de vida del material radiactivo	21
Figura 2.2 Celdas de confinamiento de residuo radiactivos	29
Figura 2.3 Contenedor para transporte de residuos radiactivos	30
Figura 4.1 Fotos de fachada del Instituto de Fisiología Celular	43
Figura 4.2 Diagrama espacial del Instituto de Fisiología Celular	44
Figura 4.3 Localización del Instituto de Fisiología Celular dentro de Ciudad Universitaria	45
Figura 4.4 Elementos de un Sistema de Administración Ambiental, ISO 14001	47
Figura 4.5 Ejemplo de las hojas de datos internas de residuos radiactivos del IFC	49
Figura 4.6 Ejemplo de manifiesto del ININ para los residuos radiactivos en el IFC	49
Figura 4.7 Porcentaje en peso de los residuos radiactivos sólidos en el IFC, 2001-2002.	50
Figura 4.8 Generación de residuos radiactivos sólidos en el IFC, 2001-2002.	51
Figura 4.9 Porcentaje en volumen de los residuos radiactivos líquidos en el IFC, 2001-2002	52
Figura 4.10 Generación de residuos radiactivos líquidos en el IFC, 2001-2002	53
Figura 4.11 Distribución de residuos de sólidos $^{125}\text{I}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	54
Figura 4.12 Distribución de residuos sólidos de $^{32}\text{P}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	56
Figura 4.13 Distribución de residuos sólidos de $^{32}\text{P}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	59
Figura 4.14 Comparativo de datos de residuos radiactivos sólidos, 2001-2002	60
Figura 4.15 Distribución de residuos líquidos de $^{125}\text{I}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	61
Figura 4.16 Distribución de residuos líquidos de $^{32}\text{P}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	62
Figura 4.17 Distribución de residuos líquidos de $^3\text{H}$ por laboratorios generadores, 2001-2002	65
Figura 4.18 Comparativo de datos de residuos radiactivos líquidos, 2001-2002	66
Figura 4.19 Comparativo entre Personal Ocupacionalmente Expuesto autorizado y no autorizado	68
Figura 4.20 Laboratorios que cuentan con cuarto separado para actividades con material radiactivo	69
Figura 4.21 Laboratorios y equipos de seguridad radiológica.	71
Figura 4.22 Distribución de laboratorios que llevan prácticas de minimización de residuos.	73
Figura 4.23 Contenedores y bolsas de residuos radiactivos utilizados	74
Figura 4.24 Almacén actual de residuos radiactivos	74
Figura 4.25 Residuos radiactivos al interior del almacén.	75
Figura 4.26 Residuos radiactivos desconocidos en los anaqueles al interior del almacén.	76
Figura 5.1 Estructura y funciones del sistema de manejo y disposición de materiales y residuos radiactivos	82
Figura 5.2 Mecanismos de información para conocer los flujos de materiales en el IFC	83
Figura 5.3 Contenedores propuestos para la retención de los residuos radiactivos	89
Figura 5.4 Carrito de recolección interna para los residuos radiactivos generados en el IFC	92

## INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de materiales y residuos peligrosos en las empresas, instituciones públicas y privadas, universidades, centros educativos y de investigación, tiene como principal objetivo el desarrollo sustentable de la sociedad, logrando mejores condiciones de vida para los posibles afectados por las emisiones de estos contaminantes, evitando el deterioro del ambiente, disminuyendo la extracción de recursos naturales y evitando accidentes laborales por la disminución de los riesgos en el manejo de sustancias peligrosas.

El trabajo realizado en esta tesis pretende contribuir a la disminución de los problemas relacionados con el manejo de sustancias peligrosas con especiales riesgos, como son los materiales radiactivos manejados y desechados en institutos y centros de investigación, tomando como referencia el caso del Instituto de Fisiología Celular. Para lo cual se diseñó un modelo general de gestión ambiental (sistema de administración ambiental) para los residuos radiactivos generados en institutos y centros de investigación, elaborándose, también una propuesta viable (técnica / económicamente) en el manejo, almacenamiento y disposición de los residuos radiactivos en el Instituto de Fisiología Celular.

Se diseñó una metodología de diagnóstico en el manejo de materiales y residuos radiactivos para ayudar a identificar todos los riesgos que pueden presentarse en los centros de investigación e institutos y posteriormente se elaboró una propuesta con todos los elementos teórico-prácticos de la gestión de residuos radiactivos incluyendo el manejo, almacenamiento y disposición de los residuos. Este proyecto contempla el estudio y adecuación de los procedimientos seguros en materia de residuos radiactivos, desde el momento en que se generan dentro de los laboratorios, su traslado al interior de las instalaciones, el almacenamiento temporal y su destino final. Por lo que fue necesario hacer una revisión de todos los requerimientos técnicos, la normatividad nacional e internacional, así como la cultura en el manejo de los residuos en el Instituto de Fisiología Celular.

La implantación de un programa con todas las características de buena administración de los residuos peligrosos debe darse desde el momento de la elaboración de la propuesta, donde los objetivos más importantes son: la disminución en los riesgos en el procedimiento de manejo de residuos radiactivos, la información y acción rápida en caso de accidentes, equipo, tecnología y el almacenamiento con las medidas de seguridad adecuadas.

La propuesta elaborada para el manejo de residuos y materiales peligrosos buscó elementos probados en la administración de recursos, para el adecuado funcionamiento de, ya sea una empresa o en este caso un instituto. Los sistemas de administración ambiental que actualmente han tomado gran auge, deben ser tomados en cuenta en cualquier modelo de manejo de materiales y residuos, ya que en un futuro cercano, estos sistemas serán implantados como normas generales de administración en prácticamente cualquier institución o empresa.

Se estima que la propuesta formulada para el Instituto de Fisiología Celular puede llevar a mejores niveles de seguridad, disminución en más del 40% de los residuos generados y contribuye a mejorar los procedimientos en las actividades de manejo, transporte, almacenamiento y control de residuos desde el punto de su generación hasta el punto de salida de los residuos para su disposición externa.

## Capítulo 1

### LOS RESIDUOS RADIACTIVOS

#### 1.1 Antecedentes históricos

Los antiguos griegos indicaban la existencia de partículas fundamentales, que actuaban como elementos constituyentes de la materia, prediciendo la existencia de "átomos" (en griego "lo que no se puede partir") como la fracción mínima. Este concepto fue ideado e introducido al acervo científico de los griegos por Demócrito, que vivió en tiempos de Sócrates e Hipócrates en el 430 a.C. Para Demócrito. "Todo está hecho de átomos unidos intrínsecamente -decía-, incluso nosotros los humanos. Nada existe aparte de átomos y el vacío".

Hasta finales del siglo XIX se encontraron los primeros elementos radiactivos (Anexo 1) con el descubrimiento del uranio por Becquerel en 1886. Los esposos Curie comienzan la investigación formal acerca de los materiales radiactivos retomando los trabajos de Becquerel y descubriendo otros elementos como el Polonio y el Radio. Siendo justos, las mayores aportaciones en esta área del conocimiento fueron realizadas por Marie Curie durante los siguientes años después de la muerte de su esposo Pierre. Junto a otros investigadores, J. J. Thomson, descubrió en 1897 que los átomos no eran indivisibles como se creía, sino que podían ser separados en componentes más pequeños. Asimismo, descubrió la composición de los átomos y la existencia de unas partículas que orbitaban en la zona exterior denominadas electrones, cuya masa era mucho menor que la del *núcleo*; éste, por su parte, tenía carga positiva y su peso suponía casi la totalidad del átomo en conjunto. A pesar de que no fue capaz de determinar la composición del núcleo, quedaron sentadas las bases para posteriores investigaciones, las primeras de las cuales se centraron en la estructura del átomo.

Ernest Rutherford desarrolló en 1911 un modelo basado en un sistema solar en miniatura, en el que el núcleo era una estrella (un sol) y los electrones los planetas (El átomo consta de un núcleo de gran tamaño sobre el que flotan (orbitan) los electrones.). La explicación de su teoría tenía, sin embargo, dos errores: que los electrones emitían energía al girar, disminuyendo su velocidad y cayendo al núcleo y que los electrones podían saltar de una órbita a otra cualquiera alrededor del núcleo.

En 1913 Niels Bohr enunció una nueva teoría atómica para dar solución a los fallos de la teoría de Rutherford; consistía en un sistema con un pequeño núcleo alrededor del cual giraban los electrones, pero con órbitas que obedecían a ciertas reglas restrictivas. Según esas reglas, sólo podrían existir un número determinado de órbitas y cada órbita tendría un nivel de energía, por tanto el electrón que ocupase una órbita concreta poseería la energía correspondiente a esa órbita. Asimismo, un electrón no podría saltar de una órbita a otra, salvo recibiendo una energía adicional igual a la diferencia de energía de ambas órbitas; si un electrón cambiara de una órbita de energía superior a otra inferior, emitiría igual cantidad de energía en forma de *onda electromagnética*, que sería de espectro fijo para los mismos tipos de átomos.

La teoría de Bohr, a pesar de los adelantos en las explicaciones sobre la estructura de la materia, también contenía errores, aunque hoy es aceptada en líneas generales. Los electrones deberían emitir energía al girar alrededor del núcleo, invalidando que las órbitas fueran de energía constante. La teoría de la *mecánica cuántica* vino a solucionar estas interrogantes, mediante la enunciación del

principio de la dualidad *onda-partícula*, por la cual toda partícula puede comportarse igualmente como una onda. Estas teorías y estudios fueron fruto del desarrollo y aportaciones de muchos y notables científicos como Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Planck, Louis de Broglie, etc.

La siguiente operación después de establecerse el sistema de las órbitas electrónicas, era determinar la estructura del núcleo. En estado normal un átomo no posee carga eléctrica, sin embargo, se observó que la carga del núcleo era positiva y siempre múltiplo de la carga del electrón; así pues, se concluyó que el núcleo estaba compuesto por un conjunto de partículas, cada una de ellas con igual carga que la del electrón, pero positiva; esas partículas fueron denominadas *protones*. Según este planteamiento, los átomos tienen el mismo número de electrones que de protones para poder mantener una carga neutra, es decir, cargas negativas en los electrones iguales a cargas positivas en los protones. El hidrógeno posee un electrón en su órbita, por tanto posee igualmente un protón en su núcleo; se dedujo así que el peso del protón era aproximadamente dos mil veces superior al del electrón; sin embargo, esta medida no se corresponde con la de otros elementos atómicos. La incógnita de las masas quedó despejada en 1932 cuando James Chadwick, de la Universidad de Cambridge, descubrió un nuevo elemento en el núcleo cuando estudiaba las colisiones entre partículas a alta velocidad, al que se le denominó *neutrón*. Quedó así definitivamente determinada la estructura del átomo.

El paso entre la determinación de la estructura de la materia y la teoría para la obtención de la energía nuclear por fisión lo dio Albert Einstein. Los experimentos sobre esta teoría demostraron que al bombardear un átomo pesado con otra partícula, las diversas partes en que se separaba el núcleo tenían en conjunto masas menores que la del núcleo original, liberándose por tanto una cantidad de energía. Si se aplicaba la fórmula de Einstein sobre la diferencia de masas, se observaba que los resultados eran coincidentes con los de la energía liberada.

Con el éxito en la ejecución de la teoría de Einstein se había encontrado una fuente de energía de enormes posibilidades, sin embargo en la práctica aún era inviable, el motivo era que experimentalmente siempre se consumía mayor energía que la que se producía. Estas limitaciones quedaron superadas en 1939, cuando Lise Meitner y Otto Hahn descubrieron la facilidad con que podía ser partido el núcleo del uranio mediante un neutrón, el cual producía además otros tres neutrones que podían dividir a su vez otros núcleos, acelerando la propia *radiactividad natural* del uranio. Pero su primera aplicación fue en verdad desastrosa con las bombas atómicas arrojadas en Hiroshima y Nagasaki en 1945, poniendo fin a la II Guerra Mundial.

La revolución nuclear tuvo lugar entre 1938 y los primeros años de 1950, después de más de 50 años de estudios por parte de los científicos del mundo, han llegado a alterar mucho más drásticamente la vida diaria de los seres humanos que con el descubrimiento del fuego o la siembra deliberada de granos. Después de los años 50's se han mantenido dos grandes líneas de investigación en materia nuclear, que son: el estudio y perfeccionamiento de las bombas nucleares y las investigaciones en busca de alternativas energéticas distintas a los combustibles fósiles, tratando de controlar y aprovechar la energía desprendida de las radiaciones emitidas por los elementos radiactivos. Los avances tecnológicos se han derivado de estas dos líneas de investigación y ahora vemos que los elementos radiactivos se utilizan en áreas de la ciencia como la medicina, la investigación, la agricultura o la industria.

## 1.2 Los isótopos y los isótopos radiactivos

Se dice que dos átomos son isótopos cuando poseyendo el mismo número atómico, esto es perteneciendo a un mismo elemento, poseen distinto número másico, lo que significa que, si bien ambos átomos tienen el mismo número de protones, el número de neutrones en el núcleo es diferente. Así por ejemplo el hidrógeno tiene tres isótopos; el  $^1\text{H}$ , llamado *protio*, cuyo núcleo está formado por un solo protón, el  $^2\text{H}$ , llamado deuterio, cuyo núcleo tiene un neutrón y un protón y el  $^3\text{H}$ , llamado tritio, cuyo núcleo tiene dos neutrones y un protón (OIEA, 1978).

Algunos isótopos de elementos en la naturaleza son inestables, esto significa que sus núcleos emiten radiaciones electromagnéticas o partículas, o ambas, y se descomponen espontáneamente, formando átomos del mismo o de otros elementos. A estos isótopos inestables se les llama isótopos radiactivos. Mientras que el hidrógeno-1 y el hidrógeno-2, o deuterio, son isótopos estables del elemento hidrógeno, el tritio es radiactivo y se desintegra emitiendo radiación beta. Asimismo, el carbono-12, isótopo estable, tiene 6 neutrones y 6 protones, mientras que el carbono-14, con 6 protones y 8 neutrones, es radiactivo (Bulbulian, 1996).

## 1.3 La fisión y la fusión

Según la teoría de Einstein en el núcleo del átomo hay un “defecto de masa”, que quiere decir que la suma de la masa de un núcleo es siempre menor a la suma de las masas de las partículas que lo forman, cuando ellas están libres, lo que provoca una cierta energía de unión lo que asegura la cohesión del núcleo. Es esta la energía que se necesita proporcionar al núcleo para disociar o unir las partículas que lo conforman (García, 1980).

$$E = M \times C^2$$

Donde:  
*E* = energía del núcleo (Joule)  
*M* = defecto de masa (kg)  
*C* = velocidad de la luz (299,792 km/s.)

El defecto de masa no es el mismo para todos los núcleos, sino que es relativamente pequeño para los elementos ligeros como el hidrógeno y es máximo para los núcleos de masa mediana (fuertemente ligados) como el hierro y es nuevamente más débil para los núcleos pesados como el uranio.

La aparición de energía nuclear es resultado de la desaparición de materia, o visto de otra forma de un incremento del defecto de masa. Para liberar la energía nuclear, es necesario por lo tanto provocar una transformación tendiente a producir los núcleos de masa mediana para los cuales el defecto de masa por núcleo es máximo. Algunos núcleos pesados como el del Uranio-235 pueden separarse en dos núcleos de masas medianas, lo que constituye la fisión nuclear. En esta transformación el defecto de masa crece, y por lo tanto hay una liberación de energía que se puede calcular, partiendo las energías de unión del núcleo inicial y final. Por otro lado hay núcleos ligeros que se pueden juntar para formar núcleos más pesados y esto constituye la fusión nuclear. En este proceso también el defecto de masa crece y se libera energía (García, 1980).

## 1.4 Dosimetría

Para poder medir y comparar las energías absorbidas por el tejido en diferentes condiciones ha sido necesario definir ciertos conceptos (exposición, dosis absorbida, dosis equivalente), así como las unidades correspondientes. Estas definiciones y unidades han ido evolucionando a medida que se ha tenido mayor conocimiento de la radiación.

La Comisión Internacional de Unidades de Radiación (CIUR) ha definido un sistema de unidades aceptado internacionalmente, que también se emplea dentro de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). El sistema internacional de unidades (S.I.) que tiene como base el MKS incluye *el becquerel, el gray y el sievert* como las unidades de medida de las cantidades radiológicas, substituyendo al *curie, al rad y al rem*, que son las unidades tradicionales. La transición de un sistema de unidades al otro ha sido lenta, por lo que es frecuente encontrar las antiguas unidades en los textos, en los medidores de la actividad de los materiales radiactivos y el uso cotidiano.

La **exposición** es una medida de la ionización producida por una radiación  $\gamma$  o X; su unidad es el roentgen (R). *Un roentgen es la exposición que recibe un kilogramo de aire en condiciones estándar de presión y temperatura (CSPT) produciendo un número de pares de iones equivalente a  $2.58 \times 10^{-4}$*  C. (Rickards, 1999)

Como la carga de un ion es  $1.602 \times 10^{-19}$  C, *esto equivale* a que se produzcan  $1.61 \times 10^{15}$  pares de iones/ kilogramo de aire.

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Coulombs/ kg de aire en CSPT.}$$

$$1 \text{ R} = 1.61 \cdot 10^{15} \text{ pares de iones/ kg de aire en CSPT.}$$

Esta definición es totalmente equivalente a la antigua, en que se tomaba 0.001293 g (1 cm<sup>3</sup> de aire en vez de un kilogramo, y una unidad electrostática de carga en vez de un coulomb. Del número de iones producidos en aire por un roentgen se puede calcular la energía empleada, si se recuerda que la energía necesaria para cada ionización del aire es de: 34 eV, equivalente a  $5.4 \times 10^{-18}$  joules (J).

Resulta ser:

$$1 \text{ R} = 0.00877 \text{ J/ kg de aire.}$$

Como en tejido la energía de ionización es diferente que en aire:

$$1 \text{ R} = 0.0096 \text{ J/ kg de tejido.}$$

La **dosis absorbida (D)** se explica *como la energía depositada por unidad de masa, independientemente de qué material se trate* (Rickards, 1999). En el S.I. la unidad de dosis absorbida es el gray (Gy), definido como sigue:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/ kg.}$$

La unidad antigua de dosis absorbida es el rad, definido como:

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/ kg.}$$

La **dosis equivalente** es una referencia que no lleva a utilizar la misma escala para distintas radiaciones de acuerdo a los daños biológicos que pueden provocar (Rickards, 1999). Las radiaciones ionizantes son capaces de producir efectos biológicos similares, una cierta dosis absorbida puede producir efectos de magnitudes distintas, según el tipo de radiación de que se trate. Esta diferencia de comportamiento ha llevado a definir una cantidad llamada factor de calidad (Q) para cada tipo de radiación.

El **factor de calidad** es una medida de los efectos biológicos producidos por las distintas radiaciones, comparados con los producidos por los rayos X y gamma (Rickards, 1999), para una dosis absorbida dada. Así, por ejemplo, un gray de partículas alfa produce efectos biológicos 20 veces más severos que un gray de rayos X. El factor de calidad Q depende de la densidad de ionización de las diferentes radiaciones. En la tabla 1.1 se encuentran los factores de calidad más importantes.

**Tabla 1.1 Factores de calidad**

Tipo de radiación	Q
Rayos X, γ	1
Electrones	1
Neutrones térmicos	2.3
Neutrones rápidos	10
Protones	10
Partículas α	20

La **dosis equivalente** es igual a la dosis absorbida multiplicada por el factor de calidad (Rickards, 1999). La unidad de dosis equivalente en el S.I. es el sievert (Sv), definido como:

$$1 \text{ SV} = 1 \text{ G} \times \text{Q}$$

La unidad antigua es el rem, con  $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{Q}$ . ( $1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv} = 1 \text{ cSv}$ ). En la tabla 1.2 se presentan las cantidades y definiciones expuestas anteriormente.

**Tabla 1.2 Cuadro conceptual de unidades**

Cantidad	Proceso físico	Unidades anteriores	S.I.
Actividad	Desintegración nuclear	Ci	Bq
Exposición	Ionización del aire	R	C/kg
Dosis absorbida	Energía depositada	rad	Gy
Dosis equivalente	Efecto Biológico	rem	Sv

Es común usar los prefijos conocidos, c (centi =  $10^{-2}$ ), m (mili =  $10^{-3}$ ), μ (micro =  $10^{-6}$ ), k (kilo =  $10^3$ ), y M (mega =  $10^6$ ) para indicar submúltiplos o múltiplos de las unidades de radiación. Algunas conversiones útiles son:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Ci} &= 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \times 10^4 \text{ MBq} \\
 1 \text{ mCi} &= 3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = 3.7 \times 10^1 \text{ MBq} = 37 \text{ MBq} \\
 1 \text{ Gy} &= 100 \text{ rad} \\
 1 \text{ cGy} &= 1 \text{ rad} \\
 1 \text{ Sv} &= 100 \text{ rem} \\
 1 \text{ mSv} &= 0.1 \text{ rem} \\
 1 \text{ mSv} &= 0.1 \text{ mrem}
 \end{aligned}$$

## 1.5 Radiaciones

La radiactividad es un estado de la materia en donde los átomos (núcleo) emiten partículas subnucleares o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo (Navarrete, 1979). Cuando un átomo se encuentra en un nivel excitado, el átomo tiende a sufrir cambios para llegar a un estado o nivel de energía más bajo, emitiendo un rayo X característico (rayo  $\gamma$ ) con energía igual a la diferencia entre los dos estados o niveles de energía del átomo (Lamarsh, 1977).

### 1.5.1 Radiaciones no ionizantes.

Las radiaciones no ionizantes son aquellas que no son capaces de sustraer electrones de los átomos de un material. Las radiaciones no ionizantes se clasifican en dos grandes grupos: los campos electromagnéticos y las radiaciones ópticas (García, 1989).

Los campos electromagnéticos se pueden distinguir en aquellos generados por las líneas de corriente eléctrica o por campos eléctricos estáticos. Otros ejemplos son las ondas de radiofrecuencia, utilizadas por las emisoras de radio en sus transmisiones, y las microondas utilizadas en electrodomésticos y en el área de las telecomunicaciones.

Entre las radiaciones ópticas se pueden mencionar los rayos láser, los rayos infrarrojos, la luz visible y la radiación ultravioleta. Estas radiaciones pueden provocar calor y ciertos efectos fotoquímicos al actuar sobre el cuerpo humano (Gálvez, 1984).

### 1.5.2 Radiaciones ionizantes.

Son radiaciones con la energía necesaria para ionizar, es decir, liberar un electrón del átomo, de tal forma que su energía interna se vea alterada con el consecuente desprendimiento de la misma cantidad de energía. Muchos de los autores consultados, tales como Lamarsh, Semat, Wher o Chrien identifican tres principales radiaciones emitidas por los núcleos atómicos que son las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Pero existen un gran número de otras partículas subnucleares inestables, tales como los neutrinos, neutrones, antineutrinos y mesones (Navarrete, 1979).

La **Ley de decaimiento radiactivo** plantea que un átomo al desintegrarse se transforma en otro átomo con distinta configuración electrónica y emite una serie de partículas al mismo tiempo. Si el proceso es rápido, el átomo original dura poco, pronto se agota. Si el proceso es lento, puede durar mucho tiempo, hasta miles de millones de años.

La cantidad  $\lambda$  se llama constante de decaimiento, y es característica de cada elemento y cada tipo de decaimiento. Representa la probabilidad de que haya una emisión en un lapso dado. De acuerdo con la fórmula, para un valor dado de  $N$ , la actividad es mayor o menor en magnitud según si  $\lambda$  es grande o pequeña. (Rickards, 1999). La **actividad**,  $A$ , es el valor esperado del número total de átomos que se desintegra por unidad de tiempo ( $t \ll 1/\lambda$ ), entonces (ICN, 2001)

$$A = \lambda N$$

Por otro lado la actividad al tiempo  $t$  es

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

donde  $A_0$  es la actividad inicial al tiempo  $t = 0$

Inicialmente se utilizó como unidad de actividad el curie (Ci) que corresponde al número de desintegraciones por segundo que ocurren en una masa de 1 g de  $^{226}\text{Ra}$  (un gramo de  $^{226}\text{Ra}$  tiene 0.998 Ci), en la actualidad se usa el bequerel (Bq) que equivale a una desintegración por segundo ( $1 \text{ s}^{-1}$ ), que es la unidad de la actividad en el sistema internacional de medidas (Su equivalencia:  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ )

**El tiempo promedio** es el valor esperado a lo largo del tiempo para que una población inicial  $N_0$  (cantidad de material radiactivo o núcleos radiactivos) decaiga a  $1/e$  de su número original (ICN, 2001).

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

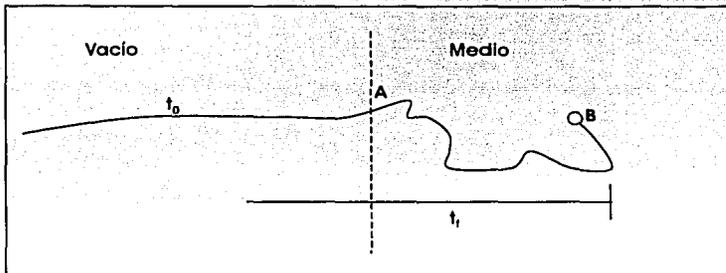
donde  $\tau$  es el tiempo promedio de vida de un núcleo individual desde un tiempo  $t_0$ , hasta que se desintegra a un tiempo  $t$  ( $0 < t - t_0 < \infty$ ).

La **vida media**  $t_{1/2}$ , de una muestra radiactiva es el valor esperado del tiempo requerido para que la mitad del número inicial de núcleos se desintegre (ICN, 2001), y entonces para que la actividad disminuya a la mitad tenemos:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693\tau$$

El **Alcance  $R$**  de una partícula cargada de un tipo y energía dados en un medio específico es el valor esperado de la longitud de trayectoria  $p$  que sigue hasta que llega al reposo. El alcance proyectado  $\langle p \rangle$  de una partícula cargada de un tipo y energía dados en un medio específico es el valor promedio de la mayor profundidad de penetración  $t_f$  de un gran número de partículas en su dirección inicial.

Para partículas cargadas pesadas, es decir con masas mucho mayores que la del electrón, el *alcance* y el *alcance proyectado* son aproximadamente iguales, mientras que para positrones o electrones el alcance proyectado puede tener un valor que va desde aproximadamente la mitad hasta un 95% del alcance total proyectado dependiendo de la energía del electrón y del número atómico del medio absorbente (ICN, 2001).



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.1 Longitud de trayectoria  $p$  y profundidad de penetración  $t_f$ , para una partícula (ICN, 2001)

Las radiaciones  $\alpha$  consisten en dos neutrones asociados con dos protones, pueden ser considerados como núcleos de átomos de Helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. (unidad de masa atómica) y dos cargas positivas (Navarrete, 1979).

La velocidad de las radiaciones alfa se encuentran en el intervalo de 14,000 a 25,000 km/s, dependiendo del emisor de la partícula, por ejemplo el Radio  $^{214}\text{Po}$  emite radiaciones con velocidad de 19,220 km/s (Figura 1.2), lo que corresponde a una energía de 765 MeV. (Coppens, 1963).

Con excepción del  $^{147}\text{Sm}$  así como algunos isótopos artificiales del Au y Hg la emisión  $\alpha$  se presenta en los núcleos más pesados a partir del número atómico 83 existiendo un máximo para la asociación de 85 y 128 neutrones. Las mayores energías de las  $\alpha$  son inferiores a 10 MeV y el límite inferior vale aproximadamente 4 MeV (Rodríguez, 1960).

Los rayos  $\alpha$  son rápidamente absorbidos por pequeños espesores de materia, la radiación de Polonio, por ejemplo, es contenida al atravesar 4 cm de aire. El poder de penetración de las radiaciones  $\alpha$ , es pues, muy débil y habrá que tenerlo en cuenta en las mediciones que se basan en esta relación. El frenado de las partículas  $\alpha$  por la materia se debe a la ionización, la trayectoria de las partículas (rectilíneas) y las características del material que pretende atravesar (Coppens, 1963).

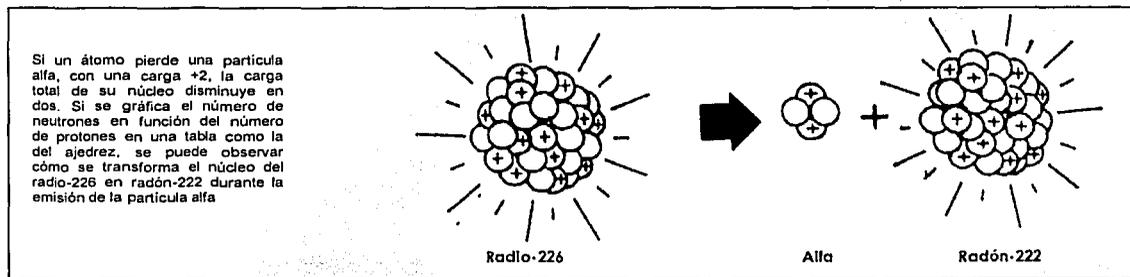


Figura 1.2 Decaimiento  $\alpha$  (Bulbulian, 1996)

Las radiaciones  $\beta$  son parecidas a las radiaciones catódicas, formadas también por electrones, aunque tienen una energía muy superior pues su velocidad se acerca a la de la luz  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/s (Coppens, 1963). Estas partículas son de masas pequeñas (su masa es la del electrón ó sea 1/1832 en relación con el protón) y puede presentar una carga negativa o positiva.

La partícula  $\beta^-$  o negativa es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta su carga positiva (una unidad), al transformarse de neutrón a protón. La partícula  $\beta^+$  o positrón es emitida cuando un protón se transforma en neutrón (Navarrete, 1979). En la Figura 1.3 se presenta un ejemplo de decaimiento  $\beta$ .

Mientras que las partículas  $\alpha$  son detenidas por algunos centímetros de aire o decenas de micrones de aluminio, los rayos  $\beta$  tienen en el aire recorridos del orden de varios metros y en el aluminio varios milímetros (Coppens, 1963), por lo cual son más penetrantes que los rayos  $\alpha$ . Las partículas  $\beta$  sufren sensibles cambios de dirección al pasar por las vecindades de los núcleos y sus trayectorias se presentan en formas sinuosas (Idelfonso, 1983)

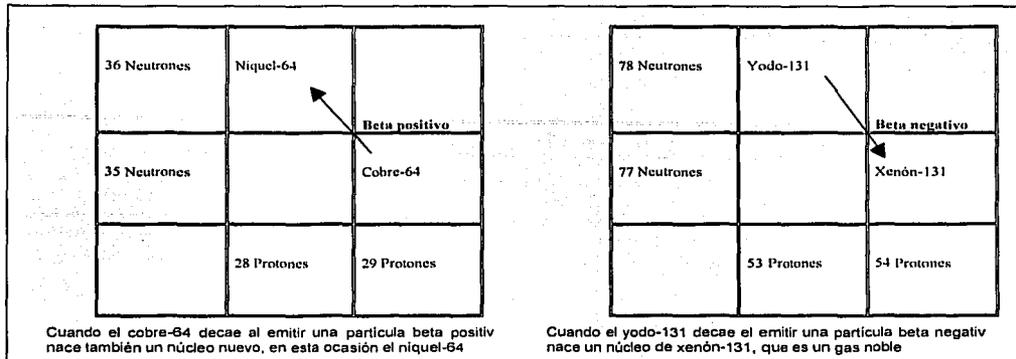


Figura 1.3 Decaimiento  $\beta$  (Bulbullan, 1996)

Las radiaciones  $\gamma$  son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, la luz o las ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda, en consecuencia, tienen mucho mayor energía. Las radiaciones  $\gamma$ , al igual que los rayos X, tienen energías bien definidas, ya que son producidas por la transición entre niveles de energía del núcleo, pero mientras las radiaciones  $\gamma$  son producidas por el núcleo, los rayos X resultan de la transición de los niveles de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. Los rayos  $\gamma$  son a menudo llamados fotones, se consideran como paquetes de energía con valor constante, emitidos por un núcleo radiactivo al decaer (Navarrete, 1979).

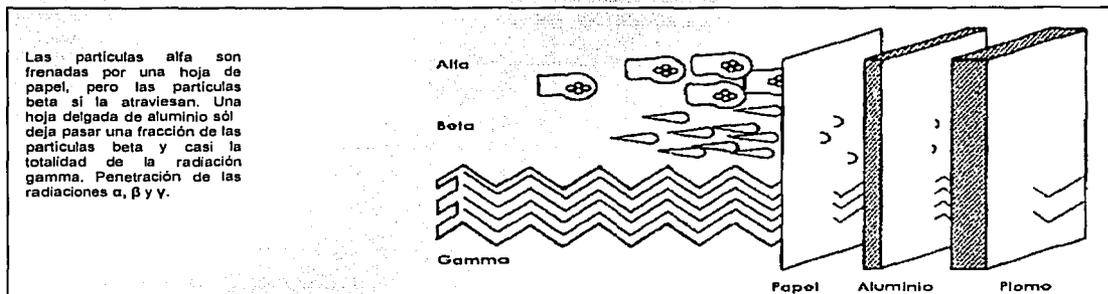


Figura 1.4 Decaimiento  $\beta$  (Bulbullan, 1996)

Las radiaciones  $\gamma$  son mucho más penetrantes que las radiaciones  $\alpha$  o  $\beta$ , no son completamente absorbidas. La disminución de la radiación  $\gamma$  se debe a la producción de pares de iones, el efecto fotoeléctrico y Compton (Coppens, 1963). Los rayos gamma, en la mayoría de los casos, acompañan a la emisión de partículas alfa o beta y acarrean el exceso de energía que tiene el núcleo después de su decaimiento. Cuando un átomo emite un rayo gamma (sin carga), se altera su contenido energético pero no cambia el número de partículas, de modo que continúa siendo el mismo elemento y no cambia su posición en el tablero de ajedrez utilizado anteriormente (Brandan, 1995).

## 1.6 Usos de la radiación

El primer uso de isótopos radiactivos con fines experimentales se realizó en Austria en 1913, justamente diez años después de la concesión del Premio Nobel a Henry Becquerel y Marie Curie por el descubrimiento de la Radiactividad. Fue concretamente el físico George Charles de Hevery quien utilizó un isótopo de plomo ( $^{210}\text{Pb}$ ) para estudiar la solubilidad del sulfato y cromato de plomo. Con el ciclotrón a principios de la década de los treinta y el posterior desarrollo de los reactores nucleares en la década de los cincuenta comienza la fabricación industrial de isótopos radiactivos. Las aplicaciones de los isótopos radiactivos son múltiples y abarcan distintos campos como la industria, medicina e investigación.

En cualquiera de estos campos se utilizan los isótopos para múltiples funciones tales como: medida de caudales, prospecciones mineras, control de contaminación de aguas, elaboración de radiofármacos, estudios y análisis citológicos, investigación bioquímica, radiodiagnóstico, tratamiento del cáncer, y muchos otros (Navarrete, 1979).

Muchas de las técnicas que a continuación se mencionan utilizan trazadores como instrumento clave de estudio. Los Trazadores son sustancias radiactivas que se introducen a determinados sistemas o procesos. Luego se detecta la trayectoria de la sustancia gracias a su emisión radiactiva, lo que permite investigar diversas variables propias del sistema. Entre otras variables, se pueden determinar caudales de fluidos, filtraciones, velocidades en tuberías, dinámica del transporte de materiales, cambios de fase de líquido a gas, velocidad de desgaste de materiales, etc. (Brandan, 1995).

### 1.6.1 Agricultura y alimentación

Las radiaciones pueden usarse para esterilizar sexualmente a los insectos. Cuando los insectos se crían en masa y se esterilizan en laboratorios, procediéndose luego a liberarlos entre la población silvestre, las hembras que se acoplen con machos esterilizados no tendrán descendencia. Este método, llamado técnica de los insectos estériles (TIE), se ha empleado exitosamente para controlar o erradicar plagas de insectos peligrosos que causan pérdidas sustanciales de productos alimenticios y de origen animal.

La técnica se ha desarrollado en los laboratorios de Seibersdorf del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). En varios países se han construido instalaciones para la cría en masa de moscas de la fruta y moscas tsé-tsé según los métodos desarrollados en esos laboratorios. La campaña más exitosa de la TIE erradicó el gusano barrenador del ganado del Nuevo Mundo en el sur de los Estados Unidos, en la mayor parte del territorio de México y en las islas de Puerto Rico y Curazao. Esa erradicación exitosa permite a los ganaderos, si se cuenta solo a los de los Estados Unidos, un ahorro anual de 378 millones de dólares de ese país. La TIE constituirá el componente de erradicación del programa recientemente iniciado para la erradicación del gusano barrenador del Nuevo Mundo en África septentrional. Esa técnica también se ha usado en proyectos para erradicar exitosamente la mosca mediterránea de la fruta en México y contra varias plagas de moscas tsé-tsé en Nigeria (AIEA, [www.iaea.or.a](http://www.iaea.or.a))

### 1.6.2 Hidrología

El estudio y monitoreo de isótopos radiactivos de oxígeno e hidrógeno presentes en el agua y de elementos contenidos en ciertas sales disueltas, permiten registrar con exactitud los fenómenos que influyen en la existencia y movimiento del agua en todas sus formas (hielo, gas o líquido). Se monitorea su trayectoria, velocidad y tiempo haciendo posible caracterizar, medir corrientes de agua de lluvia, de nieve; caudales de ríos, fugas en embalses, canales, dinámica de lagos y depósitos. En estudios de aguas subterráneas es posible medir los caudales de las napas, identificar el origen de las aguas subterráneas, su edad, velocidad, dirección, flujo, relación con aguas superficiales, conexiones entre acuíferos, porosidad y dispersión de acuíferos. (Comisión Chilena de Energía Nuclear, <http://www.cchen.cl/>)

### 1.6.3 Medicina

En la Medicina nuclear se ha extendido con gran rapidez el uso de materiales radiactivos como agentes terapéuticos y de diagnóstico. En el diagnóstico se utilizan radiofármacos para diversos estudios de, tiroides, hígado, riñón, metabolismo, circulación sanguínea, corazón, pulmón, tracto gastrointestinal. En terapia médica con las técnicas nucleares se puede combatir ciertos tipos de cáncer, con frecuencia se utilizan tratamientos mediante irradiaciones con rayos gamma provenientes de fuentes de  $^{60}\text{Co}$ , así como también, esferas internas radiactivas, agujas e hilos de  $^{60}\text{Co}$ . Combinando el tratamiento con una adecuada y prematura detección del cáncer, se obtienen terapias con exitosos resultados. En la Tabla 1.3 se enlistan algunos de los radionúclidos usados en el área de la medicina.

Se han elaborado radiovacunas para combatir enfermedades parasitarias del ganado y que afectan la producción pecuaria en general. Los animales sometidos al tratamiento soportan durante períodos más largos sin infectarse de nuevo, peligro siempre latente en su medio natural. (CIMN, <http://www.icnmp.edu.mx/TEXTOS/mednuclmo1.html>)

**Tabla 1.3 Isótopos usados en medicina (Clavijo, Molina, 2000)**

Isótopo	Aplicaciones
$^{60}\text{Co}$	Es un emisor de rayos gamma; estos rayos se usan para destruir células cancerígenas. El haz de rayos gamma se dirige al centro del tumor para disminuir los daños a tejidos sanos.
$^{131}\text{I}$	El paciente ingiere el yodo; este isótopo se usa para tratar el cáncer de tiroides. La glándula tiroidea absorbe el yodo.
$^{123}\text{I}$	Es una fuente intensa de rayos gamma que no emite partículas dañinas tipo beta; muy eficaz para obtener imágenes de las glándulas tiroideas.
$^{99}\text{Tc}$	Emisor de rayos gamma; se inyecta en el paciente y este isótopo se concentra en los huesos, de ahí que sea usado en radiodiagnóstico de huesos.

El radiodiagnóstico es un método y procedimiento de gran sensibilidad utilizado para realizar mediciones de hormonas, enzimas, virus de la hepatitis, ciertas proteínas del suero, fármacos y variadas sustancias. El procedimiento consiste en tomar muestras de sangre del paciente, donde con posterioridad se añadirá algún radioisótopo específico, el cual permite obtener mediciones de gran precisión respecto de hormonas y otras sustancias de interés. También se utilizan ciertos tipos de fármacos radiactivos que permiten estudiar, mediante imágenes bidimensionales (centelleografía) o tridimensionales (tomografía), el estado de diversos órganos del cuerpo humano.

De este modo se puede examinar el funcionamiento de la tiroides, el pulmón, el hígado y el riñón, así como el volumen y circulación sanguíneos.

También, se utilizan radiofármacos como el Cromo ( $^{51}\text{Cr}$ ) para la exploración del bazo, el Selenio ( $^{75}\text{Se}$ ) para el estudio del páncreas y el Cobalto ( $^{57}\text{Co}$ ) para el diagnóstico de la anemia. (CIMN, <http://www.icnmp.edu.mx/TEXTOS/mednuclmol.html>)

#### **1.6.4 Energía eléctrica**

La energía de las fisiones nucleares producidas al interior de los reactores nucleares por medio de Uranio calientan el agua que se encuentra en la superficie exterior de éstos. El agua en forma de vapor se canaliza a las turbinas que impulsan el generador donde se produce la electricidad. (CFE, 1997) Las centrales nucleares aportan ya alrededor del 17% del total de la electricidad en el mundo. Prácticamente no producen emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) ni óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Al menos cinco países, entre los que se cuentan Francia, Suecia y Bélgica, obtienen más del 50% de sus suministros totales de electricidad de la energía nucleoelectrónica. Otros diez países, incluidos España, Finlandia, el Japón, la República de Corea y Suiza, producen en centrales nucleares el 30% o más de sus suministros totales. Además, un gran número de naciones en desarrollo, incluidas la Argentina, el Brasil, China, la India, México y el Pakistán, tienen centrales nucleares en servicio. Actualmente hay en el mundo más de 430 reactores en funcionamiento que producen aproximadamente tanta electricidad como la que proviene de la energía hidroeléctrica (AIEA, [www.iaea.org](http://www.iaea.org))

#### **1.6.5 Ambiente**

En esta área se utilizan técnicas nucleares para la detección y análisis de diversos contaminantes del ambiente. La técnica más conocida recibe el nombre de Análisis por Activación Neutrónica, esta basada en los trabajos desarrollados en 1936 por el científico húngaro J. G. Hevesy, Premio Nobel de Química en 1944. La técnica consiste en irradiar una muestra, para obtener posteriormente los espectros gamma emitidos, procesando la información con ayuda de computadoras e identificando los elementos presentes en la muestra y las concentraciones de los mismos.

Una serie de fenómenos del comportamiento de contaminantes se han podido estudiar mediante el uso de radiositopos, tales como las emisiones de bióxido de azufre, las descargas gaseosas a nivel del suelo, en derrames de petróleo, en desechos agrícolas, en contaminación de aguas y en el smog generado en las ciudades. (Comisión Chilena de Energía Nuclear, <http://www.cchen.cl/>)

#### **1.6.6 Industria e investigación**

Imágenes: Es posible obtener imágenes de piezas con su estructura interna utilizando radiografías con base en rayos gamma o bien con un flujo de neutrones. Estas imágenes reciben el nombre de Gammagrafía y Neutrografía, respectivamente, y son de gran utilidad en la industria como método no destructivo de control de calidad. Con estos métodos se puede comprobar la calidad en soldaduras estructurales, en piezas metálicas fundidas, en piezas cerámicas, para análisis de humedad en materiales de construcción, etc. (Brandan, 1995).

