



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

**“La protección radiológica en el tratamiento con I-131  
del cáncer diferenciado de tiroides: recomendaciones en  
la implementación de un tratamiento que no requiera la  
hospitalización del paciente”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA MÉDICA)**

PRESENTA:

**JOSÉ ALFREDO HERRERA GONZÁLEZ**



posgrado en ciencias físicas  
u n a m

DIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS ALBERTO MEDINA VELÁZQUEZ  
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORAL: DRA. MARÍA ESTER BRANDAN SIQUÉS  
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORAL: DRA. MARÍA ISABEL GAMBOA DE BUEN  
ASESOR PROFESIONAL: DR. ENRIQUE ESTRADA LOBATO

MÉXICO, D.F.

2010



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.

El presente trabajo fue realizado en colaboración especial del Dr. Juan Antonio Pierzo Hernández, Coordinador de los Capítulos de Protección Radiológica y Radioterapia Molecular de la Sociedad Mexicana de Medicina Nuclear e Imagen Molecular. Médico Adscrito del Instituto Nacional de Cancerología.

Mi sincero agradecimiento a todas, todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, incluyendo a mis compañeros estudiantes de la UNAM e INCan por su amistad, entusiasmo y alegría.

A Gabriela Bejarano Cruz, quien es el amor de mi vida, morenita, te admiro y te amo con todo mi corazón.

# ÍNDICE

---

## Introducción

- 1.1 La tiroides
- 1.2 Las principales patologías de la tiroides
- 1.3 La terapia del cáncer diferenciado de tiroides
- 1.4 La seguridad radiológica actual en la terapia dirigida con I-131
  - 1.4.1 Magnitudes físicas usadas en la protección radiológica
- 1.5 Los sistemas de protección radiológica para el egreso de pacientes que han recibido terapia con I-131
  - 1.5.1 El sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida (Hospitalización obligada)
  - 1.5.2 Los nuevos sistemas de egreso de pacientes tratados con I-131: la modalidad ambulatoria (La hospitalización es una opción pero no una medida obligatoria)
  - 1.5.3 El control de la categoría de exposición ocupacional y médica en el sistema ambulatorio
  - 1.5.4 El control de la categoría de exposición pública en el sistema ambulatorio

## Objetivos

### Metodología

- 2.1 La protección radiológica antes de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.
  - 2.1.1 Determinación de la contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131. (Técnica de frotis)
  - 2.1.2 Determinación de contaminación fija y removible en la sala de hospitalización para pacientes que reciben terapia con I-131
  - 2.1.3 Estimación teórica de la dosis que recibe el POE en cada paso específico que realiza durante la manipulación del I-131 hasta el momento de administrarlo al paciente.
- 2.2 La protección radiológica después de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.
  - 2.2.1 Análisis de los criterios de segregación de los desechos radioactivos generados en la sala de hospitalización. Evaluación de la atenuación de la radiación en un bulto de desechos con ropa contaminada.
  - 2.2.2 Estimación teórica retrospectiva de la dosis recibida por la persona al cuidado del paciente en una modalidad ambulatoria de terapia con I-131.

## **Resultados y discusión**

- 3.1 Resultados Primera Parte. La protección radiológica antes de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.
  - 3.1.1 Determinación de contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131. (Técnica de frotis)
  - 3.1.2 Determinación de contaminación fija y removible en la sala de hospitalización para pacientes que reciben terapia con I-131
  - 3.1.3 Estimación teórica de la dosis que recibe el POE en cada paso específico que realiza durante la manipulación del I-131 hasta el momento de administrarlo al paciente.
    - 3.1.3.1 Estimación de la dosis recibida por confirmar la actividad de I-131 prescrita al paciente.
    - 3.1.3.2 Estimación de la dosis por transportar el material radioactivo al área de hospitalización
    - 3.1.3.3 Estimación de la dosis por exposición a 3 fuentes de I-131 dentro de sus contenedores de plomo mientras se dan instrucciones a los pacientes
    - 3.1.3.4 Estimación de la dosis a un punto cercano al paciente mientras ingiere el radioyodo
    - 3.1.3.5 Estimación de la dosis por medir la rapidez de exposición de cada paciente a 1 metro de distancia.
- 3.2 Resultados Segunda Parte. La protección radiológica después de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.
  - 3.2.1 Análisis de los criterios de segregación de los desechos radioactivos generados en la sala de hospitalización. Determinar si es despreciable la atenuación de la radiación en un bulto de desechos con ropa contaminada.
  - 3.2.2 Estimación teórica retrospectiva de la dosis recibida por la persona al cuidado del paciente en una modalidad ambulatoria de terapia con I-131.

## **Conclusiones**

### **Apéndice 1**

### **Apéndice 2**

### **Apéndice 3**

## **Referencias**

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se realizó un análisis de la protección radiológica entorno al tratamiento del cáncer diferenciado de tiroides con I-131 que se lleva a cabo en el Instituto Nacional de Cancerología (INCan) y se discute la implementación de un protocolo de tratamiento que no requiera la hospitalización del paciente. En México esta terapia requiere la hospitalización del paciente por motivos de regulación en el uso del I-131, pero en los últimos años, a nivel mundial se han encontrado deficiencias en los argumentos que sugieren aislar al paciente durante este tipo de terapia.

El trabajo se dividió en dos partes. Primero se evaluaron las medidas de protección radiológica usadas en la aplicación de la terapia con I-131 en el INCan. La evaluación consistió en: (1) determinar la posible presencia de contaminación removible en los contenedores que transportan las fuentes de I-131, (2) determinar los posibles sitios de contaminación en la sala de hospitalización, (3) evaluar los criterios de segregación de desechos radiactivos y ropa usada por el paciente hospitalizado, y (4) estimar, de manera teórica, la dosis recibida en cada paso durante el manejo de las fuentes. Los resultados de la evaluación, presentados en este trabajo, permitieron elaborar una serie de medidas de protección que contribuyeron a optimizar el procedimiento de aplicación de la terapia en el INCan.

En la segunda parte del trabajo se procedió a evaluar la posibilidad de implementar una modalidad ambulatoria del tratamiento con el I-131, considerando el análisis realizado en el INCan y estimando, de forma teórica, la dosis que podría recibir un familiar o persona al cuidado del paciente. El cálculo se basó en las mediciones de rapidez de exposición realizadas en 85 pacientes durante su aislamiento en el hospital después de recibir terapia con I-131.

El interés de implementar una modalidad ambulatoria de tratamiento se fundamenta en: (a) disminuir la exposición externa que de forma crónica recibe el personal ocupacionalmente expuesto encargado de la terapia; (b) evitar la concentración y retención de los desechos radioactivos generados en el hospital, favoreciendo su dilución y dispersión en forma significativa; (c) ampliar la cobertura del servicio para la terapia del cáncer de tiroides, a partir de reducir el tiempo de espera para recibir el tratamiento (que depende de la disponibilidad de camas de hospitalización) y, (d) reducir los gastos de hospitalización.

# INTRODUCCION

---

## 1.1 La tiroides

La tiroides es una estructura de apariencia lisa, bilobulada, de color rosado, adherida a la tráquea justo debajo de la laringe en posición lateral e inferior al cartílago tiroideo. En el adulto tiene de 15 a 25 g de peso y recibe una abundante irrigación sanguínea. Secreta dos hormonas que contienen yodo: la tiroxina (T4) y la triyodotironina (T3), que son las únicas sustancias del organismo que contienen yodo.

El tejido tiroideo normal está formado por células foliculares y células C. Las células C secretan la hormona calcitonina cuya función es regular el nivel de calcio en la sangre. Las células foliculares forman una unidad funcional dentro de la glándula llamada foliculo, que consiste de una cavidad central llena de un coloide (glucoproteína yodada: la tiroglobulina) cubierta por una capa de células foliculares y una membrana basal. El foliculo se encarga de captar yodo del torrente sanguíneo para sintetizar las hormonas tiroideas T3 y T4, que son aminoácidos yodados reguladores de la tasa de oxidación celular en casi todos los tejidos del cuerpo, también intervienen en la maduración y desarrollo de los tejidos, producción de calor, y metabolismo de nutrientes, etc. (ver Apéndice 1 sobre el mecanismo de captación del yodo)

## 1.2 Las principales patologías de la tiroides

Las principales patologías de la tiroides son el hipertiroidismo (tirotoxicosis), hipotiroidismo y el cáncer de tiroides. En este trabajo la patología de interés es el cáncer de tiroides. Existen dos formas principales del cáncer de tiroides, el diferenciado y el indiferenciado. El cáncer diferenciado de tiroides (CDT) comprende el 90% de todos los casos de cáncer de tiroides [1] y tiene la particularidad de conservar ciertas características funcionales similares a las de las células normales de la tiroides como la captación de yodo. Se clasifica en papilar (70%) y folicular (20%), ambos originados a partir de células del epitelio folicular, y es usualmente curable si se detecta en etapas tempranas [1]. Esta patología se desarrolla con el doble o más de frecuencia en mujeres que en hombres.

El cáncer de tiroides puede ocurrir a cualquier edad, aunque es más común después de los 30 años y su agresividad incrementa significativamente con la edad, en el INCan la edad promedio de los pacientes tratados es de 42 años y representa el 2% de las neoplasias malignas atendidas en esta institución.

## 1.3 La terapia del cáncer diferenciado de tiroides

### *La Medicina Nuclear*

La ciencia y práctica clínica de la medicina nuclear molecular consiste en la administración, a un paciente, de radionúclidos o radiofármacos que van dirigidos a tejidos específicos para estudiar los procesos fisiológicos y fisiopatológicos, para obtener información diagnóstica o para uso terapéutico. Un radiofármaco está formado por dos componentes: un vector no radiactivo (i.e. el fármaco), que una vez introducido en el organismo se concentrará en su mayor parte en un tejido particular, y un radionúclido unido al fármaco que tiene por finalidad, o bien ejercer acción terapéutica por medio de partículas ionizantes en el sitio al que ha sido transportado (destrucción de células cancerosas) o bien generar una imagen a partir de la distribución espacial del radionúclido dentro del cuerpo, lo cual es posible por la emisión de fotones.



En el reporte del United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR por sus siglas en Inglés) [2] se estima que anualmente se realizan más de 30 millones de procedimientos diagnósticos con medicina nuclear y cerca de 400,000 procedimientos terapéuticos en el mundo. En México durante el periodo 1991-1996 se realizaron 102 mil procedimientos con medicina nuclear de acuerdo con este mismo reporte.

### *La Terapia Dirigida en el tratamiento del Cáncer Diferenciado de Tiroides*

El tratamiento habitual para el CDT consiste en una cirugía para extraer la mayor parte del tejido tumoral posible (tiroidectomía), la cual puede ser total o casi total, seguida de una terapia dirigida de consolidación con radioyodo (I-131) [3]. El I-131 es un emisor de partículas beta: 606 keV [89.3%] y 334 keV [7.4%] (valores de energía máxima), con energía promedio de 190 keV; y de radiación gamma: 364 keV [81.2%], 637 keV [7.3%] y 284 keV [6.2%].

La terapia de consolidación tiene dos objetivos: la destrucción de residuos microscópicos del carcinoma tiroideo que la cirugía no removió, por el riesgo de dañar tejidos circundantes, y la destrucción del tejido tiroideo normal. La terapia de consolidación se conoce con el nombre de ablación, si se utiliza por primera vez, y con el nombre de terapia de seguimiento para las aplicaciones siguientes de I-131 debidas a una recurrencia de la enfermedad [3].

El uso de la terapia dirigida con I-131 disminuye la probabilidad de cáncer recurrente, facilita el seguimiento de la enfermedad a partir de la medición de niveles de tiroglobulina y del rastreo diagnóstico con I-131, y permite localizar sus posibles metástasis. Su eficacia está asociada a la capacidad de las células tumorales para concentrar y retener yodo, aunque el metabolismo del radioyodo (Ver apéndice 1) en los carcinomas papilares y foliculares está profundamente alterado [4].

El utilizar radioyodo además tiene por ventaja que la mayoría de la dosis de radiación es depositada por partículas beta (2 mm penetración máxima), con el 90% de la energía absorbida dentro de los primeros 0.8 mm de tejido para el I-131 [5]. Por lo tanto, por medio de esta terapia dirigida, una gran cantidad de radiación ionizante puede ser depositada en una región relativamente pequeña sin dañar tejido sano circundante. La dosis total de radiación depositada por el I-131 en un tejido dependerá de dos factores: la concentración radioactiva (administración de I-131 total / volumen del tejido), y la vida media efectiva. En el Instituto Nacional de Cancerología el intervalo de actividades usadas en la terapia de consolidación para el cáncer diferenciado de tiroides es de 3.700 GBq – 11.100 GBq [100-300 mCi] dependiendo del estadio de la enfermedad [3].

#### **1.4 La seguridad radiológica actual en la terapia dirigida con I-131**

En los últimos años, con base en nuevas investigaciones en la terapia dirigida con I-131 [6], [7] y [8] se ha modificado el principal sistema de protección radiológica usado en el mundo, que es el recomendado por la Comisión Internacional en Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés) [9] y [10]. En México, esta terapia dirigida es regulada a través de una norma [11] que tiene sus bases en el sistema de protección recomendado por la ICRP. En esta sección se definen los conceptos de protección radiológica utilizados sistema de protección propuesto por la ICRP.