Determinación de Fechas: Se emplean técnicas isotópicas para determinar la edad en formaciones geológicas y arqueológicas. Una de las técnicas utiliza el  $^{14}\text{C}$ , consiste en determinar la cantidad de dicho isótopo contenida en un cuerpo orgánico. La radiactividad existente, debida a la presencia de  $^{14}\text{C}$ , disminuye a la mitad cada 5730 años, por lo tanto, al medir con precisión su actividad se puede inferir la edad de la muestra (FINE, 2001).

Investigación: Utilizando haces de neutrones generados por reactores, es posible llevar a cabo diversas investigaciones en el campo de las ciencias de los materiales. Por ejemplo, se puede obtener información respecto de estructuras cristalinas, defectos en sólidos, estudios de monocristales, distribuciones y concentraciones de elementos livianos en función de la profundidad en sólidos, etc. (FINE, 2001).

### 1.7 Residuos radiactivos

De acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico en México un residuo se define como “cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, uso o tratamiento; cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso que lo generó” Se considera que un radionúclido es una sustancia que emite espontáneamente partículas o radiación electromagnética, o que se fisiona espontáneamente. Ahora bien un residuo que se genera en actividades de contacto con materiales radiactivos o mejor dicho “Cualquier material del que no se tenga previsto uso alguno, y que contenga o esté contaminado con radionúclidos a concentraciones o niveles de radiactividad mayores a los señalados por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias” se puede considerar como un residuo radiactivo (NOM-004-NUCL-1994). En la Tabla 1.4 se exponen los criterios para su clasificación.

**Tabla 1.4 Criterios para elaborar la clasificación de los residuos radiactivos (NOM-004-NUCL-1994)**

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Las concentraciones de los radionúclidos de vida media larga (y sus precursores de vida media corta) de los que pueda persistir un peligro potencial después de que el control institucional, forma del desecho y métodos de almacenamiento definitivo dejan de ser efectivos.</li> <li>b) La concentración de los radionúclidos de vida media corta, para los cuales los requerimientos como control institucional, forma del desecho y métodos de almacenamiento son efectivos.</li> <li>c) El origen y los constituyentes químicos, biológicos y radiactivos que representan un riesgo radiológico para la población y el ambiente, y aquellos que son considerados como peligrosos.</li> </ul> |
|--|

Los residuos radiactivos se deben de manejar con controles muy estrictos debido a su peligrosidad en el ambiente, y esto comienza desde la actividad en la que fue utilizado el material radiactivo.

### 1.8 Clasificación de los residuos radiactivos

La clasificación de los residuos radiactivos es necesaria para establecer criterios y requisitos, con el fin de efectuar de manera segura las operaciones de manejo, tratamiento, acondicionamiento, transporte y almacenamiento temporal y definitivo de los mismos. Esta clasificación se fundamenta en la concentración, la actividad, la vida media y el origen de los radionúclidos existentes en los desechos. Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), los desechos radiactivos se pueden considerar como cualquier material que contenga concentraciones de radionúclidos mayores que los permitidos por la autoridad de cada país, y que ya no se les encuentre ninguna utilidad. Debido a los distintos usos nucleares, las cantidades, tipos e incluso las forma física de los residuos radiactivos se complica tener criterios generales en la clasificación. Considerando que existen tres tipos en general de residuos, los residuos de baja actividad, los de media actividad y los de alta actividad, separando los primeros por sus vidas medias menores a 30 años, los segundos con vidas medias mayores a 30 años y los últimos con vidas medias mayores a 300 años.

- a) Nivel de actividad alto: Proceden de los elementos de combustible gastados, que se extraen del reactor, y se almacenan temporalmente en una piscina de agua (tanque de enfriamiento y contención de material radiactivo), situada dentro de la central nuclear, y construida de hormigón, con paredes de acero inoxidable, de tal forma que no se escape la radiación. Una vez que la piscina se llena (que puede tardar décadas), los residuos se sacan de la piscina, y se almacenan bajo tierra, profundamente, en minas excavadas, con formaciones salinas para mantenerlos aislados de la humedad, y metidos en bidones blindados con material anticorrosivo. Este es el lugar definitivo, donde se guardarán durante cientos o incluso miles de años.
- b) Nivel de actividad medio: Son generados por radionúclidos liberados en el proceso de fisión en cantidades muy pequeñas, muy inferiores a las consideradas peligrosas para la seguridad y protección de las personas. Los residuos son solidificados dentro de bidones de acero, utilizando cemento, alquitrán o resinas.
- c) Nivel de actividad bajo: Generalmente, son las ropas y herramientas que se utilizan en el mantenimiento de las tareas realizadas con materiales radiactivos de mayor actividad. Se desechan después de ser prensados mezclados con hormigón, de tal forma que se haga un bloque sólido, son introducidos en bidones de acero.

En la siguiente Tabla se presentan las distintas clasificaciones elaboradas en países europeos.

**Tabla 1.5 Clasificaciones en Europa de residuos radiactivos (FINE, 2001)**

Propuesta de clasificación de la Unión Europea	Clasificación en España
1) Residuos radiactivos de transición.	a) Residuos de baja y media actividad.
Residuos, principalmente de origen médico, que se desintegran durante el periodo de almacenamiento temporal, pudiendo a continuación gestionarse como residuos no radiactivos, siempre que se respeten unos valores de desclasificación.	Tienen actividad específica baja por elemento radiactivo, no generan calor, contienen radionúclidos emisores beta-gamma con vida media inferior a 30 años, lo que quiere decir que reducen su actividad a menos de la milésima parte en un periodo máximo de 300 años. Su contenido en emisores alfa debe ser inferior a 0.37 GBq/ton. (0,01 curies / tonelada en promedio)
2) Residuos de baja y media actividad.	b) Residuos de alta actividad
Su concentración en radionúclidos es tal que la generación de energía térmica durante su evacuación es suficientemente baja. Residuos de vida corta. Residuos radiactivos que contienen núclidos cuya vida media es inferior o igual a la del Cs- 137 y el Sr-90 (treinta años, aproximadamente), con una concentración limitada de radionúclidos alfa de vida larga (4.000 Bq/g en lotes individuales de residuos y a una media general de 400 Bq/g en el volumen total de residuos), y residuos de vida larga. Radionúclidos y emisores alfa de vida larga cuya concentración es superior a los límites aplicables a los residuos de vida corta	Los radionúclidos contenidos en los residuos de alta actividad tienen una vida media superior a 30 años, conteniendo radionúclidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables por encima de 0.37 GBq/ton (0.01 Ci/ton), que generalmente desprenden calor.
3) Residuos de alta actividad.	
Residuos con una concentración tal de radionúclidos que debe tenerse en cuenta la generación de energía térmica durante su almacenamiento y evacuación. Este tipo de residuos se obtiene principalmente del tratamiento / acondicionamiento del combustible gastado en reactores nucleares.	

Como se puede comprobar, las medidas de seguridad para prevenir posibles fugas radiactivas, son muy altas, evitando así, que se produzca un accidente radiactivo. La radiación que puede llegar a liberarse, es por tanto muy baja, prácticamente nula (CEPB, 2000).

### 1.9 Peligros de la energía nuclear

Las partículas alfa, debido a su masa relativamente grande, y su carga doblemente positiva, pierden rápidamente su energía en el medio que atraviesan; por ello, el alcance de estas partículas es muy corto. Una partícula alfa de 4 MeV tiene un alcance, dentro de los tejidos, de sólo unas cuantas centésimas de milímetro, y viaja en el aire 3 cm como máximo. De acuerdo con esto, las partículas alfa no ofrecen un gran riesgo de radiación externa; sin embargo, al interior del organismo representan un peligro enorme si se depositan en un órgano vital. Causan gran daño por sus energías altas (de 4 a 9 MeV), y por su alta ionización específica; además, el daño relativo en el tejido es alrededor de 20 veces mayor que el producido por las radiaciones beta y gamma (Sánchez, 1998).

Los efectos que la radiación produce en los organismos se divide en cuatro grupos principales: 1) Los que producen cáncer; 2) Las mutaciones genéticas; 3) Los efectos en los embriones durante el embarazo y; 4) Las quemaduras por exposiciones excesivas. Los primeros dos grupos generalmente suceden cuando las dosis recibidas son pequeñas, pero prolongadas. El tercero, se presenta en organismos susceptibles o en etapas de la vida humana donde el organismo es especialmente sensible (reproducción de células a ritmo acelerado). El cuarto sucede en accidentes o en explosiones nucleares con exposiciones excesivas que pueden causar quemaduras y muerte de inmediato o en unos cuantos días.

**Tabla 1.6 Formas de penetración de radiaciones en el organismo (Sánchez, 1998)**

Inhalación	<p>La inhalación de aerosoles radiactivos es una de las formas principales de penetración al organismo. La absorción, retención y eliminación del material transportado hasta los pulmones depende del tamaño de la partícula del material inhalado, la solubilidad del compuesto inhalado y el ritmo respiratorio del individuo; factores que forman un problema muy complejo.</p>
Ingestión	<p>El porcentaje de absorción en el torrente sanguíneo de un elemento radiactivo administrado por vía oral, depende de su estado físico y químico. Una gran proporción del material ingerido se excreta rápidamente por las heces, pero la radiación que recibe el intestino, por su paso, aun en muy pequeña cantidad, debe considerarse como altamente tóxica y de gran peligrosidad.</p>
Cutánea	<p>Los materiales radiactivos también pueden penetrar al torrente sanguíneo, ya sea a través de la piel misma o por medio de abrasiones, cortes o piquetes. De ahí que todas las personas, al trabajar con un elemento radiactivo, deben utilizar métodos apropiados y ropa protectora para evitar contacto con la piel.</p>

El cáncer se produce cuando una célula recibe suficiente radiación como para cambiar su constitución genética, dando lugar a una reproducción desmedida y sin control del código genético original (tumores). La radiación también puede provocar cáncer en la sangre, presentándose crecimiento anormal (en gran cantidad) de glóbulos blancos (leucemia). Si una radiación daña casualmente a un óvulo o a un espermatozoide fértil, los efectos no serán observados en el individuo irradiado, sino en su prole, y tal vez después de la primera generación debido a cambios a nivel ADN o información genética del individuo. Los embriones son más sensibles a la radiación cuanto menos tiempo de vida tienen, porque su crecimiento es más acelerado. Por eso una mujer embarazada debe evitar recibir radiación hasta donde sea posible (Rickards, 1999).

### 1.10 Efectos a la salud

En el caso de la afectación a individuos fuera de las actividades con materiales radiactivos, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha recomendado, para individuos o ciudadanos comunes que no reciben dosis radiactivas periódicas, los límites son iguales a 5 mSv anuales, que equivale a la décima parte de lo que se recomienda para los trabajadores que tienen contactos periódicos con material radiactivo (Brandan, 1995).

Los efectos inmediatos de la radiación, como se muestra en la Tabla 1.7, pueden aparecer poco después de la exposición mediante un síndrome denominado enfermedad de la radiación, caracterizado por náuseas, vómitos, pérdida de apetito y cefalea. Estos síntomas se han atribuido a cambios de los sistemas enzimáticos de las glándulas suprarrenales. Los efectos a largo plazo pueden resultar de exposiciones agudas o prolongadas. Las primeras son muy raras y las segundas, las más comunes en situaciones de paz mundial, tienen efectos que han sido más conocidos y estudiados. Entre ellos se menciona la carcinogénesis, pues la exposición a la radiación aumenta en el hombre la incidencia de cierto tipo de cáncer y una disminución significativa de la esperanza de vida.

**Tabla 1.7 Efectos probables de la irradiación total del organismo (Rickards 1999)**

Dosis ligera		Dosis moderada		Dosis semimortal	Dosis mortal
0 - 0.25 Sv	0.50 Sv	1.00 Sv	2.00 Sv	4.00 Sv	6.00 Sv
0 - 25 rem	50 rem	100 rem	200 rem	400 rem	600 rem
Ningún efecto clínico detectable.	Ligeros cambios pasajeros en la sangre.	Náuseas y fatiga con posibles vómitos	Náuseas y vómitos en las primeras 2-4 horas.	Náuseas y vómitos al cabo de 1-2 horas.	Náuseas y vómitos al cabo de 1-2 horas.
Probablemente ningún efecto diferido.	Ningún otro efecto clínicamente detectable.	Alteraciones sanguíneas marcadas con restablecimiento diferido.	Un período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito, debilidad general y otros síntomas como irritación de garganta y diarrea	Tras un período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito y debilidad general con fiebre.	Corto período latente a partir de la náusea inicial.
	Posibles efectos diferidos, pero muy improbables efectos graves en un individuo medio.	Probable acortamiento de la vida.	Posible fallecimiento al cabo de 2-6 semanas de una pequeña fracción de los individuos irradiados.	Inflamación grave de boca y garganta en la tercera semana.	Diarrea, vómitos, inflamación de boca y garganta hacia el final de la primera semana.
			Restablecimiento probable de no existir complicaciones a causa de poca salud anterior o infecciones.	Síntomas tales como palidez, diarrea, epistaxis y rápida extenuación hacia la 4a. semana.	Fiebre, rápida extenuación y fallecimiento incluso en la 2a. semana.
				Algunas disfunciones a las 2-6 semanas. Mortalidad probable de 50%.	Finalmente, fallecimiento probable de todos los individuos irradiados.

Del estudio de efectos en animales se ha demostrado la producción de mutaciones genéticas y una reducción del promedio de vida cercano a 7% por cada mil R. Además, la sensibilidad a la dosis de radiación es diferente para cada especie animal; por ejemplo, el ratón resiste dosis de radiación diez veces más altas que la mosca de la fruta, para que se manifieste en ellos un efecto mutagénico. (Sánchez, 1998).

### 1.11 Accidentes nucleares

Los primeros accidentes con material radiactivo, tales como el ocurrido en 1979 (28 de Marzo) en la central nuclear de Three Mile Island, en las afueras de Harrisburg, Pensilvania, una disfunción menor condujo a una serie de errores, parando el sistema de enfriamiento (Principal y de emergencia), provocando la pérdida total del reactor por fundición, aunque no se provocaron daños fuera de la estructura de la planta nuclear. En el Anexo 2 se encuentra información mas detallada de los accidentes y pruebas más importantes en la Tierra.

El accidente más importante hasta la actualidad es el ocurrido el 25 de abril en la central nuclear de Chernobyl a 150 km de la Ciudad de Kiev en la entonces Unión Soviética, se presentó una falla humana durante una experimentación con los reactores. El laboratorio de Livermore, en California, estimó que se vertieron a la atmósfera 800 millones de curies de  $^{131}\text{I}$  y aproximadamente 6 millones de  $^{137}\text{Cs}$ , así como grandes cantidades de  $^{90}\text{Sr}$  y  $\text{Pu}$ . En la primera semana el polvo radiactivo llegó a Polonia, Dinamarca, Rumania, Hungría, Suecia, Noruega, Austria, el sur de Alemania, el norte de Italia, Bulgaria y al norte de Grecia. Como ejemplo, en Polonia, donde la radiación normal es de entre 10 y 15 Bq, se llegó a medir concentraciones entre 3000 y 6000 Bq. (Jiménez, 2001)

En México, durante el año 2002 se presentaron algunos incidentes que la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias ha contenido, sin daños al ambiente o al personal (Jiménez, 2001). En febrero del 2000 dicha comisión atendió una llamada telefónica informando la existencia, en un basurero, de cuatro latas con el símbolo de radiación, indicando que contenían el radioisótopo  $\text{Ta}^{201}$ , posteriormente se procedió a la retención de estas latas junto con la documentación encontrada para investigar su procedencia.. Después una empresa usuaria de material radiactivo de radiografía industrial, reportó en mayo que una fuente de  $\text{Co}^{60}$  con actividad de 41 Ci se desprendió.

Una empresa usuaria de material radiactivo reportó en junio de 2000 que un equipo medidor de compactación y humedad de suelos había sido aplastado por un camión en el domicilio del usuario, sin ninguna consecuencia para el personal ocupacionalmente expuesto, público o medio ambiente. El equipo fue enviado posteriormente al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares para su desecho definitivo. Otra empresa de radiografía industrial móvil, reportó en septiembre que trabajando en una plataforma petrolera se desprendió el conector de una fuente con el chicote impulsor, la fuente fue recuperada. Y por último una empresa usuaria de radiografía industrial móvil de Monterrey, informó en diciembre que durante el trabajo con una fuente de  $^{192}\text{Ir}$  el conector de la misma se desprendió del chicote impulsor, posteriormente la fuente fue recuperada.

## Capítulo 2

### MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS RADIACTIVOS EN EL AMBITO INTERNACIONAL

Se considera que la generación de residuos radiactivos en el mundo es un problema de grandes magnitudes y por tanto existen organismos internacionales, como el Organismo Internacional de Energía Atómica (Internacional Atomic Energy Agency, IAEA), que controlan y recopilan toda la información en cuanto a la producción de materiales y generación de residuos radiactivos con fines bélicos y pacíficos. Sin embargo, es difícil encontrar esta información por tratarse de documentos considerados por los países del mundo como de seguridad nacional. Considerando los datos referentes a los países pertenecientes a la OCDE, se obtiene una producción total de 9 mil millones de toneladas por año de residuos sólidos, además de billones de toneladas de contaminantes líquidos y gaseosos. De estos nueve mil millones, de toneladas, aproximadamente 420 millones corresponden a residuos municipales, 1500 millones corresponden a residuos generados en procesos industriales (de los que unos 300 millones son tóxicos) y unos 7 mil millones proceden tanto de la producción energética por diversas fuentes, como de la agricultura, minería, demolición y productos resultantes de operaciones de dragado y depuración.

En el caso de los países miembros de la Unión Europea, la generación anual, expresada en metros cúbicos es, aproximadamente: mil millones de residuos agrícolas, 20 millones de peligrosos y 80 mil de radiactivos de los que 150 metros cúbicos son de alta radiactividad.

Globalmente, los residuos radiactivos constituyen menos del 1% del total de los residuos tóxicos generados siendo este porcentaje del 0,6 por mil en el caso de los de alta actividad. Este porcentaje varía ligeramente en función del número de centrales nucleares en operación y por tanto en función del peso de la generación nuclear de energía, en el contexto global de producción de electricidad utilizada en cada país. Así, por ejemplo, en países como Francia, que presentaba una potencia nuclear neta instalada en 1995 de 62.2 GWe, la producción de residuos radiactivos es más relevante, en relación con el total, que en países como España, donde la potencia nuclear neta instalada a finales de 1995 correspondió a 7.1 GWe.

Debido a la peligrosidad de los residuos radiactivos y al grado de preocupación pública hacia este tema, muy superior al existente para otros residuos tóxicos que son igualmente peligrosos, la gestión de los residuos radiactivos se efectúa hoy de manera independiente dentro del contexto general de la gestión de los residuos peligrosos. Estos dos factores (radiotoxicidad y preocupación pública) han dado lugar a un amplio desarrollo de todo tipo de tecnologías, en lo que se refiere a su gestión y regulación, abarcando tanto los aspectos de responsabilidad, como lo referente al control de la producción, tratamiento y aislamiento del medio ambiente. (Cofis, 2000)

## 2.1 Manejo de residuos radiactivos

El uso de material radiactivo en forma de fuentes abiertas, requiere de un plan de acción que ayude a minimizar las materiales de desecho al final del ciclo de vida. Una vez generados los desechos radiactivos se debe evitar: 1) su dispersión en las áreas de trabajo; a fin de evitar dosis laborales de exposición que rebasen los límites permitidos, 2) un aumento en las liberaciones al ambiente, 3) las deficiencias en las trayectorias de transporte de residuos.

En México la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias establece que los residuos radiactivos se pueden segregar o dividir de acuerdo a su actividad en :

- Desechos radiactivos de Nivel Bajo: Clase A, Clase B y Clase C.
- Desechos radiactivos de Nivel Intermedio.
- Desechos radiactivos de Nivel Alto.
- Desechos mixtos.
- Jales de uranio y torio.

Estableciendo una serie de criterios de acuerdo a las tablas establecidas en la Norma Oficial Mexicana, NOM-004-NUCL-1994, que proporciona los criterios para distinguir los distintos radionúclidos con sus respectivos límites de concentración y que de acuerdo a sus actividad específica podrán clasificarse en alguna de las categorías anteriores.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) en México tiene lineamientos claros que contribuyen a establecer los requerimiento mínimos en el manejo de materiales y desechos radiactivos al interior de las instalaciones que, por sus actividades, tienen forzosamente que utilizarlos. Es así como plantea que los residuos dentro de estas instalaciones deben tener un seguimiento estricto a fin de tener controles precisos de las actividades y ciclo de vida que pueda tener el material y el residuo en la instalación, evitando así posibles actividades riesgosas y residuos innecesarios. Para lo cual se recomienda el uso de registros de uso y manejo de los materiales y residuos, desde el punto de adquisición hasta el punto de disposición final, controlando las entradas y salidas de los materiales y si es posible estableciendo los balances de materiales necesarios.

Es necesario que las instalaciones tengan un programa para la gestión de los desechos radiactivos, garantizando:

- Una organización
- Personal capacitado
- Minimización de la generación de los desechos radiactivos.
- Segregación eficiente de los desechos radiactivos.
- Nula liberación de materiales contaminados con radionúclidos fuera de los límites establecidos.

La CNSNS también establece la ayuda de material de control, como bolsas de color específico, registros claros en las áreas claves, tales como los puntos de entrada a la instalación o el almacén de entrada y salida del material radiactivo.

La reglamentación en cuanto a la segregación de los residuos con criterios bien definidos como en los casos de  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  y emisores alfa que deben segregarse y colocarse en contenedores por separado y de forma exclusiva, o la necesidad de segregación por tiempo de vida media y tipo de radionúclido, por su estado físico, entre otros. Dentro del almacén se recomienda que los residuos que se depositen

exclusivamente materiales radiactivos, utilizando otros sitios para el almacenaje de residuos de sustancias químicas y/o con características biológico-infecciosas. Los materiales combustibles y/o inflamables no deben colocarse (por ningún motivo) en el almacén de materiales radiactivos y preferentemente deben estar alejados del este sitio.

En cuanto a los residuos que se liberan al ambiente, la CNSNS plantea que los residuos deben apegarse a los valores límite establecidos en la NOM-006-NUCL-1994 (ver inicio del capítulo) que establece los límites anuales para grupos críticos, dando los criterios para el establecimiento de límites de exposición. Ayudando a establecer los residuos que pueden ser liberados y los que deben ser confinados por períodos de tiempo mayores, o utilizar algún tratamiento que permita bajas exposiciones para el ambiente y las personas de mayor riesgo laboral.

La Comisión Reguladora Nuclear en Estados Unidos (Nuclear Regulatory Comisión, NRC) separa los residuos en dos grupos; menores y mayores de 300 años. Sin embargo, su legislación los delimita en residuos radiactivos de baja actividad de clase "A" (< 100 años), los residuos de clase "B" (<300 años), los residuos de clase "C" (<500 años) y los de alta actividad (> 500 años). La clasificación también depende de la concentración, del período y los tipos de isótopo radiactivo que contienen, la Comisión fija los requisitos para empaçar y disponer cada clase de residuo.

Los residuos con actividad y vida media baja considerados en la legislación estadounidense como *clase "A"* llegan a representar cerca del 95 por ciento en volumen de todos los residuos generados en esa nación (EUA) y más del 90 % de los residuos generados en Argentina. Las clases "B" y "C" contienen mayor actividad (la actividad depende del isótopo o mezcla de isótopos), vidas medias más largas pero sin sobrepasar los 500 años

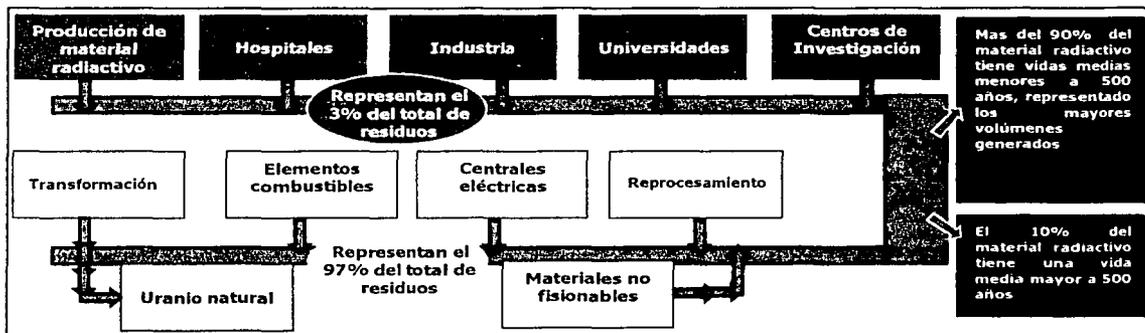


Figura 2.1 Ciclo de vida del material radiactivo

La Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina refiere que los residuos de baja y media actividad son aquellos que contienen material radiactivo con tiempos de vida media relativamente cortos y con una actividad baja o media. Estas características hacen que el máximo tiempo que debe asegurarse un residuo antes de su liberación al ambiente, sea de unos 50 ó 60 años para los residuos de baja actividad, y de unos 300 años para los de media actividad, lapso compatible con la experiencia humana y su historia.

Así también plantea que los residuos de alta actividad son los que contienen material radiactivo con vidas medias mayores a 30 años y que en algunos casos su decaimiento se lleva a cabo en miles de años. Ello obliga a asegurar el control de su dispersión en el ambiente durante centenas de miles de años, lo que constituye un gran desafío tecnológico.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) plantea que las instalaciones nucleoelectricas producen cerca de 200,000 m<sup>3</sup> de residuos de baja actividad con vidas medias largas, mientras que generan cerca de 10,000 m<sup>3</sup> de residuos de alta actividad (combustible gastado) cada año en todo el mundo. Este organismo explica también que el uso de radioisótopos en los centros de investigación, universidades, compañías industriales y la medicina son volúmenes comparativamente altos de sustancias compresibles o combustibles tales como plástico, ropa de papel y de protección, objetos metálicos pequeños o cristalería machacada, equipo usado, filtros de aire, entre otros. Por consiguiente, este tipo de residuos tiene particularmente una composición muy heterogénea, que se generan de las fuentes pero no directamente de los radioisótopos.

Los desechos radiactivos de la investigación, industria y medicina se almacenan como residuos primarios o se tratan y se depositan en envases adecuados según sus características. Este tipo de residuos se genera en cantidades relativamente bajas, Alemania está cerca de 3 por ciento del total. Los radionúclidos de especial cuidado son tritio, cobalto 60, carbono 14, yodo 121 y cesio 137. Pueden clasificarse como desechos radiactivos que generan bajas cantidades de calor. Sin embargo, hay una gran cantidad de establecimientos que generan estos residuos, y para la mayoría de ellos, el ocuparse de su desecho no es tarea fundamental. El accidente en Goiânia en Brasil en septiembre de 1987, cuando una fuente cerrada de <sup>137</sup>Cs fue extraída de una máquina de teleterapia de una clínica abandonada, lo que dio lugar a la muerte de cuatro personas y la generación de casi 3500 metros cúbicos de residuos radiactivos. (IAEA, 1991)

## 2.2 La gestión de los residuos radiactivos

Si la vida media de los radioisótopos o sus residuos es del orden de algunas semanas, como ocurre habitualmente en las aplicaciones médicas o los residuos generados en los centros de investigación, estos radioisótopos en pocas semanas o meses habrán decaído a niveles inofensivos desde el punto de vista radiológico y podrán ser tratados como residuos convencionales.

Esta es la forma más sencilla de gestión de residuos radiactivos. Cuando la vida media del material radiactivo es más larga debe aplicarse una serie de operaciones para su aislamiento hasta que pueda permitirse su liberación al ambiente, sin que impliquen un riesgo innecesario. Esta serie de operaciones a que son sometidos constituye su gestión. La finalidad de la gestión de los residuos radiactivos es prevenir la liberación de cantidades inaceptables de radioisótopos al ambiente durante la manipulación, almacenamiento intermedio, transporte ó disposición final.

El principal objetivo de los programas de gestión de residuos radiactivos es proteger a esta generación y a las futuras de escapes innecesarios y potencialmente riesgosos de residuos radiactivos y sus efluentes al ambiente.

De acuerdo con la Comisión Nacional de Energía Atómica los pasos a seguir en la gestión de los residuos radiactivos son, en términos generales:

1. Recolección y clasificación;
2. Acondicionamiento y/o Tratamiento
3. Disposición final en un repositorio, a los que se deben agregar transporte, almacenamientos intermedios entre las distintas etapas, estudios de caracterización, etc.

La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) plantea que los tratamientos de residuos radiactivos dependen de los niveles de radiación emitidos. Los métodos utilizados en la disposición de residuos radiactivos que dicha comisión describe se basan en: a) **Almacenar temporalmente los residuos radiactivos y esperar a que decaezca su actividad.** Este método resulta idóneo para el caso de materiales radiactivos de vida media corta, de forma que, en un tiempo relativamente pequeño, dicha actividad disminuye a límites que permiten su disposición directa al ambiente; b) **Dispersar el material radiactivo en el ambiente previa dilución con materiales inertes.** Este método se utiliza cuando se dispone de grandes cantidades de diluyentes, como son el aire y el agua. En el primer método se utilizan sistemas de extracción de aire en los edificios donde están ubicadas las instalaciones, los residuos gaseosos radiactivos se inactivan al contacto con el aire. Y en el segundo método, se utiliza agua (refrigerante) como medio para inactivar (disminución de actividad), este es el caso de los reactores nucleares.

### 2.3 Tratamientos existentes para los residuos radiactivos

Dado que los residuos se presentan en distintas formas físicas (líquidos, sólidos y gaseosos), los tratamientos aplicados son variados. Se elige una combinación de métodos que reduzcan su volumen y los transformen en productos sólidos, con baja dispersión, resistentes al calor, los agentes mecánicos, la radiación y la lixiviación durante el tiempo que se deba impedir su dispersión. Los residuos generalmente se concentran por evaporación, precipitación química o pasaje por resinas de intercambio iónico y posteriormente se inmovilizan por inclusión en cemento, asfalto o plásticos. Los residuos sólidos pueden ser compactados, triturados o incinerados y luego inmovilizados.

#### 2.3.1 Tratamiento de líquidos

Los métodos de tratamiento de los residuos radiactivos se basan en algunas de las operaciones que se van a describir a continuación o en su combinación, cuando los factores de descontaminación obtenidos en una sola operación no son suficientes para permitir la disposición del residuo descontaminado.

**Precipitación química.** Esta operación se aplica generalmente a residuos líquidos de bajo nivel radiactivo y con una alta concentración salina. Los factores de descontaminación globales que se obtienen por éste sistema son del orden de  $10^2$  y se pueden mejorar para algunos isótopos utilizando agentes de precipitación específicos, por ejemplo el estroncio 90 precipita con fosfato cálcico, el cesio 137 con ferrocianuro de cobre o níquel, el rutenio 106 con peryodato ( $\text{INaO}_4$ ), etc.

El método consiste en el uso de reacciones de precipitación bajo condiciones seleccionadas de pH. Se hace uso también de agentes de floculación para mejorar las características de separación sólido-

líquido. El líquido limpio, ya descontaminado, puede ser desechado al drenaje si su actividad específica es inferior a los límites de disposición fijados.

Los barros de tratamiento, que pueden contener hasta un 10% de sólidos, se concentran posteriormente por evaporación, filtración, centrifugación, etc. y se envasan en bidones metálicos utilizando normalmente un sistema de solidificación para evitar que la presencia de humedad provoque la corrosión de los envases.

**Evaporación.** La evaporación es una operación ampliamente utilizada en la descontaminación de los líquidos radiactivos y cada vez se está extendiendo más su uso, por su característica de proporcionar muy altos factores de descontaminación y de reducción de volumen, a fin de concentrarlos para reducir su volumen y almacenarlos a largo plazo. Los resultados satisfactorios de esta operación han llevado a su aplicación para residuos líquidos de cualquier nivel de actividad.

Los factores de descontaminación alcanzados han ido aumentando al extenderse el uso de esta operación al campo de los líquidos radiactivos, e irse abandonando los diseños convencionales de sistemas de evaporación en favor de diseños directamente dirigidos a la necesidad de evitar al máximo los fenómenos de arrastre. Los productos finales son un concentrado, que contiene la casi totalidad del material radiactivo presente, y un destilado normalmente libre de niveles dañinos de actividad para su disposición posterior. El concentrado se mezcla con cemento previamente a su envasado en bidones metálicos, o con asfalto. (Cofis. 200)

**Filtración y centrifugación.** Esta operación se puede usar para el tratamiento de líquidos antes de su disposición al medio, como etapa previa al tratamiento por cambio de ion o bien como etapa final en la separación sólido-líquido después del tratamiento químico.

La separación de los sólidos se logra por centrifugación, retención en cartuchos o filtración mediante presión o vacío, generalmente con el uso de aditivos para formación de capa previa. Los cartuchos filtrantes no son, normalmente, regenerables por lo que debe de tenerse en cuenta la posibilidad de su sustitución en forma remota. Otros sistemas de filtración se pueden regenerar por lavado en sentido inverso para desprender la capa de sólidos.

Como en las operaciones anteriores los barros de filtración, con un contenido de aproximadamente 25% de sólidos, se mezclan con cemento y se envasan en bidones metálicos. El factor de reducción de volumen conseguido depende del contenido en sólidos de la alimentación y el de descontaminación suele ser bastante elevado, del orden de 102 a 103.

**Cambio de ion.** El uso de este sistema de descontaminación es muy amplio dentro de las actividades del campo nuclear. Es un método para residuos con bajo contenido en sólidos con bajos niveles de actividad. Tiene las ventajas derivadas de la simplicidad del equipo y operación, y la concentración de material radiactivo en un pequeño volumen de resina que se puede manejar con relativa facilidad. La principal desventaja, cuando se utilizan resinas sintéticas, es el costo aunque este aspecto puede mejorarse utilizando la regeneración de resinas.

Como se ha señalado ya en el caso de la evaporación, el proyecto adecuado de una instalación de cambio de ion se debe hacer con la base de un conocimiento de los isótopos contenidos en los líquidos que se han de tratar, ya que, con la utilización de las resinas apropiadas, se pueden obtener

unos altos factores de descontaminación y de reducción de volumen. En estos casos puede ser económicamente viable eliminar la operación de regeneración usando nuevas resinas para cada ciclo de tratamiento.

El factor de reducción de volumen puede ser del orden de  $10^3$  mayor y el de descontaminación global del  $10^2$ , aunque para casos específicos puede ser muy superior. En los sistemas de tratamiento de residuos líquidos anteriormente mencionados se obtiene como producto final un residuo en forma concentrada y la filtración, tratamiento químico o cambio de ión, se retiene casi todo el material radiactivo presente en el residuo líquido original.

La práctica común, por razones de seguridad, consiste en la inmovilización de estos residuos mediante un proceso de solidificación adecuado. Al mismo tiempo, se logra eliminar agua, evitando así los efectos de corrosión sobre los envases durante los largos períodos de tiempo que supone el almacenamiento (CCHEN, 2002).

Conversión a sólidos de residuos líquidos de alto nivel. Por último debemos mencionar que, los residuos contienen más del 99,9% de los productos de fisión no volátiles contenidos en el combustible irradiado, y prácticamente el total de los actínidos a excepción del uranio y el plutonio cuya presencia es inferior al 0,5% del total presente en el combustible de los reactores nucleares. Se originan del orden de  $7 \text{ m}^3$  de residuos radiactivos procedentes del combustible radiactivo, los cuales se concentran y se reducen en volumen hasta  $0.7 \text{ m}^3$ . La actividad de este concentrado puede llegar a 2000-3000 Ci/l.

Estos residuos constituyen el problema más difícil que tiene planteado la gestión de residuos radiactivos líquidos, ya que, dados sus altos niveles de concentración y la vida media de los isótopos que contiene, son necesarias centurias para el decaimiento total de alguno de sus componentes ( caso del Cesio-137 y el Estroncio-90 y milenios para otros (caso de los actínidos). Hoy por hoy la única técnica razonable para el mantenimiento a largo plazo de estos residuos es su conversión a sólidos, cuyo objetivo principalmente es la reducción de la movilidad, el volumen y la optimización de las propiedades físicas y químicas del producto sólido en relación con el medio que ha de contenerlo. Un producto ideal de la solidificación debería ser insoluble en agua, estable térmicamente y frente a la radiación, buen conductor del calor, químicamente inerte, incombustible y con buenas propiedades mecánicas.

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo de investigación y desarrollo para la conversión a sólidos de residuos radiactivos de alto nivel con las propiedades deseadas. Hasta ahora se han desarrollado fundamentalmente dos métodos de conversión a sólidos de los residuos de alto nivel: calcinación y vitrificación. Como variante de la calcinación, cabe una posterior fijación del producto calcinado, en forma granular, vidrio, etc., para mejorar sus propiedades.

La calcinación se lleva a cabo evaporando los residuos hasta sequedad y calentando el residuo seco a temperaturas superiores a  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Puede realizarse en reactores de lecho fijo o de lecho fluidizado. Esta última técnica se ha aplicado en escala industrial en EE.UU. La vitrificación consiste en la fabricación de vidrios a partir de los residuos radiactivos. Generalmente se hacen vidrios de borosilicato o de fosfato. Los vidrios pueden contener entre 20 y 30% en óxidos de los productos de fisión. El principio de los diversos procedimientos de vitrificación es el mismo: los residuos líquidos pasan por procesos de secado, calcinación, fusión con los aditivos apropiados, colchándose en

contenedores adecuados, y después solidificando el envase con productos vítreos, sin dejar a un lado el tratamiento de los gases producidos en el proceso. La vitrificación ha sido experimentada a escala piloto o semi-industrial en Francia (proceso PIVER), Inglaterra (proceso HARVEST), Alemania (proceso VERA y PAMELA) y EE.UU (OIEA, 2001)

### 2.3.2 Tratamiento de sólidos

El tratamiento de los residuos sólidos tiene como una de sus estrategias reducir el volumen, cuando es factible, y de no ser posible se debe de recibir un pretratamiento antes de su almacenamiento a largo plazo o disposición final. La operación de envasado de los residuos sólidos ya tratados tiene por objetivo su inmovilización, además el diseño de los envases debe asegurar la máxima resistencia posible a la acción de los agentes naturales: aguas superficiales, subterráneas, agua del mar, etc., que se sospeche puedan influir en las sucesivas etapas de la gestión de éstos residuos. En la Tabla 2.1 se explican los métodos de tratamiento mas comunes para los residuos sólidos de bajo nivel de actividad.

**Tabla 2.1 Métodos de tratamiento de residuos sólidos radiactivos de bajo nivel (IEN, 2000)**

Compactación	Existen compresores que alcanzan una reducción en volumen de hasta 90 por ciento, dependiendo del tamaño del compresor y el tipo de residuo. Los "supercompactadores" de la actualidad pueden ejercer una fuerza de 1000 toneladas o más, reduciendo los residuos a fracciones pequeñas de su volumen original.
Incineración	Los residuos secos se pueden incinerar obteniendo así una reducción de 99 % en volumen. Los incineradores se equipan con filtros y otras tecnologías que aseguran que las emisiones de partículas radiactivas no se presenten. Es importante mencionar que el material radiactivo permanece dentro de las cenizas, que posteriormente se disponen en instalaciones de confinamiento autorizado de residuos con actividad de bajo nivel.
Descontaminación	Por lo regular dentro de los residuos de bajo nivel puede haber materiales que pueden ser reciclados, como herramientas, cristalería y ropa, por lo que se utilizan disolventes que de alguna manera remueven las partículas de material radiactivo de estos artículos descontaminándolos para su reuso o reciclaje.
Minimización	Desde el años 80 en todo el mundo han aumentado los costos para la disposición de residuos radiactivos de bajo nivel, por lo que también los generadores -- industria, gobierno, investigadores, académicos y médicos - han reducido dramáticamente el volumen de residuos enviados a los vertederos comerciales. En el año de 1980, más de 3,7 millones de pies cúbicos de residuos de bajo nivel fueron dispuestos comercialmente. En 1999, el volumen de residuos declinó a 272,262 ft <sup>3</sup> , una reducción de 93 %. Esta reducción ocurrió aunque el número de las plantas de energía atómica aumentó en más del 50 por ciento durante el mismo periodo. Las técnicas incluyen la compactación, la incineración, la descontaminación y el almacenaje temporal, o sea todas las anteriores en el mismo lugar de generación.

### 2.3.3 Tratamiento de gases

En este punto se ha de distinguir entre los residuos propiamente gaseosos como yodo, criptón o el aire y efluentes gaseosos con partículas sólidas radiactivas en suspensión. La separación de las partículas sólidas en las corrientes gaseosas se lleva a cabo con los llamados "filtros absolutos" de alta eficiencia de retención (HEPA filters). Para partículas de un tamaño medio de 0.3 µm su eficiencia de separación es del 99.97% (ver Tabla 2.2). Para concentraciones de polvo mayores de 1 mg/m<sup>3</sup> se instalan, antes de los filtros absolutos, unos prefiltros que puedan contener esos tamaños de partícula.

En el caso de los residuos radiactivos gaseosos de criptón y xenón, la práctica actual consiste en la descarga controlada; al llegar a límites aceptables, los isótopos de vida corta se liberan a través de chimeneas apropiadas, utilizando como diluyente aire y ventilándolo por el ducto de la chimenea (IEN, 2000).

**Tabla 2.2 Métodos de retención y separación (CCHEN, 2002)**

Absorción física de gases nobles	Se utilizan materiales absorbentes de gran superficie específica. Los más comunes son los tamices moleculares y los carbones activos. Como el tiempo de retención para los gases nobles aumenta con la disminución de la temperatura, ha recibido gran atención la aplicación de este método a bajas temperaturas.
Separación por membranas permeables selectivas	La corriente gaseosa se pone en contacto bajo presión con la membrana, los gases pasan a través de ella difundiendo hasta alcanzar la cara opuesta de menor presión, donde se evaporan. El factor de separación es proporcional a la razón del producto de solubilidad en la membrana y la difusividad a través de la misma
Absorción selectiva	Los gases nobles Kr y Xe son más solubles en determinados líquidos que otros componentes del aire (O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ). El disolvente después se somete a condiciones que favorezcan la desorción de los gases disueltos, pudiéndose recuperar así el gas noble concentrado. Estas operaciones pueden integrarse en un sistema continuo de extracción gas-líquido. Aparte de los detalles propios del diseño de una instalación de este tipo el buen resultado del método depende de la existencia de disolventes apropiados para extraer selectivamente los gases nobles. Entre éstos se han utilizado con mayor éxito los refrigerantes del tipo freón (compuestos fluorocarbonados).
Separación por procesos criogénicos	Este método se ha estudiado en la planta de recuperación de gases nobles de Idaho (USA). La corriente original se somete a un proceso continuo que implica unidades de licuefacción, conversión catalítica, enfriamiento con nitrógeno líquido y destilación fraccionada. Los gases condensables y el agua se separan, y en la destilación última se recuperan separadamente Kr y Xe. Como complemento a los sistemas de separación de gases nobles se debe proporcionar el almacenamiento durante los años necesarios para su decaimiento. Entre las posibilidades que se apuntan para la solución de isótopos de vidas medias mayores a un año como el Xe-85 (vida media de 10.7 años) se plantea el encapsulado en balas a presión.

## 2.4 Almacenamiento de residuos de baja, media y alta actividad

La disposición de residuos de vidas medias bajas consiste solamente en un resguardo temporal de tal forma que queden aislados tanto de la población como del ambiente, debido a la naturaleza de los materiales radiactivos van disminuyendo su actividad a niveles aceptables en cuestión de meses o años y pueden ser dispuestos finalmente como residuos convencionales (Esto también dependerá de su composición química).

Históricamente, se han realizado dos métodos de disposición de los residuos radiactivos; la disposición bajo tierra y la disposición en el mar. En tierra la disposición se realiza de acuerdo al tipo de residuo que se trate, es decir, los residuos radiactivos de bajo y medio nivel (vidas medias menores a 500 años) generalmente se depositan en almacenes superficiales, mientras que los residuos de alta actividad (vidas medias mayores a 500 años) se almacenan en sitios especiales a considerables distancias del nivel de la tierra superficial.

Los residuos radiactivos de baja y media actividad pueden ser dispuestos en recipientes especiales o bidones que se colocan en áreas confinadas del suelo marino. Este método es relativamente sencillo pero no es muy utilizado debido a los riesgos de contaminación radiactiva en el fondo marino (los efectos de las radiaciones que se provocan no han sido estudiados). Otras opciones para su disposición es el uso de minas abandonadas como confinamientos, y mediante inyección profunda

que es el bombeo de desechos radiactivos en pozos, domos de sal u otros sitios bajo tierra que aseguren la contención del material sin riesgos de migración.

En la Tabla 2.3 se enlistan algunos de los métodos mas usados para inmovilizar residuos radiactivos antes de su almacenamiento, antes de ser confinado cualquier residuo peligroso debe acondicionarse eliminando los riesgos de que el material migre por algún medio, por lo que el estado físico mas adecuado para su confinamiento, es en forma sólida (IEN, 2000).

**Tabla 2.3 Métodos de inmovilización (CCHEN, 2002)**

Cementación	Es el primer método que se utiliza para la solidificación de residuos radiactivos. Posee una gran simplicidad tanto en su operación como en el equipo requerido. Consiste, en síntesis, en la mezcla de los residuos con cemento en condiciones que garanticen una buena homogeneidad del producto, que se descarga a continuación en envases donde fragua y solidifica. La operación se puede llevar a cabo de forma discontinua o semicontinua. El producto sólido obtenido puede tener buena resistencia mecánica incluso con un contenido del 20% en peso de residuos sólidos, posee unas características de lixiviación moderadas y tiene la ventaja del autoblandaje de la radiación procedente de los isótopos incluidos.
Incorporación en asfalto	Algunos inconvenientes de la operación anterior se eliminan utilizando como material de solidificación el asfalto. La resistencia a la lixiviación del producto final es mayor y el factor de reducción de volumen es de aproximadamente 2.5 veces. El contenido sólido de este producto puede llegar al 50% en peso. La operación que consiste en una mezcla de los residuos con asfalto, se hace a temperaturas elevadas, con agitación, hasta evaporar el agua contenida y obteniendo un producto homogéneo. Los equipos utilizados son de doble función: mezcla y evaporación, y así existen diversos modelos, utilizados según la actividad del residuo original. Para mayores niveles (hasta 1 Ci/l) se utiliza un sistema de extrusión con tornillos sin fin. Una de las principales desventajas que se asigna a este sistema de incorporación es el riesgo de ignición.
Incorporación en plástico	Este es el sistema más reciente para inmovilización de residuos. Entre las resinas utilizadas figuran las de poliéster y las de urea - formaldehído. En el caso del poliéster, es preciso llevar el residuo a sequedad. Después se añade el poliéster no saturado, líquido, que admite hasta un 60% en peso. A continuación se añade un catalizador y un acelerador de la reacción, y se produce la solidificación. En el caso de la urea - formaldehído se puede añadir el residuo en forma líquida. El factor de reducción de volumen es de 2 a 3. El producto final puede contener hasta un 60% de sólidos y muestra buenas propiedades mecánicas y de resistencia a la lixiviación. Una ventaja del procedimiento es que se puede trabajar a temperatura ambiente.

### Prototipos de almacén para la disposición final de residuos radiactivos.

Uno de los procedimientos mas seguros para la disposición final de los residuos de alta, media y baja actividad es el almacenamiento. Prosiguiendo una estrategia de aislamiento total reduciendo al mínimo el contacto con el agua y la liberación de radiación al aire. Las barreras múltiples son un instrumento valioso en el diseño de almacenes de disposición final.

La disposición superficial en tierra es la opción comúnmente utilizada dentro de países como los Estados Unidos para la disposición de residuos con niveles de actividad baja y media. Las distintas celdas de confinamiento de residuos radiactivos se presentan en la Figura 2.2 y consisten en:

1. Las celdas de disposición superficial implican que los recipientes para residuos se coloquen en compartimentos, donde se utiliza arena, grava, o piedra machacada para separar el fondo de la celda o compartimento y disminuir los riesgos de inundaciones al interior del almacén debido a la infiltración de agua. El almacén cuenta con un sistema de drenaje equipado con dispositivos que detectarían el escape de cualquier isótopo radiactivo. Cuando el almacén se encuentra lleno, se rellenan los huecos existentes con arena, las celdas se encapsulan con la arcilla condensada. Existe también otra modalidad llamada Agujeros de Augured que prácticamente funciona bajo el mismo principio.

2. La disposición en módulos de concreto es virtualmente idéntica a la disposición superficial a excepción del tipo de envase utilizado. La disposición en módulos de concreto, utiliza los envases de acero o de madera pero después se colocan en grandes compartimentos de concreto que se apilan dentro de cada celda del almacén.
3. Las cámaras acorazadas son estructuras rectangulares, similares de tamaño a los almacenes. Se construyen utilizando concreto, metal, o bloques reforzados. A cada cámara acorazada se le acopla un sistema de drenaje y equipo de supervisión. También existe otra modalidad donde las celdas de concreto se diseñan con cierta pendiente para facilitar el drenaje.
4. Las celdas o fosos se cubren con cemento, colocando paneles de concreto que dividen los envases por actividad y tipo de residuo. Los espacios entre los envases se llenan de concreto. Generalmente los residuos de menor actividad van hasta arriba del foso.

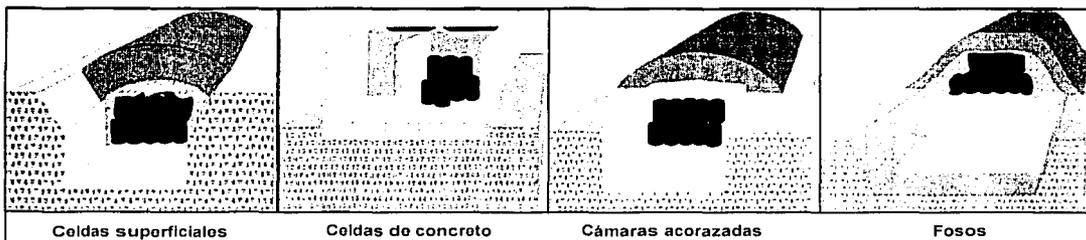


Figura 2.2 Celdas de confinamiento de residuo radiactivos (Audeen W., et al 1994)

La Comisión Reguladora Nuclear de EUA. (Nuclear Regulatory Comisión, NRC) exige que la radiación en un vertedero no exceda la dosis anual por persona, con un límite de exposición para la tiroides de 0.75 mSv, para el cuerpo entero y cualquier otro órgano de 3.6 mSv. En comparación, la exposición de una persona no expuesta ocupacionalmente es de 360 mrem anuales debidas a fuentes naturales tales como el radón y fuentes médicas tales como la radiografías (Instituto de Energía Nuclear, EUA).

## 2.5. Transporte de residuos radiactivos

Además de las precauciones, los programas de computadora se pueden utilizar para seleccionar las rutas más seguras del transporte. En Estados Unidos, los conductores reciben entrenamiento especial para respuesta de emergencia que incluye procedimientos escritos. Para accidentes más severos, la comisión federal de emergencias en Estados Unidos ha implantado un plan radiológico federal para respuesta de emergencia en coordinación con otras 11 agencias a nivel estatal. Se entrena al personal policiaco, a los bomberos y a los equipos locales de protección radiológica. Cuentan también con un acuerdo a nivel nacional que estipula una serie de ayuda entre los estados cercanos al accidente a fin de proveer de los materiales, asistencia técnica y equipos necesarios. (Comisión Reguladora Nuclear, E.U.A.)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se estima que en el mundo se efectúan al año decenas de millones de envíos de material radiactivo: tan sólo en la Comunidad Europea el número de “bultos” transportados durante un año supera el millón y medio. Sin embargo, este tipo de materiales sólo supone alrededor del 2% de los transportes de todas las mercancías peligrosas. La mayoría de los envíos de material radiactivo se realiza hacia el sector médico y de investigación y una mínima parte, alrededor del 5% de los “bultos”, están asociados al ciclo de combustible nuclear. (Consejo de Seguridad Nuclear de España). Hay cerca de 100 millones de envíos anuales de residuos peligrosos hechos por los Estados Unidos, ya sea por vía terrestre o marítima a través de América. Dos millones de los cuales implican materiales radiactivos como radiofármacos o compuestos radiactivos para la investigación médica. Solamente una fracción pequeña de estos envíos contiene residuos de bajo nivel. (Comisión Reguladora Nuclear, E.U.A.)

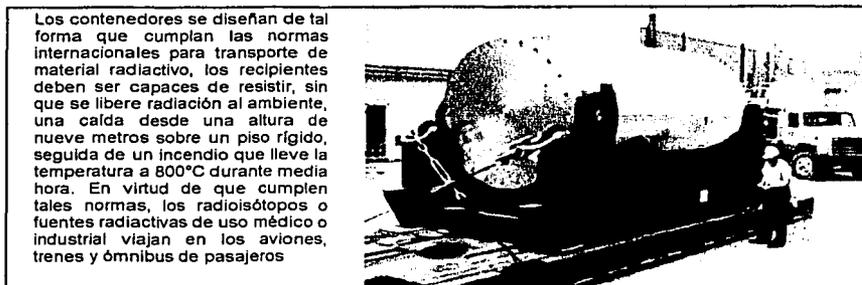


Figura 2.3 Contenedor para transporte de residuos radiactivos (Ciallella, 1997)

Los desechos radiactivos generados en la industria de la minería se transportan forzosamente en estado sólido, lo que presenta menores riesgos en caso de accidentes a diferencia de los residuos líquidos o gaseosos. Todos los países utilizan una clasificación del “bulto” basada en las recomendaciones de la IAEA que ayuda a homogeneizar criterios y evitar problemas legales y operativos. El combustible usado se ha transportado por carretera, ferrocarril y por vía marítima durante varias décadas en barriles pesados, hechos generalmente de acero con una capa absorbente neutrones y una especie de ventiladores para mantener fresco el residuo. Hasta el momento no se han presentado accidentes que logren liberar los residuos. (IAEA, 1991)

La vía aérea es la más utilizada para residuos de baja actividad, ya que el material radiactivo de aplicación médica, por su naturaleza isotópica, sufre un decaimiento radiactivo rápido y en consecuencia precisa ser transportado rápidamente. El transporte marítimo es utilizado para trasladar a largas distancias grandes cantidades de material, normalmente asociadas al ciclo de combustible nuclear (minerales, concentrados, hexafluoruro de uranio, combustible, etc.). Por carretera y ferrocarril se transportan todo tipo de materiales, pero normalmente cubriendo distancias cortas. (Consejo de Seguridad Nuclear de España).

La seguridad del transporte se basa en el concepto del “bulto”, siendo éste el conjunto formado por el material radiactivo a transportar y el embalaje que lo confina. El grado de resistencia de este embalaje es proporcional a la actividad que contiene, a la forma física y a las propiedades químicas de las sustancias transportadas, atendiendo a su capacidad de dispersión. La seguridad se refuerza mediante el diseño de vehículos especialmente acondicionados como lo muestra la Figura 2.3. (Ciallella, 1997).

Desde el comienzo de la industria nuclear, un número de instalaciones especializadas se han desarrollado en distintos lugares alrededor del mundo para proporcionar servicios del ciclo de combustible. Está claro que hay una necesidad de transportar los materiales del ciclo de combustible nuclear a y desde estas instalaciones. De hecho, la mayoría del material usado en combustible nuclear se transporta varias veces durante su vida. Los transportes son con frecuencia internacionales, y son a menudo distancias grandes. Los materiales nucleares son transportados generalmente por las compañías especializadas del transporte. (Asociación Nuclear Mundial, ANM, 2002)

El Consejo de Seguridad Nuclear en España plantea objetivos básicos en las previsiones en el transporte de residuos radiactivos:

- 1) La contención de los materiales radiactivos dentro de los embalajes.
- 2) El control de la radiación externa de los bultos.
- 3) La prevención de riesgos cuando se transportan materiales fisiónables.
- 4) Evitar los daños debidos al calor emitido por ciertos bultos.

## 2.6 Situación del manejo de los residuos radiactivos de baja y media actividad

Durante los últimos cuarenta años, el uso de materiales radiactivos se ha extendido progresivamente en la producción eléctrica, en la industria, en la medicina y en la investigación. Estas actividades implican la transformación de los materiales empleados en otros que contienen o están contaminados con sustancias radiactivas y que por no tener posibilidad de reuso posterior se consideran residuos radiactivos. Se debe tomar en cuenta que el uso de materiales radiactivos es un actividad tecnológica relativamente nueva, donde las instalaciones de las que se tiene registro comenzaron alrededor de los años cuarenta y que muchas de ellas apenas a finales del siglo pasado comenzaron su proceso de clausura.

**Tabla 2.4 Sitios cerrados o en proceso de clausura (Han de Kyong Won, 1997)**

<i>Sitios en proceso de clausura</i>		
Armenia	Erevan	CIAIBP
Bulgaria	Novi Han (1964-1994)	CIAIBP
Estonia	Tammiku (f. Saku) (1964-1996)	CIAIBP
Francia	Centre de la Manche (1969-1994)	CIAIBP
Alemania	Asse (1967-1978)	CP
Rusia	Murmansk	CIAIBP
	Groznyl, Chechnya	CIAIBP
Tayikistán	Beshkek	CIAIBP
Ucrania	Kiev center (-1992)	CIAIBP
<i>Sitios cerrados</i>		
República Checa	Hostim (1953-1965)	CMC
Hungría	Solymer (1960-1976)	CIAIBP
Japón	JAERI, Tokai (1995-1996)	CBP
México	Maquixco (1972-)	CBP
México	La Piedrera (1983-1984)	CIAIBP
Noruega	Kjeller (1970-1970)	CIAIBP
Lituania	Maishiogala (1970s-1989)	CIAIBP
Estados Unidos	Beatty, Nevada (1962-1992)	CIAIBP
	Maxey Flats, Kentucky (1963-1978)	CBP
	ORNL SWSA 1 (1944-1944)	CBP
	ORNL SWSA 2 (1944-1946)	CBP
	Sheffield, Illinois (1967-1978)	CBP
	West Valley, New York (1963-1975)	CBP

CBP = Confinamiento a baja profundidad CMC = Confinamiento en minas y cavidades CIAIBP = confinamiento en instalaciones de alta ingeniería a baja profundidad CP = Confinamiento profundo.

Estados Unidos es uno de los países que mayor impulso ha dado al uso de material radiactivo. Aunque este impulso fue por fines bélicos en los años setentas del siglo pasado, el auge y manejo en

otras áreas como la agricultura y la medicina, han tenido grandes avances, este es uno de los países que por consecuencia, también ha tenido que comenzar procesos de clausura de instalaciones en donde se manejaron materiales radiactivos o sirven de confinamientos (Tabla 2.4).

Cabe resaltar la autorización otorgada al ININ para la recuperación de los desechos inhumados en el Centro de Almacenamiento de Desechos Radiactivos (CADER) ubicado en Maquixco, Estado de México, así como las autorizaciones para la modificación del sitio de La Piedrera en Samalayuca, Estado de Chihuahua en donde están los desechos de  $\text{Co}^{60}$  derivados del accidente ocurrido en 1984, y para la modificación del sitio donde se depositaron los desechos de los jales de la planta de beneficio de uranio de Villa Aldama, Chihuahua, ubicado en Peña Blanca, Chihuahua

La gestión se organiza, en casi todos los países del mundo, mediante relaciones institucionales que intervienen directamente en el proceso de manejo o gestión de materiales radiactivos:

1. Los Gobiernos deciden las políticas y estrategias nacionales de gestión y son responsables, en última instancia, de la seguridad a largo plazo de su almacenamiento.
2. Los organismos reguladores nacionales e internacionales son los responsables de desarrollar el marco regulatorio, del control de su implantación y del licenciamiento de las instalaciones necesarias, incluidas las de gestión y almacenamiento de residuos radiactivos.
3. Los organismos ejecutivos o agencias nacionales realizan la gestión de acuerdo con las estrategias definidas por sus gobiernos y los criterios establecidos por los organismos reguladores. En general, los organismos ejecutivos aceptan los materiales de desecho que son generados por la industria, investigación, instituciones médicas, etc., para su almacenamiento.
4. Los generadores de residuos son controlados por las autoridades reguladoras de cada país. Generalmente se responsabilizan del acondicionamiento de los residuos y de su transporte hasta el emplazamiento donde se almacenan, asumiendo el operador de este último la responsabilidad, a partir de ese momento. No obstante, la anterior regla general en materia de responsabilidad puede no ser el caso para los productores de cantidades reducidas de residuos, los llamados pequeños productores. En este caso, el acondicionamiento de los residuos puede correr a cargo de un organismo competente a nivel nacional, o en algunos casos de países con estructura federal, a cargo del correspondiente Estado.

La Unión Europea (UE) produce anualmente dos mil quinientos millones de toneladas de residuos de todo tipo, de los cuales veinte millones de toneladas, son residuos peligrosos, que requieren precauciones especiales para su almacenamiento. La generación anual de residuos radiactivos asciende a 170,000 ton, de las cuales un 90% son residuos radiactivos de baja y media actividad.

El tratamiento y el acondicionamiento de este tipo de residuos, tiene sus inicios en la década de los años cincuenta, cuando se construyeron las primeras instalaciones industriales. La reducción de volumen mediante técnicas de supercompactación o incineración en el caso de tratamiento de residuos orgánicos y el acondicionamiento de los residuos principalmente en matrices de cemento son los métodos mas utilizados por la UE.

Cuatro países de la UE disponen de capacidad para el almacenamiento definitivo de los residuos de baja y media actividad: Francia, España, Reino Unido y Alemania. En los tres primeros, la solución adoptada ha sido el confinamiento superficial con barreras de ingeniería. Bélgica tiene prevista, también, la adopción de este sistema para la disposición final de sus residuos. Alemania almacena sus residuos en formaciones profundas (Tabla 2.5). El resto de países de la Unión, a excepción de

Holanda, no tienen programas de producción nucleoelectrónica. En estos casos, se almacenan los residuos de forma temporal en instalaciones centralizadas o bien en los propios centros generadores.

**Tabla 2.5 Situación del manejo de residuos radiactivos en el mundo (Han de Kyong Won, 1997)**

<i>País</i>	<i>Confinamiento</i>	<i>Situación actual</i>
<i>Sitios en funcionamiento</i>	<i>Sitio de Disposición</i>	
Australia		CIAIBP
Bélgica		CIAIBP
Brasil		CIAIBP
Bulgaria		CIAIBP
Canadá		-
China		-
Croacia		-
Cuba		CMC
Ecuador		CIAIBP
Hungría		-
Indonesia		CIAIBP
República de Corea		-
Pakistán		-
Eslovenia		-
Turquía		CIAIBP
Reino Unido		CP
Estados Unidos	Connecticut	-
	Illinois	CIAIBP
	Massachusetts	-
	Ohio	CIAIBP
	Michigan	CIAIBP
	Nueva Jersey	-
	Nueva York	CIAIBP
	Pensilvania	CIAIBP
China	Guangdong Daya Bay	CIAIBP
Chipre	Ari Farm	CBP
Egipto	Inshas	CIAIBP
México	<b>Laguna Verde</b>	<b>CIAIBP</b>
Perú	RASCO	CIAIBP
Rumanía	Cernavoda	CIAIBP
Suiza	Wellenberg	CMC
Sitios con licencia		
Canadá	Chalk River	CIAIBP
Alemania	Konrad	CP
Noruega	Himdalen	CMC
República de Eslovenia	Mohovce	CIAIBP
Estados Unidos	Ward Valley, California	CIAIBP
	Boyd County, Nebraska	CIAIBP
	Wake County, Carolina del Norte	CIAIBP
	Rancho Fackin, Texas	CIAIBP
Sitios en construcción		
China	Gobi, Gansa	CIAIBP
Finlandia	Loviisa	CMC

CBP = Confinamiento a baja profundidad CMC = Confinamiento en minas y cavidades CIAIBP = confinamiento en instalaciones de alta ingeniería a baja profundidad CP = Confinamiento profundo.

El gobierno federal de Suiza autorizó la implantación en Wellenberg en el año 2000, en el cantón de Nidwald, de un centro de almacenamiento de residuos de baja y media actividad. El confinamiento situado en el poblado de Drigg, en el Reino Unido, continúa recibiendo residuos radiactivos de baja actividad. Está previsto que el volumen total en esta instalación alcance una cifra de 600,000 m<sup>3</sup>, para lo cual se está mejorando, desde 1989, la estructura de la instalación mediante la sustitución de las zanjas de almacenamiento por un sistema de bóvedas de hormigón.

El almacenamiento definitivo de residuos de baja y media actividad en Alemania, se efectúa, actualmente, en profundidad en la instalación de Morsleben, en una mina de sal abandonada en la antigua República Democrática Alemana. Hasta la fecha, en Morsleben se han almacenado 13,500 m<sup>3</sup> de residuos sólidos y líquidos, así como un total de 5800 fuentes radiactivas.

Después de la unificación alemana, esta instalación estuvo cerrada un tiempo, y a finales de 1993 volvió a abrirse. Está previsto, por otra parte, la puesta en marcha del almacenamiento para residuos de baja y media actividad y otros que contienen emisores alfa, en Konrad, una antigua mina de hierro. La solución adoptada prevé una capacidad de almacenamiento de 600,000 m<sup>3</sup> a 1000 m.

Actualmente Estados Unidos tiene en operación los almacenamientos de Barnwell, en Carolina del Sur, y de Richland, en el Estado de Washington. La práctica utilizada en todas estas instalaciones consiste en el confinamiento de los residuos a poca profundidad, en zanjas que luego se rellenan y recubren con el mismo material del suelo excavado. Después de la promulgación de la "Low Level Waste Policy Act" de 1980 y sus modificaciones de 1985, se han iniciado negociaciones interestatales para el desarrollo de instalaciones de almacenamiento que permitan cumplir con dicha ley. El concepto de almacenamiento que prevén los Estados para cumplir con la ley, está enfocado a instalaciones someras o a poca profundidad, y algunos Estados han prohibido, explícitamente, la práctica del almacenamiento sin barreras de ingeniería.

El organismo regulador de Canadá (Agencia de control para la energía atómica), ha definido el almacenamiento de los residuos de baja y media actividad en formaciones superficiales, como la mejor práctica para la gestión a largo plazo de estos residuos. Canadá dispone, en la actualidad, con una instalación piloto de almacenamiento de residuos de baja y media actividad (IRUS), con capacidad de 12,000 m<sup>3</sup>, situada en el estado de Ontario. La instalación consiste básicamente en una bóveda de hormigón a baja profundidad.

En Finlandia la estrategia adoptada para el almacenamiento de residuos de baja y media actividad, consiste en la construcción de instalaciones en profundidad (50 a 120 m) en cada uno de los emplazamientos de las centrales nucleares existentes, Loviisa y Olkiluoto. En mayo de 1992 comenzó la operación de Olkiluoto, con un sistema de silos para el almacenamiento y capacidad para evacuar todos los residuos generados durante la operación de la central.

Japón, en diciembre de 1992 comenzó la operación de una instalación de almacenamiento a poca profundidad, con barreras de ingeniería, en Rokkasho-Mura, situado en la costa norte de la isla principal. La instalación está concebida con diseño modular, con una capacidad inicial de almacenamiento de 40.000m<sup>3</sup>, ampliables a 600,000m<sup>3</sup> en sucesivas etapas.

Suecia almacena sus residuos de baja y media actividad, desde 1988, en la instalación de almacenamiento "Swedish Final Repository" (SFR), situada bajo el mar en la costa este de la central de Forsmark. Esta instalación está construida bajo el mar Báltico a unos 60 m. de profundidad, con acceso desde tierra firme por medio de 2 túneles hasta alcanzar las galerías y el silo de almacenamiento. La primera fase tiene una capacidad para 60,000 m<sup>3</sup> y está prevista una segunda ampliación de 30,000 m<sup>3</sup>.

Por lo menos 17 sitios se han seleccionado para nuevos depósitos de residuos de baja y media actividad, algunos de los cuales se encuentran bajo construcción, mientras que más de 25 sitios se están investigando en 17 países. Incluyendo China, que está planeando desarrollar cuatro depósitos de residuos de media y baja actividad. China ya ha seleccionado dos sitios, en el noroeste y meridionales, el vertedero noroeste está situado en un área árida y con poca población del desierto de Gobi.. En Hungría existe un proyecto de localización nacional para la disposición de residuos de baja actividad, iniciado por la Comisión Húngara de Energía Atómica en 1992. Las cámaras acorazadas de concreto con diseño de caja se están utilizando en varios sitios incluyendo el centro de la Manche y

l'Aube (Francia), El Cabril (España), Trombay (la India), y Rokkasho (Japón). Cada uno tiene sus características de diseño únicas. En enero de 1992, comenzó en Francia la explotación del centro de almacenamiento definitivo de L'Aube, con una capacidad prevista de 1,000,000 de m<sup>3</sup>.

En el depósito francés, l'Aube se confinan todos los residuos dentro de cámaras acorazadas de concreto (ancho = 30 m, largo = 30 m, alto = 8,5 m, con paredes gruesas de 30 cm). Las cámaras acorazadas se construyeron sobre el nivel más alto con respecto al nivel del mar y tienen características de diseño adicionales contra la infiltración del agua de lluvia. Previamente y hasta el comienzo de su clausura en 1994, estuvo en operación el Centro de Almacenamiento de La Manche, que durante su funcionamiento acumuló un volumen de 535.000 m<sup>3</sup>. Los tambores confinados contienen residuos de media y baja actividad apilándose en monolitos de concreto.

En España, El Cabril sigue un concepto similar de la disposición, cuenta con métodos para acondicionamiento e instalaciones de caracterización de residuos. En la India, seis depósitos de residuos de baja actividad están en funcionamiento, con un diseño de fosas reforzadas con concreto. En Trombay (India), los fosos se impermeabilizan y se cubren con concreto reforzado; los conductos adicionales se utilizan para prevenir cualquier ingreso de agua.

En México, las instalaciones que manipulan materiales radiactivos se operan por instituciones públicas o privadas, las cuales deben obtener de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) la autorización correspondiente para su construcción y operación. Actualmente la Comisión tiene registrados 1074 titulares de licencias, autorizaciones y permisos para utilizar material radiactivo, siendo los principales en medicina e industria. La más importante de las instalaciones nucleares en México es la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV). Está constituida por dos unidades independientes destinadas a la producción de energía eléctrica. La capacidad de producción de cada una de las unidades es de 654 MW. La primera unidad inició su operación comercial el 14 de agosto de 1990 y la segunda unidad el 12 de abril de 1995. Esta instalación es operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Por otra parte, el reactor TRIGA Mark-III fue la primera instalación nuclear en operar en México (1968), que fue diseñada para realizar tareas de investigación y producción de radioisótopos de usos médicos. Esta instalación es operada por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y se ubica en el Centro Nuclear de México. También existen dos conjuntos subcríticos, los cuales se localizan en la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) y en el Instituto Politécnico Nacional (IPN). El único conjunto ensamblado y operando es el del IPN, ya que el de la UAZ se encuentra desmantelado y el combustible está bajo control del Centro Regional de Estudios Nucleares de dicha Universidad. Ambos conjuntos subcríticos son Chicago-Modelo 9000 (El conjunto subcrítico es un dispositivo que consta principalmente de combustible de uranio natural metálico y moderador de agua ligera).

## Capítulo 3

### LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD

#### 3.1 Organismos internacionales

Los principales organismos internacionales que formulan recomendaciones, entre otras cosas, acerca del manejo de los residuos radiactivos y que no tienen influencia directa en los estados son el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), la Agencia de Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (AEN/OCDE). Estos organismos buscan el intercambio de información legal y científica entre los países. Así como proporcionan materiales y equipos para usos pacíficos de la energía nuclear, vigilando a la vez mediante un sistema estricto de salvaguarda todo desvío de los mismos hacia usos bélicos.

##### 3.1.1 Organismo Internacional de Energía Atómica, IAEA

Creado desde 1957 con los objetivos fundamentales de recolectar, examinar, desarrollar y difundir información técnica, científica y normativa. Así como alentar, patrocinar y coordinar la investigación y el desarrollo de la gestión de los desechos radiactivos así como asistencia técnica directa y servicios de examen a los Estados Miembros.

Desde 1989, el IAEA (International Atomic Energy Agency) estableció el Comité Asesor Internacional sobre Gestión de Desechos Radiactivos (CAIGDR) e introdujo una nueva serie de documentos que contienen las normas de seguridad para la gestión de este tipo de desechos (RADWASS). Además desarrolló la Base de Datos de Gestión de Desechos (BDGD) y puso en práctica el programa de evaluación y examen técnico de la gestión de desechos (PEETGD). El IAEA presta asistencia a los países en desarrollo mediante misiones de expertos como parte del Programa del Organismo de Asesoramiento sobre Gestión de Desechos Radiactivos (PAGDR). También da asesoría in situ sobre diversas ramas de la gestión de residuos y ayuda a elaborar programas de asistencia para su manipulación. (<http://www.iaea.org/worldatom/>)

##### 3.1.2 Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP

La International Commission on Radiological Protection, ICRP, es la organización con más años de haber sido creada, su origen se remonta al II Congreso Internacional de Radiología (Estocolmo, 1928), en el que se creó el Comité Internacional para la Protección contra los Rayos X y el Radio, que estuvo formado por un escogido grupo de eminentes científicos, con la misión de formular recomendaciones de protección contra las dos fuentes de radiación ionizante entonces más importantes, los rayos X y el radio, en la Tabla 3.1 se enlistan las áreas de acción que actualmente lleva esta institución.

**Tabla 3.1 Áreas de acción de ICRP**

EFECTOS DE LAS RADIACIONES, en especial, los riesgos de cáncer a bajas dosis; LÍMITES DERIVADOS, modelos dosimétricos, el Hombre de Referencia, etc.; PROTECCIÓN EN MEDICINA, uso de radiofármacos, lesiones radioinducidas, etc.; APLICACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES, dosis crónicas, residuos radiactivos; SECRETARÍA CIENTÍFICA, que es una coordinación de todas las actividades de la Comisión y los Comités.
---

Está formada por una Comisión Principal con un máximo de doce miembros, que da cobertura general a los temas de la protección contra las radiaciones, y cuatro Comités permanentes. (<http://www.iksr.org/cipr/>)

### 3.1.3 Agencia de Energía Nuclear, AEN (OCDE)

La Agencia de Energía Nuclear (por sus siglas del país sede, Francia, AEN, L'Agence pour l'énergie nucléaire) es un organismo semiautónomo de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), con sede en París, que tiene como objetivo principal el desarrollo cooperativo de la energía nuclear como fuente segura, económicamente atractiva y aceptable desde el punto de vista medioambiental, la Tabla 3.2 nos muestra las áreas de acción, actuales de dicha Agencia. (<http://www.nea.fr/>)

**Tabla 3.2 Áreas de acción de AEN**

Gestión de los residuos radiactivos, Seguridad de las instalaciones nucleares, Responsabilidad civil nuclear, Economía y tecnología del ciclo del combustible, Gestión de la vida de las centrales nucleares, Servicio de códigos de cálculo y la gestión del Banco de Datos, Experiencia operativa de las centrales (IRS, con IAEA), Aplicaciones del Análisis Probabilista de la Seguridad, y Dirección de proyectos internacionales de investigación.
--

### 3.1.4 Agencia Europea de Energía Nuclear, NEEA

Fundada en 1958 (Nuclear European Energy Agency, NEEA) con la finalidad de contribuir con recursos científicos y económicos de los países de Europa Occidental para el desarrollo de la energía nuclear, aunque en la década de 1970, la Agencia expandió su ámbito territorial y dio entrada a Australia, Japón, E.U.A. y Canadá, con lo que se transformó en la **Agencia de Energía Nuclear**, AEN. La Agencia está formada actualmente por 27 Estados Miembros de Europa, América, Asia y Australia; todos ellos industrializados, con regímenes políticos democráticos y economías de libre mercado.

Actualmente, AEN está reorientando sus objetivos para asegurar que la energía nuclear se incluya en los planes del desarrollo sostenible, previendo que la cobertura eléctrica con combustibles fósiles pueda resultar muy problemática en el futuro.

### 3.1.5 EURATOM

Es el nombre abreviado con el que se conoce el **Tratado de la Comunidad Europea de la Energía Atómica**, firmado en Roma el 25 de marzo de 1957 por los seis países que constituían el núcleo originario de la Unión Europea; el Tratado entró en vigor el 1 de enero de 1958, teniendo como premisa el desarrollo de una industria nuclear europea, mediante la creación de un mercado común de equipos y materiales nucleares, así como el establecimiento de normas básicas de seguridad y de protección de la población, actualmente este organismo está cambiando buscando avanzar en la homogenización de sus normas en Europa y la modernización de sus áreas de acción. (Tabla 3.3, <http://www.cordis.lu/fp5-euratom/home.html>)

**Tabla 3.3 Áreas de acción a futuro de EURATON**

<p>La producción, tratamiento, manipulación, utilización, posesión, transporte, importación a la Comunidad o exportación a partir de ella, almacenamiento y eliminación de sustancias radiactivas;                  Las actividades laborales que supongan una exposición significativa de los trabajadores o del público a fuentes de radiación natural; y                  Las intervenciones, tanto en situaciones de emergencia radiológica, como en situaciones de exposición prolongada resultantes de emergencias previas o de actividades del pasado con perturbación de la radiactividad presente.</p>
---

### 3.2 La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias en México

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) como órgano regulador tanto de materiales como residuos radiactivos mantiene acuerdos que permiten el intercambio constante de información técnica y científica, correspondiente a la seguridad nuclear, el manejo de residuos radiactivos y seguridad radiológica por lo que CNSNS es un organismo que tiene los recursos legales y científicos de vanguardia en el mundo.

La CNSNS tiene acuerdo y convenios de cooperación e intercambio de información con las siguientes instituciones a nivel internacional:

- IAEA, con el que se tienen acuerdos, tratados y convenios, principalmente sobre la cooperación técnica y científica.
- (AEN/OCDE), con la que se participa en los siguientes comités: Comité Directivo de la AEN, Comité de Actividades Reguladoras Nucleares, Comité de Protección Radiológica y Salud Pública, Comité de Ciencias Nucleares y Comité de Seguridad en Instalaciones Nucleares. Enmarcados en el Grupo 2, Comportamiento de Sistemas de Enfriamiento, y Grupo 5, Evaluación del Riesgo.
- NRC /EUA (Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos de América / United States Nuclear Regulatory Commission), con la que se han firmado acuerdos de cooperación para la transferencia de información sobre seguridad nuclear, seguridad radiológica y para la capacitación técnica del personal.
- CSN/España (Consejo de Seguridad Nuclear de España), con el que se tiene un acuerdo de cooperación técnica e intercambio de información y experiencia operacional.
- Secretaría Ejecutiva para Asuntos Nucleares de Cuba, con la que se tiene un convenio bilateral para la transferencia de información sobre seguridad nuclear y capacitación de personal.
- Foro Iberoamericano de Reguladores Nucleares, dentro del cual se discuten avances y mejoras en los sistemas regulatorios nacionales de los países Iberoamericanos que cuentan con centrales nucleares en operación o construcción, propiciando la cooperación técnica y el intercambio de información y de técnicos en actividades nucleares y radiológicas.

Las Naciones Unidas convocaron en 1992 a la cumbre sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible a Jefes de Estado, científicos y líderes de todo el mundo en la ciudad de Río de Janeiro, donde se firma la llamada Agenda 21 que es un compromiso mundial en donde el Capítulo II establece la Gestión de desechos radiactivos como un punto a fortalecer y desarrollar.

### 3.3 Marco legal en México

El Artículo 27 de la **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos** establece que todos los minerales radiactivos son propiedad de la Nación. El desarrollo y regulación de la energía nuclear permanecen bajo el control exclusivo de la misma.

Las actividades que impliquen el desarrollo o uso de combustibles nucleares deben ser únicamente para propósitos pacíficos. Se contemplan dos tipos de actividad nuclear: 1) desarrollo de la energía nuclear, que se otorga solamente a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), entidad paraestatal coordinada por la Secretaría de Energía, 2) actividades de uso e investigación que no fueran de energía nuclear, que únicamente **podrán efectuar las universidades, institutos, centros de investigación y entidades públicas** debidamente autorizadas.

La Ley que regula el Artículo 27 de la Constitución Mexicana en materia nuclear (**Ley de Energía Nuclear**) rige la explotación, aprovechamiento y extracción de minerales radiactivos. Asimismo, la **Ley de Energía Nuclear (LEN)** regula el desarrollo de combustibles, uso de la energía nuclear, investigación científica y técnica, y la industria nuclear. La responsabilidad civil por accidentes o daños nucleares la rige la **Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares (LRCDN)**, que está separada de la Ley de Energía Nuclear.

La **Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)** señala en el artículo 29 la facultad del gobierno federal para realizar la **evaluación de impacto ambiental** en materia de residuos peligrosos: El artículo 29 plantea que corresponderá al Gobierno Federal, por conducto de la Secretaría, evaluar el impacto ambiental a que se refiere el artículo 28 (Impacto ambiental) de esta Ley, particularmente tratándose de las siguientes materias:

VI. Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos.

La manifestación de impacto ambiental deberá ir acompañada de un estudio de riesgo de obra, de sus modificaciones o de las actividades previstas, consistente en las medidas técnicas preventivas y correctivas para mitigar los efectos adversos al equilibrio ecológico durante su ejecución, operación normal y en caso de accidente.

La jurisdicción sobre el tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos radiactivos pertenece a la **Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardia (CNSNS)**, una dependencia reguladora dependiente de la Secretaría de Energía. La CNSNS cuenta con la autoridad administrativa y de verificación de la observancia por parte de la industria nuclear, teniendo la facultad de expedir Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) sobre seguridad y salud en cuanto al manejo y disposición de minerales radiactivos.

Los residuos radiactivos se definen por una serie de términos establecidos tanto en la LEN como en la LRCDN. Al igual que la definición de residuos peligrosos, existen características de residuos radiactivos y una enumeración de los mismos. Los residuos radiactivos, considerados como sustancias inherentemente peligrosas, incluyen en términos generales los materiales radiactivos producidos durante la fabricación o uso de combustibles nucleares, o que se han vuelto radiactivos debido a la exposición a la radiación.

**Tabla 3.4 Normas Oficiales Mexicanas en materia de energía nuclear**

Clave	Título de la norma
NOM-001-NUCL-1994	Factores para el cálculo del equivalente de dosis.
NOM-003-NUCL-1994	Clasificación de instalaciones o laboratorios que utilizan fuentes abiertas.
NOM-004-NUCL-1994	Clasificación de los desechos radiactivos.
NOM-005-NUCL-1994	Límites anuales de incorporación (LAI) y concentraciones derivadas en aire (CDA) de radionúclidos para el personal ocupacionalmente expuesto.
NOM-006-NUCL-1994	Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos del público.
NOM-008-NUCL-1994	Límites de contaminación superficial con material radiactivo.
NOM-018-NUCL-1995	Métodos para determinar la concentración de actividad y actividad total en los bultos de desechos radiactivos.
NOM-019-NUCL-1995	Requerimientos para bultos de desechos radiactivos de nivel bajo para su almacenamiento definitivo cerca de la superficie.
NOM-020-NUCL-1995	Requerimientos para instalaciones de incineración de desechos radiactivos.
NOM-022/1-NUCL-1996	Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 1 Sitio
NOM-022/2-NUCL-1996	Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 2 Diseño.
NOM-022/3-NUCL-1996	Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 3. Operación y clausura.
NOM-024-NUCL-1995	Requerimientos y calibración de dosímetros de lectura directa.
NOM-026-NUCL-1999	Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.
NOM-027-NUCL-1996	Especificaciones para el diseño de instalaciones radiactivas tipo II clases a, b y c.
NOM-028-NUCL-1996	Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas.
NOM-031-NUCL-1999	Requerimientos para la calificación y entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.
NOM-032-NUCL-1997	Especificaciones técnicas para la operación de unidades de teleterapia que utilizan material radiactivo.
NOM-033-NUCL-1999	Especificaciones técnicas para la operación de unidades de teleterapia: aceleradores lineales.
NOM-035-NUCL-1999	Límites para considerar un residuo sólido como desecho radiactivo.
NOM-036-NUCL-2001	Requerimientos para instalaciones de tratamiento y acondicionamiento de los desechos radiactivos.
NOM-012-STPS-1999	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes.

Para poder desarrollar una actividad nuclear, incluyendo la adquisición, importación, exportación, posesión, uso, transferencia, transporte, almacenamiento y disposición final de materiales o residuos radiactivos, se requiere una licencia expedida por la CNSNS. Esta Comisión debe asegurarse de que el solicitante cumpla con las normas técnicas de seguridad establecidas en las NOM's aplicables, y

tiene la facultad de condicionar la autorización del permiso sobre la aplicación de salvaguardas preventivas. Además el solicitante debe inscribirse en el Registro Nacional de Control de Combustibles y Materiales Nucleares a cargo de la misma comisión

Toda actividad relacionada con los residuos radiactivos, incluyendo el almacenamiento, transporte y disposición, debe llevarse a cabo de acuerdo con las políticas de seguridad nuclear establecidas por la CNSNS. Un concepto esencial en la seguridad nuclear es la protección al ambiente, que abarca la protección contra la exposición a elementos radiactivos de los trabajadores y la ciudadanía. La SEMARNAT, bajo la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), tiene la autoridad para requerir una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de todas las actividades nucleares, incluyendo el tratamiento, almacenamiento y disposición. Sin embargo ninguna de las leyes descritas establecen políticas específicas para la reducción de residuos radiactivos.