## 1.4.1 Magnitudes físicas usadas en la protección radiológica

### Magnitudes dosimétricas

#### **Exposición (X), definición:**

Es la suma de la carga eléctrica de todos los iones de un signo producidos en aire por rayos X o radiación gamma cuando todos los electrones liberados por los fotones en un volumen pequeño de aire son completamente frenados en aire, dividida por la masa del aire en el volumen.

$$X = dQ/dm$$

*Unidades:* Carga eléctrica/masa de aire, C/kg

*Unidades especiales:*

$$1 \text{ Roentgen [R]} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

La magnitud exposición cuantifica el número de iones producidos en aire.

#### **Dosis absorbida (D), definición:**

$$D = d\varepsilon / dm$$

$d\varepsilon$  es la energía promedio impartida por la radiación ionizante en un volumen de masa  $dm$

*Unidades:* J/kg en el sistema internacional

*Unidades especiales:*

$$1 \text{ gray [Gy]} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

#### **Kerma (K), definición:**

$$K = dE_{tr} / dm$$

*Unidades:* J/kg o Gy

$dE_{tr}$  es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas ionizantes no cargadas en una cantidad de materia de masa  $dm$ .

### Sobre la relación entre las magnitudes Dosis y Kerma

El kerma es la energía transferida a los electrones por los fotones que inciden en el medio. La energía transferida puede disiparse en dos modos distintos: pérdidas de energía por colisión y pérdidas radiativas (bremsstrahlung y aniquilación electrón-positrón). Por ello el kerma total, denominado  $K$ , se divide generalmente en dos componentes  $K_{col}$  y  $K_{rad}$ .  $K_{col}$  es el valor esperado de la energía neta transferida a partículas cargadas por unidad de masa en el punto de interés excluyendo las pérdidas radiativas de energía y la energía pasada de una partícula cargada a otra, de donde

$$K = K_{col} + K_{rad}$$

La fracción promedio de la energía transferida a los electrones que se disipa como pérdidas radiativas se representa con el factor  $g$ , por lo tanto la fracción disipada por colisiones es  $(1-g)$ , entonces

$$K_{col} = K(1-g) \quad (1)$$

Para un punto en un medio específico y una energía específica de fotones incidentes el kerma de colisiones está dado por

$$K_{col} = \psi(\mu_{en} / \rho) \quad (2)$$

y el kerma total por

$$K = \psi(\mu_{tr} / \rho)$$

Donde  $\psi$  es la fluencia de energía,  $\mu_{tr} / \rho$  es el coeficiente másico de transferencia de energía y  $\mu_{en} / \rho$  es el coeficiente másico de absorción.

De manera general, la transferencia de energía (kerma) a partículas cargadas del medio en una región particular no implica la absorción de toda esa energía (dosis absorbida) en la misma región; esto se debe a que el alcance de los electrones secundarios liberados por la interacción radiación-materia no es cero. Cuando la región de interés está rodeada de suficiente materia para que el número de electrones en movimiento producidos fuera de la región de interés compensen a los que escapan de ésta, se dice que existen condiciones de equilibrio electrónico (EPC). Ahora, respecto a las pérdidas radiativas, la mayor parte de los fotones escapan de la región de interés, por ello la dosis absorbida usualmente se relaciona con el  $K_{col}$ . En el caso especial en que existe equilibrio de partícula cargada (EPC) [12]:

$$D = K_{col} = K(1-g) \quad (3)$$

### Sobre la relación entre las magnitudes Exposición y Kerma

La energía promedio necesaria para producir un par de iones en aire es  $W_{aire} = E_k/N$ , donde  $N$  es el número promedio de pares de iones formados cuando la energía cinética inicial  $E_k$  de una partícula cargada es completamente disipada en aire. La mejor estimación actual para el valor promedio de  $W_{aire}$  es 33.97 eV por cada par de iones o  $W_{aire} / e = 33.97$  J/C. Multiplicando el kerma de colisión por el factor anterior (la carga creada por joule de energía depositada) obtenemos la carga creada por unidad de masa de aire o exposición:

$$X = (K_{col})_{aire}(e/W_{aire}) = (K(1-g))_{aire}(e/W_{aire}) \quad (4)$$

### Sobre la relación entre Dosis y Exposición

El kerma y kerma de colisión se relacionan de acuerdo a la expresión (1). El valor  $g$  depende de la energía cinética de los electrones y la  $Z$  del medio, para bajas energías y en aire  $g \sim 1$ , por lo tanto  $K_{col} \sim K$ .

Por otro lado como podemos ver en la expresión (2) el kerma de colisión depende del material con el que interaccionan los fotones del campo de radiación y de su energía. Por lo tanto una vez conocido el kerma en aire, se puede conocer el kerma en cualquier material o tejido por medio del cociente de los coeficientes másicos de absorción de energía, para el caso particular del tejido:

$$K_{tejido} / K_{aire} = (\mu_{en} / \rho)_{tejido} / (\mu_{en} / \rho)_{aire} \approx 1.1$$

Finalmente como el kerma está relacionado con la exposición  $X$  por la expresión (3) y el kerma se relaciona con la dosis por medio de la expresión (4), una vez conocida la exposición en aire podemos conocer la dosis  $D$  en tejido, siempre y cuando se tenga condiciones de EPC [13] y [14].

## Magnitudes de Protección

Para fines de protección radiológica existen magnitudes especiales que se usan para limitar los efectos estocásticos de radiación a bajas dosis, su definición está basada en la dosis absorbida promedio pero toma en cuenta las características radiobiológicas de los diferentes tejidos del cuerpo humano para cada tipo de radiación. Para tomar en cuenta estas características radiobiológicas se utilizan factores de ponderación para cada tejido (T) y para cada tipo de radiación (R).

### Dosis equivalente ( $H_T$ ), definición:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}$$

*Unidades:* J/kg

*Unidades especiales:* sievert [Sv] = 1 J/kg

$D_{T,R}$  es la dosis absorbida promedio en un tejido T, debido a una radiación R que se toma en cuenta por medio de un factor de ponderación  $w_R$  dependiendo del tipo y energía de esta radiación (ver tabla 1.4.1)

### Dosis efectiva (E), definición:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

*Unidades:* J/kg

*Unidades especiales:* sievert

$w_T$  es el factor de ponderación para tomar en cuenta las características radiobiológicas de un tejido específico T y  $\sum w_T = 1$ . La suma se realiza sobre el conjunto de todos los órganos y tejidos del cuerpo humano considerados como sensibles a la inducción de efectos estocásticos (ver tabla 1.4.2).

## Las Magnitudes Operacionales

Las magnitudes dosis equivalente y dosis efectiva no son medibles en la práctica, para aproximarlas se utilizan **magnitudes operacionales**. Hay varios tipos de magnitudes operacionales, pero se definirán sólo las relevantes para el presente trabajo, la descripción completa de magnitudes operacionales se puede consultar en la referencia 17.

### Equivalente de dosis personal $H_p(d)$ , definición:

Se define como el equivalente de dosis en tejido suave (de acuerdo a la definición ICRU) a una profundidad  $d$ , por debajo de un punto especificado en el cuerpo humano. Utiliza el sievert (Sv) como unidad.

Para la estimación de dosis efectiva usualmente se toma la profundidad  $d$  como 10 mm,  $H_p(10)$ , para la estimación de dosis a piel, para manos y pies se usa  $H_p(0.07)$ , con  $d=0.07$ mm. Las magnitudes operacionales son medibles y la instrumentación para monitoreo en un campo de radiación es calibrada en términos de éstas. Se considera que las mediciones obtenidas por medio de magnitudes operacionales son una estimación suficientemente precisa de la dosis efectiva y de la dosis a piel para los fines de la protección radiológica.

**Tabla 1.4.1** Factores de ponderación por tipo de radiación recomendados por la ICRP [15]. Todos los valores se relacionan con radiación incidente en el cuerpo, o para fuentes de radiación interna por incorporación de radionúclidos. En el caso de electrones ver las notas para electrones Auger en la referencia 15. Para el caso de neutrones, la función continua se puede consultar en la referencia 15.

Tipo de radiación, R	factor de ponderación, $w_R$
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión, iones pesados	10
Neutrones	Existe una función continua dependiendo de la energía del neutrón

**Tabla 1.4.2** Factores de ponderación por tipo de tejido recomendados por la ICRP [15]. Tejidos restantes: Glándulas suprarrenales, Región extratorácica, Vesícula biliar, Corazón, Riñones, Nódulos linfáticos, Músculo, Mucosa bucal, Páncreas, Próstata, Intestino delgado, Bazo, Timo y Región Uterina-cervical.

Tejido, T	Factor de ponderación $w_T$	$\Sigma w_T$
Médula ósea, Colon, Pulmón, Estomago, Seno, tejidos restantes	0.12	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, Esófago, Hígado, Tiroides	0.04	0.16
Superficie ósea, Cerebro, Glándulas salivales, Piel	0.01	0.04
<b>Total</b>		<b>1.00</b>

## 1.5 Los sistemas de protección radiológica para el egreso de pacientes que han recibido terapia con I-131

Al conjunto de medidas de protección contra la exposición interna y externa debida a un paciente al que se le ha administrado material radioactivo, se le conoce como sistema de egreso. En el caso de la terapia del CDT con I-131 existen dos sistemas de egreso, uno que obliga a hospitalizar al paciente dependiendo de la actividad retenida en su cuerpo, y un segundo sistema conocido como modalidad ambulatoria donde la hospitalización pasa a ser una opción para ciertos pacientes, no una obligación, que no depende de la actividad administrada.

### 1.5.1 El sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida (Hospitalización obligada, actualmente usado en México)

En este sistema el modo adecuado de protección radiológica de las personas distintas al paciente mismo, consiste en aislar al paciente en una sala de hospital acondicionada como zona controlada y dejarle ahí hasta que la actividad retenida en su cuerpo (actividad residual administrada) sea menor que una cantidad fijada por la autoridad reguladora o la rapidez de exposición medida a un metro del paciente sea menor a un valor establecido, al egresar el paciente se le proporcionan recomendaciones para los siguientes días fuera del hospital [11]. Este sistema de egreso de pacientes se conoce como “basado únicamente

en la actividad retenida”, y utiliza como principal medida de protección contra la exposición externa e interna el aislamiento. Cabe mencionar que éste es el único sistema de egreso permitido actualmente en México [11]. Las medidas de protección radiológica contra la exposición interna y externa en este sistema van encaminadas a una sola categoría de exposición de los tres existentes en el sistema de protección de la ICRP, a saber, la protección de miembros del público como se establece en el objetivo de la norma mexicana: “...a fin de que se apliquen los principios de seguridad radiológica necesarios para proteger a sus familiares y otros individuos del público.” [11].

### ***1.5.2 Los nuevos sistemas de egreso de pacientes tratados con I-131: la modalidad ambulatoria***

La modalidad ambulatoria son sistemas de egreso que permiten, bajo condiciones explícitas, que los pacientes a los que se les ha administrado actividades terapéuticas de I-131 puedan retirarse a su casa inmediatamente después de recibir su tratamiento. La hospitalización de un paciente en estos sistemas es una decisión del médico especialista en medicina nuclear para cada individuo específico [10] y no una medida obligatoria.

### ***1.5.3 El control de la categoría de exposición ocupacional y médica en el sistema ambulatorio***

La dosis recibida por el personal ocupacionalmente expuesto (POE) está determinada por la necesidad de asistencia de un paciente y esta necesidad es perfectamente identificable, es posible personalizar el grado de ayuda que un paciente requerirá los días posteriores a la terapia, factor que no es tomado en cuenta ni para el POE ni para miembros del público en el sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida. Factores de este tipo dieron pie a considerar la importancia de contar con una o varias *personas al cuidado del paciente*, cuya exposición se considera dentro de la categoría de exposiciones médicas [7], [15] y juega un papel importante en el control de las exposiciones potenciales y planeadas porque optimiza la protección compartiendo el cuidado del paciente entre familiares que funjan como *personas al cuidado del paciente* y el POE, cuya exposición es crónica al I-131 por el número de pacientes que con el que trata al año. La publicación 94 [10] de la ICRP sugiere que las personas al *cuidado del paciente*, quienes voluntariamente aceptan una mayor exposición en beneficio del paciente, puedan incurrir en exposiciones mayores al límite fijado para miembros de la categoría de exposición pública de 1 mSv/año. Estos individuos podrían sujetarse entonces a una restricción de dosis de unos pocos mSv por episodio en lugar hacerlo a un límite de dosis inflexible [10]. Una dosis restringida a 5 mSv por episodio a los familiares o persona al cuidado del paciente que ha recibido una actividad terapéutica de radioyodo en forma externa (egresado del hospital inmediatamente después de la administración de la actividad), tiene estimado un factor de riesgo de 0.025% de padecer cáncer fatal durante el resto de su vida mientras que el factor de riesgo espontáneo de cáncer fatal durante toda su vida es de 20% a 30% [17].