**Tabla 3.5 Instrumento de Gestión, ININ y CADER**

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) almacena temporalmente los residuos radiactivos de baja actividad que se generan en México, dispone de una instalación diseñada y construida ex-profeso, equipada con los equipos y sistemas de manejo, control y vigilancia requeridos en la licencia expedida por la CNSNS. Se trata del Centro de Almacenamiento de Desechos Radiactivos (CADER) ubicado en el kilómetro 18.5 de la carretera Tizayuca-Otumba en el municipio de Temascalapa, Estado de México.

El sitio fue seleccionado con base en un estudio realizado por la Dirección de Seguridad Radiológica de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (antecesora del ININ) en los años 60, donde se concluyó que la zona donde se encuentra el CADER llenaba las condiciones requeridas para la instalación de depósitos de desechos radiactivos.

Toda disposición de residuos radiactivos debe cumplir con las normas generales sobre el uso de terrenos y conservación del suelo establecidas en la LGEEPA y con las Normas Oficiales Mexicanas expedidas por la CNSNS. La autorización para eliminar residuos radiactivos requiere de tres permisos fundamentales:

- 1) Una evaluación de impacto ambiental aprobada por el Instituto Nacional de Ecología (INE, SEMARNAT)
- 2) Un permiso especial de disposición otorgado por la CNSNS.
- 3) Un permiso de la Secretaría de Salud (SSA). La disposición de residuos radiactivos se prohíbe estrictamente en los tiraderos de residuos no peligrosos y peligrosos. (NOM-055-ECOL-1993, que establece los requisitos que deben cumplir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excluyendo los residuos radiactivos).

Todo daño nuclear recae en la Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares, si bien la responsabilidad por daños específicos que resulten de los residuos radiactivos no se contemplan de manera específica, en términos generales la ley considera todos los daños y perjuicios radiactivos potenciales. El daño nuclear se define en la LRCDN como cualquier pérdida de la vida humana, daños personales o a los bienes que resulten directa o indirectamente de las propiedades radiactivas, tóxicas, explosivas u otras propiedad peligrosas o una combinación de ellas, de cualquier combustible nuclear, sus productos o residuos radiactivos de una instalación nuclear. Una instalación nuclear abarca a los reactores nucleares, a los fabricantes de materiales nucleares, así como a las instalaciones de tratamiento, almacenamiento y reuso de residuos radiactivos.

**Tabla 3.6 Síntesis de la normatividad en México**

Instrumento Normativo	Descripción
Constitución Política de los Estados Unidos	Artículo 27; todos los minerales radiactivos son propiedad de la Nación
Ley de Energía Nuclear	Explotación, aprovechamiento y extracción de minerales radiactivos. Desarrollo de combustibles, uso de la energía nuclear, investigación científica y técnica, y la industria nuclear.
Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares	Responsabilidad civil por accidentes o daños nucleares y expide las licencias para desarrollar actividades nucleares.
Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardia	Tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos radiactivos y expedición normas
Registro Nacional de Control de Combustibles y Materiales Nucleares	Requisito de todo generador
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	Evaluaciones de impacto ambiental
Normas Oficiales Mexicanas	Límites y requerimientos técnicos

La LRCDN no señala específicamente disposiciones sobre la indemnización o responsabilidad por daños y perjuicios resultantes del manejo o disposición inadecuados de residuos radiactivos. En lugar de ello, se asigna la responsabilidad a los operadores de las instalaciones nucleares en caso de un accidente nuclear. El término operador incluye de manera implícita el ducto que transporta o almacena materiales radiactivos. Se asigna una responsabilidad objetiva al operador de una instalación nuclear por todos los daños y perjuicios resultantes de un accidente nuclear. Se hace una excepción en los casos en los que el accidente nuclear fue el resultado de la guerra o catástrofes naturales.

Además, si el operador puede demostrar la negligencia contribuyente o fraude por parte de la parte agraviada, puede reducirse o eliminarse la adjudicación de daños y perjuicios. Sin embargo, los operadores de residuos radiactivos tiene una responsabilidad limitada por los daños que resulten del almacenamiento de sustancias nucleares. En caso de que exista más de un operador, todos los operadores serán responsables en forma conjunta y solidaria.

A pesar de la asignación de responsabilidad objetiva por un gran número de circunstancias, la responsabilidad del operador se limita , bajo el Artículo 9 de la Ley Responsabilidad Nuclear, a 100,000 pesos por daños a bienes de terceros. Las demandas por muerte se limitan a 1000 veces el salario mínimo en el Distrito Federal. Las demandas por responsabilidad total tienen un tope de 1500 veces el salario mínimo en el Distrito Federal y la responsabilidad parcial se limita a 500 veces el salario mínimo en el Distrito Federal. La prescripción para presentar demandas contra operadores por daños y perjuicios que resulten de accidentes nucleares dentro de su competencia es de 10 años. La aplicación de las sanciones civiles es independiente de las sanciones administrativas o penales a que hubiera lugar.

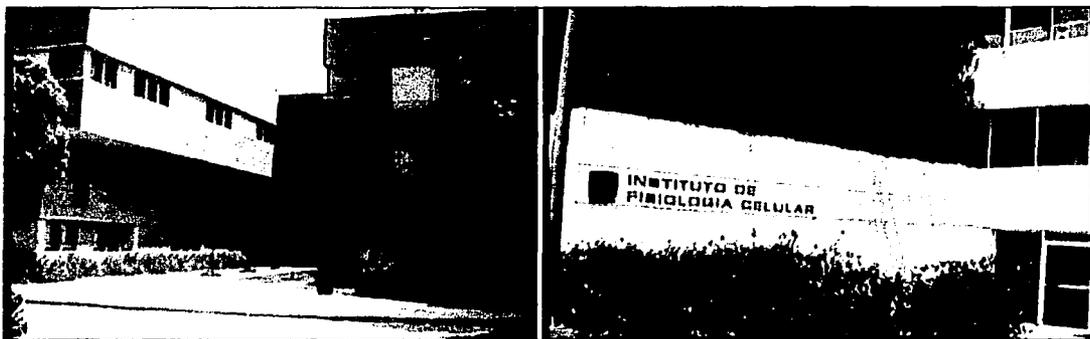
## Capítulo 4

### EVALUACIÓN DEL MANEJO DE LOS MATERIALES Y RESIDUOS RADIATIVOS EN EL INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR

#### 4.1 El Instituto de Fisiología Celular de la UNAM.

La Universidad tiene entre sus ejes sustantivos la tarea de impulsar y renovar la docencia e investigación del país, dando pie a centros de investigación que contribuyan con avances tecnológicos y científicos que ayuden al desarrollo económico y social del país.

El Instituto de Fisiología Celular tiene como antecedente el Departamento de Biología Experimental del Instituto de Biología, el cual se fundó en septiembre de 1973 con una planta académica de doce investigadores. De acuerdo con su reglamento interno tiene las siguientes funciones: llevar a cabo investigaciones científicas en las distintas especialidades de la fisiología de las células; participar con otras instituciones en trabajos sobre esta área del conocimiento; preparar investigadores y personal docente y técnico; difundir, promover y divulgar los resultados obtenidos a través de los medios más adecuados, tanto nacionales como internacionales. Actualmente tiene como director al Dr. Jesús Adolfo García-Sáinz, quien entró en funciones en el año 2001.



**Figura 4.1** Instituto de Fisiología Celular, lado izquierdo fachada del edificio de Biofísica y Neurociencias, lado derecho fachada del edificio de Bioquímica, Biología Celular y Genética Molecular

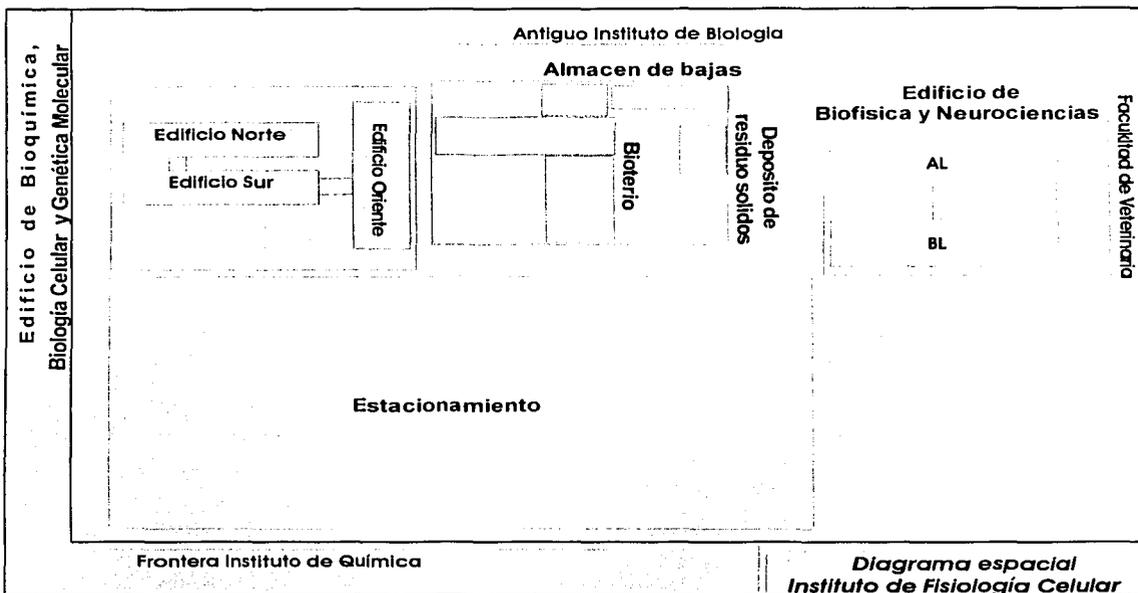
El Instituto ha sido considerado, durante más de 20 años, uno de los mejores centros de investigación básica en México en los campos de la biología moderna y las ciencias biomédicas. Cuenta con investigadores que han sido distinguidos con el Premio Nacional de Ciencias y Artes, entre ellos los doctores Adolfo García Sáinz, René Drucker Colín; premios UNAM y de la Academia Mexicana de Ciencias, como los doctores Armando González Puyou y Ricardo Tapia, entre otros investigadores titulares que trabajan en 5 departamentos: Bioquímica, Biofísica, Biología Celular, Genética Molecular y Neurociencias. Cada uno de los Departamentos está constituido por unidades básicas, los denominados laboratorios, que en su mayoría están integrados por un investigador titular - responsable del mismo-, un técnico académico -que desarrolla funciones de apoyo a la investigación- y varios estudiantes que van desde el nivel de pregrado hasta el de posdoctorado. Por el momento sólo

un número reducido de laboratorios, a cargo de investigadores eméritos y Titulares "C", cuentan con más de un técnico y con el apoyo de investigadores temporales, del nivel Asociado "C", denominados adjuntos.

**Tabla 4.1 Personal Académico (Agenda Estadística UNAM, 1998)**

Cargo	Número
Investigadores de Carrera	48
Profesores	0
Técnicos Académicos	54
Ayudantes de Investigador	0
Otro Personal Académicos en la Dependencia	6
	108

El Instituto abarca una extensión de 14,168 m<sup>2</sup> donde se distribuyen 5 edificios (Sur, Norte, Oriente, Biofísica y Neurociencias) con 46 laboratorios de investigación, un taller de mantenimiento, la unidad de fotografía y la unidad de dibujo, además se cuenta con una biblioteca especializada, la unidad de histología, de biología molecular, de cómputo, y la unidad de microscopía electrónica y confocal. También, dentro de la área del IFC, se encuentra el bioterio, el almacén de bajas y un pequeño invernadero.



**Figura 4.2 Diagrama espacial del Instituto de Fisiología Celular**

El Instituto de Fisiología Celular, esta ubicado dentro de Ciudad Universitaria (UNAM), en la zona de institutos cerca del metro universidad y colinda con la Facultad de Veterinaria, el Instituto de Química y el Instituto de Astronomía (Figura 4.3)

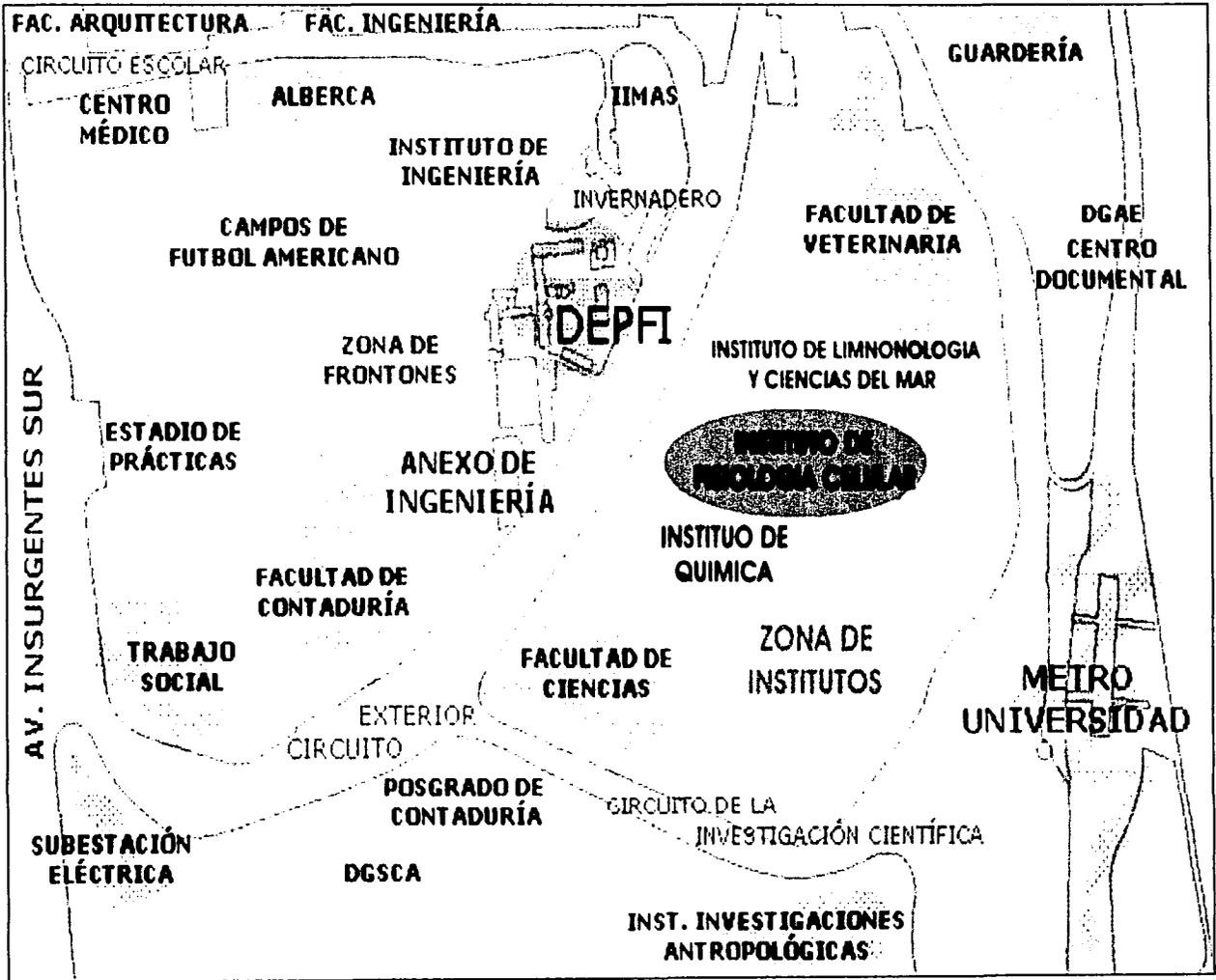


Figura 4.3 Localización del Instituto de Fisiología Celular dentro de Ciudad Universitaria

#### 4.2 Metodología de evaluación del manejo de materiales y disposición de residuos. Prácticas seguras en el laboratorio, protección a la salud y al ambiente.

El proyecto de tesis presentado tiene como objetivos principales: el diseño de un modelo de gestión ambiental para los residuos peligrosos especiales generados en institutos y centros de Investigación; en particular la elaboración de una propuesta viable en el manejo, almacenamiento y disposición de los residuos peligrosos especiales en el Instituto de Fisiología Celular.

Por lo que, dentro de un esquema de mejora ambiental en las prácticas al interior de la institución se debe considerar la administración y control de materiales además de los elementos de tipo técnico, científico que deben conjuntarse en apoyo de una propuesta de manejo de residuos. Lo anterior debe considerarse dentro de un marco nacional e internacional de implantación de estructuras organizativas que ayuden a atacar problemas de tipo ambiental. Los *sistemas de administración ambiental* son la mejor referencia, cuyo origen es la norma internacional ISO 14001 environmental management systems elaborada en 1998, que tienen entre sus puntos más importantes, la necesidad de un diagnóstico como punto de partida en la elaboración de un sistema de manejo integral de materiales y/o residuos. El diagnóstico ambiental implica el análisis de la situación actual en cuanto al impacto de las actividades de la institución en las personas y los riesgos o afectaciones al ambiente, la identificación de oportunidades de mejora y la estimación de beneficios potenciales ambientales y económicos. Entre otros puntos, esta norma internacional plantea el establecimiento de objetivos y metas de mejora del desempeño del sistema, el desarrollo de un programa de administración ambiental que consiste en detallar las acciones específicas y asignación de responsabilidades para cumplir los objetivos y metas planteados. Y plantea la responsabilidad de la eficiencia en la capacitación para la instrumentación del programa, así como el seguimiento de la ejecución y la evaluación de resultados (Figura 4.4).

Por lo que, para elaborar un diagnóstico acerca del funcionamiento actual del manejo, almacenamiento y disposición de los residuos radiactivos que el Instituto genera, fue necesario revisar las recomendaciones que los organismos internacionales (la Comisión Internacional de Protección Radiológica y el Organismo Internacional de Energía Atómica) hacen a ese respecto. Encontrando cuatro puntos nodales (Garonis, 2000) que se deben de aplicar para el manejo y control de los materiales radiactivos:

1. Cumplimiento de las leyes nacionales de la actividad nuclear y las normas regulatorias de la autoridad local.
2. Garantías de seguridad radiológica y convencional de los trabajadores y del público en general.
3. Preservación del ambiente y las personas en contacto con las actividades de manejo de materiales radiactivos.
4. Prevención de fallas en la operación del manejo de material radiactivo.

**FALTA  
LAS  
PAGINAS**

**47**

**A**

**48**


**U.N.A.M.**  
**INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR**  
**SOLICITUD DE DESECHOS RADIOACTIVOS**


Fecha: \_\_\_\_\_

**DRA. ROCÍO BALCEDA SACANELLES**  
**ENCARGADA DE LA SEGURIDAD**  
**RADIOLOGICA**  
**PRESENTE**

Me permite hacer de su patrimonio la relación de desechos radiactivos que se allegan para su procesamiento.

Laboratorio: \_\_\_\_\_ Responsable: \_\_\_\_\_

**SOLIDOS**

ISOTOPOS	ACTIVIDAD	CANTIDAD

**LIQUIDOS**

ISOTOPOS	ACTIVIDAD	CANTIDAD

Atenciones: \_\_\_\_\_

Nombre y firma: \_\_\_\_\_

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 4.5 Ejemplo de las hojas de datos internas de residuos radiactivos del IFC (Anexo 3)

Y un manifiesto (Figura 4.6) de generación de residuos radiactivos que el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) llena como prueba de la transferencia de residuos para el control externo que la CNSNS debe conocer. El manifiesto cuenta con la descripción del tipo de envase en el que se encuentran los residuos, peso o volumen, el radioisótopo, estado físico, actividad y fecha.

<p style="text-align: center;">  <b>GERENCIA DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA</b>  <b>DEPARTAMENTO DE DESECHOS RADIACTIVOS</b>  <b>RECEPCIÓN DE DESECHOS RADIACTIVOS</b> </p> <p>                 INSTITUCIÓN O EMPRESA: <u>UNAM - INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR</u>      TELÉFONO: <u>5223815</u>                  DIRECCIÓN: <u>CERRO UNIVERSITARIO - MÉXICO, D.F.</u>                  FECHA: <u>DRA. ROCÍO BALCEDA SACANELLES</u>      No. de LIBRO DE CUENTA: <u>MOE 2001-08-01</u> </p> <p> <b>1) DESECHOS RADIACTIVOS SÓLIDOS</b> </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TIPO DE ENVASE</th> <th>No. DE ENVASES</th> <th>PESO (kg)</th> <th>ISÓTOPO</th> <th>ACTIVIDAD</th> <th>CLASIFICACIÓN</th> <th>NIVEL DE RADIACIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><u>Bolsas de plástico</u></td> <td><u>4</u></td> <td><u>20</u></td> <td><u><sup>137</sup>Cs</u></td> <td><u>2.2110E+05</u></td> <td><u>2.2110E+05</u></td> <td><u>CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL</u></td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>                 CASO NUMÉRICO: <u>Recepción de 4 bolsas de plástico con residuos radiactivos de <sup>137</sup>Cs en el IFC de la UNAM.</u> </p>	TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	PESO (kg)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN	<u>Bolsas de plástico</u>	<u>4</u>	<u>20</u>	<u><sup>137</sup>Cs</u>	<u>2.2110E+05</u>	<u>2.2110E+05</u>	<u>CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL</u>																						<p> <b>2) DESECHOS RADIACTIVOS LÍQUIDOS</b> </p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">TIPO DE ENVASE</th> <th rowspan="2">No. DE ENVASES</th> <th rowspan="2">VOLUMEN (litros)</th> <th rowspan="2">ISÓTOPO</th> <th rowspan="2">ACTIVIDAD</th> <th rowspan="2">CLASIFICACIÓN</th> <th colspan="2">NIVEL DE RADIACIÓN</th> </tr> <tr> <th>Contador</th> <th>µSv</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>                 OBSERVACIONES: _____             </p> <p style="text-align: center;"> <b>UNAM - INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR</b>      Código de envío de residuos: <u>00000</u> </p> <p>                 Que acompaña el presente documento de participación de residuos, expedido para el envío de residuos generados por el IFC de la UNAM en cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades, usos y procedimientos de los manifiestos.             </p> <p>                 ENTREGO POR EL USUARIO: <u>Rocio Balceda Sacanelles</u>      FIRMA: <u>[Firma]</u>                  RECIBO POR EL USUARIO: <u>[Firma]</u>      FIRMA: <u>[Firma]</u>                  LUGAR: <u>México, D.F.</u>      FECHA: <u>15/06/02</u> </p>	TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	VOLUMEN (litros)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN		Contador	µSv																																
TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	PESO (kg)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN																																																																								
<u>Bolsas de plástico</u>	<u>4</u>	<u>20</u>	<u><sup>137</sup>Cs</u>	<u>2.2110E+05</u>	<u>2.2110E+05</u>	<u>CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL</u>																																																																								
TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	VOLUMEN (litros)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN																																																																								
						Contador	µSv																																																																							

Figura 4.6 Ejemplo de manifiesto del ININ para los residuos radiactivos en el IFC (Anexo 4)

## 4.4 Resultados

### 4.4.1 Experimentos con material radiactivo

En el Instituto de Fisiología Celular se realizan experimentos utilizando técnicas con isótopos radiactivos en donde se investigan las funciones celulares, el metabolismo, las distintas vías de entrada, salida o funcionamiento de los organismos y sus órganos, como por ejemplo en la función y regulación de receptores acoplados a proteína-G por señalización de calcio, en acciones fisiológicas y farmacológicas de adenosina, en investigaciones como la regeneración del hígado o los efectos del potasio y del calcio en el metabolismo de la levadura. En términos generales se puede observar que la hibridación, el marcaje de sondas, el radioinmunoanálisis y marcado de DNA son los experimentos donde se utiliza material radiactivo.

### 4.4.2 Generación de residuos radiactivos

Los datos de residuos radiactivos que se mencionan a continuación se basan en los manifiestos de entrega de residuos al ININ por el IFC en el periodo de Mayo de 2001 a Febrero de 2002, sin que se pudiera facilitar mayor información por problemas administrativos.

#### Residuos radiactivos sólidos

Los residuos radiactivos sólidos generados fueron  $^{32}\text{P}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{14}\text{C}$  y  $^{35}\text{S}$ , en donde los valores acumulados de la generación de residuos a lo largo de estos 11 meses fueron 115 kg, 34 kg, 3 kg, 15 kg y 3 kg respectivamente, lo que representa un total de 170 kg. El residuo que el Instituto generó en mayor cantidad fue el  $^{32}\text{P}$  con un 67% en peso y el que menos generó fue el  $^{125}\text{I}$  con un 2% en peso (Figura 4.6). Dentro del reporte del ININ se encontró que la clasificación para todos estos residuos es de sólidos compresibles y su actividad fue para el  $^{32}\text{P}$  de 0.94  $\mu\text{Bq}$  como mínimo en el mes de octubre de 2001 hasta 59.2  $\mu\text{Bq}$  en el mes de junio de 2001.

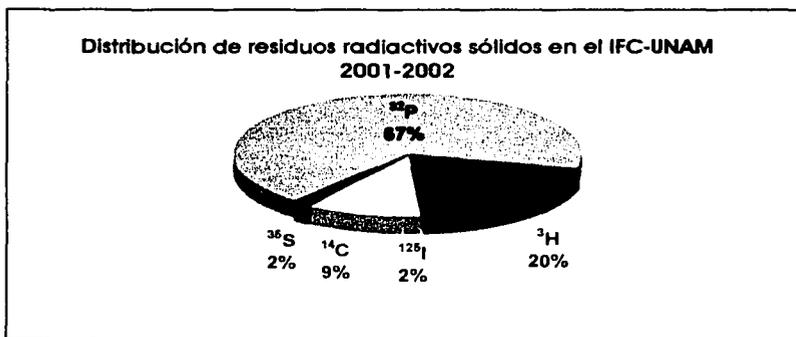


Figura 4.7 Distribución (% peso) de los residuos radiactivos sólidos en el IFC, Manifiestos ININ, 2001-2002.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**FALTA  
LAS  
PAGINAS**

**51**

**A**

**56**

respectivamente. Los siguieron los residuos de los meses de agosto a octubre con cantidades de 10 a 15 kg generados por los mismos laboratorios. En el resto de los meses se generaron residuos que fluctúan entre 0.8 kg y 5 kg.

Dentro de las cantidades globales también vemos una gran diferencia, mientras que el ININ reporta 115 kg, la suma de los residuos generados de acuerdo a las hojas internas da como resultado 185 kg, que tiene una diferencia de 70 kg. Su actividad se presenta en la siguiente Tabla

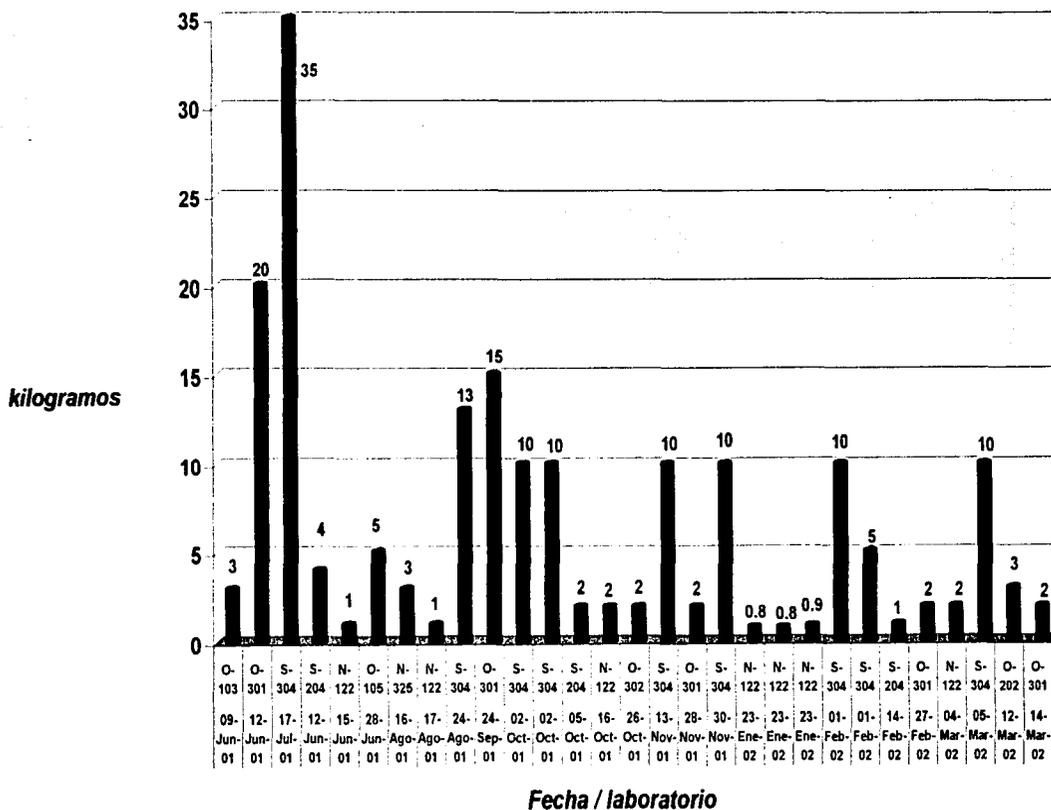
**Tabla 4.8 Actividad de residuos sólidos de <sup>32</sup>P, hojas internas del IFC, 2001-2002**

Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades	Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades
09-Jun-01	O-103	3000.0	mCi/mmol	26-Oct-0	O-302	0.5	mCi
12-Jun-01	O-301	3000.0	Ci/mmol	13-Nov-0	S-304	5.0	mCi
17-Jul-01	S-304	5.0	mCi	28-Nov-0	O-301	3000.0	Ci/mmol
12-Jun-01	S-204	20.0	μCi	30-Nov-0	S-304	5.0	mCi
15-Jun-01	N-122	20.0	μCi	23-Ene-0	N-122	3000.0	Ci/mmol
28-Jun-01	O-105	500.0	μCi	23-Ene-0	N-122	3000.0	Ci/mmol
16-Ago-01	N-325	200.0	cuentas/min	23-Ene-0	N-122	3000.0	Ci/mmol
17-Ago-01	N-122	250.0	μCi	01-Feb-0	S-304	5.0	mCi
24-Ago-01	S-304	7.0	mCi	01-Feb-0	S-304	2.5	mCi
24-Sep-01	O-301	3000.0	Ci/mmol	14-Feb-0	S-204	5.0	μCi
02-Oct-01	S-304	10.0	mCi	27-Feb-0	O-301	3000.0	Ci/mmol
02-Oct-01	S-304	10.0	mCi	04-Mar-0	N-122	250.0	μCi
05-Oct-01	S-204	50.0	μCi	05-Mar-0	S-304	10.0	mCi
16-Oct-01	N-122	250.0	μCi	12-Mar-0	O-202	1.0	mCi

**FALTA  
PAGINA**

**58**

### Residuos radiactivos sólidos de <sup>32</sup>P, IFC-UNAM. 2001-2002



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 4.13 Distribución de residuos sólidos de <sup>32</sup>P por laboratorios generadores, hojas internas, IFC, 2001-2002

La generación de residuos radiactivos de  $^{86}\text{Rb}$  se realizó por un solo laboratorio dentro de los meses de noviembre de 2001 y febrero de 2002 (Tabla 4.9), que significa dentro del total de los residuos 15 kg pero que no son nombrados dentro de los manifiestos de residuos sólidos que se transportaron al ININ. Al menos los residuos de noviembre debieron estar reportados en los manifiestos, lo que confirma falta de seguimiento en el destino final de los residuos existentes dentro del almacén y por supuesto los que se trasladan fuera del Instituto. La actividad de estos residuos no fue especificada.

Tabla 4.9 Relación de datos de los residuos sólidos de  $^{86}\text{Rb}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002

Fecha	Laboratorio	kg	Actividad	Unidades
16-Nov-01	BL-301	5	NE	-
26-Feb-02	BL-301	10	NE	-

Por último se presenta la Figura 4.14 con los distintos valores globales de las masas los residuos radiactivos comparando los datos del ININ y de las hojas internas, a modo de resumen de las diferencias entre estos controles en el manejo de residuos.

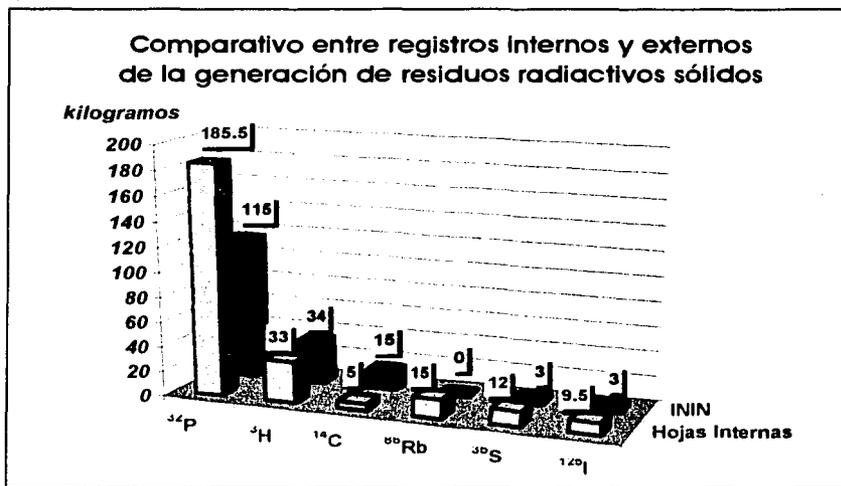


Figura 4.14 Comparativo de datos dentro de las hojas internas y el ININ de residuos radiactivos sólidos, 2001-2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Residuos radiactivos líquidos por laboratorio

Los residuos líquidos radiactivos de menor generación según las hojas internas del IFC fueron de  $^{35}\text{S}$  (Tabla 4.10) con solo 2.6 kilogramos en los meses de septiembre y marzo de 2001, este residuo no está contemplado dentro de los manifiestos del ININ. Su actividad se muestra a continuación:

Tabla 4.10 Relación de datos de los residuos líquidos de  $^{35}\text{S}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002

Fecha	Laboratorio	Litros	Actividad	Unidades
28-Sep-01	O-202	0.8	0.1	mCi
sólidos 12-Mar-02	O-202	1.8	2.0	mCi

Los residuos líquidos de  $^{125}\text{I}$  fueron generados en 4 laboratorios que se muestran en la Figura 4.15, donde el laboratorio O-202 tuvo la mayor contribución con 6.35 litros, mientras los demás laboratorios disminuyen su generación desde 3 litros del BL-301 hasta 0.5 litros del S-204, generándose en los laboratorios en prácticamente los 11 meses un volumen total de 11.05 litros, lo cual representa un aumento con respecto a los manifiestos del ININ (8 litros de  $^{125}\text{I}$ ) de 3.05 litros.

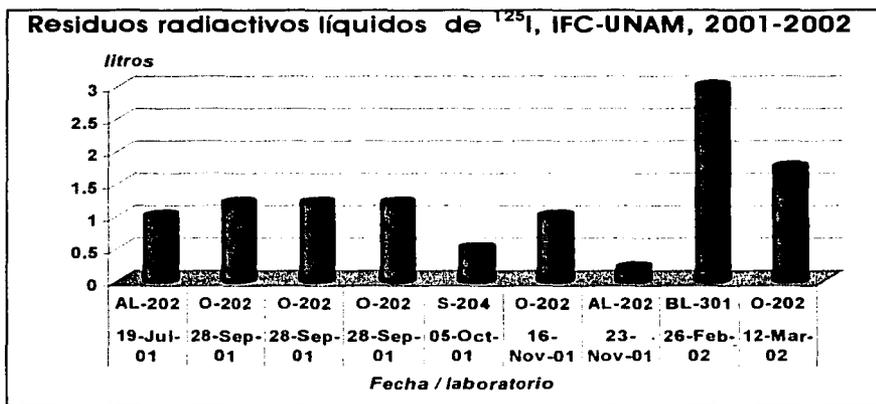


Figura 4.15 Distribución de residuos líquidos de  $^{125}\text{I}$  por laboratorios generadores, hojas internas, IFC, 2001-2002

La actividad que presentaron estos residuos se encuentra en la Tabla 4.11., donde los residuos presentan actividades distintas dependiendo del laboratorio que los generó que van desde 1  $\mu\text{Ci}$  hasta 1 mCi. Los residuos generados a partir de  $^{125}\text{I}$ , son de especial importancia al tratarse de un residuo con radiaciones tipo  $\gamma$ , lo que significa que será necesario el uso de barreras de plomo para su contención.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.11 Relación de datos de los residuos líquidos de  $^{125}\text{I}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002

Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades	Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades
19-Jul-01	AL-202	1.0	$\mu\text{Ci}$	16-Nov-01	O-202	0.1	mCi
28-Sep-01	O-202	0.1	mCi	23-Nov-01	AL-202	1.0	$\mu\text{Ci}$
28-Sep-01	O-202	0.1	mCi	26-Feb-02	BL-301	2.5	mCi
28-Sep-01	O-202	1.0	mCi	12-Mar-02	O-202	1.0	mCi
05-Oct-01	S-204	20.0	$\mu\text{Ci}$				

Los residuos líquidos de  $^{86}\text{Rb}$  (48 litros) reportados en las hojas internas presentan diferencias significativas con los registros del ININ (36 litros) con una diferencia favorable de 12 litros. Estos residuos solo fueron generados por el laboratorio BL-301, teniendo en el mes de julio de 2001 una cantidad considerable de 40 litros a diferencia de los meses de noviembre y febrero que fueron de tan solo 4 litros, mientras su actividad estuvo entre 40  $\mu\text{Ci}$  y 10 mCi.

Tabla 4.12. Relación de datos de los residuos líquidos de  $^{86}\text{Rb}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002

Fecha	Laboratorio	Litros	Actividad	Unidades
18-Jul-01	BL-301	40	40.0	$\mu\text{Ci}$
16-Nov-01	BL-301	4	4.3	mCi
26-Feb-02	BL-301	4	10.0	mCi

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

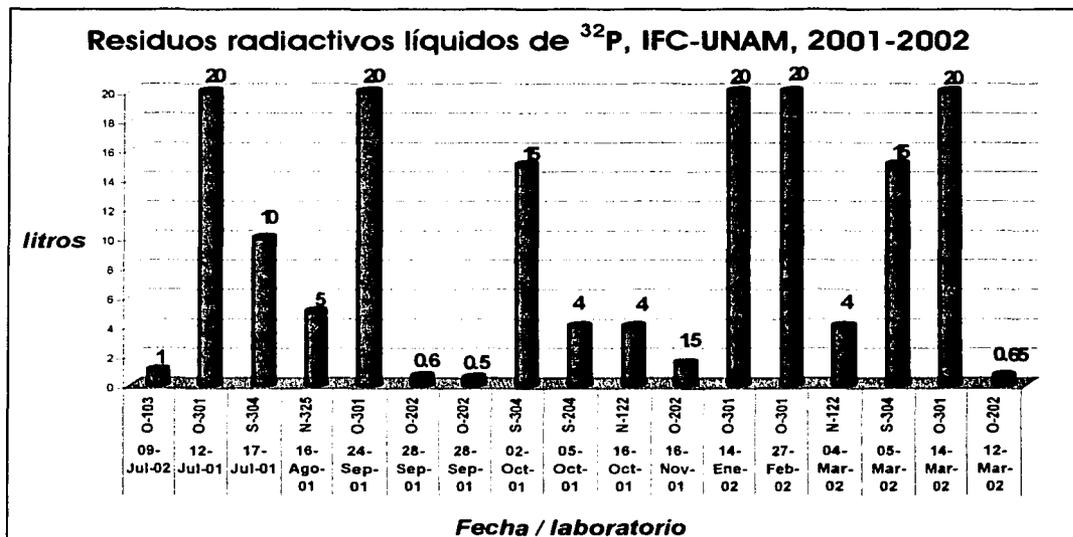


Figura 4.16 Distribución de residuos líquidos de  $^{32}\text{P}$  por laboratorios generadores, hojas internas, IFC, 2001-2002

El  $^{32}\text{P}$  es uno de los residuos que presentó mayores volúmenes repartidos en 7 laboratorios (Figura 4.16), para un total de 161 litros. Tan solo el laboratorio O-301 generó 100 litros, lo que representa el 62% del volumen total de los residuos líquidos de este isótopo. El siguiente laboratorio que contribuyó a la generación de  $^{32}\text{P}$  fue el S-304 con 25 litros (16 %, repartidos en dos meses), lo que significa que dos laboratorios de estos siete, generaron alrededor del 78 % de los residuos radiactivos líquidos de  $^{32}\text{P}$ . Otra cosa que es importante analizar es la diferencia con los manifiestos del ININ, que reportaron 77 litros a diferencia de lo reportado dentro de las hojas internas, con una diferencia de 84 litros, corroborando que el Instituto debe ser más cuidadoso en los registros de entrada y salida de material radiactivo de las instalaciones.

En cuanto a su actividad, se muestra la Tabla 4.13 con la actividad de cada residuo y los laboratorios de procedencia. Y aunque su energía de radiación es de  $\beta^-$  de alta energía no es necesario el uso de barreras acrílicas o de lucita, pero de ninguna forma se puede dejar de asegurar el desecho radiactivo generado en la experimentación.

**Tabla 4.13 Relación de datos de los residuos líquidos de  $^{32}\text{P}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002**

Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades	Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades
09-Jul-02	O-103	3000.0	mCi/mmol	16-Oct-01	N-122	250.0	$\mu\text{Ci}$
712-Jul-01	O-301	3000.0	Ci/mmol	16-Nov-01	O-202	0.3	mCi
17-Jul-01	S-304	5.0	mCi	14-Ene-02	O-301	3000.0	Ci/mmol
16-Ago-01	N-325	100.0	cuentas/min	27-Feb-02	O-301	3000.0	Ci/mmol
24-Sep-01	O-301	3000.0	Ci/mmol	04-Mar-02	N-122	250.0	$\mu\text{Ci}$
28-Sep-01	O-202	0.2	mCi	05-Mar-02	S-304	5.0	mCi
28-Sep-01	O-202	0.1	mCi	14-Mar-02	O-301	3000.0	Ci/mmol
02-Oct-01	S-304	5.0	mCi	12-Mar-02	O-202	1.0	mCi
05-Oct-01	S-204	200.0	$\mu\text{Ci}$				

Como último residuo radiactivo líquido y el de mayor importancia por su generación, tenemos al  $^3\text{H}$ , que sumó a lo largo de 11 meses un total de 473 litros. Esta es una cifra muy por encima del resto de los residuos, generándose en 7 laboratorios dentro del IFC.

El laboratorio de mayor contribución para el  $^3\text{H}$  fue el AL-304 con 260 litros (120 litros en julio y 140 litros en octubre de 2001) lo que representa un 55 % del total de los residuos generados de  $^3\text{H}$ . Después de este laboratorio, el BL-301 generó 104 litros, ó sea, el 22% en volumen total, los otros 5 laboratorios tienen una contribución mucho más baja aunque no deja de ser importante (Figura 4.17). Los residuos de  $^3\text{H}$  de acuerdo a las hojas internas, representan un valor superior a cuatro veces lo reportado en esos meses por el ININ. Existen diferencias muy grandes como para pensar que solo existen errores de medición, lo cual hace suponer una pérdida de los manifiestos entregados por el ININ, además de controles poco rigurosos en el manejo y desecho de materiales radiactivos.

Los residuos de  $^3\text{H}$  tienen una actividad desde 50  $\mu\text{Ci}$  hasta 2.7 mCi como se muestra en la Tabla 4.14

**Tabla 4.14 Relación de datos de los residuos líquidos de  $^3\text{H}$ , hojas internas del IFC, 2001-2002**

Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades	Fecha	Laboratorio	Actividad	Unidades
06-Jul-01	AL-3 04	760.0	$\mu\text{Ci}$	25-Sep-01	AL-202	35.0	S/unidades
17-Jul-01	S-304	100.0	$\mu\text{Ci}$	05-Oct-01	S-204	500.0	$\mu\text{Ci}$
12-Jun-01	S-204	100.0	$\mu\text{Ci}$	10-Oct-01	AL-304	872.0	$\mu\text{Ci}$
18-Jul-01	BL-301	1.0	mCi	16-Nov-01	BL-301	2.8	mCi
24-Ago-01	S-304	100.0	$\mu\text{Ci}$	29-Nov-01	AL-204	390.0	$\mu\text{Ci/nmol}$
27-Ago-01	AL-204	190.0	$\mu\text{Ci}$	26-Feb-02	BL-301	2.7	mCi
25-Sep-01	AL-202	35.0	S/unidades	06-Mar-02	N-122	50.0	$\mu\text{Ci}$

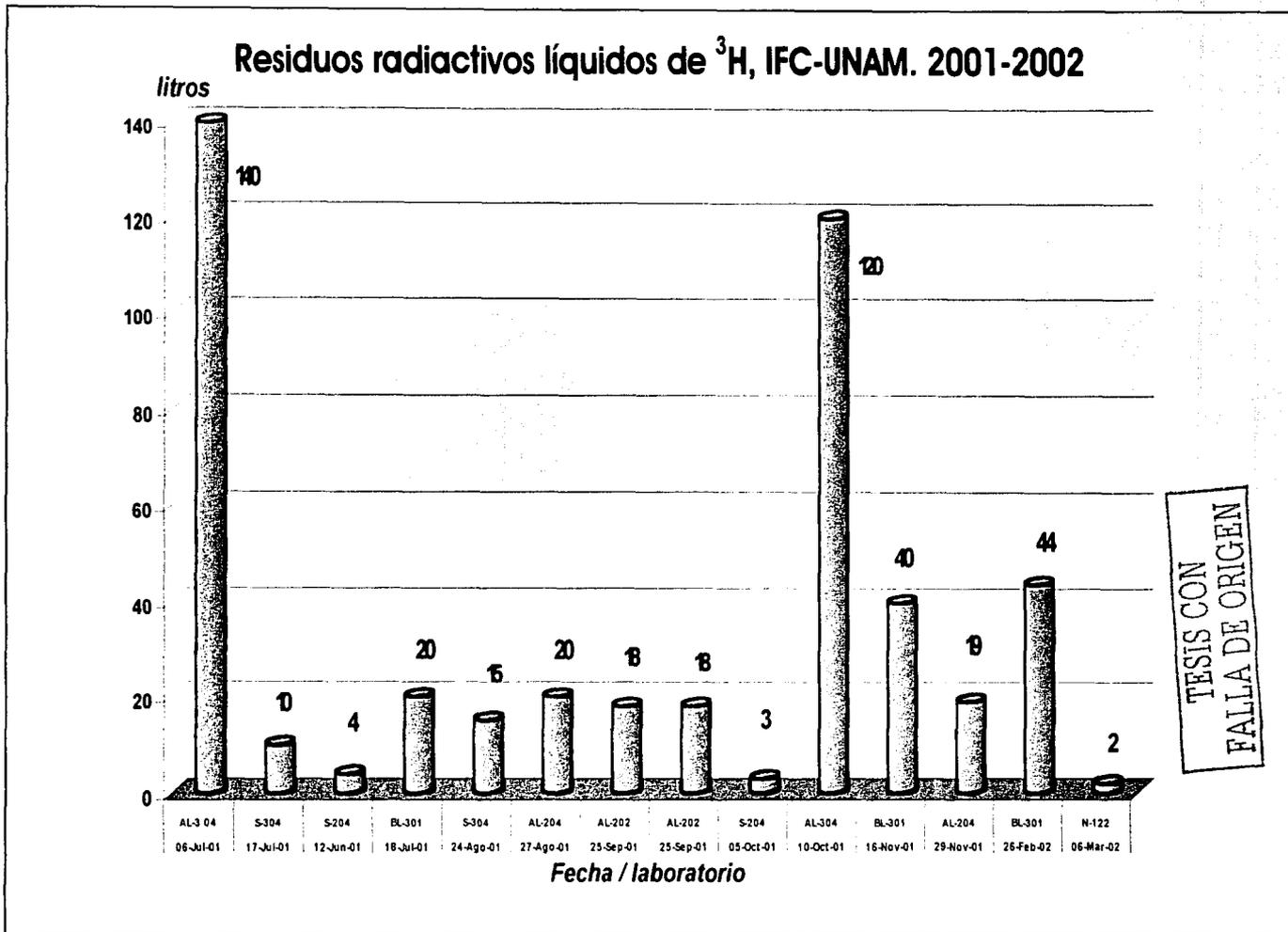


Figura 4.17 Distribución de residuos líquidos de  $^3\text{H}$  por laboratorios generadores, hojas internas, IFC, 2001-2002

Como recapitulación se muestra (Figura 4.18) una comparación entre los volúmenes reportados en los manifiestos del ININ y los volúmenes registrados en las hojas internas. Donde los valores con mayor diferencia se presentan para el  $^3\text{H}$  y el  $^{32}\text{P}$ , aunque existen datos muy diferentes, lo más probable es que se hayan presentado problemas de tipo administrativo y los residuos fueron mandados al ININ, aunque no se tengan registrados. Estos datos deberían tener una correspondencia aún para fines contables o administrativos, de no ser así, podrían causar vacíos en la justificación de gastos y para fines de seguridad, estos datos deberían estar en manos del jefe de seguridad a modo de establecer toda la cadena de custodia al interior del IFC.

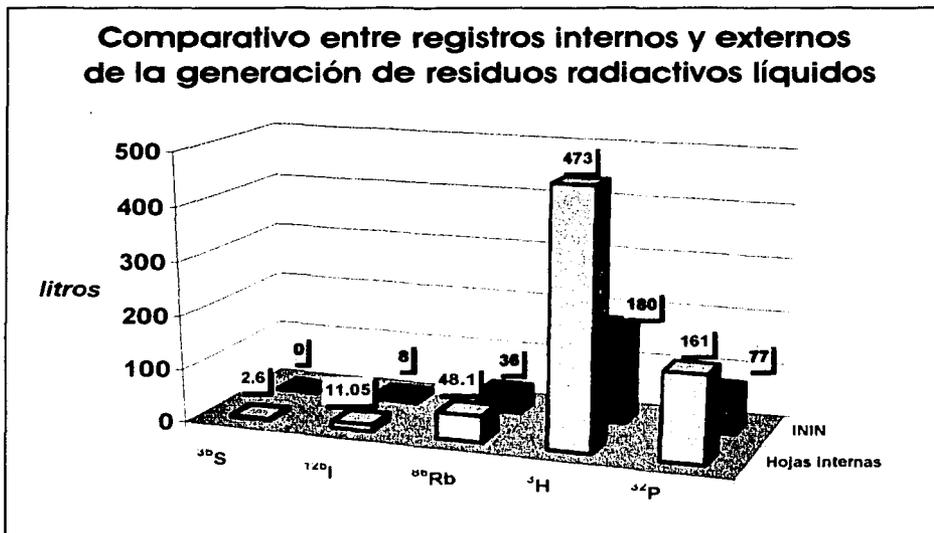


Figura 4.18 Comparativo de datos dentro de las hojas internas y el ININ de residuos radiactivos líquidos, 2001-2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.4.4 Tipos de materiales y residuos radiactivos

Lo primero que se identificó dentro del IFC para aplicar las listas de verificación fueron los laboratorios que manejaban materiales radiactivos y por ende desechaban los distintos isótopos después de su uso. Por lo que se identificaron 26 laboratorios (más del 55%) de los 47 existentes en el Instituto que utilizan material radiactivo dentro de sus investigaciones, ubicando todos los laboratorios que los han utilizado en los últimos dos años o piensan utilizarlo en un periodo breve. Algunos laboratorios no pudieron contemplarse dentro de los resultados de este diagnóstico, debido a la disminución o supresión de experimentos con materiales radiactivos recientemente ó simplemente por tratarse de laboratorios que tienen planes futuros (a largo plazo). Dentro del diagnóstico se contempló a dos laboratorios que en términos de materiales radiactivos, recursos humanos y experimentos de investigación pudieron plantear elementos suficientes para tomarlos en cuenta, además de su proximidad para realizarlos (entre 1 ó 2 meses). Los laboratorios referidos son el 225-N y 226-N que se encuentran en etapa de instalación dentro del Instituto.

Tabla 4.15 Relación de laboratorios y materiales radiactivos utilizados

No	Laboratorio	<sup>32</sup> P	<sup>3</sup> H	<sup>86</sup> Rb	<sup>22</sup> Na	<sup>35</sup> S	<sup>36</sup> Cl	<sup>14</sup> C	<sup>46</sup> Ca	<sup>125</sup> I	<sup>33</sup> P
1	122 N	☣	☣								
2	222 N	☣				☣					
3	225 N*	☣									
4	226 N*	☣									
5	324 N	☣				☣				☣	
6	325 N	☣				☣		☣		☣	
7	326 N		☣					☣			
8	204 S	☣	☣							☣	
9	206 S	☣									
10	303 Y 304 S	☣	☣			☣				☣	
11	305 S	☣	☣					☣	☣		
12	103 O	☣						☣			
13	105 O	☣									
14	106 O	☣									
15	201 O	☣								☣	☣
16	202 O	☣				☣				☣	
17	301 O	☣									
18	302 O	☣									
19	306 O	☣	☣	☣	☣	☣	☣	☣	☣		
20	AL-101	☣	☣								
21	AL-202	☣	☣							☣	
22	AL-204		☣					☣		☣	
23	AL-302		☣							☣	
24	AL-304	☣	☣								
25	BL-102	☣	☣					☣			
26	BL-301		☣	☣						☣	

Distribución del uso de materiales, porcentajes respecto al total de laboratorios que utilizan material radiactivo

84.6 % 50 % 7.7 % 3.8 % 23 % 3.8 % 23 % 7.7 % 34.6 % 3.8 %

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En el Instituto de Fisiología Celular se manejan y utilizan 10 distintos isótopos radiactivos que son el  $^{32}\text{P}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  y  $^{35}\text{S}$ . Algunos de estos materiales radiactivos no fueron reportados dentro de los últimos 11 meses, ya que si comparamos los residuos de los manifiestos y hojas internas mencionados en incisos anteriores, el  $^{45}\text{Ca}$ , el  $^{22}\text{Na}$  y el  $^{36}\text{Cl}$  no se mencionan, pero estos materiales según el personal de los distintos laboratorios son utilizados normalmente. Es importante entender que los institutos y centros de investigación utilizan periodos largos de tiempo en sus proyectos, que pueden ir desde meses hasta años, donde el uso de materiales radiactivos se hace en distintas etapas del proyecto de investigación y no necesariamente se utilizan todo el tiempo, pero son de uso común. El material radiactivo que se utiliza con mayor frecuencia en el IFC es el  $^{32}\text{P}$ , utilizándose en el 84.6 % del total de laboratorios (22 laboratorios), lo sigue el  $^3\text{H}$  con 13 laboratorios (46 %), cabe señalar que aunque este material se utiliza en menor número de laboratorios, fue el que presentó el volumen total mas alto. También el material  $^{125}\text{I}$  se utiliza en un número importante de laboratorios, representando un 35 %, el  $^{35}\text{S}$  tiene un 23% y el  $^{14}\text{C}$  un 19% del total de laboratorios (Tabla 4.15).

En especial, existe un laboratorio que utiliza distintos isótopos radiactivos en sus investigaciones, el 306-O maneja 8 de los 10 materiales radiactivos en uso dentro del IFC, lo que llama la atención ya que los distintos laboratorios utilizan entre 1 y 4 distintos radionúclidos, aunque esto no quiere decir que se puede restringir el uso de materiales para la investigación, si es necesario tener especial cuidado en los laboratorios que utilizan una gama de radionúclidos mayor, por que los riesgos pueden aumentar.

#### 4.4.5 Manejo de materiales

##### 4.4.5.1 Problemática del personal ocupacionalmente expuesto

Uno de los problemas que se pudieron observar dentro del Instituto, es el relacionado con el personal ocupacionalmente expuesto (POE), encontrando que la CNSNS autorizó a 38 personas para el uso de materiales radiactivos, a los cuales el ININ les entregó un dosímetro para monitorear los y revisar los niveles de exposición a los que se someten en el trabajo diario. EL POE debe utilizar su dosímetro en todo momento al trabajar en el Instituto, este personal tiene como condición para trabajar con isótopos radiactivos, el someterse a capacitación (La institución que en este caso los imparte es el ININ) y tomar cursos de actualización cada año, así como ciertos controles de seguridad como los exámenes médicos anuales para verificar su integridad física.

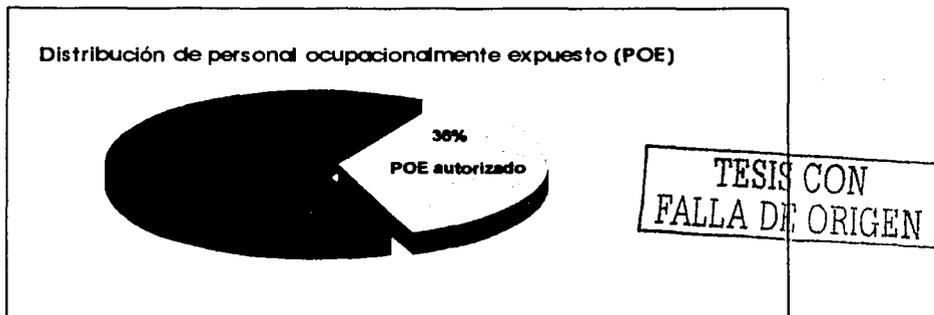
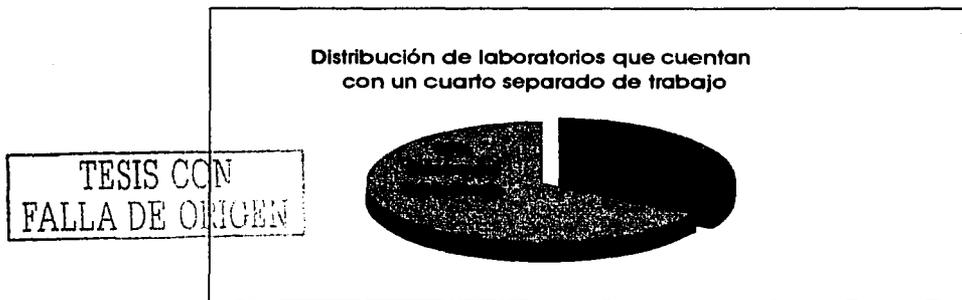


Figura 4.19 Comparativo entre personal ocupacionalmente expuesto autorizado y no autorizado

Pero existe otro conjunto de personas que utilizan material radiactivo sin contar con los beneficios que un POE reconocido puede tener. Los investigadores tienen como premisas importantes tomar en cuenta que los estudiantes o técnicos deben capacitarse y contar con la seguridad al interior de los laboratorios, pero no existe ningún control o procedimiento interno que asegure que las personas que se encuentran expuestas reciban un mínimo de capacitación. Gran parte de este personal no autorizado son estudiantes de servicio social o tesis (en su mayoría), los cuales tienen períodos cortos de trabajo y estancias reducidas dentro del IFC, lo que implica grandes costos si se piensa en canalizarlos para su capacitación y monitoreo por el ININ, aunque algunos de ellos si asisten a los cursos de actualización de manejo de material radiactivo que se imparten al interior del Instituto.

#### 4.4.5.2 Condiciones de trabajo en los laboratorios

La seguridad en el manejo de los materiales radiactivos, tiene una relación directa con las condiciones de trabajo en los laboratorios y por supuesto lo relativo al espacio de trabajo con el que se cuenta. En el IFC el 33 % de los laboratorios cuenta con un cuarto especial para la experimentación y manejo de los materiales radiactivos, en contraste con un 67% de los laboratorios que no cuenta con cuartos separados. Este no tiene el suficiente peso como para restringir el uso de material radiactivo, por que todos cuentan con una zona aislada dentro o fuera del laboratorio y específica para la experimentación con isótopos radiactivos. También se debe tomar en cuenta que existen problemas de espacios físicos en el Instituto y que no es posible por el momento asignar lugares especiales para las distintas actividades de cada uno de los laboratorios, y como veremos más adelante, las condiciones de seguridad influyen directamente en el manejo adecuado de radiactividad.



**Figura 4.20 Laboratorios que cuentan con cuarto separado para actividades con material radiactivo**

Los investigadores cuentan con procedimientos para el manejo de materiales radiactivos en el IFC, lo que comienza con el uso de pañales o papel absorbente en toda la zona de trabajo para evitar contaminación y el uso de equipo de seguridad que ayuda a evitar exposiciones innecesarias. Cada investigador cuenta con cierto material y equipo que a su criterio es el necesario para el manejo de los materiales. Pero no se cuenta con una lista de control para saber que equipo de seguridad tiene cada laboratorio y así salvaguardar su integridad física, esto no quiere decir que no lo tengan o no lo usen, pero si que falta mayor conocimiento acerca de cómo se esta trabajando al interior de los laboratorios, lo que puede derivar en problemas de exposición innecesaria a la radiación. En la Tabla 4.16 se muestra el diagnóstico acerca del equipo de seguridad con el que cuenta cada laboratorio en el IFC, esta Tabla tiene que relacionarse por fuerza con los isótopos radiactivos que utilizan

**Tabla 4.16 Relación de laboratorios y equipo de seguridad utilizado**

Laboratorio	Bata	Guantes	Mampara de lucha	Mampara de plomo	Mandil de plomo
122 N	b	b	b	NA	NA
222 N	b	b	b	NA	NA
324 N	b	b	b	†*	†*
325 N	b	b	b	†*	b
326 N	b	b	b	NA	NA
204 S	b	b	b	†*	†*
206 S	b	b	b	NA	NA
303 Y 304 S	b	b	b	†*	†*
305 S	b	b	b	NA	NA
103 O	b	b	b	NA	NA
105 O	b	b	b	NA	NA
106 O	b	b	b	NA	NA
201 O	b	b	b	NA	NA
202 O	b	b	b	b	†
301 O	b	b	b	NA	NA
302 O	b	b	b	NA	NA
306 O	b	b	b	NA	NA
AL-101	b	b	b	NA	NA
AL-202	b	b	b	†*	†*
AL-204	b	b	b	b	b
AL-302	b	b	†	NA	NA
AL-304	b	b	b	NA	NA
BL-102	b	b	b	NA	NA
BL-301	b	b	b	b	b

b Cuenta con el equipo de seguridad con <sup>125</sup>I

† No cuenta con el equipo de seguridad

NA No aplica al no usar material

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

para así comprender si existe alguna irregularidad importante. Los isótopos radiactivos que emiten radiación (tipo  $\gamma$ ) como el  $^{125}\text{I}$  deben utilizar barreras de plomo, mientras que las  $\beta^-$  como las emitidas por el  $^3\text{H}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$  necesitan barreras de lucita con solo algunos milímetros de espesor.

Dentro de la Tabla 4.16 se colocó un asterisco (\*) en los laboratorios con algunas irregularidades de seguridad en el trabajo, aunque en general se nota un nivel bueno en las medidas de reducción de riesgos para la experimentación dentro del Instituto..

En la Figura 4.21 se muestran algunos laboratorios que utilizan material radiactivo en la investigación, donde se puede notar una clara diferencia entre los laboratorios que tienen destinado un espacio especial para estas actividades y los que utilizan algún lugar (generalmente la campana de extracción) dentro del mismo laboratorio. Mientras que los laboratorios que tienen un cuarto apartado presentan mucho más espacio para colocar todos los aditamentos necesarios y material de seguridad, los laboratorios que manejan sus materiales radiactivos al interior del laboratorio, tienen menos espacio y es difícil restringir el paso de las personas.



Figura 4.21 Laboratorios y equipos de seguridad radiológica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.4.5.3 Manuales y planes de emergencia

Existe un manual de seguridad radiológica que se utiliza en el IFC pero que al parecer no todos lo conocen, al menos 7 laboratorios (27%) no tienen conocimiento de dicho manual en donde se incluye un pequeño plan de emergencia en el caso de que ocurra una contaminación radiactiva, así como algunos procedimientos y reglas para el manejo de materiales radiactivos. Además, el personal de 10 laboratorios (38%) desconocen si existen planes de emergencia, lo que implica mayores riesgos en caso de accidentes.

#### 4.4.5.4 Controles en el manejo de material y residuos radiactivos

Uno de los aspectos importantes dentro del manejo de residuos radiactivos es la determinación de períodos de generación de residuos radiactivos y tipos de isótopos radiactivos en uso, para así poder prever su forma de disposición y, en su caso, el tratamiento o acondicionamiento necesario. Por lo que encontramos que ningún laboratorio tiene mecanismos de comunicación acerca de los materiales utilizados, aunque si existen mecanismos para saberlo. Los técnicos académicos o los investigadores solicitan al departamento de compras del IFC cualquier adquisición de material, pero esta información sólo se utiliza en términos administrativos, no de prevención o control de materiales radiactivos. Existen algunos laboratorios que tienen según sus propias palabras un “club” que pide a proveedores específicos ciertos materiales radiactivos, lo que representa una fuente de información radiológica. Estos mecanismos son indirectos, pero muy seguros para ubicar los flujos de materiales que entran al IFC. Hasta ahora los investigadores reportan el uso de materiales radiactivos, sólo hasta el punto final del ciclo dentro del laboratorio, lo que implica que hasta que el isótopo radiactivo se convierte en desecho, es reportado al departamento de mantenimiento para su disposición.

#### 4.4.5.5 Mecanismos de minimización

También se preguntó dentro de cada laboratorio, si existían mecanismos para minimizar los residuos generados (Figura 4.21), para lo cual explicaron en prácticamente todos los casos que no existe algún procedimiento establecido y mucho menos en forma escrita, aunque se trataba en algunos laboratorios de trabajar al mínimo. Uno de los métodos de minimización que se lleva a cabo en distintos laboratorios consiste en el uso de materiales y equipo desechable hasta su contaminación radiactiva.

Fue importante establecer si dentro de los procedimientos de seguridad de cada laboratorio existía un registro interno del uso de material radiactivo (actividad utilizada) para el control diario de las actividades y personal involucrado en su manejo. Esto con el objetivo de saber con mayor certeza el uso, destino y las posibles pérdidas de todo el material radiactivo presente en el IFC.

Encontrando que el 50% de los laboratorios no cuentan con bitácoras internas para el manejo de los materiales radiactivos y por ende para el control y reporte de la actividad utilizada. Aunque la actividad puede calcularse a partir del material extraído del kit adquirido para la investigación se deben tener mayores controles en su manejo.

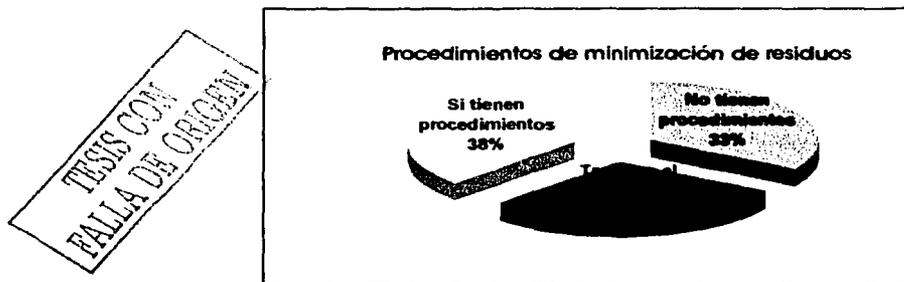


Figura 4.22 Distribución de laboratorios con procedimientos de minimización de residuos.

#### 4.4.5.6 Bitácoras de manejo de materiales y residuos

Fue importante establecer si dentro de los procedimientos de seguridad de cada laboratorio existía un registro interno del uso de material radiactivo (actividad utilizada) para el control diario de las actividades y personal involucrado en su manejo, con el objetivo de saber con mayor certeza el uso, destino y las posibles pérdidas de todo el material radiactivo presente en el IFC. Se encontró que el 50% de los laboratorios no cuentan con bitácoras internas para el manejo de los materiales radiactivos y por ende para el control y reporte de la actividad utilizada. Aunque la actividad puede calcularse a partir del material extraído del kit adquirido para la investigación se deben tener mayores controles en su manejo.

#### 4.4.5.7 Reportes de actividad en los residuos

Se encontró una baja confiabilidad en los datos de actividad reportados y procedimientos poco claros para la estimación de actividad de los residuos líquidos y/o sólidos. La mayoría de los laboratorios manifestaron que utilizaban algún tipo de cálculo para estimar la actividad presente (uso de bitácoras, diferencia con el material radiactivo “virgen”), aunque hubo algunos laboratorios que utilizaban el contador Geiger para reportar la actividad del material de desecho.

#### 4.4.5.8 Separación de residuos

La separación de los residuos dentro de los laboratorios, se lleva a cabo de acuerdo a lo establecido por el ININ, donde los residuos son segregados por su estado físico (líquido y sólido) y por el tipo de isótopo radiactivo utilizado, así como, no se utilizan materiales de vidrio por no ser aceptados por el ININ. Los residuos como se indicó en las listas de verificación no se separan de acuerdo a su vida media o si se trata de  $^3\text{H}$  o  $^{14}\text{C}$ , pero al separarse por estado físico e isótopo estos puntos quedan invalidados en términos prácticos. Los residuos sólidos son en su mayoría materiales desechables, como papel absorbente de las mesas de trabajo y limpieza, puntas de siembra, pipetas de plástico, cajas petri pequeñas, tubos de ensayo de plástico, microtubos y tubos ependorff; ocasionalmente se generan algunos materiales con características biológico-infecciosas. Los residuos radiactivos líquidos se encuentran en mezclas con disolventes como xileno o tolueno y en otras ocasiones en disoluciones acuosas.

#### 4.4.5.9 Recipientes, envases y códigos de colores

Los residuos una vez generados se colocan en recipientes de plástico y en bolsas según su estado físico. Este es un punto importante, ya que los recipientes de residuos radiactivos líquidos que se utilizan son los distintos recipientes que contuvieron alguna sustancia química y se desechan dentro de los mismos laboratorios: En forma generalizada se utilizan bolsas de supermercado para depositar los residuos sólidos, sin tener un recipiente o bolsa bien identificado en forma y color, (no digamos en grosor o resistencia química) para la contención de los distintos residuos. Aunque si se les coloca una etiqueta especial distintiva para los residuos radiactivos y tienen recipientes de lucita, donde se colocan los residuos sólidos, hasta su desecho fuera del laboratorio.



Figura 4.23 Contenedores y bolsas de residuos radiactivos utilizados

#### 4.4.6 Almacén de residuos radiactivos

El almacén se encuentra en un área restringida detrás del Bioterio, es una zona en la que solo personal administrativo y el jefe de seguridad tiene acceso, dentro de la misma zona se encuentra el almacén de bajas del IFC. En la Figura 4.24 se presenta un esquema del área asignada para el almacén temporal.

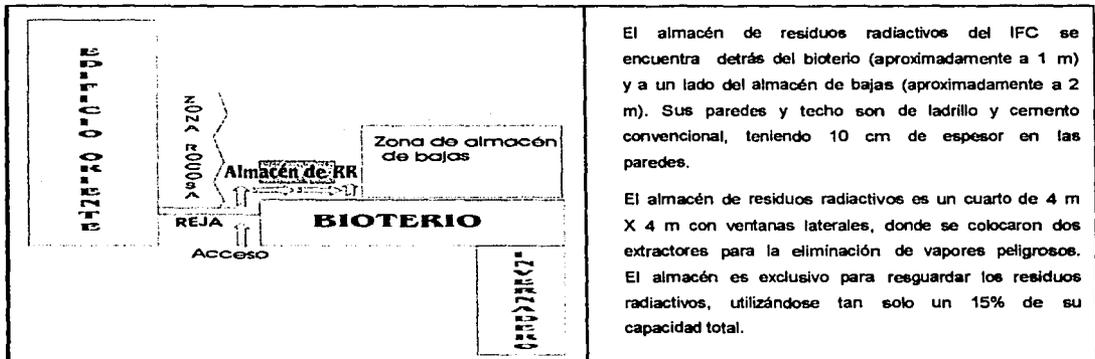


Figura 4.24 Almacén actual de residuos radiactivos

El almacén de residuos radiactivos del IFC se encuentra detrás del bioterio (aproximadamente a 1 m) y a un lado del almacén de bajas (aproximadamente a 2 m). Sus paredes y techo son de ladrillo y cemento convencional, teniendo 10 cm de espesor en las paredes.

El almacén de residuos radiactivos es un cuarto de 4 m X 4 m con ventanas laterales, donde se colocaron dos extractores para la eliminación de vapores peligrosos. El almacén es exclusivo para resguardar los residuos radiactivos, utilizándose tan solo un 15% de su capacidad total.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.4.6.1 Procedimiento de almacenamiento

El almacén se encuentra actualmente a cargo del departamento de mantenimiento del IFC, donde existe un encargado de recibir los residuos radiactivos de acuerdo al procedimiento siguiente: 1) Una vez que un experimento termina o los contenedores se encuentran llenos, a consideración de cada investigador, se hace la petición al área de mantenimiento para su disposición. 2) Se llena la hoja interna proporcionada por el área de mantenimiento. 3) Los residuos se transportan hasta el almacén de residuos radiactivos, generalmente por personal del laboratorio solicitante. 4) Una vez abierto el almacén, se colocan en anaqueles metálicos y 5) Cada mes el ININ llega por los residuos al almacén temporal para su transporte.

Cuando el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) hace su arribo al IFC para el traslado de los residuos radiactivos, se da aviso al área de mantenimiento para que supervise y ayude en las labores de carga de residuos.

El procedimiento para el transporte consiste en colocar los residuos en bidones de 200 l hasta que se llenen completamente y en caso de haber una mayor cantidad de residuos se evalúa la necesidad de utilizar otro bidón. Los residuos preferentemente se separan en bidones distintos dependiendo de su estado físico (residuos sólidos y residuos líquidos), pero cuando la totalidad de residuos no excede la capacidad de un bidón, se colocan líquidos y sólidos en ese mismo recipiente. Es importante mencionar que los residuos se mantienen en todo momento dentro de su recipiente en el caso de los residuos líquidos y dentro de su bolsa en el caso de los residuos sólidos, con el objetivo de que el ININ pueda reconocer cada residuo para su posterior tratamiento o disposición final.

Supuestamente se tienen asignados anaqueles según el estado físico del residuo, pero en la práctica solo se colocan dentro del almacén sin orden o forma de segregación como lo podemos apreciar en el siguiente grupo de fotografías (Figura 4.25). Podemos apreciar dentro de estas fotografías algunos recipientes que se encuentran en el almacén, los cuales no presentan ninguna etiqueta de identificación, provocando que el ININ se niegue a aceptarlos y que el IFC tenga un problema de disposición para ellos, mostrando falta de controles más rigurosos en el ingreso de materiales al almacén e imposibilidad para la identificación y disposición de materiales desconocidos (Figura 4.26).

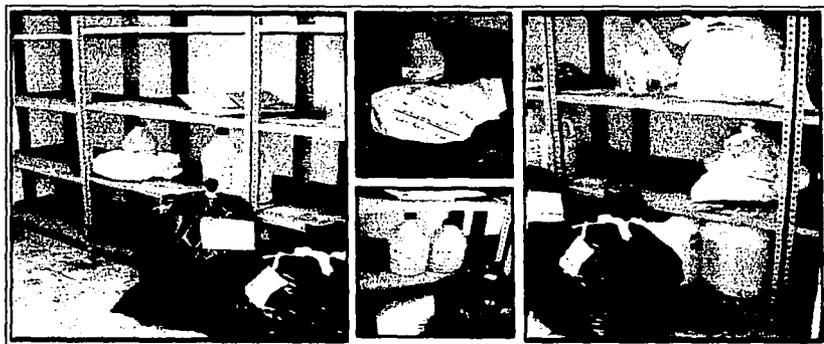


Figura 4.25 Residuos radiactivos al interior del almacén.

Otro de los puntos de las listas de verificación plantea la necesidad del uso de bolsas y envases resistentes a las sustancias químicas que pudieran encontrarse mezcladas con residuos radiactivos, y su resistencia mecánicamente a golpes o caídas con la finalidad de evitar accidentes o contaminación.. Los técnicos académicos e investigadores no han tenido problemas con las bolsas que contienen los residuos sólidos, pero los envases utilizados para la contención de residuos líquidos sobre todo de disolventes orgánicos han llegado a traspasar ligeramente el material del recipiente por lo que ha sido necesario trasvasar el líquido a otro tipo de envase, hasta ahora sin ningún accidente mayor.

El uso indiscriminado de recipientes y bolsas aumenta los riesgos de accidentes, ya sea por la baja resistencia de los envases y embalajes, por el olvido o pérdida de material radiactivo, que al no encontrarse en recipientes bien identificados con el símbolo de material radiactivo es posible una contaminación o disposición inadecuada.

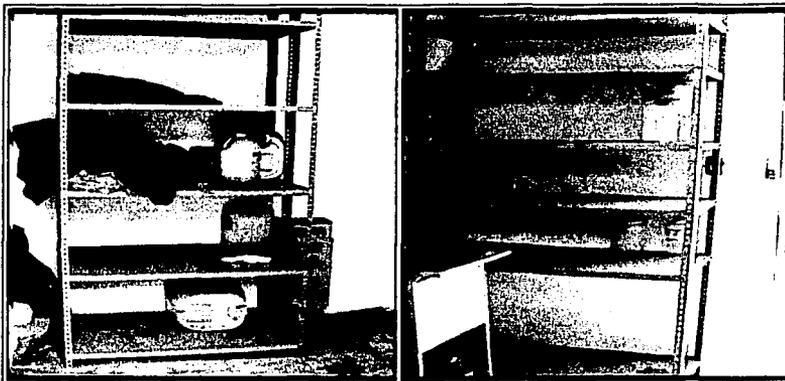


Figura 4.26 Residuos radiactivos desconocidos en los anaqueles al interior del almacén.

#### 4.4.7 Costos de operación

El manejo y disposición de los residuos radiactivos fuera de las instalaciones del IFC queda a cargo del ININ, lo que implica un costo alto y es uno de los puntos importantes en el presente estudio. En los 11 meses del estudio hubo un total de 10 bidones de residuos radiactivos que fueron enviados al ININ para su disposición final, observándose que la generación de residuos por mes fue muy irregular, en algunas ocasiones solo se mandaba un bidón y en otras se llegaron a enviar hasta tres bidones en la Tabla 4.17 se muestran todos los envíos realizados por el IFC.

Al final del período de once meses, se pudo contabilizar que el IFC había gastado un total de \$77,064.00 M.N. en el envío de residuos radiactivos. Todos los residuos se mandan al ININ como la única opción de disposición que tienen hasta ahora. Lo que implica una ruta en el manejo de los materiales radiactivos que se resume en proveedor-laboratorio-almacén temporal-ININ.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 4.17 Costos de envío de residuos radiactivos al ININ**

Fecha de envío	Costo	Envío	No de bidones enviados
Junio de 2001	\$23,090.00	1 bidón de sólidos y 2 bidones de líquidos	3
Julio de 2001	\$7,696.00	1 bidón	1
Agosto de 2001	\$7,696.00	1 bidón	1
Octubre de 2001	\$23,090.00	2 bidón de sólidos y 1 bidón de líquidos	3
Enero de 2002	\$7,696.00	1 bidón	1
Febrero de 2002	\$7,796.00	1 bidón	1
<b>Total</b>	<b>\$77,064.00</b>		<b>10 bidones</b>

El último precio unitario (por bidón) fue de \$7,796 M.N., reportado en el mes de Febrero de 2002, cabe señalar que el ININ cobra de acuerdo al número de bidones que son transportados y no hay ninguna distinción si los bidones se encuentran llenos o semivacíos. De acuerdo a estos datos se obtendría un costo promedio mensual de \$8,562 M.N. y por consecuencia si lo proyectamos a un año el estimado sería de \$102,752 M.N. tomando en cuenta la generación de residuos en forma constante, mes con mes.

#### 4.5 Resumen del estudio

A manera de síntesis del estudio realizado en este capítulo, se observó que existe personal capacitado para el manejo adecuado de los materiales radiactivos dentro del Instituto de Fisiología Celular, viéndose reflejado: 1) en las prácticas cotidianas de investigación y manipulación de materiales radiactivos al interior de cada uno de los laboratorios; 2) en el uso del equipo de seguridad adecuado para minimizar la exposición a las radiaciones; 3) disminución de riesgos; 4) educación en el tema; y 5) uso adecuado de sustancias. En la síntesis presentada en la Tabla 4.18, se colocaron los aspectos más importantes que se estudiaron en este trabajo, considerando por lo tanto un avance significativo en el manejo seguro de material radiactivo.

Pero existen una serie de fallas importantes tanto en el control de materiales radiactivos (en toda la cadena de custodia) como en toda la parte de manejo y disposición de residuos, observándose la necesidad de mejorar las políticas en el manejo de residuos radiactivos, así como la mejora en los mecanismos de control y aseguramiento de materiales y residuos radiactivos.

**Tabla 4.18 Conclusiones finales del manejo de materiales y residuos radiactivos en el Instituto de Fisiología Celular – UNAM**  
**Áreas estratégicas de gestión de materiales y residuos radiactivos** Conclusión

<b>Materiales radiactivos</b>	
Manejo de materiales radiactivos al interior de los laboratorios	Satisfactorio
Equipo protección personal	Satisfactorio
Capacitación del personal	Satisfactorio
Manuales	Satisfactorios
Planes de emergencia	Satisfactorio
Señalización	Satisfactorio
Controles en el manejo dentro de las instalaciones (fuera de laboratorios)	No satisfactorio
Bitácoras de uso de materiales	No satisfactorio
Flujo de información	No satisfactorio
<b>Residuos radiactivos</b>	
Manuales de manejo, tratamiento y disposición de residuos radiactivos	No satisfactorio
Controles en el manejo de residuos radiactivos	No satisfactorio
Bitácoras por laboratorio de desecho de materiales	No satisfactorio
Reportes de actividad de los residuos en el Instituto	No satisfactorio
Equipo protección personal	No satisfactorio
Separación de residuos	Satisfactorio
Recipientes, envases, embalajes	No satisfactorio
Códigos de colores	No satisfactorio
Transporte de residuos radiactivos	No satisfactorio
Proceso de almacenamiento	No satisfactorio
Proceso de tratamiento de residuos	No existe
Flujo de información	No satisfactorio

Por último, es importante mencionar que en las áreas estratégicas para el control, disposición y manejo de residuos radiactivos se identificaron inadecuados procedimientos que necesitan ser modificados para disminuir los riesgos que tiene su manejo y disposición, en sectores como: 1) la administración de residuos; 2) la difusión y manejo de información. 3) la comunicación de riesgos por el uso de estos materiales radiactivos. Posiblemente las modificaciones en esta prácticas, también pueden modificar los gastos económicos actuales por la disposición final de los residuos, pero de manera benéfica para el Instituto.

## Capítulo 5

### PROPUESTA PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE MATERIALES Y RESIDUOS RADIATIVOS EN EL INSTITUTO DE FISIOLÓGÍA CELULAR

Previamente a la propuesta de manejo y disposición de materiales y residuos radiactivos en el Instituto de Fisiología Celular se diseñó una guía que puede utilizarse para trabajos posteriores dentro del o bien para trabajos en otras instituciones de investigación o docencia. Esta guía contempla los puntos clave de la gestión y las soluciones propuestas en cada caso, ahí se incluyen aspectos y actividades que dentro del Instituto de Fisiología Celular se puede decir que, después de haber realizado el diagnóstico, son adecuados. En la Tabla 5.1 se presenta una guía como parte de la aportación de la propuesta para evaluaciones, diagnósticos y consideraciones subsecuentes Se contemplan las actividades y procedimientos mas usuales en la praxis, pero también se considera la normatividad, así como se incluyen algunas recomendaciones.

En la 5.1 se consideran todos los elementos importantes para el manejo de materiales radiactivos (*Guía propuesta para la creación de programas de manejo adecuado de materiales*) y para el manejo de residuos radiactivos (*Guía propuesta para la creación de programas de manejo adecuado de residuos*), es importante hacer notar que dentro "del manejo de materiales y residuos" se contemplan todas las actividades relacionadas con la gestión de los materiales y desechos radiactivos al interior de institutos o centros de investigación, de tal forma que se refiere al manejo de materiales, tratamiento, almacenamiento, medidas de seguridad, planes de emergencia, códigos y comunicación de riesgos, entre otros. Creando una guía que refuerce y ayude a la elaboración de nuevos programas, explicando todos los aspectos relacionados en un problema con radiactividad de baja actividad.

Independientemente de las referencias e información expuestas dentro de la Tabla 5.1 se debe trabajar con el principio ALARA que es una cultura del trabajo especial dentro del uso de actividades relacionadas con radiaciones ionizantes, y, por supuesto en el manejo de materiales radiactivos o todas las exposiciones a las radiaciones ionizantes. El principio dice que todas las actividades deben realizarse de forma tal que las dosis que reciban los individuos o los grupos en su conjunto sean "TAN BAJAS COMO RAZONABLEMENTE SEA POSIBLE" (principio ALARA), compatibles con la realización de los trabajos. Las diferentes actuaciones se planificarán de modo tal que el número de personas expuestas a las radiaciones ionizantes sea el menor posible.