### ***1.5.4 El control de la categoría de exposición pública en el sistema ambulatorio.***

La dosis recibida por un individuo por exposición a un paciente está gobernada por la distribución del yodo-131 en el cuerpo del paciente, por la rapidez con la que el paciente excreta el radioyodo y por el tiempo que pasa el individuo en la cercanía del paciente. Tomando en cuenta lo anterior, en los sistemas de egreso ambulatorio se elaboran guías de conducta personalizadas a partir de entrevistas con el paciente para controlar la exposición de los individuos cercanos al paciente.

El comportamiento del paciente y su habilidad para modificar sus hábitos temporalmente, de acuerdo a lo indicado por el personal médico, juega un papel determinante en todos los sistemas de egreso. Si estos períodos de restricción son omitidos por los pacientes, las dosis recibidas resultantes por esta omisión pueden rebasar los límites de dosis y las restricciones de dosis, por ello si cabe la menor duda sobre la capacidad del paciente para

seguir las indicaciones se debe recurrir a una modalidad con hospitalización. El tratamiento con radioyodo a padres de niños **menores de 5 años** que no puedan hacer los arreglos necesarios para el cuidado de los mismos por sus familiares también deberá de realizarse con ingreso hospitalario [17], independientemente de la actividad administrada, porque en el caso de los niños la dosis recibida podría rebasar el límite establecido para ellos de 1 mSv [7]. Es necesario también minimizar la transferencia de secreciones, puesto que algunos **episodios de contaminación pueden ocurrir hasta 21 días o más** después de la administración de la actividad [8]; esto último es muy importante en la convivencia con niños [20], [7].

En la modalidad ambulatoria se han aumentado y fortalecido las medidas de protección [3] basándose en la nueva evidencia, se aumenta el tiempo de restricción para las actividades del paciente, a diferencia del egreso basado únicamente en la actividad retenida que pondera el tiempo de restricción a los primeros **tres días** después del tratamiento. En el sistema ambulatorio la restricción en el contacto con niños es de 12 hasta 24 días dependiendo de las circunstancias particulares del paciente, la actividad administrada y el tipo de tratamiento recibido (Ver Tabla 1.1 que es un resultado independiente de este trabajo), el periodo de restricción para dormir separado de la pareja es de 4 a 22 días, etc.

**Tabla 1.1** *Tiempos de restricción para el paciente tratado con radioyodo para cumplir con el límite de 1 mSv/año para miembros del público y reducir al mínimo la posibilidad de contaminación infantil o mujeres embarazadas en el sistema ambulatorio propuesto en este trabajo (Adaptado por el Dr. J. A. Pierzo de la Sociedad Mexicana de Medicina Nuclear e Imagen Molecular de las referencias [6], [7], y [8]). Los valores entre corchetes son valores propuestos para complementar los valores de las referencias originales [17].\* Los niños en esta tabla son considerados como las personas menores de 20 años.*

	TERAPIA PARA HIPERTIROIDISMO				TERAPIA DE ABLACIÓN PARA RESTOS TIROIDEOS POR CÁNCER DE TIROIDES				ACTIVIDADES TERAPÉUTICAS PARA RECURRENCIA DEL CÁNCER DE TIROIDES		
	200 (5.4)	400 (10.8)	600 (16.2)	800 (21.6)	1,850 (50)	3,700 (100)	5,550 (150)	7,400 (200)	1,850 (50)	3,700 (100)	5,550 (150)
Transporte privado < 24 h de la administración (horas)	[8]	[4]	[2.5]	[2]	8	4	2.5	2	8	4	2.5
Transporte privado 24 h a 48 h de la administración (horas)	[20.5]	[10]	[6.5]	[5]	20.5	10	6.5	5	20.5	10	6.5
Transporte privado > 48 h después de la administración (horas)	[24]	[18.5]	[12.5]	[9]	24	18.5	12.5	9	24	24	17
Ausencia al trabajo (> 1 metro distancia) (días)	0	3	6	8	3	7	10	12	1 [2]	2 [5]	2 [9]
Dormir separado de la pareja (días)	1	5	9	12	16	20	22	23	3 [5]	4 [7]	4 [7]
Contacto restringido con niños < 2 años (días)	15	21	25	27	16	20	22	24	4 [11]	4 [16]	5 [20]
Contacto restringido con niños 2-5 años (días)	11	16	20	22	13	17	19	21	3 [5]	4 [11]	4 [14]
* Contacto restringido con niños > 5 años (días)	5	11	14	16	10	13	16	17	2 [5]	3 [11]	3 [14]
Evitar lugares de esparcimiento, concurridos y transporte público (días)	0 [1]	0 [4]	7	7	[10]	[10]	[12]	[12]	[4]	[4]	[6]



## **OBJETIVOS**

---

### **Objetivo General:**

Proponer medidas de protección radiológica que permitan la implementación de una modalidad ambulatoria de tratamiento con I-131 para el cáncer diferenciado de tiroides.

### **Objetivos específicos:**

- Evaluar las medidas de protección radiológica durante la aplicación del tratamiento con I-131 en el Instituto Nacional de Cancerología (INCan)
- Elaborar recomendaciones de protección radiológica con el fin optimizar el procedimiento de la administración terapéutica del I-131
- Evaluar el criterio de segregación de los desechos generados en la sala de hospitalización
- Estimar la dosis que recibiría un familiar al cuidado del paciente en una modalidad ambulatoria de egreso para pacientes tratados con I-131

## METODOLOGÍA

---

El estudio se dividió en dos partes que requieren análisis distintos por tratarse de situaciones de protección distintas, la protección radiológica antes y durante de la administración de la terapia con I-131 a un paciente (involucra únicamente la categoría de exposición ocupacional y la fuente es considerada puntual) y la protección radiológica después de la administración del I-131, que involucra las tres categorías de exposición y la fuente no se considera puntual.

### **2.1 La protección radiológica antes y durante la administración de la terapia con I-131 a un paciente.**

Las fuentes del I-131 que se reciben en el hospital son fuentes abiertas. Una fuente abierta es toda aquella que no está sellada y su principal característica es la posibilidad de contaminación de objetos o personas bajo condiciones normales de uso.

Para alcanzar el primer objetivo específico se desarrolló un análisis del procedimiento usado en un ambiente hospitalario (INCan) para administrar la terapia con I-131, desde el punto de vista del sistema de protección radiológica propuesto por la ICRP. Para ello fue necesario analizar el manejo de las fuentes de I-131 desde el momento que llegan al hospital hasta el momento en que el paciente ingiere la actividad de radioyodo prescrita.

Para realizar este análisis del procedimiento de administración de la terapia, se realizaron dos mediciones y una estimación teórica:

1. Determinación de la contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131.
2. Estimación indirecta de la contaminación fija más la removible en la sala de aislamiento del hospital
3. Estimación de la dosis que recibe el POE por cada paso durante el procedimiento de administración del I-131

#### ***2.1.1 Determinación de la contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131. (Técnica de frotis)***

El I-131 que ingiere un paciente que recibirá terapia para el cáncer diferenciado de tiroides puede venir en dos presentaciones: en forma de una sal dentro de una cápsula o la sal en una solución líquida, ambas dentro de un pequeño frasco de vidrio con tapa de rosca. El frasco a su vez viene dentro de un contenedor de plomo. En principio, el exterior del frasco y del contenedor de plomo no deben estar contaminados. Por su peso (5 kg aprox.) los contenedores de plomo son manejados directamente sin la ayuda de pinzas cuando se verifica la actividad prescrita a cada paciente, cuando se transportan dentro del hospital, en el momento de colocarlos sobre la mesa del paciente para su administración, etc. El frasco también tiene contacto con el paciente al momento de destaparlo para ingerir la cápsula con el I-131. Debido al contacto de dichos contenedores con las manos es necesario determinar si existe contaminación removible en ellos.

Para evaluar y cuantificar la presencia de contaminación superficial removible en los contenedores de I-131 se utilizó la técnica de frotis. Esta técnica consiste en usar papel absorbente y frotarlo con fuerza sobre la superficie posiblemente contaminada, de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma Oficial Mexicana [19].

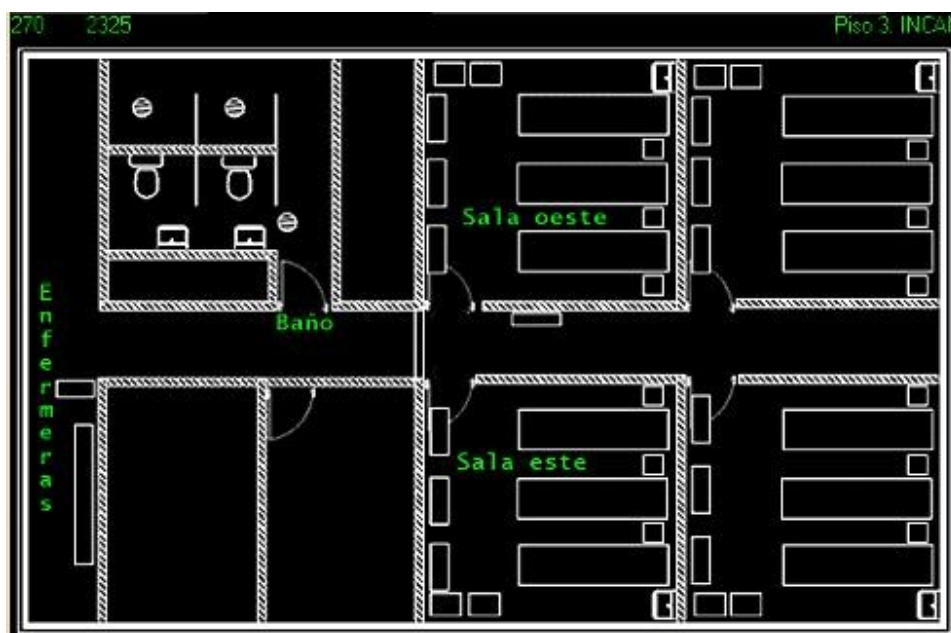
La cuantificación de la contaminación se hace con el contador de centelleo de NaI tipo pozo LUDLUM (Measurements inc.) Modelo 2200, del laboratorio de Física Médica de la

Unidad de Investigación Biomédica en Cáncer INCan-UNAM, que ha sido calibrado y caracterizado para su uso con I-131 [20].

### **2.1.2 Determinación indirecta de contaminación fija y removible en la sala de hospitalización para pacientes que reciben terapia con I-131**

La sala de aislamiento, ubicada dentro del área de hospitalización en un tercer piso, está clasificada como una zona controlada. En esta sala es donde se destapan los contenedores y los frascos con el radioyodo para administrar el I-131 al paciente que permanecerá aproximadamente 48 horas en la sala, tiempo durante el cual estará eliminando paulatinamente I-131 y hace susceptible a la sala de hospitalización de contaminarse incluyendo los objetos que se encuentren dentro de ella. Por esta razón se realizó una medición en la sala de aislamiento con el propósito de localizar las zonas de contaminación y poder sugerir las medidas de protección adecuadas al entrar y salir de ella. Se utilizó un monitor CARDINAL-HEALTH (Victoreen 190 Survey and Count Rate Meter) en acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana para el control de la contaminación radioactiva [19]. La metodología empleada fue la siguiente: se tomaron las lecturas con el monitor y se marcó en un diagrama de la zona controlada el lugar donde se realizó la lectura y el valor medido, de esta forma se podría distinguir entre sitios que acumulan material radioactivo de forma recurrente y los sitios de acumulación ocasional. En la figura 2.1.1 se presenta un diagrama del área de hospitalización y la zona controlada donde se realizaron las lecturas de tasa de exposición.

**Figura 2.1.1** Diagrama del área de hospitalización. El área de hospitalización fue rediseñada en el transcurso del desarrollo de este trabajo y este diagrama no corresponde a las instalaciones usadas actualmente. El diagrama mostrado en esta figura es el que se usó cuando fueron realizadas las medidas.



La zona controlada comprende 4 salas de hospitalización, dos de ellas dedicadas al tratamiento terapéutico con radioyodo, la “sala oeste” para mujeres y la “sala este” para hombres. En el diagrama también aparece el baño utilizado por los pacientes que reciben el tratamiento. Las lecturas se realizaron dentro de las salas este y oeste, el baño y el pasillo central entre las salas este y oeste.

### **2.1.3 Estimación teórica de la dosis que recibe el POE en cada paso específico que realiza durante la manipulación del I-131 hasta el momento de administrarlo al paciente**

La ruta que las fuentes siguen una vez que llegan al hospital es la siguiente: primero las fuentes se reciben y son almacenadas en el cuarto caliente. Posteriormente, dentro del mismo cuarto caliente se verifica la actividad de cada fuente con un activímetro (Carpintec CRC-15 Beta). Por último la fuente es almacenada dentro de un carro blindado y transportada a la sala de hospitalización donde se administrará el I-131 a los pacientes.

Cada uno de estos pasos, mencionados de manera general, tiene varios pasos intermedios que implican exponerse al campo de radiación de la fuente. Como punto final del análisis previo a la administración del radioyodo al paciente, se estimará la magnitud de la interacción entre el campo de radiación y el POE en cada uno de estos pasos intermedios, el parámetro de estimación será el equivalente de dosis personal, y se obtendrá por medio del algoritmo de cálculo de rapidez de exposición para una fuente puntual (ver Apéndice 2), su relación con el equivalente de dosis personal se ha explicado en la sección 1.4.1.