**Tabla 5.1 Guía propuesta para la creación de programas de manejo adecuado de materiales y residuos radiactivos de Institutos y Centros de Investigación en México**

Puntos clave en la gestión de residuos radiactivos	Solución propuesta
Requisitos previos	<p>El Instituto o centro de Investigación debe:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Contar con una licencia de posesión y uso de material radiactivo expedida por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).</li> <li>Formar un Comité de Protección Radiológica integrado por representantes de los Departamentos, Unidades o Secciones que manejen material radiactivo.</li> <li>Que el Comité cuente con un coordinador.</li> </ol> <p>Para mayor información acerca de los requerimientos legales ver Anexo 5</p>
<b>GUÍA PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DE PROGRAMAS DE MANEJO ADECUADO DE MATERIALES</b>	
<b>Materiales radiactivos</b>	
Manejo de materiales radiactivos al interior de los laboratorios (Manuales)	<p>Revisión y adecuación de manuales, normas y reglamentos de seguridad radiológica expedidos por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias en períodos máximos de 2 años. Se debe tomar en cuenta el uso de materiales particulares del instituto o centro de investigación.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reglamento General de Seguridad Radiológica, Diario Oficial de la Federación, 22 de Noviembre de 1988, CNSNS</li> <li>• Normas Oficiales Mexicanas: NOM-001-NUCL-1994, NOM-003-NUCL-1994, NOM-004-NUCL-1994, NOM-005-NUCL-1994, NOM-006-NUCL-1994, NOM-008-NUCL-1994, NOM-012-STPS-1999, NOM-018-NUCL-1995, NOM-019-NUCL-1995, NOM-020-NUCL-1995, NOM-022/1-NUCL-1996, NOM-022/2-NUCL-1996, NOM-022/3-NUCL-1996, NOM-024-NUCL-1995, NOM-026-NUCL-1999, NOM-027-NUCL-1996, NOM-028-NUCL-1996, NOM-031-NUCL-1999, NOM-032-NUCL-1997, NOM-033-NUCL-1999, NOM-035-NUCL-1999, NOM-036-NUCL-2001</li> </ul>
Mecanismos de minimización	<p>Información y capacitación acerca de los materiales radiactivos en uso y las distintas formas de reciclaje de los materiales desechables como guantes o papel absorbente.</p>
Equipo protección personal	<p>El uso de guantes, lentes de seguridad, batas y papel absorbente para todos los casos, así como el uso de equipo especial dependiendo del tipo de radiación a la que se exponga, lo que contemplará el manejo y diseño de barreras especiales de plomo, lucita, acrílico u otro dependiendo del material específico.</p>
Planes de emergencia	<p>Esquema general de un plan de emergencia</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Identificación de accidentes previsible             <ol style="list-style-type: none"> <li>Contaminaciones fuera de las instalaciones (personas o lugares).</li> <li>Contaminaciones dentro de instalaciones (personas o lugares).</li> <li>Incendio.</li> </ol> </li> <li>Línea de autoridad.</li> <li>Planes establecidos para hacer frente a los accidentes.             <ol style="list-style-type: none"> <li>Contaminaciones externas:</li> <li>Contaminaciones internas:</li> <li>Procedimiento y materiales de descontaminación</li> <li>Incendio.</li> </ol> </li> <li>Elaboración de informe de accidentes y mejoras</li> </ol>
Comunicación de riesgos	<p>Se deben colocar los carteles y etiquetas necesarias de acuerdo con la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-NUCL-2001, la NOM-126-STPS-1996 y la NOM-114-STPS-1994.</p>
Controles en el manejo dentro de las instalaciones (fuera de laboratorios)	<p>Uso de formas administrativas de ingreso y egreso de materiales a las instalaciones y revisiones constantes en el manejo de materiales y residuos radiactivos.</p>
Bitácoras de uso de materiales	<p>El uso de bitácoras para el reporte diario de la actividad utilizada de los materiales radiactivos para el mejor control y los cálculos de actividad de desecho.</p>
Capacitación	<p>El personal que maneje material radiactivo deberá ser capacitado y anualmente actualizado en el tema (Reglamento General de Seguridad Radiológica y NOM-028-NUCL-1996, CNSNS)</p>
Flujo de información	<p>El uso de folletos, carteles, el diseño de hojas de seguridad de cada uno de los materiales en uso y la capacitación constante del personal ocupacionalmente expuesto son objetivos primordiales como mecanismos de educación e información que deben incluirse como programas permanentes dentro de institutos y centros de investigación.</p>

**GUÍA PROPUESTA PARA LA CREACIÓN DE PROGRAMAS DE MANEJO ADECUADO DE RESIDUOS**

Puntos clave en la gestión de residuos radiactivos	Solución propuesta
<b>Residuos radiactivos</b>	
Manejo de residuos radiactivos	<p>Para esto se deben contemplar cuando menos tres áreas de trabajo dentro de institutos y centros de investigación; área administrativa, área de compras y área de Jefes de seguridad. Estas áreas deben dar seguimiento a la cadena de custodia de los materiales y residuos radiactivos; Dar mayor seguridad a las personas que tengan contacto con estos materiales y asegurar la buena disposición de los residuos generados.</p> <p>Se debe asignar a una persona especializada para la recolección, transporte, almacenamiento y tratamiento de residuos de tal forma que se minimicen riesgos y costos. La persona asignada deberá contar con el equipo de seguridad adecuado.</p>
Manuales de manejo y disposición de residuos radiactivos	<p>Se deben diseñar y adecuar manuales y procedimientos que se apeguen a la normatividad nacional y que contemplen los materiales específicos que se encuentran en uso en cada instituto y centro de investigación, ya que sus características físicas, químicas y radiactivas darán pauta a las precisiones necesarias (revisar la estrategia planteada en el punto de <i>Manejo de materiales</i> de esta guía). Es necesario que se revisen lineamientos en materia de residuos peligrosos, revisar NOM's-(052, 053, 054)-ECOL-1993, ya que las características de los residuos pueden tener características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas (CRETIB).</p>
Bitácoras por laboratorio de desecho de materiales	<p>Es necesario que cada laboratorio del instituto o centro de investigación lleve una relación diaria del uso y desecho de material radiactivo dentro de sus procesos de investigación, contribuyendo al control de los materiales en uso y el personal que esté en contacto con él.</p>
Equipo protección personal	<p>Se debe utilizar, sin importar la actividad a realizar en el laboratorio, bata de algodón, guantes de neopreno o nitrilo y lentes de protección. Utilizar papel absorbente en la superficie de trabajo, monitor portátil de radiación. Quedando a consideración dependiendo del tipo de material radiactivo utilizado la protección con mamparas acrílicas, de lucita o plomo (y su espesor), el uso de mandiles y campanas de extracción.</p>
Comunicación de riesgos	<p>Se deben colocar los carteles y etiquetas necesarios de acuerdo con la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-NUCL-2001, la NOM.126-STPS-1996 y la NOM-114-STPS-1994.</p>
Separación de residuos	<p>Los residuos radiactivos deben separarse de acuerdo con el tipo de material radiactivo al que pertenecieron (sin descuidar ningún material, tener especial cuidado con el <math>^3\text{H}</math> y <math>^{14}\text{C}</math>).</p>
Recipientes, envases, embalajes	<p>Los recipientes de recolecta de residuos radiactivos deben ser siempre distintos a los utilizados en otras áreas y materiales, resistentes a productos químicos corrosivos y de un color exclusivo (recomendado blanco).</p>
Códigos de colores	<p>Es importante el uso de la señalización (trébol) de comunicación de riesgo radiactivo buscando que el material de riesgo (de acuerdo con la norma de EUA 10.CFR.29) siempre se encuentre etiquetado</p>
Transporte interno de residuos radiactivos	<p>El transporte de material radiactivo dentro de las instalaciones (instituto o centro de investigación) debe hacerse preferentemente con personal especializado que controle desde el punto de generación el material de desecho, la actividad reportada, así como los códigos y recipientes reglamentarios. Evitando manejos inadecuados fuera de cada laboratorio, prácticas inseguras en el transporte, pérdidas, falta de equipo de seguridad o mamparas y riesgos innecesarios del público en general.</p>
Controles en el manejo de residuos radiactivos	<p>Es importante que se levanten registros de los materiales, laboratorios generadores, actividad y fechas de generación, de modo que se tengan mejores controles en las cadenas de custodia del material radiactivo.</p>
Reportes de actividad de los residuos en el Instituto	<p>El encargado de seguridad radiológica y el personal especializado en el manejo de los residuos harán los balances de material radiactivo y actividad pertinentes periódicamente a fin de ayudar al control de materiales y evitar riesgos.</p>
Capacitación	<p>El personal que maneje material radiactivo deberá ser capacitado y anualmente actualizado en el tema (Reglamento General de Seguridad Radiológica y NOM-028-NUCL-1996, CNSNS)</p>
Proceso de almacenamiento y desclasificación	<p>Revisar el Reglamento General de Seguridad Radiológica así como las NOM-022/1-NUCL-1996 y NOM-022/2-NUCL-1996 de tal forma que se busque tener un almacén temporal adecuado para la retención por períodos menores a dos años. También revisar las NOM-004-NUCL-1994 y NOM-019-NUCL-1995 referentes a la clasificación y caracterización de los residuos radiactivos</p> <p>En la medida del espacio y recursos del instituto o centro de investigación es recomendable que los residuos con vidas medias menores a un año se retengan al interior de esta instalación hasta su decaimiento, para, posteriormente, desecharse como residuo no radiactivo (Proceso de desclasificación de residuos radiactivos, ver normas NUC-1994 y NOM-019-NUCL-1995). Es importante tomar en cuenta que pueden tener alguna otra característica peligrosa (CRETIB)</p>
Controles en almacenamiento	<p>Se deben elaborar listas de control de entrada, salida y permanencia de materiales dentro del almacén de residuos radiactivos, así como se debe utilizar una etiqueta especial para los residuos que se pretendan desclasificar.</p>
Comunicación de riesgos	<p>Se deben colocar los carteles y etiquetas necesarios de acuerdo con la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-036-NUCL-2001 y la NOM.126-STPS-1996.</p>
Flujo de información	<p>Al igual que con los materiales radiactivos de deben utilizar instrumentos de flujo de información como folletos, carteles, hojas de seguridad y la capacitación constante del personal ocupacionalmente expuesto para explicar a todo el personal de las formas y estrategias de gestión de los residuos.</p>



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Como fue mencionado en el capítulo anterior, la propuesta siguiente se diseñó en el marco de los sistemas de administración ambiental donde la organización (instituto o centro de investigación) debe cumplir entre otros puntos con un sistema de manejo de materiales y residuos, en este caso radiactivos. Se plantea entonces la creación de un programa técnico, científico y administrativo que cumpla con los siguientes objetivos:

1. Cumplir las normatividad emitida a nivel nacional por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).
2. Garantizar la seguridad radiológica de toda persona que esté en contacto con las emisiones radiactivas durante la experimentación, manejo, traslado, acondicionamiento, almacenamiento, disposición u otro procedimiento que contemple el uso de material radiactivo en el IFC.
3. Preservar al ambiente en riesgo por el uso de materiales radiactivos.
4. Prevenir fallas en la operación del manejo de material radiactivo.
5. Concientizar mediante cursos de capacitación, pláticas, conferencias, trípticos, carteles u otro medio informativo (educación ambiental y laboral) al personal que esté involucrado en el manejo de materiales y residuos radiactivos del IFC.

En este capítulo se diseñó todo un sistema que cubre otro elemento importante en la construcción de un Sistema de Administración Ambiental (capítulo 4, ISO 14001, Figura 4.3) que es la planeación del sistema de manejo y disposición de materiales y residuos radiactivos .

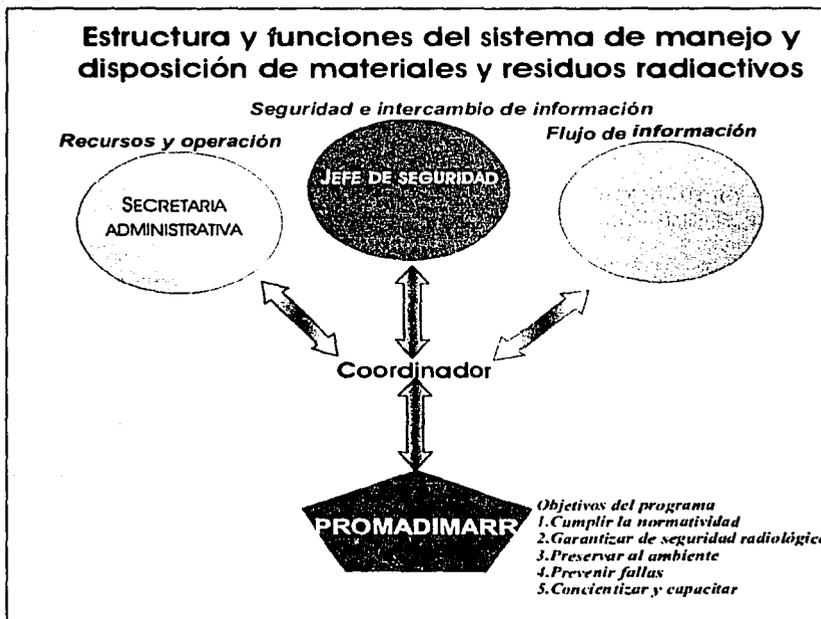


Figura 5.1 Estructura y funciones del sistema de manejo y disposición de materiales y residuos radiactivos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Los demás elementos como la “instrumentación” y puesta en marcha, “medición” y “revisión”, se contemplan dentro del programa. Como por ejemplo se plantea en la sección 5.6 que el encargado del programa debe hacer una actualización año con año de la información acerca del funcionamiento del sistema de manejo de materiales y residuos y en la sección 5.5 se propone el uso de registros en las recolectas que ayudarán a conocer los flujos y hacer correcciones o mejoras continuas.

La estructura organizativa que se plantea para el manejo de los materiales y residuos radiactivos en el IFC contempla, en primer plano un programa de manejo y disposición de materiales y residuos con los objetivos antes descritos (PROMADIMARR), al director del IFC por conducto de la Secretaría Administrativa para que apoye en cuanto a recursos y requerimientos operativos necesarios para el funcionamiento del programa, al encargado de seguridad radiológica (ESR) que tiene las funciones de aseguramiento del personal del IFC, y el departamento de compras que colaborara en la cadena de custodia de los materiales radiactivos que ingresan al IFC.

El PROMADIMARR deberá tener un coordinador que ayudará a enlazar a todas estas instancias y será el encargado de llevar la gestión de los materiales y residuos radiactivos así como será el encargado de dar seguimiento a las actividades contempladas en los siguientes lineamientos para así poder cumplir los objetivos planteados. El Programa de Manejo y Disposición de Materiales y Residuos Radiactivos (PROMADIMARR) se plantea como el instrumento principal en el manejo, control y desecho de materiales radiactivos dentro del Instituto de Fisiología Celular. Este programa tendrá distintas tareas a lo largo del año, que es el ciclo social y de investigación idóneo y que a su vez se plantea como el ciclo de revisión y reformulación de estrategias para el cumplimiento de los objetivos.

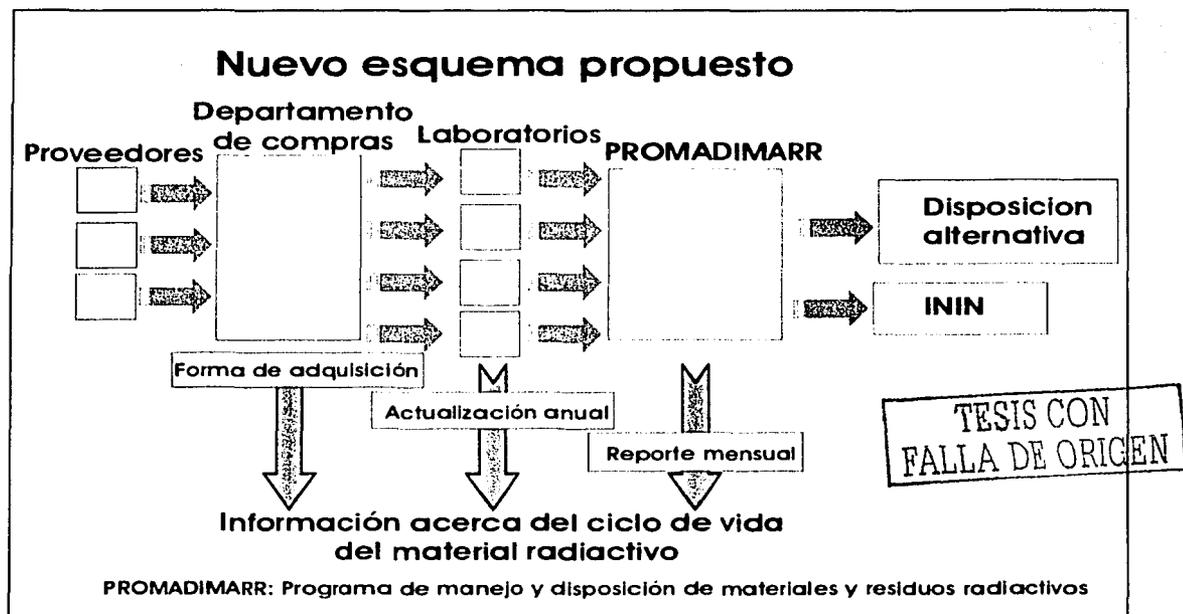


Figura 5.2 Mecanismos de información para conocer los flujos de materiales en el IFC

Las tareas que el programa tendrá que realizar son las siguientes:

- Revisión periódica del cumplimiento de la normatividad nacional.
- Administración de los insumos necesarios para el manejo de los residuos radiactivos (bolsas, recipientes, etiquetas, etc.).
- Formulación de estrategias de control y manejo adecuado de materiales y residuos.
- Revisión de prácticas y análisis de riesgos radiológicos en el instituto.
- Recolección de residuos radiactivos.
- Envío de residuos radiactivos a las instancias pertinentes (ININ).
- Desregulación de residuos radiactivos (disposición alternativa).
- Manejo de información
  - Realización de informes de generación de residuos.
  - Control de formas de adquisición.
  - Control de manifiestos del ININ.
  - Diseño de hojas de seguridad para los nuevos materiales en uso.
  - Balances anuales de materiales radiactivos y actividad.
  - Actualización de la información en la gestión de los materiales y residuos radiactivos
  - Difusión de información por medio de los canales instaurados en el instituto (red de información interna, comunicados oficiales) y la creación de algunos otros canales como folletos, carteles y/o pláticas.

Dentro de los puntos siguientes en el desarrollo de la propuesta, se contemplan estas tareas como parte de la reglamentación mínima en las distintas áreas del programa.

### **5.1 Cadena de custodia de los materiales y residuos radiactivos.**

En el IFC como ya lo analizamos en el punto anterior, se tienen mecanismos administrativos que pueden ayudar a conocer la entrada de materiales radiactivos y los laboratorios que los solicitan. Es una vía indirecta pero que se apega estrictamente a la realidad.

El departamento de compras del IFC es el encargado de manejar todos los gastos por laboratorio de sustancias y materiales que ingresan, es un área obligada por la cual todos los investigadores tienen que hacer sus peticiones de material radiactivo para sus experimentos, aún si son de distintos proveedores, por lo que es la vía más fácil para conocer y ubicar los insumos de material radiactivo utilizado en el IFC.

La salida de cualquier desecho radiactivo del IFC, estará a cargo del PROMADIMARR. El cual estará obligado a hacer un reporte mensual de todos los residuos generados en los laboratorios, y el balance de la actividad de los materiales que ingresan y egresan. Por lo que se propone que el área de compras pida al investigador llenar una forma (distinta a las administrativas de rutina) en la que especificará, el tipo de material radiactivo que adquirirá, la cantidad de material, la actividad, así como el investigador y laboratorio que lo solicita (Anexo F). Con el objetivo de conocer e identificar los distintos materiales (nuevos o en uso) que se adquieren en el instituto, esta información servirá para prevenir el acondicionamiento y forma de disposición de los residuos.

Además el PROMADIMARR tiene que hacer cada año una actualización de la información que se refiere al flujo de materiales (sección 5.7 ).

Estos elementos de información acerca de los flujos de materiales y residuos radiactivos dentro del IFC, ayudarán a tener un mejor control y por ende mayor seguridad en las formas de disposición, lo que contribuye a disminuir riesgos de contaminación al ambiente y daños a la salud de las personas que tengan contacto en la ruta de los materiales dentro y fuera del IFC (Figura 5.2).

## CADENA DE CUSTODIA

### Departamento de compras

1. Entregará semestralmente un juego de copias de la forma de adquisición de material radiactivo al encargado del PROMADIMARR.
2. Estará obligado a conservar las formas de adquisición de materiales cuando menos 1 ½ años después de su adquisición.

### Encargado del PROMADIMARR.

1. Deberá pedir semestralmente las formas correspondientes a la adquisición de material radiactivo.
2. Hará el seguimiento de los distintos materiales y residuos radiactivos, haciendo dos importantes cálculos que deben contemplar los materiales desde su adquisición hasta la forma de disposición final.
  - a. Balance de materiales.
  - b. Balance de actividad residual.
3. En caso de encontrar diferencias importantes:
  - a. Verificar con el laboratorio implicado los movimientos de material radiactivo.
  - b. Eliminar cualquier duda razonable de pérdida de material.
  - c. De ser necesario, presentar un informe al encargado de seguridad radiológica del IFC.

### 5.2 Procedimientos, material, equipo y medidas de seguridad adecuadas en los laboratorios de acuerdo con los radioisótopos encontrados.

En el diagnóstico del manejo de materiales y residuos radiactivos se ubicaron 10 materiales radiactivos distintos ( $^{32}\text{P}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{33}\text{P}$ ) que se usan normalmente al interior de los laboratorios del IFC, por lo que se recopiló la información necesaria para conformar las *Hojas de datos de seguridad* de estos radionúclidos, que se encuentran en el Anexo B, en estas *Hojas de datos de seguridad*, se da la información técnica necesaria para el manejo de los distintos materiales fuera y dentro de los laboratorios del IFC. Las *Hojas de datos de seguridad* tienen 6 distintos apartados que muestran las propiedades físicas y radiactivas de los distintos materiales radiactivos, así como las distintas barreras y materiales de contención de las emisiones de radiación. Se incluye finalmente la información del monitoreo y algunas precauciones especiales específicas de cada sustancia. Aunque en términos generales a continuación se muestran algunas recomendaciones para el manejo de los materiales radiactivos en el IFC con el objetivo de tener una base general de instrucciones y un agregado de especificaciones para cada isótopo radiactivo

En esta sección se coloca la propuesta en cuanto a procedimientos de manejo de materiales y residuos radiactivos, y se diseñaron instrumentos de síntesis de información específica para los radioisótopos utilizados en la actualidad en el IFC. Por lo cual adelante se colocan los procedimientos generales

para llevar prácticas seguras dentro de los laboratorios, el sistema de recolección y almacenaje de los materiales y residuos del IFC.

### **PRECAUCIONES GENERALES**

1. Mantener la exposición ocupacional a la radiación lo más bajo razonablemente posible (ALARA).
2. Revisar las características del isótopo de las *Hojas de datos de seguridad del IFC* y las indicaciones que los proveedores de material recomienden.
3. Realizar un plan de minimización del tiempo de experimentación y utilizar las barreras de protección adecuadas para cada radioisótopo ( 5.1).
4. Realizar una *Bitácora* (Anexo C) del material radiactivo y actividad incluyendo todos los recipientes, transferencias y desechos (tener cuidado con el <sup>125</sup>I).
5. Llevar los procedimientos seguros de disposición de los residuos radiactivos evitando mezclarlos con otros radioisótopos o algún material biológico o químico.
6. Seguir las políticas de seguridad para materiales radiactivos incluidas en el *Manual de Seguridad Radiológica del IFC y las Hojas de datos de seguridad* diseñadas especialmente para los materiales manejados al interior del IFC.
7. Conocer los pasos a seguir en caso de incidente y/o accidente.
8. Restringir el paso de personal ajeno a la zona o cuarto de experimentación (según sea el caso) con isótopos radiactivos
9. Se debe realizar la manipulación con material radiactivo, en una superficie plana (sin hendiduras), cubierto de papel absorbente (con una película de polietileno por un lado) y sobre una charola para prevenir derrames.
10. Ubicar las zonas de experimentación en espacios bien definidos que tengan carácter de exclusividad por períodos de tiempo largos.
11. En términos generales para el manejo de materiales con emisiones tipo  $\beta$ - en niveles del orden de  $\mu$ Ci utilizar barreras de lucita y para emisores y utilizar barreras de plomo.

### **MATERIAL Y EQUIPO DE SEGURIDAD PARA EL MANEJO DE MATERIALES Y RESIDUOS**

En términos generales se puede dividir el equipo de seguridad para el manejo de materiales y residuos radiactivos dentro del IFC, de acuerdo con el tipo de emisión que el radionúclido presenta. Así pues, los isótopos radiactivos con radiaciones tipo  $\alpha$  y como las emitidas por el <sup>125</sup>I deben utilizar barreras de plomo, mientras que las  $\beta^-$  como las emitidas por el <sup>3</sup>H, <sup>22</sup>Na, <sup>35</sup>S, <sup>36</sup>Cl, <sup>14</sup>C, <sup>45</sup>Ca, <sup>33</sup>P necesitan barreras de lucita con algunos milímetros de espesor. Aunque también se presentan materiales que tienen emisiones combinadas de tipo  $\beta^-$  y  $\gamma$  como el <sup>86</sup>Rb. Y materiales que requieren condiciones especiales debido a la alta energía de radiación emitida por el <sup>32</sup>P. En la 5.2 se presentan en términos generales los requerimientos de equipo de protección para los distintos residuos radiactivos presentes en el IFC, que de acuerdo con los datos específicos, se diseñó y debe utilizarse como instrumento de prevención e información en las hojas de datos de seguridad (Anexo B)

**Tabla 5.2 Equipo de seguridad recomendado para los distintos radioisótopos manejados en el IFC**

Isótopo radiactivo	Emisión	Equipo de seguridad recomendado
$^{35}\text{S}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{45}\text{Ca}$ , $^{32}\text{P}$	$\beta^-$	Bata de algodón, guantes de neopreno o nitrilo, lentes de protección, mampara acrílica o de lucita mayor a 1.2 cm de espesor. Utilizar papel absorbente en la superficie de trabajo, monitor portátil de radiación GM con sonda apropiada (ventana en el extremo con mica de 1.5 mg/cm <sup>2</sup> ) para registrar radiación tipo $\beta^-$ de baja energía y contador de centelleo. No requiere dosímetro personal, tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos. La apertura del vial se deberá hacer después de la <i>prueba de frotis</i> para determinar contaminación, en campana de extracción de gases para evitar la inhalación de gases o aerosoles generados por la diferencia de presiones entre el microclima del vial y la atmósfera.
$^3\text{H}$	$\beta^-$ , baja energía	Bata de algodón, guantes de neopreno o nitrilo, lentes de protección, no requiere mampara acrílica o de lucita. Utilizar contador de centelleo líquido para registrar emisiones $\beta^-$ de muy baja energía. No requiere dosímetro personal, tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos. La apertura del vial se deberá hacer después de la <i>prueba de frotis</i> para determinar contaminación, en campana de extracción de gases para evitar la inhalación de gases o aerosoles generados por la diferencia de presiones entre el microclima del vial y la atmósfera.
$^{32}\text{P}$ , $^{36}\text{Cl}$	$\beta^-$ , alta energía	Bata de algodón, guantes de neopreno o nitrilo, lentes de protección, no requiere mampara acrílica o de lucita. Utilizar papel absorbente para evitar contaminación por salpicaduras y contador de centelleo para registro de emisiones tipo $\beta^-$ máx. (1.7 MeV). Emplear dosímetro personal de muy baja energía (placa fotográfica o dosímetro termoluminiscente), sobre la bata en la región central del tórax, y para determinar la dosis a extremidades se puede emplear dosimetría de anillo (TLD), tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos. La apertura del vial se deberá hacer después de la <i>prueba de frotis</i> para determinar contaminación, en campana de extracción de gases para evitar la inhalación de gases o aerosoles generados por la diferencia de presiones entre el microclima del vial y la atmósfera.
$^{125}\text{I}$	$\gamma$	Usar doble guante de neopreno o nitrilo y cambiarlos cada 20 minutos durante el tiempo de experimentación (este elemento puede traspasar el material del guante). Utilizar mampara de plomo con espesor mayor a 0.02 cm, mandil de plomo con igual espesor (para evitar contactos por salpicaduras), monitor portátil de radiación GM con sonda apropiada para registrar radiación tipo $\gamma$ (0.03, 0.035 MeV) o monitores de NaI (Tl), emplear dosímetro personal (Placa fotográfica, TLD o plumilla) y para determinar la dosis a extremidades se puede emplear dosimetría de anillo (TLD), tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos. La apertura del vial se deberá hacer después de la <i>prueba de frotis</i> para determinar contaminación, en campana de extracción de gases para evitar la inhalación de gases o aerosoles generados por la diferencia de presiones entre el microclima del vial y la atmósfera.
$^{22}\text{Na}$ , $^{86}\text{Rb}$	$\beta^- \gamma$	Usar guantes de neopreno o nitrilo, bata, lentes de protección, mampara de lucita con espesor mayor a 0.9525 cm, monitor portátil de radiación GM con sonda apropiada para registrar radiación tipo $\gamma$ (0.03, 0.035 MeV) o monitores de NaI(Tl), emplear dosímetro personal (placa fotográfica, TLD o plumilla). Tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos.

## PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO

1. Utilizar el equipo de seguridad adecuado, (5.1).
2. Cubrir la zona con papel absorbente para evitar contaminación radiactiva y al terminar el experimento limpiar y desechar como residuo radiactivo sólido.
3. Etiquetar los contenedores con el símbolo de radiactividad y las etiquetas proporcionadas por el instituto.
4. Nunca comer, beber, utilizar maquillaje, tomar medicamentos u otra actividad no relacionada con los experimentos de materiales radiactivos al interior del Laboratorio o cerca de la zona trabajo.
5. Utilizar siempre propipeta, materiales como el  $^{125}\text{I}$  y  $^3\text{H}$  pueden causar graves problemas en el organismo.
6. Prevenir todo contacto con la piel por soluciones que contengan material radiactivo.
7. Utilizar los contenedores y bolsas especiales para depositar los residuos radiactivos.
8. Evitar el uso excesivo de material dentro de la experimentación con material radiactivo.
9. Tomar especial atención cuando se trabaja con compuestos radiactivos muy volátiles, como el  $^{125}\text{I}$  protegiendo los sistemas de vacío y cubriendo las celdas de cultivo con filtros que contengan carbón activado.
10. No utilizar recipientes de vidrio o evitarlos lo más posible.
11. Contar con disoluciones descontaminantes con el objetivo de "limpiar" perfectamente la zona de experimentación.
12. Almacenar la fuente radiactiva y los residuos en un lugar especial y restringido a modo de no permitir pérdidas o sustracciones no programadas.
13. Utilizar el monitor de radiación adecuado para el isótopo radiactivo específico.
14. Realizar la prueba de contaminación o "Frotis" antes de abrir la fuente y utilizarla.
15. Después de trabajar, lavarse las manos, codos, guantes, bata y revisar ropa, material con un detector eficiente.

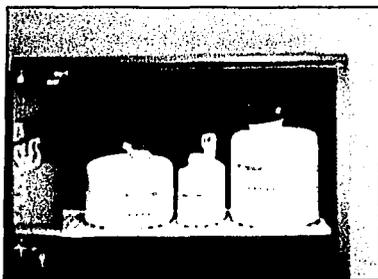
### 5.3 Segregación de residuos radiactivos

Los residuos radiactivos generados por el uso de material radiactivo (fuentes abiertas), se deben segregar o separar en función del tipo de radionúclido o isótopo radiactivo presente y de su estado físico, ya sea líquido o sólido. Esta segregación se lleva cabo desde su origen de generación, o sea, desde el laboratorio donde se usó el material radiactivo. Los residuos líquidos provienen tanto de la solubilización de muestras biológicas y químicas, como también de los líquidos de lavado y descontaminación. Por lo que respecta a los residuos sólidos, están formados por material de laboratorio contaminado, considerado como desechable, tales como guantes, puntas de pipetas, papel absorbente, vasos de precipitado, cofias, y otros contenedores. Para una adecuada gestión de estos residuos radiactivos, además de clasificarse en función de la forma física, hay que tener en cuenta los aspectos siguientes:

- Forma física, teniendo presente su toxicidad química, como su solubilidad para evaluar así las prácticas de desclasificación y vertido en dilución.
- Carga biológica, para conocer los posibles riesgos biológicos.
- Radionúclido contaminante y su actividad. Es fundamental que los residuos líquidos marcados con  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$  no se mezclen con el resto de los residuos líquidos.

Por lo que es importante el manejo adecuado de residuos radiactivos líquidos en recipientes especiales que lleven las etiquetas (Anexo D) correspondientes para así tener toda la información posible en caso de necesitar su desclasificación y evacuación. Es importante que los residuos se encuentren dentro de recipientes especiales que resistan residuos líquidos orgánicos, ya que estos recipientes podrían ser almacenados por varios meses dentro del almacén hasta su desclasificación. Los residuos líquidos se deben separar también en residuos líquidos acuosos y orgánicos, por tener que manejarse y disponerse de distintas maneras (ver desclasificación inciso 5.8). Por último es importante hacer notar que estos recipientes deben resistir en caso de que caigan accidentalmente al piso y por lo tanto deben resguardar el líquido contenido.

Dentro del Instituto de Fisiología Celular será indispensable la adquisición de recipientes de residuos líquidos por un número no menor a 50 envases (20 de 5 gal (20 litros) y 30 de 1 gal (4 litros)) que puedan resistir líquidos orgánicos y que cuenten con una tapa de rosca o un sistema de cierre hermético. Se proponen los recipientes similares a los ofrecidos por la compañía "Lab Safety" con número 1B-18997 y con número 1B-18998 de 1 gal y 25 gal respectivamente por cumplir con estas especificaciones (ver 5.3).



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.3. Contenedores propuestos para la retención de los residuos radiactivos

Los residuos radiactivos sólidos deben de ir en bolsas transparentes para así poder distinguir el tipo de residuos presentes y además deben de colocarse su etiqueta respectiva (Anexo D) y de un calibre 300, además de tener un ancho de 60 cm por un alto de 90 cm.

#### 5.4 Procedimientos para la recolección de residuos radiactivos

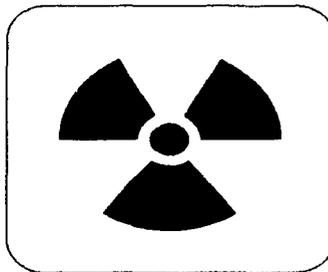
Lo más importante en el manejo de los residuos radiactivos dentro de los distintos laboratorios generadores es que segreguen de acuerdo con los radioisótopos en uso. Con esta práctica y el uso de los recipientes y bolsas propuestas se cumple con los requerimientos normativos para el manejo y disposición de los residuos. Separando los distintos residuos de acuerdo con su estado físico y radioisótopo, se cumple con los requerimientos de segregar por fuente radiactiva, por nivel de actividad, en líquidos y sólidos y también separamos los residuos de  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$  a los que se les debe dar, por seguridad, un seguimiento especial (NOM-012-STPS-1999). Por último con la provisión de las bolsas y recipientes hecha por el almacén de suministros interno del IFC, disminuimos los riesgos por disposición en recipientes de vidrio, riesgos por el uso de recipientes poco resistentes mecánicamente y riesgos de derrame o vertimiento debidos a la baja resistencia química de bolsas y recipientes.

MANEJO DE RESIDUOS EN EL LABORATORIO

- 1) Se deben segregar los residuos de acuerdo con el isótopo radiactivo de procedencia. Por ningún motivo se mezclarán dentro de bolsas o recipientes los residuos radiactivos generados en el laboratorio.
- 2) Se prohíbe disponer residuos radiactivos ya sea por tarjas, alcantarillado, sistema de disposición de residuos sólidos (basura).
- 3) Nunca utilizar recipientes de vidrio para la contención de residuos radiactivos y mucho menos para su disposición fuera del laboratorio.
- 4) Utilizar las bolsas y recipientes para residuos radiactivos líquidos y sólidos respectivamente, con los códigos de colores y simbología, proporcionados por el IFC.
- 5) Colocar las bolsas con los residuos radiactivos sólidos dentro del contenedor de lucita hasta su recolección (mantener cerrado).
- 6) Colocar los recipientes de residuos radiactivos líquidos atrás de las barreras de contención (*Hojas de datos de seguridad, anexo B*) hasta su recolección (mantener cerrado).
- 7) Usar bitácoras para calcular el estimado de actividad deseada. Llenar las etiquetas de residuos radiactivos colocando toda la información requerida y en las mismas unidades.

**Cantidades mínimas para colocar una etiqueta de comunicación de riesgos de señal de advertencia "PRECAUCION MATERIAL RADIOACTIVO" (Norma, EUA,10.CFR.29)**

Formula	Isótopo	Cantidad ( $\mu$ Ci)
$^{86}\text{Rb}$	Rubidio 86	100
$^{35}\text{S}$	Azufre 35	100
$^{45}\text{Ca}$	Calcio 45	100
$^{32}\text{P}$	Fósforo 33	100
$^{32}\text{P}$	Fósforo 32	10
$^{125}\text{I}$	Yodo 125	1
$^3\text{H}$	Tritio	1,000
$^{36}\text{Cl}$	Cloro 36	10
$^{14}\text{C}$	Carbono 14	100
$^{22}\text{Na}$	Sodio 22	10



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los residuos que se generan dentro de los laboratorios tienen ciertas peculiaridades como lo vimos en el capítulo anterior, por lo que se diseñó la siguiente estrategia para el manejo y transporte de residuos en las recolectas a realizar al interior del IFC. Aunado a la recolección tienen forzosamente que considerarse los vínculos con los suministros de los distintos recipientes, bolsas y etiquetas que ayudarán a realizar las recolectas sin contratiempos. En estos procedimientos se establece que debe colocarse la etiqueta en el almacén de suministro, previo a la entrega de las bolsas y recipientes a los distintos laboratorios para su uso, esto es con el fin de asegurar que los distintos envases y embalajes cumplan con los requerimientos mínimos para poder tener toda la información necesaria en caso de algún incidente o accidente durante su transporte y/o disposición, además de que en términos

operativos facilita que los distintos generadores de residuos ubiquen rápidamente la forma de entrega de los residuos y se vean forzados a llenar las distintas etiquetas.

### **ALMACÉN DE SUMINISTRO DE MATERIALES**

---

1. El encargado del programa de manejo de los residuos radiactivos junto con el personal del almacén deberán etiquetar (Anexo D) las bolsas y recipientes antes de su entrega a los laboratorios.
2. El encargado del programa de manejo de los residuos radiactivos estará al tanto del flujo de bolsas y recipientes al interior del almacén de suministros y prever con un mínimo de 2 meses de anticipación la adquisición del material nuevo (etiquetas, bolsas y recipientes).

Se propone, de acuerdo con el análisis de generación de residuos radiactivos, una recolecta cada 15 días (dos veces al mes). La recolecta se encuentra supeditada a los tiempos de trabajo de investigación al interior de cada uno de los laboratorios, por lo que se diseñó y se propone una *lista de espera* que ayude a ubicar cada 15 días los laboratorios que presenten generación de residuos. Estas *listas de espera* ayudarán a realizar las rutas de recolección más convenientes, los materiales y equipo de seguridad en el manejo y transporte interno con destino al almacén de residuos radiactivos del IFC.

### **RECOLECTA DE RESIDUOS RADIATIVOS EN EL IFC**

---

#### **Laboratorios generadores**

- 1) Se realizarán recolectas según el calendario propuesto a principios de cada año por el PROMADIMARR.
- 2) Para realizar la recolecta en los laboratorios generadores que lo requieran, es necesario en el ciclo de espera entre los días fijados para la recolecta, que los encargados se anoten en una *lista de espera* (Anexo E) que se cerrará hasta 2 días antes de la recolecta.
- 3) Solo se recogerán los residuos que se encuentren dentro de los recipientes y bolsas especiales para estos residuos, que se encuentren segregados y con la etiqueta llenada correctamente.
- 4) Si por alguna razón fuera de las obligaciones del encargado de la recolecta, no se hace la entrega de los residuos, los generadores necesitarán volver a llenar la lista de espera.

#### **Encargado de la recolección de residuos**

- 1) Se basará en las listas de espera para hacer las provisiones de seguridad en el transporte y disposición interna.
- 2) Hará la recolección de los residuos radiactivos apegándose a la ruta de recolección diseñada.
- 3) Solo hará la recolección si cuenta con el equipo de protección y los carritos de transporte interno de acuerdo con los residuos radiactivos que las listas de espera arrojen.
- 4) Solo recibirá los residuos si se encuentran en los recipientes o bolsas y con las etiquetas bien llenadas, de no ser así tendrá la obligación de instruir la forma de manejo de los residuos.
- 5) Levantará un acta de registro de los laboratorios generadores de residuos radiactivos (anexo F).
- 6) En caso de algún incidente en la entrega de residuos que no permita su recolección se tendrá que hacer un informe pormenorizado de la situación que se turnará a la Secretaría Administrativa y al encargado de seguridad radiológica.

- 7) En caso de accidente en la recolección el encargado de la recolecta también hará un informe de la situación que se reportará a la Secretaría Administrativa y al encargado de seguridad, además guardará esta información, como registro histórico
- 8) De presentarse la capacidad completa del carrito recolector, se llevará la carga al almacén y después se proseguirá la recolecta. Por ningún motivo se sobrecargará el carrito de recolección con residuos radiactivos.

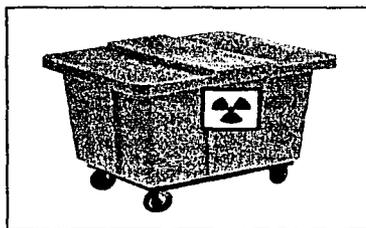
### 5.5 Material para la recolección de residuos radiactivos

El encargado del PROMADIMARR debe contar con el material y equipo de seguridad para el manejo de materiales y residuos radiactivos de protección personal que se plantea en la Tabla 6.1. el cual debe encontrarse en un lugar accesible para el uso continuo. También debe utilizar en la recolección de los residuos un carrito de transporte de residuos, el cual se propone que sea de plástico y contará con dos "cajas" distintas para la contención de materiales radiactivos.

Si se realiza una recolección de los residuos radiactivos generados por laboratorio: a) se estará asegurando que los residuos serán llevados al sitio de disposición (ININ o almacén para desclasificación), b) se evitará el traslado de material radiactivo por personal no capacitado, c) se responderá a la necesidad de evitar desvíos de residuos a otras áreas indeseadas, d) se asegurará que los residuos sean manejados y trasladados en las mejores condiciones de seguridad, e) se tendrá la certeza que los residuos llegarán al sitio de disposición con toda la información necesaria para su disposición o descalcificación.

El carro recolector deberá ser cerrado para evitar que los residuos se caigan o extravíen una vez colocados en su interior. Debe ser mínimo: 90cm x 80cm x 115cm, resistente a disolventes orgánicos como el hexano o metanol por lo que debe ser de polietileno de alta densidad, también el carro recolector de residuos radiactivos debe contar con su etiqueta de comunicación de riesgo radiactivo. Adelante se coloca la Figura 5.3 para ejemplificar el carrito que se propone para la recolección de residuos radiactivos. El carro recolector contará con dos cajas en su interior, que serán intercambiables, en las cuales se colocarán los residuos radiactivos, estas cajas se propone que sean de plomo y de lucita con un espesor de 0.03cm y 1.2 cm respectivamente.

La caja de lucita deberá ser de un mínimo de 85cm x75cm x 105cm y ahí se colocarán todos los residuos radiactivos de  $^{32}\text{P}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{33}\text{P}$ , mientras que los residuos de  $^{125}\text{I}$  serán colocados dentro de la caja de plomo con dimensiones de 50 cm x 50cm x 50 cm.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.4. Carrito de recolección interna para los residuos radiactivos generados en el IFC

## 5.6 Actualización de la información acerca del manejo y disposición de residuos.

El PROMADIMARR tiene que hacer cada año, una actualización de la información que se refiere al flujo de materiales y residuos generados en los laboratorios, verificar que las buenas prácticas de seguridad, manejo y disposición sean llevadas a cabo. Se pueden tomar como base para esta actualización las listas de verificación descritas en el anexo A. Es importante esta actualización debido a que en los institutos y centros de investigación como es el caso del IFC, se realiza experimentación continua e innovadora, por lo que es probable que se presente el uso de algún nuevo material radiactivo con el tiempo. Según el diagnóstico hecho en este Instituto, se prevé que a mediano plazo (5 a 6 años), se presenten nuevos materiales.

## 5.7 Almacenamiento temporal de residuos y desclasificación

Dentro del almacén, después de las recolectas internas, se encontrarían dos distintos grupos de residuos, los que tienen vidas medias menores a un año y los de vida medias mayores a un año. Los residuos generados en el IFC se propone que puedan separarse al ingresar al almacén de acuerdo con estos dos grupos, la Tabla 5.3 muestra los distintos materiales radiactivos en uso dentro del IFC y su segregación por vidas medias. Se propone que los residuos radiactivos con vidas medias menores de 1 año podrán ser almacenados dentro del IFC para su desclasificación, mientras que los residuos radiactivos con vidas mayores a 1 año deben ser mandados al ININ para su disposición.

**Tabla 5.3 Materiales radiactivos del IFC clasificados de acuerdo con sus tiempos de vida media**

	Isótopo	Vida media		Isótopo	Vida media
<b>Menores a un año</b>	<sup>86</sup> Rb	19.00 días	<b>Mayores a un año</b>	<sup>3</sup> H	12.30 años
	<sup>35</sup> S	87.44 días		<sup>36</sup> Cl	833.00 años
	<sup>45</sup> Ca	162.61 días		<sup>14</sup> C	5,730.00 años
	<sup>33</sup> P	25.30 días		<sup>22</sup> Na	2.6 años
	<sup>32</sup> P	14.29 días			
	<sup>125</sup> I	60.14 días			

## Desclasificación de residuos radiactivos

El proceso de desclasificación consiste en la retención de los residuos en forma segura hasta que su actividad baje hasta niveles ambientalmente aceptables o niveles de dispensa (límites a partir de los cuales se determina si un residuo es declarado como desecho radiactivo o puede ser gestionado por métodos convencionales: evacuado, reciclado o reutilizado. Aunque todos los residuos radiactivos con vidas menores a 1 año deben ser retenidos para su desclasificación, se tiene que hacer una separación para su forma de disposición de acuerdo con el medio líquido en que se encuentre o su estado físico, Clasificándolo entonces en residuos líquidos acuosos, residuos líquidos orgánicos y residuos sólidos.

**Los residuos radiactivos líquidos acuosos .** Los residuos radiactivos líquidos acuosos son todos aquellos residuos de materiales radiactivos que se encuentran disueltos o dispersos en agua y que por lo tanto después del término de la actividad del material radiactivo no requieren (al no presentar) de algún otro procedimiento para eliminar algún peligro existente.

**Los residuos radiactivos líquidos orgánicos.** Los residuos radiactivos líquidos orgánicos son todos aquellos residuos de materiales radiactivos que se encuentran disueltos o dispersos en un disolvente orgánico tales como tolueno, xileno, cloroformo, etc. y que después del término de la actividad del material radiactivo tienen que manejarse como residuos químicos con los riesgos y peligros inherentes a su naturaleza química.

En general para los residuos líquidos generados en el Instituto de Fisiología Celular tenemos que se pueden retener dentro del almacén de acuerdo con la clasificación antes descrita y por supuesto los de vida media menor a 1 año para su desclasificación como residuos radiactivos de acuerdo con el criterio siguiente de Rapidez de dosis ambiental:

Rapidez de dosis ambiental		
MGy/año	Mwi.	AmCi/cm <sup>2</sup>
1000.00	0.11	1000.00

Lo que permite la elaboración de los siguientes criterios que están calculados para un máximo de 1 mCi por volumen de residuo radiactivo y que para actividades mayores será necesario consultar al encargado de seguridad del instituto:

**Tabla 5.4 Criterios para la desclasificación de residuos líquidos de acuerdo con el periodo de retención**

Radionúclido	1mCi/1 cm <sup>2</sup>	Vida Media	Días	Meses	Años
$\gamma$					
125I	1000.00	60.00	597.95	19.93	1.66
$\beta^-$					
35S	1000.00	88.00	876.99	29.23	2.44
45Ca	1000.00	163.00	1624.42	54.15	4.51
33P	1000.00	25.30	252.13	8.40	0.70
$\beta^-$ , baja energía					
32P	1000.00	14.30	142.51	4.75	0.40
$\beta^- \gamma$					
86Rb	1000.00	19.00	189.35	6.31	0.53

**Los residuos radiactivos sólidos.** Los residuos radiactivos sólidos son todos aquellos residuos sólidos que tienen material radiactivo y que por lo tanto presentan riesgos de contaminación. Todos los residuos sólidos deben ser regidos por la NOM-035-NUCL-2000 que plantea "Límites para considerar un residuo sólido como desecho radiactivo" y que en su Apéndice "A" Tabla "1" nos muestra los niveles de dispensa. Para los residuos que no se encuentran en esta se debe llevar cada caso a la CNSNS.

**Tabla 5.5 Niveles de dispensa para los residuos sólidos radiactivos**

Radionúclido	Nivel de dispensa
	Concentración de actividad (Bq/g), o contaminación superficial fija (Bq/cm <sup>2</sup> )
<sup>22</sup> Na	0.3
<sup>125</sup> I	30
<sup>14</sup> C, <sup>32</sup> P, <sup>36</sup> Cl	300
<sup>3</sup> H, <sup>35</sup> S, <sup>45</sup> Ca	3000

#### REQUERIMIENTOS PARA EL ALMACEN TEMPORAL DE RESIDUOS RADIATIVOS DENTRO DEL IFC

1. Los residuos se separarán de acuerdo con la vida media que presenten (menores y mayores a un año).
2. Los residuos con vidas medias menores a un año se colocarán en los anaqueles de confinamiento temporal hasta su desclasificación.
3. Los residuos con vidas medias mayores a un año se colocarán en los anaqueles del almacén cercanos a la puerta reservados para estos residuos que serán trasladados bimestralmente al ININ.
4. Toda persona que ingrese al almacén de residuos radiactivos deberán seguir las reglas generales y particulares para los materiales radiactivos que se manejan en el IFC.
5. El almacén temporal contará con anaqueles a desnivel (espacios de 40 cm entre ellos).
6. Se deberán colocar barreras de lucita o plomo según el material que se almacenará.
7. Todas las superficies donde se coloquen los residuos para su confinamiento temporal deberán contar con un recubrimiento de papel absorbente.
8. A los residuos que se sometan a desclasificación se les deberá colocar la etiqueta de residuos radiactivos de desclasificación (Anexo H) con la fecha en la que termina su peligro como material radiactivo.
9. El almacén deberá contar con anaqueles corredizos que ayudarán a utilizar el mayor espacio. Los anaqueles corredizos deberán contar con un sistema de rieles y con 4 láminas para colocar los residuos.
10. Los anaqueles de residuos radiactivos contarán con protecciones para disminuir la exposición a las radiaciones emitidas, que serán de lucita de 1.3 cm de espesor y de plomo de 0.5 cm.

### 5.8 Plan de emergencia y descontaminación

En el caso de que ocurra alguna contaminación deberá instrumentarse un procedimiento que posibilite la actuación rápida del personal y la limpieza de áreas y personas evitando el transcurso del tiempo. En cualquier plan de emergencia, el tiempo que transcurre entre el comienzo de la emergencia y las medidas de mitigación tiene una relación directa con los daños provocados. A continuación se coloca la información necesaria para la en caso de contaminación o emergencia que pueda presentarse en la los escenarios de: 1) Descontaminación de superficies y objetos; 2) Descontaminación de material de laboratorio y equipos; y 3) Descontaminación personal:

---

#### PROCEDIMIENTO GENERAL EN CONTRA DE DERRAMES

---

1. En primer lugar hay que evitar que continúe avanzando la contaminación, limitando con papel su avance y colocando recipientes para su re-envase o recepción.
2. Identificar perfectamente la zona contaminada y señalizarla en ese mismo momento.
3. Valorar si procede: a) la descontaminación del sitio, b) aislar y esperar el decaimiento del material o c) tratar el objeto contaminado como un residuo y desecharlo. Esta última opción se considerará en el caso de ser un objeto de escaso valor económico y fácilmente sustituible.
4. Si decidimos descontaminar, siempre se debe comenzar por procedimientos menos agresivos e ir aumentando la intensidad de los procedimientos dependiendo de la persistencia de la contaminación. Los lavados serán siempre desde la zona periférica de la superficie contaminada hacia el centro para disminuir la posibilidad de extender la contaminación.
5. Utilizar en primera instancia los descontaminantes comerciales que se hayan adquirido para este fin, Si esto no fuera suficiente se podrán utilizar otro tipo de sustancias limpiadoras más específicas (revisar procedimiento siguiente) junto con métodos más abrasivos, como cepillos, si persistiese la contaminación se utilizarán estropajos o métodos más enérgicos. Todos los líquidos y sólidos utilizados serán considerados como residuos.
6. Es de vital importancia evitar la contaminación de nuevas superficies al aplicar estos métodos de descontaminación.
7. En el supuesto de que no se pueda lograr una descontaminación total, se procederá a cubrir la superficie contaminada con material adhesivo e identificar perfectamente la zona contaminada.

---

#### MÉTODOS DE LIMPIEZA DE SUPERFICIES, MATERIAL Y EQUIPO

---

1. PARA TODO TIPO DE SUPERFICIES:  
EN TODOS LOS CASOS DEBEMOS:

**Usar el equipo de protección personal sugerido en la Tabla 5.2.**

- a. Adicionar una solución de detergente comercial, a 25 °C y frotar vigorosamente.
- b. Si no desaparece la contaminación, sumergir el material en una disolución de detergente con ácido fosfórico al 10 %, también se puede utilizar EDTA al 10 % (al final conviene neutralizar a pH = 7 con NaOH).
- c. Desechar como residuo radiactivo todo el material que entre en contacto con el área contaminada

## 2. PARA MATERIAL DE LABORATORIO Y EQUIPOS:

### Usar el equipo de protección personal sugerido en la Tabla 5.2.

- a. Superficies pintadas: agua con detergente comercial. Si no desaparece usar un disolvente como glicerina o acetona.
- b. Superficies barnizadas: disolventes como el xileno. Si no desaparece, usar papel de lija (equipo de protección: mascarilla para polvos).
- c. Superficies porosas: si la contaminación está incrustada, se usará un aspirador provisto de filtro.
- d. Acero inoxidable: ácido fosfórico o sulfúrico al 3%, 5% ó 10%.
- e. Metales: ácido nítrico al 10%.
- f. Para radioisótopos concretos:
  - i.  $^{32}\text{P}$ : usar un paño con una disolución de EDTA 10% con ácido fosfórico al 10% o un paño con etanol.
  - ii.  $^{125}\text{I}$ : Lavar con paño o algodón impregnado en una disolución de tiosulfato de sodio al 10%.
- g. Desechar como residuo radiactivo todo el material que entre en contacto con el área contaminada

Se distinguen en este caso la contaminación externa (piel) e interna (interior del organismo). En cualquiera de los casos hay que informar, actuar de rápidamente e informar a la instancia inmediata superior.

## DESCONTAMINACIÓN PERSONAL:

### 1. DESCONTAMINACIÓN EXTERNA

- a. No utilizar procedimientos abrasivo que dañen la piel, puesto que se provocaría una contaminación en el organismo. El calor dilata los poros favoreciendo la entrada de sustancias radiactivas, por ello es recomendable usar agua fría en vez de caliente en los lavados de la piel contaminada. Se tendrá especial cuidado en los orificios naturales para evitar incorporaciones internas. No utilizar disolventes orgánicos ya que pueden facilitar el transporte y absorción cutánea.
- b. En caso de contaminación cutánea: 1) se le retirará toda la ropa y elementos como relojes o anillos a las personas contaminadas; 2) se medirá el material retirado con el detector; 3) se lavará la zona afectada tantas veces como sea comprobada la existencia de contaminación. Descontaminantes utilizados en casos de contaminación personal externa
- c. **Piel en general:** se lavará la zona afectada con agua tibia, jabón y un cepillo blando. Si la contaminación persiste, se hará un lavado con hipoclorito de sodio 1% o permanganato de potasio al 1%.
- d. **Manos:** se lavarán con una disolución de permanganato de potasio al 1%; posteriormente sumergirlas en bisulfito sódico al 5% para eliminar la mancha producida por el permanganato.
- e. **Pelo:** se hará un lavado del cuero cabelludo utilizando un champú comercial, con especial cuidado de no contaminar ojos, oídos, nariz y boca. También pueden usarse disoluciones de ácido cítrico 3% o ácido acético 1%.

- f. **Ojos:** se lavará primero la parte exterior de los párpados y después, separando bien éstos, se lavará con abundante agua estéril. Si persiste la contaminación se utilizará una disolución salina al 8%. Para la primera operación están disponibles los lavaojos.
- g. **Mucosas, fosas nasales y boca:** se utilizará NaCl (8%) o jabón ácido líquido.
- h. **Garganta: gárgaras:** Lavado con agua oxigenada diluida (10% v/v).

## 2. DESCONTAMINACIÓN INTERNA

### **Revisar las hojas de seguridad de cada material radiactivo.**

- a. Pueden existir tres vías de contaminación interna: absorción (heridas abiertas), inhalación o ingestión. Es muy importante saber con precisión por cual vía ingreso al organismo el material radiactivo, en qué momento, qué isótopo (s) es el causante (s) y cuánta actividad estaba manejando la persona afectada.
- b. La actuación, en cualquier caso siempre guiada por el jefe de seguridad, dependerá del tipo de vía de entrada del radioisótopo:
- c. Por absorción (heridas abiertas):
  - i. La incorporación se producirá a través de vasos sanguíneos o linfáticos. Se debe actuar lo más rápidamente posible:
  - ii. Se someterá la herida a un chorro de agua a presión hasta que sangre.
  - iii. Se monitorizará la contaminación.
  - iv. Se lavará la herida con agua oxigenada comercial o suero fisiológico
  - v. Se aplicará un antiséptico y pomada antibacteriana.
  - vi. Se cubrirá para evitar la infección..
- d. Por inhalación o ingestión:
  - i. Se favorecerá la eliminación del contaminante aumentando la diuresis o provocando vómitos o expectoración, para intentar evitar o reducir la incorporación del contaminante al interior del organismo.

Superada la situación de emergencia, se procederá a recoger los siguientes datos para su transmisión a los organismos competentes:

#### **DATOS FUNDAMENTALES QUE SE RECOGERÁN DURANTE UNA EMERGENCIA:**

- Descripción del tipo de accidente.
- Fecha y hora en que se ha producido.
- Identificación del motivo probable del incidente o accidente.
- Personas que han intervenido en la emergencia.
- Personas ajenas a la instalación y presentes durante la misma.
- Informe médico sobre reconocimientos clínicos, análisis efectuados y posibles lesiones.
- Niveles de radiación y contaminación originados.
- Duración estimada de la exposición.
- Dosis equivalentes individualizadas estimadas o medidas.
- Medidas adoptadas.
- Relación de la instrumentación y material utilizado en la solución de la emergencia.
- Identificación y forma de control de los residuos radiactivos.
- Tratamiento de los residuos radiactivos producidos.
- Medidas adoptadas en cuanto al funcionamiento futuro de la instalación.

### 5.9 Revisión periódica del cumplimiento de la normatividad nacional

El IFC esta obligado a cumplir con los requerimientos de ley que tanto la Secretaría del Trabajo y Previsión Social como la Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias exigen, dentro del Anexo 5 se plantean todas las disposiciones que se requieren para que el instituto cumpla sus obligaciones ante estas instituciones. El encargado de la seguridad radiológica y el encargado del PROMADIMARR son los responsables directos de que estas disposiciones legales sean cumplidas cabalmente en el IFC, por lo que es su obligación hacer una revisión anual a los puntos del anexo 5 para constatar su cumplimiento en tiempo y forma.

### 5.10 Estimación de los costos de implantación y operación del programa de manejo de materiales y residuos radiactivos.

Los residuos generados por e IFC a lo largo del año pueden ser resguardados en el almacén actual, donde se deben colocar en anaqueles a desnivel que cuenten con charolas de contención de líquidos y papel absorbente para cualquier derrame de líquidos. Los residuos que se coloquen dentro del almacén para su descalcificación deben estar en recipientes especiales que resistan algún posible efecto corrosivo o característica reactiva, también será necesario adquirir recipientes de residuos radiactivos para la disposición de los residuos radiactivos que serán mandados al ININ cada mes por ser imposible su desclasificación a corto plazo. Los costos para el manejo de materiales y residuos radiactivos en el Instituto de Fisiología Celular, se dividen en los costos fijos y los costos de operación. Los costos fijos son todos aquellos costos que se harán para el acondicionamiento del almacén, así como el carrito recolector y sus cajas de salvaguardia para el manejo y transporte de los residuos de los distintos laboratorios al almacén temporal. En la 5.6 se en listan los materiales necesarios para la implantación del programa en cuanto a sus costos fijos se refiere.

**Tabla 5.6. Costos fijos estimados.**

Material	Cantidad	Características / Capacidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Anaqueles metálicos corredizos	8	3.2 m x 3.8 m	1,200	9600
Recipientes para desclasificación	35	4 litros	300	10,500
	25	20 litros	600	1,200
Blindajes en los anaqueles del almacén				
Lucita	7	Hojas de 1.5 m x 1 m de 1.3 cm de espesor	410	2,870
Plomo	1	Hojas 0.5 x 1 de 0.5 cm de espesor	650	650
Charolas de contención	50	20 cm x 35 cm, de plástico o polietileno resistente a disolventes orgánicos	120	6,000
Carro recolector	1	90m x 80cm x 115cm, de plástico o polipropileno resistente a disolventes orgánicos	1,700	1,700
Caja de plomo	1	85cm x75cm x 105cm	1,130	1,130
Caja de lucita	1	50 cm x 50cm x 50 cm.	1,200	1,200
<b>Total</b>				<b>34,850</b>

*Precios basados en Lab Safety Suplí, 2001*

**Capítulo 5: Propuesta para el manejo y disposición de materiales y residuos radiactivos en el Instituto de Fisiología Celular**

El almacén actual de residuos será utilizado entonces para el manejo de los residuos que se desclasificarán y para aquellos que serán mandados al ININ, con modificaciones en su interior de modo que se hagan los blindajes necesarios para la protección del personal que maneje los materiales al interior del almacén.

Los costos de operación son todos aquellos costos derivados del material necesarios para manejar los residuos de forma segura, los materiales que ahí se contemplan son las bolsas y envases que se usarán para la contención de los residuos y el equipo mínimo de seguridad para el manejador de los residuos. En la Tabla 5.7 se encuentran todos los materiales comprendidos en los costos de operación.

**Tabla 5.7. Costos de operación estimados**

Material	Cantidad	Características / Capacidad	Costo Unitario	Costo Total
			\$	\$/año
Recipientes para el ININ	40 anuales	4 litros	10	400
		Polipropileno de calibre 300		
Bolsas de residuos radiactivos sólidos	1.5 millares anuales	Ancho = 60 cm Alto = 90 cm	750 millar	1125
		Paquetes de 20 m de longitud x 30 cm de ancho		
Papel absorbente	2		730	1,760
Bata	2 anuales	Algodón	150	300
Gautes de nitrilo	2 anuales	Paquetes de 100 pares	120	240
Lentes de protección	1 anuales	Polycarbonato	50	50
<b>Total</b>				<b>3,875</b>

*Precios basados en Lab Safety Suplí, 2001*

Se estima que si se lleva a cabo el manejo de los residuos adecuadamente, incluyendo su descalcificación, se puede llegar a una reducción en costos de más del 40%, y como se vió en el capítulo cuatro, los datos anuales de gasto estimado por concepto de disposición de residuos en el ININ es de \$102,752, por lo tanto los costos por la implantación y manejo adecuado de los residuos corresponden a menos del 40% del total de los gastos anuales, con un 34 % (\$34,850) para los costos fijos y un 3.8 % (\$3,875) en costos de operación. Por lo que en el primer año de implantación del programa se pagan todos los costos y se obtiene un ligero ahorro.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La normatividad mexicana en materia de seguridad nuclear y todo lo referente al manejo de materiales y residuos radiactivos cuenta con el respaldo de los organismos internacionales correspondientes y puede utilizarse como una de las herramientas técnicas en la elaboración de sistemas de administración ambiental radiológica.

El diseño de un modelo de gestión ambiental para los materiales radiactivos generados en institutos y centros de investigación debe estar inmerso dentro de un esquema de manejo integral de materiales y residuos peligrosos. Es necesario que el diseño del modelo tenga como base un *diagnóstico* de las condiciones de trabajo en el instituto o centro de investigación.

Las listas de verificación son, junto con los reportes de generación de residuos, los instrumentos más importantes para el análisis y el diagnóstico de los aciertos y áreas de oportunidad que se pueden encontrar en los modelos actuales de manejo de materiales y residuos radiactivos en institutos y centros de investigación. Estas listas de verificación, son una de las aportaciones de este proyecto para posteriores diagnósticos en el Instituto de Fisiología Celular (IFC) o en algún otro instituto o centro de investigación.

El escenario encontrado en la gestión para los materiales radiactivos del IFC es un ejemplo que ayuda a comprender la situación de los programas de seguridad radiológica en Ciudad Universitaria y puede orientar las posibles fallas y consecuentes áreas de oportunidad en otros institutos y centros de investigación. De acuerdo al diagnóstico realizado se puede afirmar que el funcionamiento de los modelos de gestión de residuos radiactivos tiene grandes avances en los procedimientos, usos y costumbres del manejo de materiales, pero presenta fallas en el aseguramiento de materiales de toda la cadena de custodia y en el manejo de los residuos radiactivos

Existe poco cuidado en la gestión de residuos una vez generados, en el caso del IFC se encontraron fallas en el manejo, transporte, y almacenamiento temporal, además de que no existe tratamiento alguno para los residuos radiactivos generados

Una de las aportaciones con mayor alcance de este trabajo, fue la elaboración de una *guía general de gestión ambiental* de materiales radiactivos en institutos y centros de investigación que puede ayudar a la planeación de programas de manejo de materiales radiactivos en otras instituciones. Es importante recalcar que se proponen puntos generales y soluciones generales que deben puntualizarse de acuerdo a los diagnósticos de cada una de las dependencias generadoras de residuos radiactivos.

Los costos que representan tanto el manejo como la disposición de los residuos radiactivos generados por los institutos y centros de investigación de la UNAM llegan a representar cantidades muy fuertes, por lo que es necesario contar con una gestión adecuada que ayude a la disminución de estos costos.

En la planeación de modelos de gestión ambiental de materiales radiactivos es importante tener reglas administrativas y de seguridad que permitan el seguimiento de los materiales y residuos desde su ingreso hasta su disposición final (Cadena de custodia) fuera de los institutos y centros de

**FALTA**  
**PAGINA**

**102**

resultados a partir del segundo año de su implantación; el primer año del programa de manejo de materiales y residuos radiactivos provocará el gasto de recursos que no sobrepasarán a los beneficios por el ahorro obtenido, con un 37.7% anual (respecto al total gastado actualmente) como costo estimado por el manejo e implantación del programa con respecto a un 40% de ahorro por la disposición final de los residuos. Desde el segundo año se estima que solo se tendrán gastos por conceptos operativos por un 3.7% anual con respecto al total gastado actualmente.

Si bien es cierto que no se puede hacer un tratamiento (almacenamiento y desclasificación como residuos radiactivo) al volumen total de residuos generados, esta propuesta ayuda a su disminución y busca crear un esquema menos riesgoso con figuras operativas hasta ahora inexistentes (en el IFC) pero que deben ser creadas para desaparecer o disminuir los problemas administrativos, los problemas contables y los riesgos en el control, manejo y disposición.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alexei V. Byalko, Nuclear Waste Disposal, 1994, Ed. CRC, Rusia., pág 22-54.
- Audeen W. F., Matthew E. Jorat, Ronald J. Veley, 1994, Métodos de disposición de residuos radioactivos de bajo nivel , The Ohio State University, pág 10 36.
- Castellanos Barba C., López Marín L. M., Rosales Ledesma R., Ladrón de Guevara O., Héron Scohy P., Osorio A. V., Garduño Sorio G., Seguridad para laboratorios biomédicos, 1999, Instituto de Investigaciones Biomédicas. UNAM, pág 160-194.
- Dietz David, Historia de la Ciencia, 1943, Buenos Aires, Argentina, Ed. Santiago Rueda, pág 7-25 y 203-218.
- D. Van Nostrand , Management of Radioactive Wastes, 1965, Company, Inc, New Jersey USA, pág 24-37.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), Del fuego a la energía nuclear, 1997, Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, México, pág 17-28.
- Comisión de Residuos Radiactivos, Origen y gestión de los residuos radiactivos, 2000, Colegio Oficial de Físicos (Cofis), España, 3ª edición, España, pp. 132-154.
- Departamento de Seguridad Radiológica, límites y procedimientos radiológicos, 2001, Universidad de UTA, Salt Lake City, EUA.
- García Alonso, El cuaderno de la energía, 1989, Forum Atómico Español, pág 10-55 y 60-66.
- García y García E., Los reactores nucleares y la producción de electricidad, 1980, CFE, pág 99-150.
- Han de Kyong W., Heinonen J., y Bonne A., Disposición de Residuos Radiactivos, Experiencias y cambios globales, 1997, Boletín de Agencia Internacional de Energía Atómica, Volumen 39.
- Herrera E., Gálvez J., Trujillo L., Energía nuclear, CCHEN, 1984, pág 20-39.
- Idelfonso Irum M., La energía del átomo, 1983, Ed. Salvat editores, Barcelona, pág 21-33.

- Jiménez Castro I., El sistema de licenciamiento y el control de las fuentes de radiación en México, estado actual y desafío a futuro, 2001, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardia- CNSNS, México, Simposio sobre energía nuclear: desafíos y realidades en Latinoamérica, Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina.
- Jiménez-Cisneros B., La contaminación ambiental en México, 2001, Ed. Limusa, México, pág 411-451.
- Lamarch J. R., Introduction to Nuclear Engineering, 1977, Ed. Addison-Wesley, pag13-17, 50-62 y 367-530.
- Colegio Experimental Paraguay-Brasil (CEPB), La energía nuclear y los seres vivos, 2000, Universidad Nacional de Asunción, pág 15-71.
- Lenihan J. M. A., La energía atómica y sus aplicaciones, 1951, Ed. Reverte, Buenos Aires Argentina, pág 12-60.
- Organización Internacional de Energía Atómica, Los isótopos en la vida cotidiana, 1978, Austria, pág 5-50.
- Echeverría M., "Apuntes de Elementos de Física Nuclear", CCHEN, 1995.
- Navarrete M. y Cabrera L., Introducción al estudio de los radioisótopos, 1979, Ediciones del sector eléctrico, México, pág 7-185.
- Holden N. E., Historia de los elementos químicos y sus descubridores, 2001, Brookhaven National Laboratory, Nueva York, pág 1-5, 17-19.
- Protección radiológica para el uso de fuentes abiertas, Instituto de Ciencias Nucleares (ICN), UNAM, 2001. Apuntes: Curso para personal ocupacionalmente expuesto, pág 5-22, México.
- Radioactive Waste Management and Radioactivity in the Environment, 1987, Her Majesty's Inspectorate (HMSO), Londres, Inglaterra, pág 12-61.
- Ronald W. Clark, Hazañas Científicas, 1980, CONACYT, México, pág 211-266.
- Coppens R., La radiactividad de las rocas, 1963, Ed. EUDEBA, Argentina, pág 15-33.

- Segré E., De los rayos a los quarks, 1983, Ed. Folios Ediciones, México, pág 89-170.

## Artículos

- Sánchez-Ocampo A., Jiménez Reyes, Juan Torres Pérez, Rafael López Castañares y Óscar Olea Cardoso, Efectos tóxicos y radiactivos del uranio, 1998, Melania Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Química.
- Garonis O., Palacios T., Gestión de la calidad en el desmantelamiento de centrales nucleares, Gestión de la Calidad, CNEA, Buenos Aires Argentina, 2000.
- Ciallella Norberto R., INFORME: Eliminación de Residuos Radiactivos de Alta Actividad, Autoridad Regulatoria Nuclear, Octubre de 1997.

## Recursos de Internet

- Consejo de Seguridad Nuclear de España 13/Octubre/2001, 8:50 pm.  
<http://www.csn.es/>
- Comisión Chilena de energía Nuclear, 14/Octubre/2001, 10:50 pm.  
<http://www.cchen.cl/>
- Instituto Peruano de energía Nuclear (Ipen) 17/Octubre/2001, 8:55 pm.  
<http://sipan.inictel.gob.pe/soperfi/hipervinculos/instituciones/>
- Nuclear Science Division. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), USA, 22/Octubre/2001, 9:10 pm.  
<http://www.nsd.lbl.gov/nsd/overview/overview.html>
- Radiactividad y ondas electromagnéticas. 2000. Carolina Clavijo, José Antonio Molina. Recursos Didácticos: Proyecto Thales-CICA, 24/Octubre/2001, 8:10 pm.  
<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/ed99-0504-01.html>
- Energía 2001. Foro de la Industria Nuclear Española (FINE), 24/Octubre/2001, 9:30 pm.

- [http://www.foronuclear.org/222/0\\_222.htm](http://www.foronuclear.org/222/0_222.htm)
- Medicina Nuclear Molecular, Colegio Internacional de Médicos Nucleares, A.C., 28/Octubre/2001, 6:22 pm.  
<http://www.icnmp.edu.mx/TEXTOS/mednuclmol.html>
  - La radiación al servicio de la vida, 1995, Brandan María Ester. Díaz Perches Rodolfo Ostrosky Patricia, FCE, México., 10/Noviembre/2001, 10:22 am.  
[http://omega.lfce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/099/htm/sec\\_13.htm](http://omega.lfce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/099/htm/sec_13.htm)
  - Las Radicaciones II. El manejo de las radicaciones nucleares, 1999, Rickards Campbell Jorge Y Camaras Ross Ricardo, FCE, México, 22/Octubre/2001, 9:03 pm.  
<http://omega.lfce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>
  - Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina, 11/Nov/2001 10:20 pm  
<http://www.cnea.gov.ar>
  - Foro de la Industria Nuclear Española (FINE), 18/Noviembre/2001, 10:12 pm  
<http://www.foronuclear.org/>
  - Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCEN), 20/Noviembre/2001, 8:51 pm  
<http://www.cchen.cl/>
  - Instituto de Energía Nuclear (IEN), 20/Noviembre/2001, 9:22 pm  
<http://www.nei.org/>
  - Agencia Internacional de la Energía Atómica (OIEA). 9/Diciembre/2001, 2:12 pm  
<http://www.iaea.org/worldatom/>
  - Consejo de Seguridad Nuclear de España, 10/Junio/2002, 9:12 pm  
<http://www.csn.es/>
  - Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 1991, La gerencia de los desechos radioactivos, Informe: ISBN 0 946777 21 7. 13/Junio/2002, 9:48 pm  
[http://www.iaea.org/worldatom/Press/Events/RadWaste/radwaste\\_backyard.shtml%26hl%3Des](http://www.iaea.org/worldatom/Press/Events/RadWaste/radwaste_backyard.shtml%26hl%3Des)
  - Asociación Nuclear Mundial (ANM), 2002, Transporte de materiales nucleares, 24/Abril/2002, 10:32 pm  
[www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)

- Instituto de Energía Nuclear (IEN), 2000, Disposición de los desechos radioactivos bajos, E.U.A. 27/Mayo/2002, 9:48 am  
<http://www.nei.org/index.asp?catnum=1&catid=14>
- Comisión de seguridad de la Universidad de Queen, 1998, Políticas y procedimientos de seguridad radiológica, Canadá, Universidad de Queen, Kingston, 15/Julio/2002, 9:05 pm  
<http://www.safety.queensu.ca/>
- Departamento de Seguridad ocupacional y ambiental Universidad de Búfalo, Búfalo, Nueva York, EUA, 16/Julio/2002, 12:01 am  
<http://wings.buffalo.edu/services/fac/QES/radsafety/radhome.htm>
- Asociación Nuclear Mundial (ANM), 2000 , Avances mundiales en la gerencia de los desechos radiactivos, 17/Julio/2002, 5:02 pm  
[http://www.iaea.org/worldatom/Press/Events/RadWaste/radwaste\\_backyard.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/Press/Events/RadWaste/radwaste_backyard.shtml)
- Departamento de física de la salud, 1997, Manual de seguridad radiológica, Universidad de Stanford, Stanford, California, EUA, 17/Julio/2002, 8:39 pm  
<http://www.stanford.edu/dept/EHS/prod/researchlab/radlaser/manual/>
- Oficina de seguridad biológica, 1996, Manual de seguridad radiológica, radiología y química, Universidad del estado de Michigan, EUA, 19/Julio/2002, 3:57 pm  
<http://www.orcbs.msu.edu/radiation/radsaf.html>
- Instalaciones nucleares en México, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS, México), 21/Julio/2002, 2:02 pm  
<http://www.cnsns.gob.mx/inucl.htm>

## ANEXO 1

**Historia de la radiactividad**

<b>Año</b>	<b>Acontecimientos</b>	<b>Referencia</b>
470 a.C	Demócrito formula la teoría de que la materia se compone de partículas indivisibles, a las que llamó átomos.	Dietz, 1943,
1803	Aristóteles creía que la materia estaba formada por sustancias básicas llamadas "elementos": fuego, aire, tierra y agua, que, a diferencia de los átomos, sí se podían ver y se podían sentir por el tacto.	Dietz, 1943
1864	John Dalton propone que los elementos estarían constituidos por unidades fundamentales y los compuestos se constituirían de moléculas, cuya estructura viene dada por la unión de átomos	Dietz, 1943
1896	Mendeleiev clasificó los elementos conocidos en esa época en lo que llamó tabla periódica	Bulbulian, 1996 /
1897	Antoine Henri Becquerel descubrió accidentalmente la existencia de unos rayos desconocidos o X que provenían de la sal de uranio. E. H. Grubbe aplica por primera vez la radiactividad con fines terapéuticos	Holden, 2001
1897	J. J. Thomson descubre el electrón como partícula fundamental del átomo. Sugiere un modelo atómico que tomaba en cuenta al electrón, aunque se trataba de un modelo estático	Bulbulian, 1996
1898	Marie y Pierre Curie al proseguir los estudios en el área, encontraron fuentes de radiación natural más poderosas que el Uranio, entre estos el Polonio y el Radio.	Bulbulian, 1996 /
1903	Frederick Soddy encontró que en el mismo sitio de la tabla periódica quedaban clasificados átomos químicamente iguales, con núcleos diferentes y con propiedades físicas distintas, descubriendo así los isótopos	Holden, 2001
1904	Frederick Soddy encontró que en el mismo sitio de la tabla periódica quedaban clasificados átomos químicamente iguales, con núcleos diferentes y con propiedades físicas distintas, descubriendo así los isótopos	Bulbulian, 1996
1904	Hantaro Nagaoka durante sus trabajos realizados en Tokio, propone su teoría según la cual los electrones girarían en órbitas alrededor de un cuerpo central cargado positivamente, al igual que los planetas alrededor del Sol.	Bulbulian, 1996 /
1905	Albert Einstein desarrolló la ecuación que relaciona la masa y la energía, como parte de su teoría de la relatividad.	LBNL, 2001
1907	Joseph John Thomson supuso que partículas con cargas negativas (electrones), estaban dispersos de alguna forma ordenada en una configuración esférica, proponiendo el primer modelo atómico.	Bulbulian, 1996 /
1911	Ernest Rutherford y su colaborador químico Frederick Soddy propusieron una teoría que describía el fenómeno de la radiactividad o mejor conocido como decaimiento radiactivo. Finalmente, Rutherford y Audiade, otro colaborador suyo, descubrieron que los penetrantes rayos gamma son en realidad radiaciones electromagnéticas parecidas a los rayos X y a la luz visible, pero de diferente energía. Su modelo del átomo propuesto tenía un núcleo muy pequeño y muy denso cargado positivamente, rodeado de electrones cargados negativamente en movimiento alrededor del núcleo.	LBNL, 2001
1913	Niels Bohr postula que los electrones giran a grandes velocidades en órbitas definidas alrededor del núcleo atómico.	Bulbulian, 1996 /
1919	Ernest Rutherford realiza la primera transmutación atómica artificial.	OIEA, 1978
1924	Luis De Broglie plantea que una partícula con cierta cantidad de movimiento se comporta como una onda. En tal sentido, el electrón tiene un comportamiento dual de onda y corpúsculo a la vez, pues tiene masa y se mueve a velocidades elevadas	Bulbulian, 1996 /
1928	Se crea la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).	Segre 1983
1930	Bothe y Becker observaron una radiación emitida por núcleos de boro, berilio y litio cuando eran bombardeados por radiación alfa.	Bulbulian, 1996 /
1931	Frédéric Joliot e Irène Curie obtuvieron los primeros elementos radiactivos artificiales.	Bulbulian, 1996 /
		OIEA, 1978
1932	James Chadwick, científico del laboratorio Cavendish de Cambridge, estudió la radiación observada por ellos y su propiedad de proyectar los átomos de hidrógeno fuera de la parafina, concluyendo la existencia del neutrón.	Lenihan 1951 /
		Segre 1983
1938	Enrico Fermi consideró la posibilidad de bombardear los núcleos con neutrones, este fenómeno se conoce como fisión nuclear.	Lenihan 1951 /
		Segre 1983
1939	Los científicos Otto Hahn, Fritz Strassmann y Lisa Meitner fisieron núcleos de uranio bombardeándolos con neutrones. Esto consiste en utilizar un neutrón que bombardea el núcleo de uranio obteniendo energía, pero además dos o tres neutrones libres que a su vez podían hacer colisión con otros núcleos en una reacción en cadena con liberación de energía en cada colisión liberando una gran cantidad de energía.	OIEA, 1978 /

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Año	Acontecimientos	Referencia
1942	Enrico Fermi logra la primera reacción en cadena controlada, fisionando un núcleo de uranio 235 y Uranio 238 al ser bombardeado con neutrones, al dispositivo creado también se le llamó reactor de Fermi.	Clark 1980
1945	El mundo entero observa la explosión de las bombas atómicas (Uranio) en Hiroshima y Nagasaki, descubriendo su poder destructivo. La falta de sentido humanitario por parte de los países que se atrevieron a detonarla, sigue en la mente de la mayoría de la población mundial.	OIEA, 1978 / Clark 1980
1951	Por primera vez en la ciudad de Idaho, se diseña y pone en funcionamiento un reactor nuclear de donde se obtiene electricidad	OIEA, 1978
1952	Detonación de la primera bomba de hidrógeno.	OIEA, 1978
1954	Construcción del submarino Nautilus movido por energía nuclear. Se inaugura en la Unión Soviética la Primera Central Nuclear.	OIEA, 1978
1956	Inauguración de la primera central nuclear comercial (Calder Hall, Inglaterra)	OIEA, 1978 / Clark 1980
1959	La URSS, Alemania y Japón colocan pequeños reactores para el funcionamiento de barcos de carga, mientras Estados Unidos desarrolla una serie de reactores nucleares miniatura.	Clark 1980
1968	Entra en funcionamiento la primera Central Nuclear en España	OIEA, 1978
1969	Se logra la primera fusión controlada en la URSS, mediante un tokamak	OIEA, 1978
1979	Accidente de Harrisburg	OIEA, 1978
1990	Se pone en funcionamiento la primera planta de energía nuclear en México que cuenta con dos reactores con un potencial total de 1308 MWh	CFE, 1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 2

**Pruebas nucleares y accidentes trascendentes en el Mundo**

Fecha	Acontecimiento
-------	----------------

- |      |  |
|------|--|
| 1945 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- EE.UU. : 1ra. prueba de una bomba atómica, denominada Trinity en Alamogordo, N.Mexico.</li> <li>- Japón: Bombardeo de Hiroshima por parte de los EE.UU.</li> <li>- Japón: Bombardeo de Nagasaki por parte de los EE.UU. Los resultados de las bombas atómicas empleadas contra Japón, poniendo fin a la guerra, no pudieron ser más devastadores; al pavoroso número de víctimas directas de los bombardeos siguió aun décadas más tarde un sinnúmero de crueldades provocadas por la radiación liberada por las explosiones, cuya intensidad y características eran entonces en gran medida desconocidas.</li> </ul>                                     |
| 1946 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- En Atolón de Bikini en el Pacífico, se realizó la Operación Crossroads, que consistía en detonar dos bombas. El 30 de junio y el 24 de julio respectivamente.</li> </ul>  |
| 1949 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Primera prueba atómica realizada por Rusia.</li> </ul>  |
| 1952 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Primera prueba atómica realizada por Gran Bretaña.</li> <li>- EE.UU detona su primer bomba de hidrógeno en el atolón de Enewetak en las Islas Marshall. Sin embargo, nuevas tensiones bélicas entre los EE.UU. y Rusia en el marco de la Guerra Fría alentaron la producción de nuevas armas de características apocalípticas. Las pruebas atómicas realizadas inicialmente en remotos parajes de Asia y del Pacífico sur continuaron produciendo nuevas víctimas. Para entonces el conocimiento adquirido por científicos y militares sobre los efectos colaterales de su uso para terceros inocentes no evitaron que las mismas continuaran.</li> </ul> |
| 1957 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- En Rusia se presentó una explosión dentro de la planta de almacenamiento nuclear de Kishtim</li> </ul>  |
| 1959 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La marina de EE.UU se deshace de elementos del reactor del submarino USS Seawolf hundiéndolos en el Atlántico a 120 millas de Maryland.</li> </ul>  |
| 1960 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Francia realiza su primera prueba atómica.</li> </ul>   |
| 1961 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un satélite de la Armada de EE.UU identificado como SNAP SA 3 explota al reingresar a la atmósfera portando componentes de plutonio.</li> </ul>   |
| 1963 | <ul style="list-style-type: none"> <li>-El submarino nuclear Thresher (EE.UU) se hunde desintegrándose en las profundidades del océano atlántico a 200 millas de Massachusetts, con 129 tripulantes .</li> </ul>   |
| 1964 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un satélite de la Armada (EE.UU) identificado como SNAP 9A se desintegra al reingresar a la atmósfera portando componentes de plutonio.</li> <li>- China realiza su primera prueba nuclear.</li> </ul>  |
| 1966 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre el Mediterráneo, frente a las costas de España, en Palomares, (Almería) cae un avión B-52 (de EE.UU) después de chocar con un avión nodriza KC- 135 de la base de Morón. El avión portaba 4 bombas atómicas de 1.5 megatonnes, que fueron rescatadas del mar, la última bomba es recuperada 80 días más tarde.</li> </ul>   |
| 1968 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un avión B-52 estadounidense, portando 4 bombas atómicas, se estrella e incendia cerca de Thule en Groenlandia</li> <li>- El submarino nuclear USS Scorpion, con una tripulación de 99 personas, se hunde, con dos torpedos nucleares, a 400 millas de las Azores en el océano atlántico.</li> </ul>  |

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

---

**Fecha Acontecimiento**

- 1969 - En la central nuclear de Saint-Laurent (Francia), un error de operación provoca la fusión parcial de su reactor.
- 1979 En Pensylvania, EE.UU., un escape radiactivo a través de los circuitos de refrigeración del reactor en la central nuclear de Three Mile Island produce el más grave de los accidentes nucleares conocidos en el país obligando a evacuar el área.
- 1986 El mayor desastre nuclear en Ucrania una explosión afecta a uno de los reactores de la central nuclear de Chernobyl produciendo graves fugas radiactivas incontroladas al medio en lo que será recordado como el peor accidente de la historia en el uso de la energía nuclear con fines pacíficos.
- 1999 El accidente nuclear de Tokaimura, el más grave de Japón en su historia nuclear. Esta instalación de reprocesamiento de combustible nuclear, ubicada a sólo 140 kilómetros de Tokio quedó varias horas expuesta a una reacción nuclear incontrolada que provocó graves escapes radiactivos y amenazó extenderse al resto de la planta con riesgo de desatar un nuevo proceso de fisión aun mayor y de impredecibles consecuencias. El accidente fue calificado por la Agencia Internacional de Energía Atómica como el más grave en su tipo después de la tragedia de Chernobyl. A tres meses del suceso el número de personas afectadas fue de 150, incluyendo la primera muerte por los efectos de la radiación, en lo que representa un caso inédito en la historia de la energía atómica civil del Japón.
- 2000 Accidente en la central nuclear Con Edison, próxima a New York. Se produce una grave falla en las tuberías del reactor Indian Point 2 de la central nuclear - Con Edison - ubicada en Buchanan a 50 kilómetros de Nueva York; como resultado del mismo un escape de vapor radiactivo superó las instalaciones de contención y llegó a la atmósfera. La emergencia obligó a neutralizar el funcionamiento del reactor y el escape por procedimientos manuales. El accidente, el primero desde la inauguración de la planta en 1974, no provocó víctimas entre el personal, pero produjo alarma en la población a pesar de no haberse detectado variación en los valores normales de radiactividad ambiental.
-

## ANEXO 3



U.N.A.M.  
INSTITUTO DE FISILOGIA CELULAR



## SOLICITUD DE DESECHOS RADIOACTIVOS

Fecha: 

DRA. ROCIO SALCEDA SACANELLES  
ENCARGADO DE LA SEGURIDAD  
RADIOLOGICA  
P R E S E N T E

Me permito hacer de su conocimiento la relación de desechos radioactivos que se entregan para su confinamiento.