La información recabada con las dos mediciones y la estimación teórica, descritas en los párrafos anteriores, permitirá elaborar las recomendaciones al POE sobre su conducta durante la administración del radioyodo, advertir sobre las zonas de contaminación frecuentes en la sala de hospitalización y sobre las medidas de protección radiológica que deberá seguir, como el uso de equipo y vestimenta adecuada de acuerdo a los resultados que se encuentren.

## **2.2 La protección radiológica después de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.**

La segunda parte del trabajo consistió en analizar la protección radiológica una vez que el paciente ha ingerido el radioyodo. Para este momento las cosas cambian de manera drástica cuando se compara con las condiciones que se tenían hasta antes de administrar el radioyodo al paciente, pues la fuente ingresa al paciente y se pierde por completo su control de manera directa. Ahora el paciente estará eliminando I-131, como función de su metabolismo, de la cantidad de líquidos que consuma, de las condiciones de su enfermedad, del tipo de terapia que esté recibiendo y de su conducta en los días siguientes a la terapia. El yodo excretado por el paciente potencialmente puede llevar a una contaminación, y además introduce un campo de radiación por la emisión gamma del I-131, cuya interacción con las personas al cuidado del paciente es necesario reevaluar como la misma ICRP lo ha sugerido en su publicación 94 [10].

La metodología utilizada para evaluar la protección radiológica después de la administración del I-131 consistió en a) una medición para estudiar los criterios de segregación de la ropa usada por los pacientes y posiblemente contaminada con I-131 en la sala de hospitalización y b) una estimación teórica de la exposición externa que podría recibir una persona que convive con el paciente que ha recibido terapia con I-131 en una situación planeada de exposición. Ambos procedimientos se describen en la sección 2.2.1 y 2.2.2.

### **2.2.1 Análisis de los criterios de segregación de los desechos radioactivos generados en la sala de hospitalización. Evaluación de la atenuación de la radiación en un bulto de desechos con ropa contaminada**

Con base en las vías de eliminación del I-131 (Ver Apéndice 3) se escogieron dos tipos de desechos radioactivos generados en la sala de hospitalización para su análisis. Éstos tienen bastante interés por la gran cantidad (y volumen de ocupación) que se genera en un servicio que administra varios tratamientos con I-131 a la semana: a) la ropa usada por los

pacientes durante su estancia en la sala de hospitalización (la ropa puede tener contacto con la orina, saliva o sudor del paciente), y b) los residuos de las comidas de estos pacientes (los residuos de comida contaminados con su saliva).

La ropa contaminada presenta el problema de ocupar un volumen bastante considerable de espacio que implica gastos de diversos tipos: infraestructura, personal ocupacionalmente expuesto, equipo, etc. La comida que ocupa volúmenes menores tiene el inconveniente de todos los residuos orgánicos: la descomposición.

En el caso de la ropa se tiene el siguiente escenario, un paciente necesita una bata, dos sábanas, un cobertor y una almohada. Se supone que no usa una toalla de baño y que usa la bata para secarse después del baño. Un total de 5 prendas por día si el paciente se baña diario, que es lo recomendable. La moda estadística de la estancia en el hospital para un paciente es de 48 horas, lo que genera 15 prendas en contacto directo con él. Para un servicio que administra 6 terapias a la semana arroja un total de 90 prendas a la semana. Como no es posible pasar directamente semana a semana esta cantidad de ropa a un almacén de desechos y esperar a que transcurran 10 vidas medias de decaimiento radiactivo, entre otras razones porque el hospital cuenta con un número finito de prendas, es necesario segregadas para reducir este volumen de prendas contaminadas. En países como el nuestro donde el espacio en las salas de hospitalización está todo el tiempo ocupado al máximo de su capacidad, nos coloca en una situación desfavorable para realizar esta tarea que requiere de un espacio considerable y condiciones especiales. Sacar las prendas de la sala de terapia (zona controlada) tiene también muchos inconvenientes: transportar por los pasillos del hospital las prendas contaminadas, un volumen difícil de manipular y normalmente muchas prendas estarán mojadas lo que agrega bastante peso. Además el yodo se volatiliza a temperatura ambiente y ahora está en forma orgánica pues se trata del radioyodo eliminado por el paciente a diferencia de cuando se le administra que está en una forma inorgánica. Hay que tomar en cuenta que el I-131 es un emisor beta con energía promedio de 190 keV con un alcance en aire de unos 35 centímetros, para la energía máxima 606 keV el alcance en aire rebasa el metro.

Una técnica que se ha observado es segregadas en la misma sala de terapia. Se colocan las prendas en el piso y con un monitor de radiación se toma la lectura de rapidez de exposición. Prácticamente es necesario colocar prenda a prenda en piso para tomar la lectura, pues de lo que se trata es precisamente identificar las prendas que contengan mayor contaminación. El criterio usado es el siguiente: si la lectura en el monitor es menor que 1 mR/h a contacto la prenda es llevada al contenedor de ropa sucia normal para dirigirla a la lavandería. Si la lectura es mayor que 1mR/h entonces es colocada en el interior de una bolsa, a la cual una vez llena, se le toma un par de lecturas de rapidez de exposición y se le coloca una etiqueta con estos datos (entre otros) para llevarla al almacén de desechos. No fue posible rastrear el origen de este criterio de 1 mR/h. La técnica anterior tiene varias desventajas, la lectura tiene que ser tomada a contacto y agacharse en cuclillas; tomar 90 lecturas puede ser algo tedioso, tómesese en cuenta que es necesario tener encima el equipo de protección si se quiere evitar incorporar radioyodo o controlar la exposición; desde luego no se cuenta con una mesa para esta tarea ni se tiene el espacio para colocar una del tamaño para colocar un cobertor. Otra gran desventaja es que el piso puede quedar contaminado.

Una segunda técnica requiere a una persona que saca una prenda del contenedor donde los pacientes depositan la ropa sucia y la sostiene en la mano, mientras una segunda persona, con monitor en mano, toma la lectura de la rapidez de exposición a contacto. Nuevamente es aplicado el criterio de 1 mR/h. Se repite la operación para verificar todas las prendas. En ambas técnicas es importante mencionar que la sala de terapia podría estar ocupada por pacientes con I-131. La segregación de 90 prendas contaminadas puede tomar varios minutos en una zona en la que por definición, el POE no debe permanecer más del tiempo estrictamente necesario, y que el objetivo mismo de esta zona

en el sistema de egreso, basado únicamente en la actividad retenida, es mantener a un paciente alejado de las personas para *protegerlas de la exposición*.

Una tercera técnica para segregar la ropa contaminada consiste en tomar la ropa por pequeños grupos en vez de prenda por prenda; esta variante pretende reducir el tiempo que el personal ocupacionalmente expuesto tiene contacto con esta ropa contaminada y por lo tanto también el tiempo que permanece en la sala de terapia en la cercanía de los pacientes. Existe la suposición de que la atenuación de la radiación gamma por la misma ropa es despreciable para la energía de los fotones gamma del I-131, de modo que la tasa de exposición medida es prácticamente la misma si a la prenda y el monitor los separa aire o están separados por ropa.

Para evaluar la atenuación de la ropa se construyó una especie de "maniquí" que simula un pequeño bulto de ropa contaminada. Un Bulto de desecho radiactivo se considera como el producto final del acondicionamiento que comprende al desecho radiactivo, cualquier contenedor (es) y sus barreras internas, (p.e. material absorbente), preparado en concordancia con los requerimientos para el manejo, transporte y almacenamiento temporal y/o final. Este "maniquí" consiste en una bolsa de plástico llena de ropa limpia de la que usan los pacientes. Las dimensiones de este bulto son de unos 30x40x40 cm<sup>3</sup>. Se usaron dos fuentes de I-131 con distinta actividad, una con 23.31 MBq (0.63 mCi) y otra con 49.58 MBq (1.34 mCi). Se tomaron lecturas de rapidez de exposición a varias distancias de cada una de las fuentes en aire. Se tomó una segunda serie de lecturas para las mismas distancias pero ahora con la fuente dentro del "maniquí" de ropa.

### ***2.2.2 Estimación teórica retrospectiva de la dosis recibida por la persona al cuidado del paciente en una modalidad ambulatoria de terapia con I-131***

Se usaron los registros de las mediciones de rapidez de exposición de todos los pacientes a los que se les administró I-131 para tratamiento de cáncer diferenciado de tiroides desde enero del 2008 a marzo del 2009 en el INCan (266 registros). Lo anterior con el fin de estimar la dosis que podrían recibir las personas al cuidado del paciente en el contexto de los nuevos sistemas de egreso y comparar con el sistema de egreso actualmente usado en el país: el sistema que únicamente se basa en la actividad retenida por el paciente para decidir la protección radiológica de miembros del público.

En resumen, la metodología implementada durante el trabajo consistió en lo siguiente:

1. Determinación de contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131 por medio de la técnica de frotis
2. Estimación indirecta de la contaminación fija más la removible en la sala de hospitalización usando un monitor de radiación
3. Estimación teórica de la dosis que recibe el POE en cada paso específico que realiza durante la manipulación del I-131, hasta el momento de administrarlo al paciente
4. Construcción de un maniquí que simule un bulto con ropa y medición con un monitor de la rapidez de exposición al aire y dentro del maniquí a distintas distancias para dos fuentes de I-131
5. Estimación teórica de la dosis que podría recibir la persona más expuesta en la modalidad ambulatoria por medio de un análisis estadístico de las mediciones de rapidez de exposición realizadas en pacientes hospitalizados que fueron tratados con I-131 en el INCan

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo se presentan en dos partes. La primera parte comprende la protección radiológica antes y durante la administración del I-131 al paciente y atañe a una sola categoría de exposición: la exposición ocupacional. La segunda parte de los resultados comprende la protección radiológica después que el paciente ha ingerido el radioyodo, se ocupa de las tres categorías de exposición: ocupacional, miembros del público y exposición médica.

### 3.1 Resultados Primera Parte. La protección radiológica antes de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.

#### 3.1.1 Determinación de contaminación removible en los contenedores que almacenan el I-131. (Técnica de frotis)

En la tabla 3.1 se presentan los resultados de la contaminación removible medida en las unidosis de I-131 con la técnica de frotis.

**Tabla 3.1** Contaminación removible en unidosis de I-131. Resultados usando la técnica de frotis en una muestra de 8 contenedores pertenecientes a distintos lotes de pedidos realizados en 2 meses. El algoritmo de cálculo de incertidumbre usado se puede ver en la referencia [23].

Superficie	Contaminación removible (Bq/cm <sup>2</sup> )	Incertidumbre porcentual
Exterior del contenedor de plomo	0.3	18%
Exterior del frasco	25	3%
Interior del frasco	1,420	23%

Al comparar estos resultados con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana [19], se observa que rebasan el límite de contaminación superficial para I-131 ( $33 \times 10^{-3}$  Bq/cm<sup>2</sup>). Los frotis se realizaron inmediatamente después de sacar los contenedores de las cajas de transporte de la radiofarmacia, lo que implica que dicha contaminación tiene su origen en la radiofarmacia. Al final de esta sección se enlistan las medidas de protección sugeridas para el manejo de las fuentes de I-131 durante y antes de su administración a los pacientes con base en este resultado.

Como consecuencia de este análisis se solicitó al proveedor de I-131 (una radiofarmacia externa) un mejor control de la contaminación en los contenedores enviados. Actualmente los contenedores vienen recubiertos externa e internamente por plástico desechable.

#### 3.1.2 Determinación indirecta de contaminación fija y removible en la sala de hospitalización para pacientes que reciben terapia con I-131

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados promedio de 99 mediciones de la rapidez de exposición a contacto en la zona de aislamiento para los pacientes que reciben terapia con I-131, realizadas por un periodo de dos meses usando un diagrama de piso de hospitalización y marcando el lugar y la rapidez de exposición.

Los lugares con las mediciones más altas de rapidez de exposición son los lavabos, cestos de basura, coladeras y retretes. Las zonas o lugares con mayor frecuencia de contaminación se pueden apreciar en la Figura 3.1

**Tabla 3.2 Niveles de exposición promedio a contacto por región en la zona de aislamiento para pacientes.** El promedio de la rapidez de exposición para todas las medidas realizadas dentro del baño es 52 mR/h (Desviación estándar (DS) 106, min 0.4, máx. 500) y de todas las medidas para las dos salas ocupadas por los pacientes el promedio es 19 mR/h (DS 32, min 0.5, máx. 134).

Zona	Rapidez de exposición mR/h (Media estadística por región)
<b>Baño</b>	
Lavabo (coladera)	103.0
Cesto de basura junto al retrete	70.0
Coladera	65.7
Retrete	19.4
Llave del lavabo	4.7
Piso	3.8
Lavabo (medida a 1m de distancia)	1.0
Puerta (picaporte)	0.9
<b>Sala de hospitalización</b>	
Lavabo (coladera)	76.8
Almohada	12.5
Blindaje extra colocado bajo cama del paciente	10.0
Piso	7.7
Dispensador de papel	6.0
Silla	6.0
Buró	5.3
Cama	4.8
Mesa (paciente)	4.5
Lavabo llave	3.9

**Fig. 3.1 Distribución espacial de contaminación en la sala de hospitalización, generada a partir de los valores medidos de la rapidez de exposición durante el periodo de estudio.**



Las lecturas de rapidez de exposición más altas dentro del baño y su frecuencia de contaminación se deben al contacto con la orina del paciente, que es la principal vía de eliminación del I-131, y al contacto con otros fluidos excretados. Observamos que en el caso de las coladeras y los lavabos es muy probable que estén reteniendo I-131 en las



uniones de ensamble, debido principalmente al contacto continuo con I-131 que no permite el tiempo suficiente para diluir los residuos del radioyodo al drenaje.

Los resultados de contaminación fija y removible presentados en esta sección provienen de mediciones que se realizaron en un periodo de tiempo en el que prevalecían ciertas condiciones en la sala de aislamiento que deseamos mencionar. Primero, las salas contiguas a la sala de aislamiento se utilizaban para tratamientos de braquiterapia. Segundo, existía un periodo de transición entre un encargado de seguridad saliente y uno nuevo. Aunque estas condiciones no afectan las conclusiones de este trabajo, queremos mencionar que actualmente se han tomado varias medidas correctas de protección para controlar la contaminación, por mencionar algunas: Las mesas de los pacientes se plastifican, el encargado de seguridad creó un protocolo para medir la contaminación removible en la sala, antes de llevar el radioyodo a la sala de aislamiento se platica con el paciente con bastante detalle sobre su conducta para minimizar la contaminación en la sala durante su estancia.

### ***3.1.3 Estimación teórica de la dosis que recibe el POE en cada paso específico que realiza durante la manipulación del I-131 hasta el momento de administrarlo al paciente***

A continuación se enlistan los pasos necesarios para administrar la terapia dirigida a un paciente con cáncer diferenciado de tiroides:

#### **PREPARACIÓN PARA APLICAR LA TERAPIA**

- Confirmar la actividad de radioyodo (I-131) prescrita al paciente con el activímetro (Carpintec CRC-15 Beta)
- Transportar el material radioactivo al área de hospitalización
- Dar instrucciones a los pacientes (las fuentes están en la cercanía)
- Colocar los contenedores con el radiofármaco sobre la mesa de cada paciente

#### **APLICACIÓN DE LA TERAPIA**

- El paciente ingiere el radioyodo cuando el médico lo indica
- Se mide la rapidez de exposición de cada paciente a 1 metro de distancia. Se anota el resultado de la medición en el registro del paciente

### ***3.1.3.1 Estimación de la dosis recibida por confirmar la actividad de I-131 prescrita al paciente***

Como procedimiento rutinario del programa de control de calidad, se corrobora con un activímetro que la actividad del radioyodo reportada por la radiofarmacia en la etiqueta en el exterior del contenedor sea la prescrita por el médico. Una vez que se ha verificado la actividad se sella la tapa del contenedor de plomo con cinta adhesiva. Sobre la cinta que cubre la tapa, y no en el costado del contenedor, se anota la actividad medida y el nombre del paciente que la recibirá.

Los contenedores de plomo vienen de la radiofarmacia, y con múltiplos de 1,850 MBq (50mCi) o 3,700 MBq (100mCi) se conforma la actividad prescrita al paciente. El grosor del contenedor de plomo es de 2.5 cm y entre la pared interior del contenedor y la cápsula que contiene el radioyodo hay una distancia de 0.5 cm (la cápsula está dentro de un frasco de

vidrio). En esta estimación nos interesa conocer la dosis en un punto que se encuentra a una distancia de 43.5 cm del contenedor con I-131, suponiendo que sería un punto en la superficie del tórax de una persona que mantuviera en sus manos el contenedor de plomo. En el cálculo, el blindaje usado es de 3 cm de plomo, que corresponde a 2.5 cm de plomo del contenedor y 0.5 cm de plomo de la mampara de protección utilizada para realizar este procedimiento (ver Anexo 1 para detalles del algoritmo usado). El tiempo usado en el cálculo son 255 s, que es el tiempo promedio medido para este paso. El resultado se presenta en la Tabla 3.3

**Tabla 3.3** Estimación de la dosis recibida al verificar la actividad del radioyodo prescrita al paciente. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 verificaciones de actividad de I-131 por semana, 40 semanas al año.

Actividad (MBq)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
1,850	$1.7 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-2}$
3,700	$3.5 \times 10^{-4}$	$8.3 \times 10^{-2}$
<b>Suma</b>		$1.3 \times 10^{-1}$

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados si además se usa un mandil de plomo (0.05 cm)

**Tabla 3.4** Uso de un mandil en la estimación de la dosis al verificar la actividad de I-131 prescrita al paciente. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 verificaciones de actividad de I-131 por semana, 40 semanas al año.

Actividad (MBq)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
1,850	$1.6 \times 10^{-4}$	$3.9 \times 10^{-2}$
3,700	$3.3 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-2}$
<b>Suma</b>		$1.2 \times 10^{-1}$

### 3.1.3.2 Estimación de la dosis recibida por transportar el material radioactivo al área de hospitalización

Una vez que se ha verificado la actividad prescrita al paciente, el radioyodo es transportado a la sala de hospitalización para su administración a los pacientes. El transporte se realiza en una caja blindada de plomo con ruedas, empujada con una manija de aproximadamente un metro de largo. Por lo general se transportan cinco o más contenedores de plomo con un total de 16.7 GBq (450 mCi) en promedio de I-131. En esta estimación el blindaje consiste de 2.5 cm de plomo del contenedor más 1 cm de plomo de las paredes del carro de transporte. La distancia entre la fuente y la persona que lo transporta es 1.5 m, y el tiempo estimado para llevar el carro desde el cuarto caliente (planta baja) hasta la sala de hospitalización (en el tercer piso) es de 3 minutos en el mejor de los casos. El resultado del cálculo se presenta en la Tabla 3.5

**Tabla 3.5** En la estimación anual suponemos que se realizan 2 transportes de I-131 a la sala de hospitalización por semana, 40 semanas al año. ( $1.5 \times 10^{-4}$  mSv por episodio y  $1.2 \times 10^{-2}$  mSv anual para un tiempo de 10 minutos)

Actividad (MBq)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
16,700	$4.4 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-3}$

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados suponiendo el uso de un mandil de plomo (0.05 cm) durante el transporte del material radioactivo.

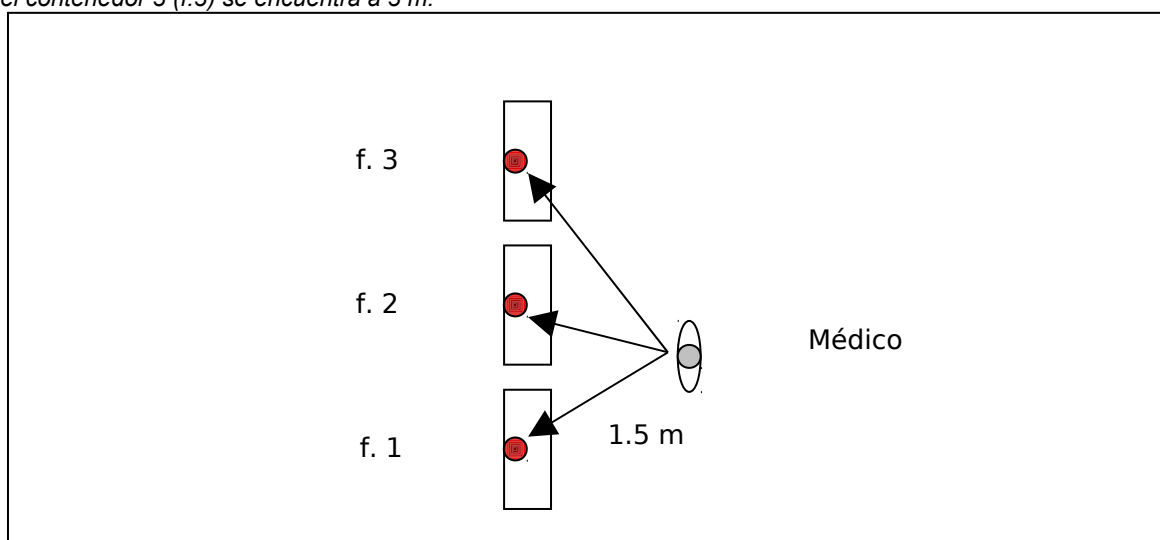
**Tabla 3.6** Uso de un mandil en la estimación de dosis por transportar el I-131 a la sala de hospitalización. En la estimación anual suponemos que se realizan 2 transportes de I-131 a la sala de hospitalización por semana, 40 semanas al año. ( $1.4 \times 10^{-4}$  mSv por episodio y  $1.1 \times 10^{-2}$  mSv anual para un tiempo de 10 minutos)

Actividad (MBq)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
16,700	$4.2 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-3}$

### 3.1.3.3 Estimación de la dosis recibida por exposición a 3 fuentes de I-131 dentro de sus contenedores de plomo mientras se dan instrucciones a los pacientes

El siguiente paso después de llevar los contenedores a la sala de hospitalización es colocar los contenedores de plomo sobre la mesa de cada paciente que recibirá la terapia con radioyodo y a continuación darle instrucciones sobre la forma como lo ingerirá y las medidas que deberá tomar en los días siguientes. Se estimó la dosis en un punto que se encuentra cercano a tres mesas de pacientes sobre las cuales se encuentran 5,550 MBq (150 mCi) de I-131 en cada una. El arreglo geométrico se muestra en la Figura 3.2. En este punto de cálculo se pretende simular el lugar donde el médico permanece de pie dando las instrucciones al paciente mientras los contenedores con I-131 permanecen sobre las mesas a su espalda. El grosor del blindaje del contenedor es de 2.5 cm. Suponemos que el médico da las instrucciones en aproximadamente 16 min. La Tabla 3.7 presenta el resultado.

**Fig. 3.2** Arreglo geométrico del cálculo. Los contenedores 1 y 2 (f.1 y f.2) se encuentran a 1.5 m del médico y el contenedor 3 (f.3) se encuentra a 3 m.



**Tabla 3.7** Estimación de la dosis por exposición a 3 fuentes de I-131 con 5,550 MBq (150 mCi) cada una dentro de sus contenedores mientras se da las explicaciones al paciente según el arreglo geométrico de la Figura 3.2. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq cada una, 40 semanas al año.

Contenedor	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
1	$3.1 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-2}$
2	$3.1 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-2}$
3	$7.7 \times 10^{-5}$	$6.2 \times 10^{-3}$
<b>suma</b>	<b><math>6.9 \times 10^{-4}</math></b>	<b><math>5.5 \times 10^{-2}</math></b>

En la Tabla 3.8 se muestra la dosis recibida al colocar cada uno de los contenedores sobre la mesa de los pacientes desde el carro de transporte, lo cual se realiza a mano, y en el cálculo suponemos que toma aproximadamente 10 s. El grosor del blindaje del contenedor de plomo es de 2.5 cm. Si en este procedimiento se usa un mandil de plomo (0.05 cm) los resultados se muestran en la Tabla 3.9.

Los contenedores traen en una cinta adhesiva los datos del paciente en su tapa superior, esta cinta es colocada durante el paso de verificación de la actividad, gracias a esta cinta los datos son visibles cuando los contenedores están dentro del carro de transporte. Si no se marcaran los datos del paciente sobre la cinta adhesiva, tendríamos que buscar los datos del paciente en la etiqueta de la radiofarmacia en el costado del contenedor, aumentando el tiempo de exposición para realizar una búsqueda contenedor por contenedor. En nuestro cálculo este tiempo se estableció como 20 s por contenedor.

**Tabla 3.8** Estimación de la dosis recibida por colocar los contenedores con I-131 sobre las mesas de los pacientes. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año.

Tiempo (s)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
10	$3.7 \times 10^{-5}$	$8.9 \times 10^{-3}$
20	$7.4 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-2}$

**Tabla 3.9** Uso de un mandil en la estimación de la dosis recibida por colocar los contenedores con I-131 sobre las mesas de los pacientes. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año.

Tiempo (s)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
20	$7.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-2}$

### 3.1.3.4 Estimación de la dosis recibida en un punto cercano al paciente mientras ingiere el radioyodo

Cuando el médico ha dado las instrucciones al paciente, el paciente saca el frasco del contenedor de plomo, lo destapa e ingiere la cápsula con I-131 con ayuda de un vaso con agua. En esta estimación se pretende conocer el cambio de la dosis en un punto en función de la distancia que se guarda con el paciente durante la ingestión del radioyodo. El tiempo estimado para destapar el frasco, colocar la cápsula en la boca y tomar el agua es de 10 a 30 segundos. No hay blindaje y se supone una actividad prescrita de 5,550 MBq (150 mCi) por paciente. El resultado para distintas distancias entre el paciente y el punto de cálculo se muestra en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10** Estimación de la dosis recibida en un punto a distintas distancias del paciente mientras ingiere el radioyodo en un tiempo estimado de 10 segundos. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año.

Distancia (m)	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
1	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-1}$
2	$5.9 \times 10^{-4}$	$4.7 \times 10^{-2}$
3	$2.8 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-2}$
3.5	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-2}$

### 3.1.3.5 Estimación de la dosis recibida por medir la rapidez de exposición de cada paciente a 1 metro de distancia.

El último paso en el procedimiento para administrar el I-131 a un paciente es medir, con un monitor de radiación, la rapidez de exposición a 1 metro de distancia a la altura de su abdomen inmediatamente después de haber ingerido el radioyodo. Este paso es necesario porque su egreso del hospital depende de esta medida con base a lo establecido en la normatividad mexicana [11] (sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida). En este paso el personal encargado de la administración permanece algunos segundos frente al paciente para tomar esta medida a una distancia aproximada de 1.40 metros; 1 metro de separación entre el detector y el paciente, y 40 centímetros entre el detector y el cuerpo de la persona que realiza la medición. En la Tabla 3.11 se presentan los resultados de estimar la dosis a un punto a 1.40 metros de distancia del paciente durante la medición de la rapidez de exposición, se estima un tiempo promedio de 53 segundos por cada paciente. En la Tabla 3.12 se presenta el resultado si se usa una mampara con 2.7 cm de plomo.

**Tabla 3.11** Estimación de la dosis recibida por medir la rapidez de exposición producida por un paciente que ingiere I-131. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año. (dosis anual para un tiempo de 10 segundos:  $1.1 \times 10^{-1}$ )

Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
$2.5 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-1}$

Se observa que si se usa la mampara sólo se recibe el 0.6% de la dosis que se recibiría si no se usa. Si además se porta un mandil plomado (0.05 cm) los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.12** Uso de una mampara con un blindaje de 2.7 cm de plomo durante la medición de la rapidez de exposición producida por un paciente que ingiere I-131. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq cada una, 40 semanas al año. (dosis anual para un tiempo de 10 segundos:  $7.0 \times 10^{-4}$ )

Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual con mampara (mSv)
$1.5 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-3}$

**Tabla 3.13** Uso de un mandil y una mampara con un blindaje de 2.7 cm de plomo durante la medición de la rapidez de exposición producida por un paciente que ingiere I-131. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año. (dosis anual para un tiempo de 10 segundos:  $6.6 \times 10^{-4}$ )

Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
$1.5 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-3}$

Además del tiempo necesario para realizar la medida de la rapidez de exposición a 1 metro del paciente, podríamos suponer una situación hipotética donde el personal ocupacionalmente expuesto pasa un tiempo mayor en la cercanía de los pacientes que han ingerido el radioyodo para realizar otros pasos menores complementarios en la administración de la terapia, por ejemplo, dar instrucciones a los pacientes para tomar las mediciones, trasladarlos para realizar la medición, registrar los datos en su expediente que se encuentra al pie de su cama, recoger material, etc. En la Tabla 3.14 se muestra el resultado de la dosis en un punto, a una distancia de 2.5 metros de tres pacientes en la sala de hospitalización a los que se les ha prescrito una actividad de 5,550 MBq (150 mCi) y suponiendo 5 minutos de tiempo para realizar las actividades extras.

**Tabla 3.14** Estimación de la dosis recibida por permanecer 5 minutos en la cercanía de tres pacientes (2.5 m) que han recibido terapia con I-131 para realizar pasos menores complementarios no calculados en este trabajo. La mampara tiene un blindaje de 2.7 cm de plomo. En la estimación anual suponemos que se realizan 6 aplicaciones de I-131 por semana de 5,550 MBq (150 mCi) cada una, 40 semanas al año.

Blindaje de protección	Dosis por episodio (mSv)	Dosis Anual (mSv)
Ninguno	$3.4 \times 10^{-3}$	$9.3 \times 10^{-1}$
Uso de un mandil	$4.3 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-1}$
Uso de una mampara	$2.4 \times 10^{-5}$	$5.7 \times 10^{-3}$
Uso de un mandil y mampara	$2.2 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-3}$

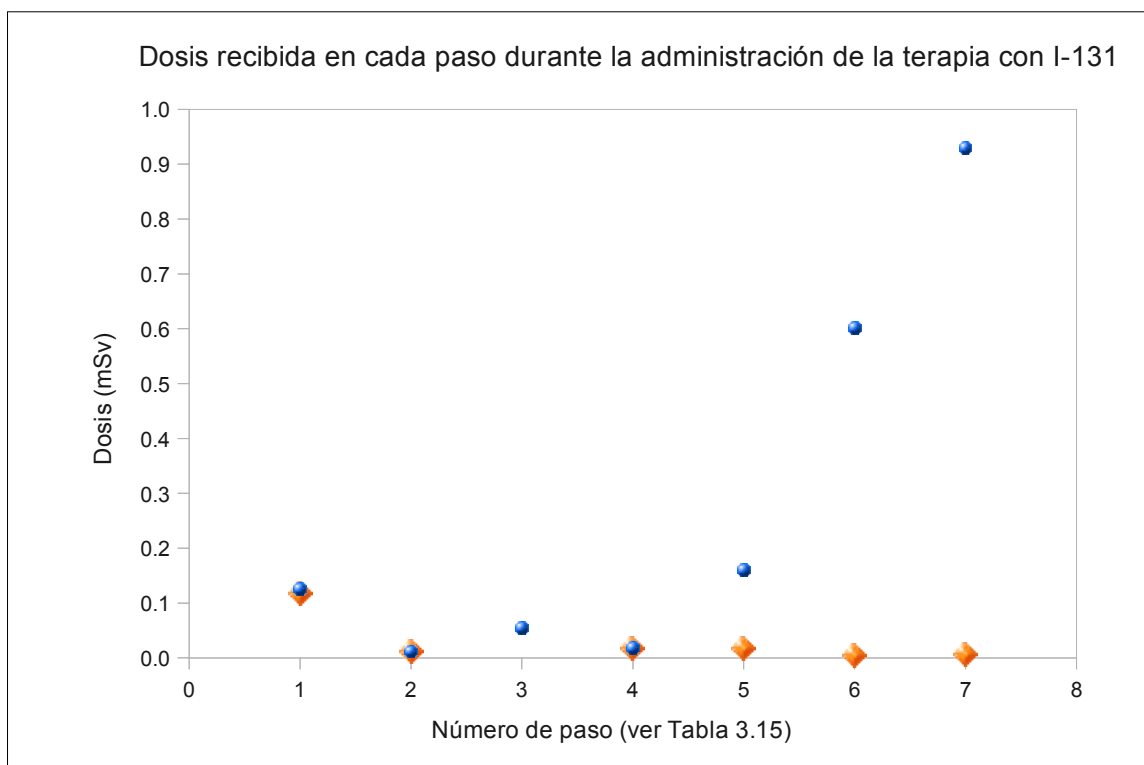
En resumen, el cálculo de la dosis recibida por la manipulación de las fuentes de I-131 durante la administración de la terapia dirigida a un paciente con cáncer diferenciado de tiroides se enlista en la Tabla 3.15. En este resumen los cálculos se han agrupado en dos esquemas, A y B. El esquema A resume los cálculos sin blindaje y es un escenario que subestima las medidas de protección. El B resume los cálculos realizados con blindaje y es un escenario donde las medidas de protección no son subestimadas. La gráfica 3.1 compara los resultados de ambos esquemas de protección.

**Tabla 3.15** Resumen de la dosis recibida por la manipulación del radioyodo durante la administración de la terapia con I-131 si una sola persona realizara todo el procedimiento. El Esquema A obedece a un procedimiento de administración sin el uso de blindajes de protección (Ver los detalles del cálculo en las secciones anteriores) y subestima las medidas porque no se rebasa el límite dosis anual recomendado por la ICRP. El esquema B se basa en el uso de blindaje y optimización de la protección (Actualmente implementado en el INCan). Si se toma como tiempo de transporte del material 3 minutos y 10 segundos para la lectura de rapidez de exposición a 1m del paciente la dosis anual total sería de 1.4 mSv en el esquema A y 0.2 mSv en el esquema B.

Paso específico	Dosis Anual (mSv) Esquema A	Dosis Anual (mSv) Esquema B	Tabla
1. Verificar actividad	$1.3 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^{-1}$	3.3 y 3.4
2. Transporte del material (10 min)	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	3.5 y 3.6
3. Instrucciones a los pacientes con los contenedores sobre la mesa	$5.5 \times 10^{-2}$	-	3.7
4. Colocar contenedor (20 s)	$1.8 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$	3.8 y 3.9
5. Permanecer a 1 m durante la ingesta	$1.6 \times 10^{-1}$	-	3.10
5. Permanecer a 3.5 m durante la ingesta	-	$1.7 \times 10^{-2}$	3.10
6. Medir rapidez de exposición a 1m del Paciente (53 s)	$6.0 \times 10^{-1}$	-	3.11
6. Medir rapidez de exposición a 1m del paciente. Uso de mandil y mampara (53 s)	-	$3.5 \times 10^{-3}$	3.13
7. Permanencia en la sala de hospitalización para realizar pasos complementarios	$9.3 \times 10^{-1}$	$5.4 \times 10^{-3}$	3.14
<b>Dosis Anual Total (mSv)</b>	<b>1.9</b>	<b>0.2</b>	

Las medidas de protección, por minúsculo que parezca su efecto en un episodio, llevan a una considerable disminución en la dosis anual, resultado por el apropiado uso de los tres factores de protección: tiempo, distancia y blindaje. El esquema B de protección es el que se ha implementado actualmente en el INCan durante el proceso de administración de I-131 a los pacientes con cáncer diferenciado de tiroides.

**Gráfica 3.1** Comparación gráfica de ambos esquemas de cálculo anual.



Con base en los resultados encontrados en este trabajo en las secciones 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3, unido a las recomendaciones internacionales vigentes en materia de protección radiológica y la experiencia de la aplicación terapéutica de la terapia dirigida con I-131 en el INCan, proponemos y justificamos las siguientes medidas de protección necesarias durante el proceso de administración terapéutica de I-131 para pacientes con cáncer diferenciado de tiroides. Actualmente en el INCan todas estas medidas de protección se han implementado.

#### DURANTE LA PREPARACIÓN PARA APLICAR LA TERAPIA

a) Actualmente la radiofarmacia envía el I-131 con una pequeña etiqueta impresa con los datos de la actividad contenida y del paciente sobre el costado del contenedor. Una vez que se ha verificado la actividad se sella la tapa del contenedor de plomo con cinta adhesiva, sobre ella, en la parte superior del contenedor y no en el costado, se anota la actividad medida y el nombre del paciente con el fin de visualizar tanto actividad como nombre desde una distancia mayor a 1 metro; esto permite ver los datos a una mayor distancia sin tener que tocar el contenedor. Además, el carro de transporte no permite ver los costados de los contenedores, pero sí son visibles las tapas, de otro modo se tendrían que buscar los datos nuevamente en la sala de hospitalización para asignar a cada paciente sus respectivos contenedores (en el cuarto caliente se cuenta con una mampara con vidrio plomado, en el piso de hospitalización no), manipulando por más tiempo en las manos el contenedor (ver Tabla 3.8), además habría que encontrarlo entre otros cuatro contenedores que en promedio se llevan a la zona de hospitalización y cuyo peso es de 5 kg.

b) Sobre los guantes. Se deben usar dos pares de guantes porque el personal podría contaminar uno de los pares de guantes al manipular los contenedores o frascos con radioyodo, que de acuerdo al resultado presentado en la tabla 3.1 no están exentos de traer contaminación removible en su superficie, en caso de detectar contaminación en este par de guantes, se deberá retirar y desecharlo para no trasladar la contaminación a otros lugares con estos guantes contaminados, por ejemplo al monitor, bolígrafos, mobiliario, etc. Además, en la experiencia incluso se ha rasgado el guante al manipular los

contenedores o el carro de transporte (varios kilos de plomo) que observamos no tiene un diseño óptimo para transportar material radioactivo.

c) Al momento de colocar la cinta adhesiva sobre el contenedor se recomienda dejar una pestaña en la cinta para minimizar el tiempo de contacto del contenedor con las manos. Sin la pestaña hay que despegar la cinta, con guantes es más difícil, y generalmente la cinta se adherirá a los guantes e incluso podría rasgarlos.

d) Cuando el radioyodo está en forma líquida, es necesario hacer preparativos especiales para evitar exponer innecesariamente al POE (principalmente enfermeras y personal de limpieza) que tiene que ingresar a las salas de hospitalización. En esta situación, se necesita de un popote para que el paciente sorba el radioyodo del frasco. Además se requerirá de una jeringa que permita introducir agua dentro del frasco varias veces. Este último procedimiento es necesario porque una vez que el paciente sorbe todo el contenido del frasco, puede permanecer adherida a sus paredes una cantidad de I-131 que ya no tendrá ningún uso útil. Recuérdese que 1 Curie de I-131 (sin diluir) tiene una masa de 8 microgramos, cantidad que puede fácilmente quedar adherida a cualquier superficie, siendo ésta la razón de su dilución [14]. Sobre este punto la IAEA hace la misma recomendación [21]. Se recomienda el uso de cápsula en lugar de solución líquida para administrar el I-131 (Si se usa cápsula, se debe tener cuidado que no se adhiera a las paredes del frasco). El UNSCEAR reporta que la dosis a manos y dedos pueden alcanzar el límite anual de 500 mSv, recomendando tomar precauciones adecuadas para el personal que maneja directamente el material radioactivo, ya que la mayoría del personal de medicina nuclear que no maneja directamente el material radioactivo reciben muy bajas dosis [2].

e) Debe existir la confirmación de que los pacientes ya están listos para recibir el radioyodo. Si se transporta el material radioactivo a la sala de hospitalización y los pacientes aún no han sido hospitalizados, o no han sido preparados por el personal de enfermería, este transporte de material radioactivo por los pasillos del hospital es exposición externa innecesaria para miembros del público, miembros del POE e incluso pacientes. Si se regresa el material al cuarto caliente implica transportar el material en dos ocasiones para administrarlo.

f) El POE encargado de administrar el radioyodo puede contaminarse durante la administración del I-131 en el área de hospitalización. Una vez terminado el proceso de administración de I-131 se debe realizar una exploración con el monitor antes de salir de la zona controlada para verificar que no se haya contaminado el POE, generalmente se verifican manos, zapatos, ropa, etc. como lo recomienda la normatividad mexicana [19]. Si se encuentra contaminación alguna no será tan fácil conocer su procedencia (que es de interés en materia de protección radiológica) si el personal no verificó la existencia de contaminación antes de administrar los radiofármacos. La contaminación pudiera proceder de otro departamento de medicina nuclear donde también labora dicho POE. Recomendamos realizar la exploración antes y después de administrar el I-131.

g) Los contenedores y el carro de transporte podrían presentar contaminación removible (Ver Tabla 3.1) por lo que es necesario, además de usar guantes, que sólo una persona manipule el material radioactivo y otra se encargue del uso de objetos como plumas, cinta adhesiva, expedientes clínicos, el monitor, etc. El resto del personal involucrado en la administración deberá protegerse antes de entrar a la zona controlada colocando cubrezapatos, cubreboca, dos pares de guantes, mandil de plomo y bata quirúrgica en acuerdo a lo establecido en la normativa mexicana [19] para el nivel de contaminación medido (Ver Tabla 3.1 y Tabla 3.2). La persona designada para manipular el material radioactivo deberá tomar las medidas de protección antes de transportar el material radioactivo.



Una zona gris justo en la entrada de la zona controlada es lo adecuado para los preparativos de protección del POE. Además se sugiere que en esta zona gris permanezca un depósito blindado para colocar desechos contaminados, como los cubrezapatos. Si no se cuenta con esta zona gris se recomienda regresar sin cubrezapatos a las salas de hospitalización para depositarlos dentro de las bolsas para desechos radiactivos.

h) Las zonas con mayor contaminación en la sala de hospitalización se encuentran dentro del baño en los lavabos, seguido de coladeras, cestos y retretes. Se debe tener especial cuidado cuando se esté dentro del baño. Sugerimos usar las medidas y equipo mencionado en el inciso (g). Las instrucciones a los pacientes sobre su conducta durante su estancia en el hospital juegan un papel importante en el control de esta contaminación. Las medidas más efectivas en el control de la contaminación han resultado ser las que se toman antes y no después de ocurrida la contaminación. Una modalidad de terapia ambulatoria disminuye la concentración de I-131 en un único lugar y de manera crónica.

i) Sobre los cubrezapatos. Debido a que el cubrezapato normal no es impermeable se podría contaminar el zapato, por lo tanto se recomienda usar un tipo de cubrezapato impermeable o colocar bolsas de plástico entre el zapato y el cubrezapato

j) Sobre el uso de la bata quirúrgica. Es necesaria para no contaminar el mandil de plomo. Ocurre en ocasiones que es necesario retirar líquidos del piso (vómito, orina, etc.) y es necesario adoptar una posición con las rodillas flexionadas para acercarse al piso; en este momento se corre el riesgo de contaminar el mandil por el contacto con el piso. Un kit de descontaminación que cuente con utensilios de limpieza exclusivos para contaminación (como se recomienda en los manuales de medicina nuclear) podría disminuir este riesgo. El uso de la bata quirúrgica evita también la contaminación de la bata clínica normal. La normativa mexicana establece su uso para el nivel de contaminación de la zona controlada [19] al igual que la IAEA [21].

k) Sobre el uso de los mandiles de plomo disponibles. Aunque el mandil de plomo no provee suficiente protección para fotones de la energía del I-131 (0.05 cm plomo), puede proveer un factor de atenuación de 20 o más para bajas energías de la radiación dispersa y bremsstrahlung [22] (Ver las secciones 3.1.3.1, 3.1.3.2, 3.1.3.4 y 3.1.3.5).

l) Sobre la concentración de yodo radioactivo en el aire. El yodo a temperatura ambiente se volatiliza. No fue posible realizar mediciones de concentración en aire en la sala de hospitalización porque no se cuenta con el equipo para realizarlas, sin embargo, se observó que las habitaciones de hospitalización no cuentan con suficiente ventilación y los pacientes por lo regular cierran las pequeñas ventanas que existen. El documento de la ICRP, publicación 94 [10], reporta medidas de concentraciones de yodo radioactivo en aire (0.08 – 0.44 Bq/l) en condiciones de más de 100 cambios de aire al día. En la terapia con radioyodo, el mismo documento reporta hasta el 0.1% del I-131 administrado liberado en el aire del cuarto de terapia y la actividad exhalada a través de la respiración en un rango de 20 a 190 Bq/l dos días después del tratamiento. En otro trabajo de investigación realizado en el hospital [20] se reportó un valor estimado de 6,388 Bq (promedio) de I-131 inhalado en 5 miembros del POE en un departamento de medicina nuclear. El cubreboca sencillo es la mínima protección que debe usarse mientras se desconozca la concentración de yodo en el aire. La eficiencia del cubreboca para evitar la incorporación del yodo volatilizado se desconoce también. La normativa mexicana recomienda su uso para el caso de la sala de hospitalización usando un criterio indirecto [19].

m) Sobre el manejo del carro de transporte en la sala de hospitalización. El material radioactivo, una vez ingresado a la zona de hospitalización (zona controlada), se debe colocar lo más alejado posible del pasillo de mayor tránsito y de las personas. La explicación del médico y la preparación de los pacientes puede tomar algunos minutos, por

ello es preferible mantener el material radioactivo lo más alejado del POE y dentro del blindaje del carro de transporte (Ver Tabla 3.7).

n) Sobre las instrucciones al paciente. Es necesario explicar el procedimiento para ingerir el radioyodo a los pacientes. Esta pequeña planeación puede minimizar el tiempo de administración de los radiofármacos y evitar contaminaciones innecesarias. Una de las principales indicaciones se refiere a no ingerir el radiofármaco hasta el momento en que el médico lo indique, de este modo se vigila, uno por uno, la administración correcta por parte del paciente. Se recomienda dar instrucciones sobre los desechos que el paciente genera, platicar con el paciente ha resultado una medida efectiva en el control de la contaminación, por ejemplo pedirle que procure dejar el mínimo de restos de alimento y algunas recomendaciones básicas para presegregar los desechos radioactivos que genere. Las bebidas como el refresco es más conveniente dispersarlas por medio del drenaje en vez de mezclarlas con la basura. La dieta del paciente debe evitar alimentos que no se pueden ingerir completamente como frutas con cáscara (preferir fruta picada) o aquellos que son difíciles de manejar si el paciente decide no terminarlos de comer como las sopas. Las recomendaciones al paciente sobre la dieta reducen los desechos radioactivos que se generan en la zona de hospitalización. Los alimentos contaminados son en particular difíciles de manejar y en un hospital que atiende a 6 pacientes por semana se trata de varios kilos de alimentos. Estas recomendaciones al paciente sobre los desechos que genera también aplican a su comportamiento fuera del hospital [10], [21].

#### DURANTE LA APLICACIÓN DE LA TERAPIA

ñ) Sobre el momento en que el paciente ingiere el radioyodo y sobre la medición de la rapidez de exposición a 1 metro del paciente. El personal encargado de la administración deberá permanecer lo más alejado posible del paciente en el momento que ingiere el radioyodo. Se observó que existe una costumbre generalizada de subestimar la distancia al igual que el blindaje y el tiempo (factores de protección radiológica). Se debe enfatizar este punto en el POE que realiza por primera vez la administración del radioyodo para evitar que con el tiempo se propaguen hábitos inapropiados de protección radiológica. El paciente es la principal fuente de exposición para el POE. Uno de los factores que más contribuyen a la dosis total de un POE en un departamento de medicina nuclear es la dosis recibida mientras se asiste al paciente (Ver Tabla 3.14)

o) Sobre el uso de una mampara. En las salas de hospitalización existen dos mamparas de plomo. Si se colocan entre el paciente y el POE permiten atenuar la radiación mientras se supervisa la administración del radioyodo (Ver tablas 3.11, 3.12, y 3.14) y durante las mediciones de tasa de exposición a 1 metro de distancia del paciente [21].

p) Sobre el manejo de desechos radioactivos durante la administración. Una bolsa de desechos en la entrada de la habitación es útil para colocar desechos contaminados durante la administración del material radioactivo tal como lo recomienda la IAEA [21]. El papel usado sobre la mesa para colocar el contenedor, los guantes usados, jeringas, etc. se deben colocar dentro de esta bolsa.

En resumen, las recomendaciones de protección durante el procedimiento para administrar la terapia dirigida con I-131 en el INCAN, tomando en cuenta los resultados de este estudio en las secciones 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 y la discusión de anterior, se enlistan en la tabla 3.16.

**Tabla 3.16** Resumen de las medidas de protección para administrar la terapia con I-131 tomando en cuenta los resultados 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3

---

### **PREPARACIÓN PARA APLICAR LA TERAPIA**

- En la tapa del contenedor, marcar con letra grande sobre cinta adhesiva el nombre del paciente y la actividad dentro del contenedor. Dejar una pestaña en un extremo de la cinta para abrir con facilidad el contenedor
- Marcar sobre la etiqueta si el radionúclido será administrado a través de una cápsula o solución líquida
- Verificar que los pacientes se encuentren hospitalizados y preparados antes de transportar el material radioactivo
- Verificar si existe contaminación en manos y zapatos del POE antes de administrar el radioyodo
- Designar la persona que manipulará el material radioactivo y la persona encargada de manejar los objetos libres de contaminación
- Antes de entrar a la zona controlada colocar cubrezapatos, cubreboca, guantes dobles, mandil de plomo y bata quirúrgica. (la persona designada para manipular el material radioactivo deberá tomar las medidas de protección antes de transportar el material radioactivo)
- Mantener el material radioactivo lo más alejado posible de las personas dentro de la zona controlada de hospitalización mientras se preparan a los pacientes y se les da instrucciones

*Antes de colocar los contenedores con radioyodo en la mesa de cada paciente:*

- Medir el fondo de radiación en la zona controlada con el monitor (rapidez de exposición)
- Colocar una bolsa para desechos en la entrada de la sala de hospitalización de los pacientes. Lo realiza la persona que no manipula el material radioactivo
- Verificar que cada paciente cuente con un vaso con agua para ingerir el radioyodo
- El lugar donde se coloca el vaso con agua y se deposita el contenedor debe estar cubierto con papel
- Dar explicación e instrucciones en forma oral y escrita a los pacientes.
- Colocar guantes a los pacientes (lo realiza la persona que no manipula el material radioactivo)
- Colocar la mampara de plomo entre el paciente y el POE en la entrada de la sala de hospitalización, a un lado de la puerta
- Colocar los contenedores con el radioyodo sobre la mesa de cada paciente. Se debe tener cuidado en identificar apropiadamente a cada paciente y sus respectivos contenedores con el I-131

---

## APLICACIÓN DE LA TERAPIA

*Después de colocar los contenedores con radioyodo en la mesa de cada paciente:*

- El personal ocupacionalmente expuesto debe estar lo más alejado posible del paciente durante la administración del radioyodo
  - La persona designada para manipular el material radioactivo destapa el contenedor (o los contenedores, si la actividad prescrita viene en más de un contenedor) para el primer paciente que ingerirá el I-131
  - Cuando el médico lo indique, el paciente se acercará al contenedor y realizará los siguientes pasos, explicados con antelación al paciente (radioyodo en cápsula)
    - Extraer del contenedor el frasco con el radioyodo por medio del hilo que sujeta al frasco
    - Destapar el frasco y verter la cápsula dentro de su boca (sin tocarla)
    - Beber toda el agua contenida en el vaso (Si la actividad prescrita está contenida en una sola cápsula)
    - Tapar el frasco y colocarlo dentro del contenedor de plomo
    - Repetir los últimos 4 puntos si la actividad está repartida en más de una cápsula (en este caso, el agua en el vaso debe repartirla entre el número de cápsulas que ingerirá)
    - Retirarse a su cama o alejarse la mayor distancia posible del POE
  - El punto anterior se repite para cada uno de los pacientes
  - Se retiran los guantes de las manos del paciente y se depositan en la bolsa de desechos colocada en la entrada de la habitación
  - La persona designada para manipular el material radioactivo, retirará los contenedores de las mesas para guardarlos en el carro de transporte. El papel y los vasos usados durante la administración se colocarán en la bolsa de desechos (verificar si se ha derramado líquido en piso o mesa)
  - Se medirá la rapidez de exposición de cada paciente a 1 metro de distancia a la altura del abdomen. Se anotará el resultado de la medición en el registro del paciente. La medición debe realizarse haciendo uso de la mampara de plomo (se les pide a todos los pacientes en la sala que se alejen la mayor distancia posible de la mampara y luego uno por uno se coloca frente a la mampara para realizar una lectura de la tasa de exposición)
  - En la zona gris (real o declarada como zona gris) el POE retirará los cubrezapatos y el primer par de guantes, se determinará con el monitor si presentan contaminación para su adecuada segregación
  - Medir la rapidez exposición en manos y zapatos del POE que administró el radioyodo
-

### 3.2 Resultados Segunda Parte. La protección radiológica después de la administración de la terapia con I-131 a un paciente.

#### 3.2.1 Análisis de los criterios de segregación de los desechos radioactivos generados en la sala de hospitalización. Determinar si es despreciable la atenuación de la radiación en un bulto de desechos con ropa contaminada

En la Tabla 3.17 podemos ver los resultados de las lecturas de la rapidez de exposición a distintas distancias para el maniquí y para las fuentes desnudas.

**Tabla 3.17** Rapidez de exposición para dos casos: una fuente puntual sin atenuación y atenuada con ropa de algodón (dentro del maniquí)

distancia (m)	Fuente sin atenuación		Fuente dentro del bulto de ropa	
	23.31 MBq (0.63 mCi)	49.58 MBq (1.34 mCi)	23.31 MBq (0.63 mCi)	49.58 MBq (1.34 mCi)
	rapidez de exposición (mR/h)		rapidez de exposición (mR/h)	
0	600 (over-range)	600 (over-range)	1.20	1.40
0.1	17.00	28.00	0.80	0.81
0.5	0.90	1.60	0.24	0.43
1.0	0.12	0.20	0.10	0.25
1.5	0.08	0.12	0.05	0.17

Los resultados muestran que no es despreciable la atenuación. Observando el caso para una distancia de 0.1 metros, la distancia aproximada para realizar una operación de rastreo de contaminación, los datos de la tabla muestran que prácticamente no es posible diferenciar entre 23.31 MBq (0.63 mCi) y 49.58 MBq (1.34 mCi) de I-131 si estamos examinando un pequeño bulto de ropa, y de acuerdo al criterio de segregación de: “menor que 1 mR/h a la lavandería, mayor que 1 mR/h al almacén de desechos”; ambos bultos serían enviados a la lavandería con la ropa normal.

Este resultado pone en entredicho la tercera técnica de segregación, lo que regresa el problema al POE de medir prenda por prenda. Para tener una estimación gruesa de cuanto I-131 podríamos tener en las prendas contaminadas, se sumergieron algunas de las batas de los pacientes de hospitalización en un recipiente con agua, posteriormente se tomó una alícuota del agua para conocer cuanto radioyodo *al menos* se podría encontrar en una bata contaminada. Usando el contador de pozo encontramos 1.3 MBq (0.04 mCi) y 577 kBq (0.02 mCi), en dos batas cuya lectura de rapidez de exposición a contacto era de 14 y 4 mR/h. La contaminación en una bata desde luego no está uniformemente distribuida en su superficie y cambia de bata a bata, la Tabla 3.18 muestra los resultados de medir la rapidez de exposición de 53 prendas.

**Tabla 3.18** Estadística descriptiva de la una muestra de 53 prendas monitorizadas para su segregación en el piso de hospitalización. Los valores están dados en  $\mu$ R/h.

N. total	promedio	Desviación Estándar	suma	media geométrica	moda	mín.	máx.	mediana
53	615	906	32,570	320	220	120	4,920	320

Usando la moda estadística de 220  $\mu$ R/h notemos que es 18 veces menor que los 4mR/h asociados al valor de 577 kBq medidos con el contador de pozo de la alícuota de agua donde se sumergió la bata. Supongamos entonces para una prenda con una rapidez de

exposición de 220  $\mu\text{R/h}$  tuviéramos 32 kBq (577 kBq dividido entre 18), en 90 prendas sumaría 2,880 kBq a la semana, y 149,760 kBq anualmente manejados por el personal, 416,520 kBq si usamos el promedio de 615  $\mu\text{R/h}$  por prenda. En la muestra anterior sólo 7 prendas se guardaron en el almacén de desechos (54,148 kBq de 416,520 kBq de acuerdo a nuestra estimación anterior), el resto se fue a la lavandería con la ropa normal de acuerdo con el criterio de segregación antes descrito.

No se describirá lo relacionado a los desechos generados por residuos de comida del paciente pero las técnicas de segregación no difieren mucho de lo descrito para la segregación de la ropa. Se mencionará que actualmente el Encargado de Seguridad Radiológica ha solicitado la preparación de un menú especial para pacientes tratados con I-131, que minimice la cantidad de desechos de alimentos contaminados, por ejemplo prefiriendo fruta picada a las frutas con cáscara, evitando las sopas, etc.

### 3.2.2 Estimación teórica retrospectiva de la dosis recibida por la persona al cuidado del paciente en una modalidad ambulatoria de terapia con I-131

Se utilizaron 266 registros de la rapidez de exposición procedentes de 85 pacientes de sexo femenino hospitalizados entre enero del 2008 y marzo del 2009 para recibir 5,550 MBq (150 mCi) de I-131 con el fin de estimar la dosis que recibiría una persona a 1 metro del paciente en un tiempo  $t$  dado.

Los registros contienen la rapidez de exposición medida a 1 metro del paciente cada uno de los días que el paciente permaneció en el hospital. La primera lectura se realiza justo después de que el paciente ha ingerido el radioyodo, y a partir de ese momento se realiza una lectura aproximadamente cada 24 horas hasta que la rapidez de exposición sea menor que el valor estipulado en la norma mexicana para egreso de este tipo de pacientes [11].

Se agruparon los datos por día de la medición. En la Tabla 3.19 se muestran los valores promedio de rapidez de exposición. En la Gráfica 3.3 se muestra la relación entre los datos de la Tabla 3.19 y el resultado de un ajuste exponencial.

**Tabla 3.19** Rapidez de exposición medida a 1 metro en pacientes de sexo femenino que recibieron terapia con 5,550 MBq (150 mCi) de I-131.

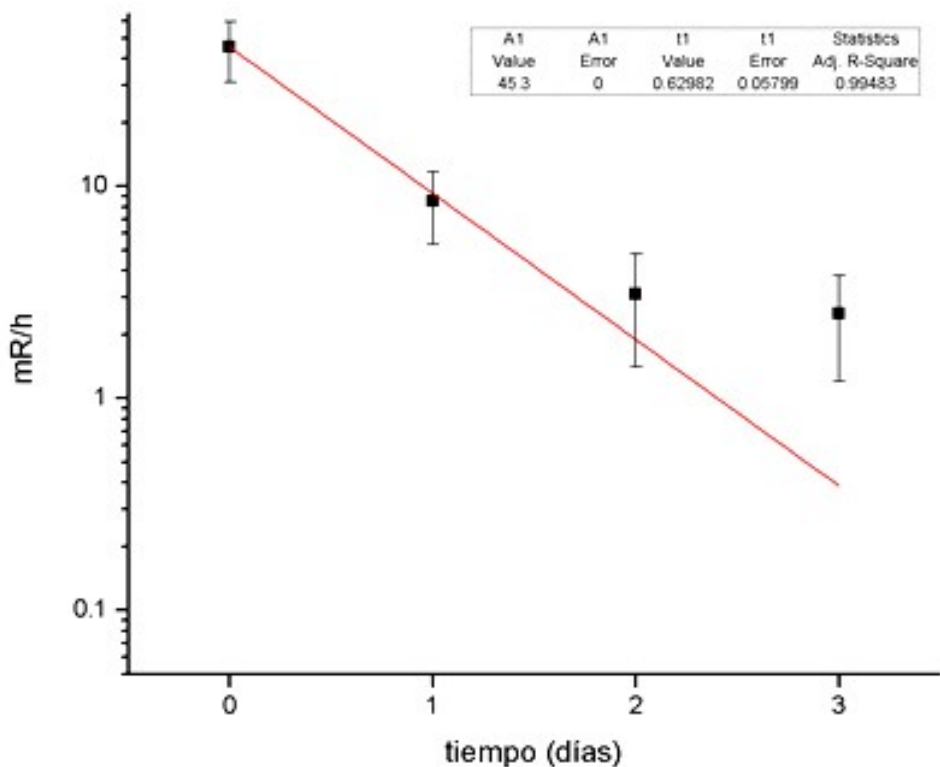
Días	Rapidez de exposición (mR/h)	DS
0	45.3	14.4
1	8.5	3.2
2	3.1	1.7
3	2.5	1.3

La rapidez de dosis promedio para estos datos decae de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{dD(t)}{dt} = A_1 e^{-\frac{t}{p}} \quad \text{a 1 metro de distancia} \quad (5)$$

Donde  $D(t)$  es la tasa de dosis  $t$  días después del día de la administración de radioyodo,  $A_1 = 45.2$  mR/h y  $p = 0.63$  d (La relación entre dosis y exposición para fotones se discute en el Capítulo I).

**Gráfica 3.3** Rapidez de exposición promedio vs. Tiempo (días) para 266 mediciones realizadas en pacientes de sexo femenino a las que se les administraron 5550 MBq de I-131. Los datos se ajustaron a una relación exponencial.



A partir de la ecuación (5) se estimó la dosis máxima probable que un individuo recibiría como *persona al cuidado del paciente*, por exponerse a un paciente a quien se le han administrado 5,550 MBq (150 mCi) de I-131 para tratamiento de cáncer diferenciado de tiroides.

$$dosis(\infty) = (0.25)(24)(0.01) \int_0^{\infty} (45.2) e^{-\frac{t}{0.63}}$$

$$dosis = 1.7 \text{ mSv}$$

- El factor (24) es para usar la vida media en días
- El factor (0.25) indica la fracción del tiempo total que el familiar al cuidado del paciente pasa a 1 metro del paciente, en este cálculo suponemos 6 horas por día a 1 metro del paciente. Este factor se podría establecer en una entrevista con el paciente para conocer sus condiciones particulares de vida.
- El factor (0.01) es un factor de conversión entre exposición y dosis (ver sección 1.4)
- El cálculo no aplica para niños, adolescentes (menores de 20 años), y mujeres embarazadas o lactando
- El cálculo no incluye la contribución por dosis interna, considerada menor que el 10% de la componente por dosis externa [10]

- El paciente y familiar al cuidado del paciente deben recibir instrucciones en forma oral y escrita sobre su conducta en los días siguientes a la terapia (ver Tabla 1.1)
- Se recomienda ver la referencia [24] sobre los cálculos de dosis en los sistemas de egreso ambulatorios.

Con base en nuestro cálculo, se puede proponer que un paciente al que se le han administrado 5,550 MBq (150 mCi) de I-131, no necesita permanecer bajo el control del hospital siempre y cuando se cumplan las condiciones enlistadas anteriormente. El personal médico junto con el paciente podrían optar por la modalidad ambulatoria, dado que la persona que atiende al paciente en su domicilio (persona al cuidado del paciente), y quien probablemente reciba la dosis más alta por exposición durante el cuidado del paciente, probablemente no rebasaría 5 mSv, que es la restricción de dosis recomendada por ICRP para las personas al cuidado del paciente [10].

Con los resultados obtenidos hasta el momento se puede hacer las siguientes observaciones sobre la protección radiológica en la terapia del cáncer diferenciado de tiroides con I-131:

a) Categoría de exposición ocupacional:

Los pasos específicos que se realizan manipulando el radioyodo para su administración al paciente conllevan tasas de dosis instantáneas bajas en las condiciones y precauciones observadas en el hospital (Tabla 3.15).

Sin embargo, las medidas de protección y la actitud de protección del personal ocupacional, no deben basarse únicamente en esta rapidez de dosis instantánea y deben tomar en cuenta el tiempo de permanencia en la cercanía del paciente o de las fuentes. La sobrevaloración a favor de la tasa de dosis, por encima de otros factores de igual importancia, como el tiempo, es un hecho reportado en los últimos años [6].

El mejor nivel de protección en una situación planeada de exposición no subestima el efecto crónico ni sobrevalora la tasa de dosis; en la situación planeada de exposición del proceso de la administración de I-131, se puede llegar a una diferencia de 1.7 mSv por año entre un esquema de protección diseñado erróneamente por episodios de bajas tasas de dosis únicamente y otro que toma en cuenta el efecto crónico (Ver Tabla 3.15), es decir, hace uso apropiado de los tres factores de protección y del principio de optimización.

La implementación de un sistema de egreso ambulatorio prevé este efecto para optimizar la protección radiológica: el familiar al cuidado del paciente se expone a bajas tasas de dosis por episodio, y el efecto crónico es reducido en el personal ocupacionalmente expuesto que labora en el hospital. Por el contrario, en el sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida, la protección radiológica de familiares del paciente y miembros del público se decide en un valor en la rapidez de exposición instantánea (5mR/h en México) a un metro del paciente.

Las sugerencias para minimizar la probabilidad de contaminación del personal ocupacional se enlistaron en la Tabla 3.16. El sistema de egreso ambulatorio