Laboratorio: Responsable: **SOLIDOS**

ISÓTOPOS	ACTIVIDAD	CANTIDAD

**LIQUIDOS**

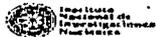
ISÓTOPOS	ACTIVIDAD	CANTIDAD

Atentamente

\_\_\_\_\_  
Nombre y firma

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 4


**GERENCIA DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA  
DEPARTAMENTO DE DESECHOS RADIATIVOS  
RECEPCIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS**

 HOJA: 1  
 DE: 1  
 FOLIO: 02001

 INSTITUCIÓN O EMPRESA: UNAM - INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR TELÉFONO: 622-5633  
 DIRECCIÓN: CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.  
 ESR: DRA. ROCÍO SALCEDA SACALLES No. de Licencia de CNSNS: 100-200/1495/01

## 1) DESECHOS RADIATIVOS SÓLIDOS

TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	PESO (kg)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN	
						Contacto	1 m
Bolsas de Plástico	4	20	P-32	3.511 MBq	Sólidos	0.2 mSv	0.02 mSv/h
"	1	5	H-3	0.185 "	"	"	"

 OBSERVACIONES: Recolección de 5 Bolsas de Plástico para Contención de Residuos Radiactivos Sólidos de un Biotin de 200 Litros

## 2) MATERIALES RECOLECTADOS POR UNIDADES

 Contenedores de Pb,  Bolsas de lámina,  Filtros absolutos,  Tubos de plástico o GETEC's,  Durlos de lámina,  Prefiltros, Otros:

F.DR-4a201

## 3) DESECHOS RADIATIVOS LÍQUIDOS

F	TIPO DE ENVASE	No. DE ENVASES	VOLÚMEN (litros)	ISÓTOPO	ACTIVIDAD	CLASIFICACIÓN	NIVEL DE RADIACIÓN	
							Contacto	1 m

OBSERVACIONES:

UNAM - INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR cede al ININ los materiales y bienes que ampara el presente documento de almacenamiento definitivo, recibiendo éstos a título de cesión gratuita; por lo que, a partir de esta fecha se asumen todas las obligaciones y responsabilidades, uso y aprovechamiento de los mismos.

 ENTREGÓ POR EL USUARIO: Miguel González Del. FIRMA: [Firma]

 RECIBIÓ POR EL ININ: Cecilia Vela Tenorio FIRMA: [Firma] FECHA: 15/feb/02  
 LUGAR: MÉXICO, D.F.

F.DR-4a201

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## ANEXO 5

**DISPOSICIONES LEGALES A CUMPLIR POR UN INSTITUTO O CENTRO DE INVESTIGACIÓN QUE UTILICE RADIACIONES IONIZANTES:**

Licencia de operación emitida por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (Punto 5.2 inciso b NOM-012-STPS-1999).

Registros de Reconocimiento, evaluación y control de radiaciones ionizantes. (Art. 79 RFSHMAT y punto 5.5 . NOM-012-STPS-1999).

Art. 79 Los centros de trabajo en donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes, deberán contar con la autorización correspondiente expedida por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

En los centros de trabajo a que se refiere este artículo, para efectos de la seguridad, higiene y medio ambiente de trabajo, el patrón deberá contar con los registros de reconocimiento, evaluación y control de dichas radiaciones, en los términos y condiciones que señalen las normas aplicables, independientemente de lo que proceda conforme a otras leyes o reglamentos.

NOM-012-STPS-1999-5.5: Tener actualizados los siguientes documentos:

El estudio de análisis de riesgo potencial de acuerdo a las características radiológicas de cada fuente de radiación ionizante.

El manual de seguridad radiológica, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento General de Seguridad Radiológica.

El plan de emergencia de seguridad radiológica, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento General de Seguridad Radiológica.

El programa específico de seguridad e higiene.

C) Exámenes médicos de ingreso y periódicos (Art. 81 RFSHMAT y PUNTO 5.9 NOM-012-STPS-1999).

Art. 81: Será responsabilidad del patrón que se practiquen los exámenes médicos específicos a los trabajadores a que se refiere el presente Capítulo, así como adoptar las medidas pertinentes para proteger la salud, de conformidad con las disposiciones legales, los reglamentos o normas aplicables.

NOM-012-STPS-1999, punto 5.9: Proporcionar al personal ocupacionalmente expuesto, el equipo de protección personal, capacitarlo en su uso y asegurarse que sea utilizado.

D) Manual de procedimientos de seguridad radiológica, de acuerdo al reglamento de seguridad radiológica, con sello de depósito ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (Punto 5.6, inciso b) NOM-012-STPS-1999).

NOM-012-STPS-1999-5.6 inciso b) El manual de procedimientos de seguridad radiológica, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento General de Seguridad Radiológica.

D) Plan de emergencia de seguridad radiológica de acuerdo al reglamento de seguridad radiológica, con sello de depósito ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (Punto 5.6 inciso c) NOM-012-STPS-1999).

NOM-012-STPS-1999-5.6-c): El plan de emergencia de seguridad radiológica, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento General de Seguridad Radiológica.

E) Programa específico de seguridad e higiene. (Punto 5.6 inciso d) NOM-012-STPS-1999).

NOM-012-STPS-1999-5.6- d): El programa específico de seguridad e higiene.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO A

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR  
 LISTAS DE VERIFICACIÓN  
 INFORMACIÓN ACERCA DEL MANEJO DE RESIDUOS RADIATIVOS  
 ENCARGADO DE SEGURIDAD

Encargado de seguridad en el instituto: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

1. ¿Los laboratorios que utilizan material radiactivo avisan con anterioridad de su adquisición y de la generación del residuo respectivo?
2. ¿Qué controles existen dentro del instituto para la adquisición, almacenamiento y disposición del material radiactivo?
3. ¿Existe una organización interna definida en el manejo de los residuos radiactivos?
4. ¿Cuál es el procedimiento a seguir para manejar los materiales?
5. ¿Cuál es el procedimiento a seguir para disponer los residuos radiactivos?
6. ¿Se dan pláticas, conferencias o cursos acerca de la seguridad radiológica (incluyendo los residuos radiactivos y cada cuánto tiempo se realizan)?
7. ¿Cuál es la justificación técnica para los recipientes sugeridos y utilizados en los laboratorios?
8. ¿Que hace el instituto con los residuos radiactivos una vez generados?
9. ¿Qué tipo de contenedores se utilizan para disponer los residuos sólidos radiactivos?
10. ¿Cuáles son las especificaciones técnicas de las bolsas (calibre, color, etc)?
11. ¿Para los residuos líquidos radiactivos se utilizan recipientes especiales?
12. ¿Cuáles son las especificaciones técnicas del contenedor donde se encuentran sus residuos radiactivos líquidos?
13. En caso de utilizar recipientes de vidrio para contener los residuos líquidos radiactivos ¿Se utiliza un recipiente de polietileno secundario que los contenga?
14. ¿Se generan residuos radiactivos sólidos que además tengan características biológico-infecciosas o químicas (corrosivo, reactivo, explosivo, toxico, inflamable)?
15. ¿Qué procedimiento se sigue con ellos?
16. ¿Se tienen los registros de cada uno de los recipientes de desechos radiactivos líquidos, así como los vertimientos que se realizan (si es que se realizan)? ¿Qué datos contiene el registro?
17. ¿Se tiene autorización de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias para el manejo del material y los residuos radiactivos?
18. ¿Existen personas menores de 18 años que tengan contacto con materiales o residuos radiactivos?
19. ¿Existen personas que por prescripción médica, no reúnan las condiciones para el manejo de materiales o residuos radiactivos?
20. ¿Existen mujeres en período de gestación o de lactancia ocupacionalmente expuestas a radiaciones por material o residuos radiactivos?

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

21. ¿Se hacen inventarios de los experimentos en los que se generan residuos radiactivos?
22. ¿Hay estudios de riesgo potencial de acuerdo a las características radiológicas de las fuentes abiertas manejadas?
23. ¿Existe algún manual de procedimientos y con que bases fue hecho?
24. ¿Existe un plan de emergencias de seguridad radiológica y en qué se basa?
25. El personal ¿Tiene algún tipo de protección personal para el uso de material radiactivo?
26. ¿El personal tiene equipo de detección de radiación ionizante?
27. ¿Se cumple o no con los límites de dosis?
28. ¿Existen áreas para descontaminación del personal en caso de que se contaminen con material radiactivo?
29. ¿Hay instalados en algún lugar equipos e instrumentos de seguridad para la medición y control de la radiactividad?
30. ¿Está Identificado el personal ocupacionalmente expuesto?
31. ¿Se tienen identificadas las fuentes abiertas de radiación en el instituto?
32. ¿Se hacen evaluaciones médicas al personal expuesto?
33. ¿Con que periodicidad?
34. ¿Se tienen registros?

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR  
 LISTAS DE VERIFICACIÓN  
 INFORMACIÓN ACERCA DEL MANEJO DE RESIDUOS RADIATIVOS  
 LABORATORIOS DEL INSTITUTO

Laboratorio \_\_\_\_\_

Responsable \_\_\_\_\_

1. ¿Cuántas son las personas que se encuentran dadas de alta como Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)?
2. ¿Cuántas personas trabajan con materiales radiactivos y no son POE?
3. La zona del laboratorio donde se maneja material radiactivo ¿Está aislada del resto del laboratorio y tiene acceso restringido?
4. El registro de uso de material radiactivo en el laboratorio :
 

¿Cuenta con fecha de actividad inicial?	SI	No
¿Cuenta con fecha de actividad extraída?	SI	No
¿Contiene espacio para el nombre del usuario?	SI	No
¿Cuenta con espacio para registrar la actividad de los residuos?	SI	No
5. ¿Sabe a quien dirigirse para desechar y pedir información acerca de sus residuos radiactivos?
6. ¿Planea con anterioridad y avisa a la autoridad local la adquisición de material radiactivo y su consecuente residuo?
7. ¿Que controles existen dentro del laboratorio para el uso y desecho de materiales radiactivos?
8. ¿Sabes como manejar los residuos radiactivos?
9. ¿Cuál es el procedimiento que sigue para manejar los materiales radiactivos dentro del laboratorio?
10. ¿Cuáles son los materiales radiactivos que se utilizan en el laboratorio?
11. ¿Cuáles son los experimentos en los que se utilizan materiales radiactivos? ¿Pueden proporcionar la técnica del experimento?
12. ¿En cuáles experimentos se generan residuos radiactivos?
13. ¿Existe algún mecanismo para disminución de residuos radiactivos dentro del laboratorio?
14. ¿Se separan de alguna forma los residuos radiactivos en el laboratorio?
15. ¿Disminuye su actividad en la experimentación?
16. ¿Existe alguna otra característica de cuidado además de su actividad en el residuo que genera (residuo químico o residuo biológico infeccioso)?
 

¿Qué procedimiento sigue con ellos?
17. ¿Separa los residuos radiactivos de acuerdo al material radiactivo original?

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

18. ¿Qué conocimiento sigue para conocer la actividad de los residuos generados?
19. ¿Separa el material (desechable o no) que tuvo contacto con material radiactivo y lo desecha como residuo radiactivo?
20. ¿Cuenta con recipientes especiales para depositar los residuos radiactivos sólidos?
21. ¿El contenedor tiene el símbolo de radiación?
22. ¿Mantiene abierto o cerrado el contenedor cuando éste se encuentra sin uso?
23. ¿Sabe si el o los desechos radiactivos sólidos que maneja tienen vida media menor de un año?
24. ¿Separa los materiales que tienen vida media menor a un año y los que la sobrepasan?
25. ¿Separa los residuos de  $^{14}\text{C}$  y  $^3\text{H}$  en recipientes separados de los demás (sean sólidos o líquidos)?
26. ¿El recipiente de los residuos sólidos que se encuentra en su laboratorio tiene bolsa?
27. ¿Cómo es la bolsa físicamente?
28. ¿Ha tenido algún problema con el contenedor donde se encuentran sus residuos radiactivos?
29. ¿Genera residuos radiactivos líquidos?
30. ¿Cómo los maneja en el laboratorio?
31. ¿Sabe si el o los desechos radiactivos líquidos que maneja tienen vida media menor de un año?
32. ¿Separa los materiales líquidos que tienen vida media menor a un año y los que lo sobrepasan?
33. ¿Ha notado que el material del contenedor reacciona con los residuos radiactivos líquidos?
34. ¿Los recipientes de residuos radiactivos líquidos tienen el símbolo de radiactividad y tienen el letrero del tipo de residuos que contienen, cuentan con tapa roscada y disco de sello?
35. ¿Los contenedores de residuos radiactivos son de vidrio?  
 En caso de que así sea: ¿tienen un recipiente secundario que los proteja?
36. ¿Mantiene abierto o cerrado el contenedor de residuos radiactivos líquidos?
37. ¿Descarga residuos radiactivos líquidos al drenaje siguiendo la normatividad existente?
38. ¿Tiene algún manual de procedimientos para el manejo de los residuos y con que bases fue hecho?
39. ¿Conoce si existe algún plan de emergencias de seguridad radiológica y se llevan a cabo simulacros de emergencia?
40. ¿Usa algún tipo de protección personal para el manejo de material radiactivo?
41. ¿Cuenta con equipo de detección de radiación ionizante,?
42. ¿Conoce los límites de dosis para el POE?
43. ¿Se dan pláticas, conferencias o cursos acerca de los residuos radiactivos para POE (cada cuánto tiempo)?
44. ¿Se da capacitación a estudiantes antes de empezar a trabajar con material radiactivo?



15. ¿De qué material son los recipientes de residuos líquidos almacenados?
16. ¿Los recipientes de líquidos en el almacén se colocan sobre bandejas de material absorbente?  
Si No
17. ¿Dentro del almacén se separan los residuos radiactivos de acuerdo a su tipo?
18. ¿Se tienen registros de los residuos radiactivos que cada laboratorio ingresa al almacén?
19. ¿Contiene la siguiente información el inventario de desechos?

**Inventario de entrada de desechos**

No. de identificación del recipiente	Fecha recepción		Radionúclido		Actividad a la fecha de recepción		Descripción	Fecha de liberación al drenaje o envío a instalación de tratamiento		Actividad a la fecha de liberación	
	Firma responsable en el almacén									Firma responsable de la liberación o envío	
SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO

ENVÍO DE LOS DESECHOS RADIATIVOS A OTRA INSTALACIÓN

20. ¿Quién recibe los materiales radiactivos que genera el instituto?  
Si No
21. ¿Cuenta con toda la reglamentación para su transporte, manejo y disposición?
22. ¿Se tienen registros de los residuos radiactivos que se envían?  
Si No
23. ¿Contienen la siguiente información estos registros?
24. ¿El inventario de envío de desechos radiactivos contiene los siguientes datos?

No. de identificación del bulto con desechos	Fecha de recepción		Radionúclido	Actividad y nivel de radiación a la fecha de recepción		Descripción	Fecha de liberación como basura o envío a una instalación de tratamiento		Actividad y nivel de radiación a la fecha de liberación o envío		
	Firma responsable del almacén								Firma responsable de la liberación o envío		
SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO

LIBERACIÓN DE DESECHOS.

25. ¿Se hace algún tipo de tratamiento a los residuos radiactivos que se generan?
26. ¿Cómo disponen los sólidos?
27. ¿Cómo disponen los líquidos?
28. ¿Se hace alguna descarga de residuos líquidos al drenaje?

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## ANEXO B HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES RADIATIVOS DEL IFC

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL <sup>125</sup>I

Elemento químico original Yodo

Símbolo del material radiactivo: <sup>125</sup>I

### PROPIEDADES FÍSICAS:

**Emisión:** Gama 35.5 KeV (Abundancia del 7%)  
Rayos X 27 KeV (Abundancia del 113%)

**Constante Gama:** 0.27 mR/hr por mCi a 1 metro (7.342E-2 mS/h por Bq a 1 metro))

**Tiempo de vida media [T<sub>1/2</sub> ]:**  
T<sub>1/2</sub> Física: 60.14 días  
T<sub>1/2</sub> Biológica: 120-138 días  
T<sub>1/2</sub> Efectiva: 42 días

**Actividad específica:** 17,300 Ci/g máxima (642 Tbq/g)

### PROPIEDADES RADIATIVAS:

**Radiotoxicidad:** 3.44E-7 Sv/Bq (1773mrem/μCi) por ingestión  
2.16E-7 Sv/Bq (799mrem/μCi) por inhalación

**Órgano crítico** Glándula tiroides

**Rutas de entrada** Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel

**Peligro radiológico** Exposición interna y externa

### Barreras de Protección

	HVL <sup>1</sup>	TVL <sup>2</sup>
<b>Material: Plomo</b>	0.02 mm	0.07 mm

### Monitoreo DOSIMÉTRICO

Siempre se debe de monitorear la ropa (cuerpo y anillos) cuando haya indicios de contaminación con <sup>125</sup>I .  
Realizar estudios prioritarios en la tiroides buscando contaminación con este material radioactivo.  
Realizar bioensayos en la tiroideos no antes de 6 horas, y hasta 72 horas (de algún contacto con 1 mCi (o más) o si hay alguna sospecha de contaminación.

#### Dosímetros portátiles para seguimiento:

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM, radiación tipo γ 0.03, 0.035 MeV)  
Centello Beta (e.g. Ludlum 44-21)  
Monitores de INa(Tl)

#### Examen de contaminación

Emplear dosímetro personal (Placa fotográfica, TLD o plumilla) t

#### Para determinar la dosis a extremidades

Dosimetría de anillo (TLD)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Precauciones Especiales

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante.

Usar barreras de protección de plomo.

Evitar la preparación de soluciones ácidas que contengan o entren en contacto con  $^{125}\text{I}$ , se propicia la volatilización.

Trabajar siempre en la campana extractora, certificando que cuente con filtro de carbón activado, y utilizar cubrebocas o mascarilla para gases tóxicos al usar el material radioactivo y en especial al abrir los viales.

Cubrir los recipientes usados que contengan  $^{125}\text{I}$  con papel parafilm hasta su nuevo uso o desecho.

Etiquetar todo recipiente en el que se esté utilizando  $^{125}\text{I}$  y evitar moverlo fuera del área de la campana extractora.

Usar métodos que disminuyan la volatilidad del  $^{125}\text{I}$ , como mantener pH alto, no abrir el vial fuera de la campana extractora, sumergir el material contaminado, como pipetas, buretas, jeringas en una cubeta que contenga una disolución de ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , 0.1M), preparada con hidróxido de sodio (NaOH, 0.1M). Para estabilizar el radiofármaco, la administración de KI no radiactivos por vía oral es una práctica que tiene por objeto bloquear con ese compuesto, sitios libres en donde pudiera incorporarse el  $^{125}\text{I}$  en la glándula tiroides, solo se recomienda en caso de accidentes de  $^{125}\text{I}$  y siempre con vigilancia médica.

La dosis que proporciona 1 GBq (27 mCi) de  $^{125}\text{I}$  a una distancia de 1 m es de 4.1 mrem/h, 5 mCi de  $^{125}\text{I}$  a una distancia de 50 cm es de 3.03 mrem/h

Usar doble guante y cambiarlos cada 20 minutos durante el tiempo de experimentación (Este elemento puede traspasar el material del guante).

Tener a la mano solución descontaminante para usar en caso de derrame, contaminación de superficies, piel, manos y antebrazos.

La apertura del vial se deberá hacer después de la prueba de frotis para determinar contaminación, en campana de extracción de gases para evitar la inhalación de gases o aerosoles generados por la diferencia de presiones entre el microclima del vial y la atmósfera.

<sup>1</sup>HVL: Espesor del plomo que se requiere para disminuir a la mitad (50%) la intensidad de la radiación gama incidente

<sup>2</sup>TVL Espesor del plomo que se requiere para disminuir a la décima (10%) parte la intensidad de la radiación gama incidente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Hoja de datos de Seguridad del  $^{32}\text{P}$ 

Elemento químico original Fósforo

Símbolo del material radiactivo:  $^{32}\text{P}$ 

## PROPIEDADES FÍSICAS:

Emisión:	Beta (100% de abundancia) 695 keV (máximo 1,710 keV)
Tiempo de vida media [T $\frac{1}{2}$ ]:	T $\frac{1}{2}$ Física: 14.29 días T $\frac{1}{2}$ Biológica: 1,155 días (hueso), 257 días (todo el cuerpo) T $\frac{1}{2}$ Efectiva: 14.29 días
Actividad específica:	286,500 Ci/g máxima (10.600 Tbq/g)
Alcance de las partículas Beta:	
Aire	610 cm
Agua	0.76 cm
Plástico	0.61 cm

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## PROPIEDADES RADIATIVAS:

Radiotoxicidad:	8.1 x 10 <sup>-9</sup> Sv/Bq (30 mrem/ $\mu\text{Ci}$ , médula espinal) por ingestión 2.4 x 10 <sup>-9</sup> Sv/Bq (8.8 mrem/ $\mu\text{Ci}$ , todo el cuerpo) por ingestión 2.6 x 10 <sup>-8</sup> Sv/Bq (95 mrem/ $\mu\text{Ci}$ , pulmón) por inhalación 4.2 x 10 <sup>-9</sup> Sv/Bq (16 mrem/ $\mu\text{Ci}$ , todo el cuerpo) por inhalación
Órgano crítico	Hueso ( $^{32}\text{P}$ soluble), pulmón por inhalación, tracto digestivo por ingestión de compuestos insolubles
Rutas de entrada	Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel
Peligro radiológico	Exposición interna: Cantidades sin protección desde 1 mCi por vía oral Exposición externa: aproximadamente 26 rem/h

## Barreras de Protección

Barreras de 4/8 de pulgada de lucita, si el detector de rayos X se activa utilizar de 1/8 a 1/4 de pulgada de plomo después de la barrera de lucita

## Monitoreo DOSIMÉTRICO

Siempre se debe de monitorear la ropa (cuerpo y anillos) cuando haya indicios de contaminación con  $^{32}\text{P}$

## Dosímetros portátiles para seguimiento:

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)  
Centello Beta (e.g. Ludlum 44-21)

## Examen de contaminación

Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^{32}\text{P}$  o un Geiger-Mueller

## Precauciones Especiales

La manipulación de este material requiere de condiciones especiales debido a su alta energía. Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante. Usar barreras de protección de lucita de 3/8 de pulgada a fin de minimizar exposiciones. Evitar usar la mano directamente al usar fuentes  $^{32}\text{P}$ . Siempre utilizar dosímetro al manejar  $^{32}\text{P}$ . El  $^{32}\text{P}$  no es volátil, se puede desestimar la emisión o transporte por gases o vapores al calentar. Con el fin de disminuir la dosis en manos y extremidades se debe evitar en lo posible exponerlas directamente y efectuar las operaciones precipitadamente. Se debe planear cuidadosamente el experimento y la extracción de alícuotas.

Hoja de datos de Seguridad del  $^{33}\text{P}$ 

Elemento químico original Fósforo

Símbolo del material radiactivo:  $^{33}\text{P}$

## PROPIEDADES FÍSICAS:

<b>Emisión:</b>	Beta (100% de abundancia) 76.4 keV (máximo 248.5 keV)
<b>Tiempo de vida media [T<sub>1/2</sub>]:</b>	T <sub>1/2</sub> Física: 25.3 días T <sub>1/2</sub> Biológica: 1,155 días (hueso), 257 días (todo el cuerpo) T <sub>1/2</sub> Efectiva: 25.3 días
<b>Actividad específica:</b>	156,000 Ci/g máxima (5,780 T bq/g)
<b>Alcance de las partículas Beta:</b>	
<b>Aire</b>	50 cm
<b>Agua</b>	0.06 cm
<b>Plástico</b>	0.05 cm

## PROPIEDADES RADIATIVAS:

<b>Radiotoxicidad:</b>	1.85 Sv/Bq (30 mrem/ $\mu$ Ci, médula espinal) por ingestión 0.92 Sv/Bq (8.8 mrem/ $\mu$ Ci, todo el cuerpo) por ingestión 15.6 Sv/Bq (95 mrem/ $\mu$ Ci, pulmón) por inhalación 2.32 Sv/Bq (16 mrem/ $\mu$ Ci, todo el cuerpo) por inhalación
<b>Órgano crítico</b>	Hueso ( <sup>32</sup> P soluble), pulmón por inhalación, tracto digestivo por ingestión de compuestos insolubles
<b>Rutas de entrada</b>	Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel
<b>Peligro radiológico</b>	Exposición interna: De cuidado Exposición externa: Cantidades del orden de mCi no existen datos de daños reportados.

## Barreras de Protección

No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.

## Monitoreo DOSIMÉTRICO

Realizar bioensayos de orina para detectar posible contaminación por <sup>33</sup>P, siempre que se sospeche algún accidente o problema por el uso de este material.  
No es necesario utilizar dosímetro al trabajar con <sup>33</sup>P

## Dosímetros portátiles para seguimiento:

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)  
Centello Beta (e.g. Ludlum 44-21)

## Examen de contaminación

Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de <sup>33</sup>P o un Geiger-Mueller

## Precauciones Especiales

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante.  
El <sup>33</sup>P no es volátil, aún al calentar, y puede ser ignorado el uso de campana extractora o alguna otra protección.  
Para la limpieza de zonas de trabajo con este radionúclido, el vinagre es un efectivo descontaminante.  
En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases; en el caso de someter muestras de nucleidos de <sup>35</sup>S a cambios térmicos con equipos termicladores, deberá realizarse la apertura de esos viales en campanas extractoras y evitar cualquier inhalación

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

**Hoja de datos de Seguridad del  $^{45}\text{Ca}$** 
**Elemento químico original** Calcio**Símbolo del material radiactivo:**  $^{45}\text{Ca}$   
**PROPIEDADES FÍSICAS:**

**Emisión:** Beta (100% de abundancia) 77 keV (máximo 257 keV)  
**Tiempo de vida media [ $T_{1/2}$ ]:**  $T_{1/2}$  Física: 162.61 días  
 $T_{1/2}$  Biológica: 18,000 días (hueso)  
 $T_{1/2}$  Efectiva: 163 días  
**Actividad específica:** 17,800 Ci/g máxima (659 Tbq/g)

**PROPIEDADES RADIATIVAS:**

**Radiotoxicidad:** 19.4 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (hueso) y 3.2 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (organismo) por ingestión  
35.8 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (pulmón) y 16.2 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (hueso) por inhalación  
**Órgano crítico** Pulmón y hueso  
**Rutas de entrada** Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel  
**Peligro radiológico** Exposición interna: Cantidades en mCi no considerada como peligro  
Exposición externa: De cuidado

**Barreras de Protección**


---

**No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.**
**Monitoreo DOSIMÉTRICO**


---

Realizar bioensayos en la orina siempre que exista algún accidente, incidente o cualquier tipo de contaminación.
**Dosímetros portátiles para seguimiento:**
Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)  
Centello Beta (e.g. Ludlum 44-21)
**Examen de contaminación**
Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^{45}\text{Ca}$  o un Geiger-Mueller
**Precauciones Especiales**


---

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante  
En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

---

**Hoja de datos de Seguridad del  $^{35}\text{S}$** 
**Elemento químico original** Azufre**Símbolo del material radiactivo:**  $^{35}\text{S}$ 


---

**PROPIEDADES FÍSICAS:**

**Emisión:** Beta (100% de abundancia) 48.8 keV (máximo 167.47 keV)  
**Tiempo de vida media [ $T_{1/2}$  ]:**

$T_{1/2}$  Física: 87.44 días  
 $T_{1/2}$  Biológica: 623 días, 90 días en hueso  
 $T_{1/2}$  Efectiva: 44-66 días

**Actividad específica:** 42,707 Ci/g máxima (1,580 Tbq/g)

**Alcance de las partículas Beta:**

<b>Aire</b>	26cm
<b>Agua</b>	32 mm
<b>Plástico</b>	0.25 mm

---

**PROPIEDADES RADIATIVAS:**

**Radiotoxicidad:** 0.73 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (organismo) por ingestión  
 2.48 mrem/ $\mu\text{Ci}$  (organismo) por inhalación

**Órgano crítico**  
**Rutas de entrada**  
**Peligro radiológico**

Testículos  
 Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel  
 Exposición interna: Cantidades en mCi no considerada como peligro  
 Exposición externa: De cuidado

---

**Barreras de Protección**

No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.

---

**Monitoreo DOSIMÉTRICO**

Realizar bioensayos en la orina siempre que exista algún accidente, incidente o cualquier tipo de contaminación, o se trabaje con más de 5mCi.

**Dosímetros portátiles para seguimiento:**

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)  
 Centelleo Beta (e.g. Ludlum 44-21)

**Examen de contaminación**

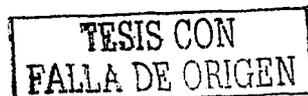
Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^{35}\text{S}$  o un Geiger-Mueller

---

**Precauciones Especiales**

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante. Muchos compuestos de  $^{35}\text{S}$  y sus metabolitos son ligeramente volátiles y fácilmente pueden crear problemas de contaminación si no se controlan. Esto ocurre particularmente cuando el  $^{35}\text{S}$  se adiciona a medios de cultivo y se incuban. Por lo tanto se recomienda utilizar recipientes para medios de cultivo bien tapados con algún material absorbente y desechar como material radiactivo sólido.

En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases.



**Hoja de datos de Seguridad del  $^3\text{H}$** **Elemento químico original** Tritio**Símbolo del material radiactivo:**  $^3\text{H}$ **PROPIEDADES FÍSICAS:****Emisión:** Beta (100% de abundancia) 5.7 keV (máximo 18.6 keV)**Tiempo de vida media [ $T_{1/2}$ ]:** $T_{1/2}$  Física: 12.3 años $T_{1/2}$  Biológica: 10-12 días $T_{1/2}$  Efectiva: 10-12 días**Actividad específica:**

9,650 Ci/g máxima (357 Tbq/g)

**Alcance de las partículas Beta:****Aire** 6 mm**Agua** 0.006 mm**Sólidos** insignificante**PROPIEDADES RADIATIVAS:****Radiotoxicidad:**

Baja toxicidad en todos los radionúclidos por ingestión o inhalación

Agua triteada:  $1.72 \times 10^{-11}$  Sv/Bq (.064 mrem/ $\mu\text{Ci}$ ) al contactoCompuestos orgánicos  $4.2 \times 10^{-11}$  Sv/Bq (0.16 mrem/ $\mu\text{Ci}$ ) al contacto**Órgano crítico**

Cuerpo y tejidos por contacto con agua triteada

**Rutas de entrada**

Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel

**Peligro radiológico**

Exposición interna: Tomar precauciones

Exposición externa: No de cuidado

**Barreras de Protección****No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.****Monitoreo DOSIMÉTRICO**Realizar bioensayos de orina para detectar posible contaminación por  $^3\text{H}$ , siempre que se sospeche algún accidente o problema por el uso de este material con actividades mayores a 10 mCi.**Examen de contaminación**Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^3\text{H}$  o un Geiger-Mueller**Precauciones Especiales**

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante

Muchos compuestos de  $^3\text{H}$  penetran rápidamente en los guantes y en la piel, siempre que se manejan manualmente compuestos con  $^3\text{H}$  utilizar dobles guantes y cambiar por otro par cada 20 minutos durante el transcurso del experimento.Cuando se utilizan los precursores de DNA triteado son considerados muy tóxicos (más que  $^3\text{H}_2\text{O}$ ). Este compuesto generalmente se volatiliza desprendiendo algunas trazas de material que no se deben considerar de cuidado.

La difícil detección de tritio por los distintos instrumentos complica la detección de contaminación por lo que es necesario tener mucho cuidado al manejar y disponer este material.

Manipular el  $^3\text{H}$  siempre sobre papel absorbente y la operación de apertura de viales deberá realizarse dentro de la campana extractora de gases.

<p style="text-align: center;">TESIS CON FALLA DE ORIGEN</p>
--

Hoja de datos de Seguridad del  $^{14}\text{C}$ 

Elemento químico original Carbono

Símbolo del material radiactivo:  $^{14}\text{C}$ 

## PROPIEDADES FÍSICAS:

<b>Emisión:</b>	Beta (100% de abundancia) 49 keV (máximo 156 keV)
<b>Tiempo de vida media [<math>T_{1/2}</math>]:</b>	$T_{1/2}$ Física: 5,730 años $T_{1/2}$ Biológica: 12 días $T_{1/2}$ Efectiva: 12 días en hueso
<b>Actividad específica:</b>	4.46 Ci/g máxima (0.165 Tbq/g)
<b>Alcance de las partículas Beta:</b>	
<b>Aire</b>	24 cm
<b>Agua</b>	1.28 mm
<b>Plástico</b>	0.25 mm

## PROPIEDADES RADIATIVAS:

<b>Radiotoxicidad:</b>	$5.64 \times 10^{-10}$ Sv/Bq (2.09 mrem/ $\mu\text{Ci}$ ) por ingestión $6.36 \times 10^{-12}$ Sv/Bq (0.023 mrem/ $\mu\text{Ci}$ ) por inhalación
<b>Órgano crítico</b>	Tejido graso y hueso
<b>Rutas de entrada</b>	Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel
<b>Peligro radiológico</b>	Exposición interna: Tomar precauciones Exposición externa: No de cuidado

## Barreras de Protección

No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.

## Monitoreo DOSIMÉTRICO

Realizar bioensayos de orina para detectar posible contaminación por  $^{14}\text{C}$ , siempre que se sospeche algún accidente o problema por el uso de este material con actividades mayores a 5 mCi.

## Dosímetros portátiles para seguimiento:

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)  
 Centello Beta (e.g. Ludlum 44-21)

## Examen de contaminación

Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^3\text{H}$  o un Geiger-Mueller

## Precauciones Especiales

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante  
 Muchos compuestos de  $^{14}\text{C}$  pueden penetrar por los guantes y por la piel, siempre que se manejan manualmente compuestos con  $^{14}\text{C}$  utilizar dobles guantes y cambiar por otro par cada 20 minutos durante el transcurso del experimento.  
 En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

---

**Hoja de datos de Seguridad del  $^{36}\text{Cl}$** 

Elemento químico original Cloro

Símbolo del material radiactivo:  $^{36}\text{Cl}$ 


---

**PROPIEDADES FÍSICAS:**

Emisión: Beta (99% de abundancia) 710 keV

Tiempo de vida media [ $T_{1/2}$ ]: $T_{1/2}$  Física: 300,000 días $T_{1/2}$  Biológica: 10 días $T_{1/2}$  Efectiva: 10 días

Alcance de las partículas Beta:

Aire 204 cm

Tejido: 0.26 cm

---

**PROPIEDADES RADIATIVAS:**
Radiotoxicidad: 3.44 mrem/ $\mu\text{Ci}$  por absorción por la piel

Órgano crítico Tejido superficial

Rutas de entrada Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel

Peligro radiológico Exposición interna: Tomar precauciones

Exposición externa: Tomar precauciones

---

**Barreras de Protección**

No requiere consideraciones especiales para cantidades del orden de mCi.

---

**Monitoreo DOSIMÉTRICO**
Realizar bioensayos de orina para detectar posible contaminación por  $^{36}\text{Cl}$ , siempre que se sospeche algún accidente o problema por el uso de este material con actividades mayores a 2 mCi., entre 2 y 4 horas después del contacto.**Dosímetros portátiles para seguimiento:**

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)

**Examen de contaminación**Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^{36}\text{Cl}$  o un Geiger-Mueller

---

**Precauciones Especiales**

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante

Este material presenta baja volatilidad por lo que no es necesario tomar precauciones de captación de gases cuando se utiliza dentro del laboratorio

En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Hoja de datos de Seguridad del  $^{86}\text{Rb}$ 

Elemento químico original Rubidio

Símbolo del material radiactivo:  $^{86}\text{Rb}$   
PROPIEDADES FÍSICAS:

Emisión:	Beta	698 keV	8.8%
		1077 keV	8.8%
Tiempo de vida media [ $T_{1/2}$ ]:	Gamma	1774 keV	91.2%
	T $_{1/2}$ Física: 19 días		
	T $_{1/2}$ Biológica: 44 días		
	T $_{1/2}$ Efectiva: 13.3 días		

## PROPIEDADES RADIATIVAS:

Radiotoxicidad:	10.4 mrem/ $\mu\text{Ci}$ por contacto
Órgano crítico	Hueso
Rutas de entrada	Ingestión, inhalación, herida profunda y superficial, absorción por la piel
Peligro radiológico	Exposición interna: Tomar precauciones
	Exposición externa: No de cuidado

## Barreras de Protección

Utilizar barreras de 0.9525 cm de lucita  
Monitoreo DOSIMÉTRICO

Realizar bioensayos de orina para detectar posible contaminación por  $^{86}\text{Rb}$  entre 6 y 12 horas después del contacto, algún accidente o problema o por el uso de este material en niveles mayores a 5 mCi.

## Dosímetros portátiles para seguimiento:

Geiger-Mueller (e.g. Bicrom PGM)

## Examen de contaminación

Utilizar contador geiger de líquido de centelleo con método para conteo de  $^{86}\text{Rb}$  o un Geiger-Mueller

## Precauciones Especiales

Evitar contacto con la piel, ingestión, inhalación o algún tipo de herida con punzocortante  
Utilizar dosímetro de protección cuando se experimente con material con niveles de actividades mayores a 1 mCi.  
La volatilidad de este material es baja por lo que se puede prescindir del uso de la campana extractora.  
En las operaciones de apertura de viales y en experimentos que generen aerosoles utilizar campanas extractoras de gases.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ANEXO C**  
**PROPUESTA DE BITÁCORA DE TRABAJO DE**  
**MATERIALES RADIACTIVOS EN EL LABORATORIO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR**

**LABORATORIO**

**PROMADIMARR**

**Bitácora interna**



**Responsable:**

**Laboratorio:**

**Isótopo**

**Compuesto marcado**

**Sólidos**

**Líquido**

**Acuoso**

**Orgánico**

**Otro**

**especifique**

**Fecha**

**Actividad inicial del isótopo**

**Fecha**

**Actividad extraída del isótopo**

**Usuario**

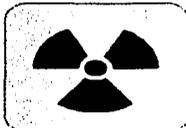
**Cálculo de actividad**

**Observaciones**

**TESIS CON**  
**FALLA DE ORIGEN**

**ANEXO D  
PROPUESTA DE ETIQUETAS DE CONTROL  
EN EL MANEJO DE RESIDUOS RADIACTIVOS**

**Universidad Nacional Autónoma de México**



**Instituto de Fisiología Celular**



Fecha \_\_\_\_\_

**RESIDUOS RADIACTIVOS**

Investigador \_\_\_\_\_

Laboratorio \_\_\_\_\_

Isótopo \_\_\_\_\_ Compuesto marcado \_\_\_\_\_

Sólidos  Líquido  Acuoso  Orgánico

Otro  Especifique \_\_\_\_\_

Cálculo estimado

Actividad desechada \_\_\_\_\_  $\mu$  Ci      Paquete \_\_\_\_\_  $\mu$  Ci frasco

Concentración extraída \_\_\_\_\_  $\mu$  Ci  
del frasco original = \_\_\_\_\_  $\mu$  litros totales

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**





**ANEXO F**  
**PROPUESTA DE HOJAS DE CONTROL DE RESIDUOS RADIATIVOS**  
**PARA EL DEPARTAMENTO DE COMPRAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR**  
**DEPARTAMENTO DE COMPRAS**  
**PROMADIMARR**  
**Forma de adquisición de material radiactivo**



Fecha:

Laboratorio	Investigador encargado			
No	Isótopo radiactivo	Cantidad		Actividad
		<input type="checkbox"/> litros	<input type="checkbox"/> kilogramos	
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ANEXO G  
PROPUESTAS DE HOJAS DE REGISTRO  
PARA EL ALMACÉN TEMPORAL DE RESIDUOS**

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</b> <b>INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR</b> <b>PROMADIMARR</b> <b>Registro de residuos radiactivos por laboratorio</b>			  
Fecha:			
<b>Laboratorio</b>	<b>Investigador encargado</b>		
<b>Isótopo radiactivo</b>	<b>Cantidad</b> <input type="checkbox"/> litros <input type="checkbox"/> kilogramos	<b>Actividad</b>	
<b>Laboratorio</b>	<b>Investigador encargado</b>		
<b>Isótopo radiactivo</b>	<b>Cantidad</b> <input type="checkbox"/> litros <input type="checkbox"/> kilogramos	<b>Actividad</b>	
<b>Laboratorio</b>	<b>Investigador encargado</b>		
<b>Isótopo radiactivo</b>	<b>Cantidad</b> <input type="checkbox"/> litros <input type="checkbox"/> kilogramos	<b>Actividad</b>	

Continúa

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## ANEXO H

PROPUESTA DE ETIQUETAS DE DESCLASIFICACIÓN  
DE RESIDUOS RADIACTIVOS**Universidad Nacional Autónoma de México****Instituto de Fisiología Celular****RESIDUOS RADIACTIVOS****Desclasificación**Fecha de ingreso del residuo  
\_\_\_\_\_Fecha de egreso calculada del residuo  
\_\_\_\_\_Tiempo de retención del residuo  
\_\_\_\_\_TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN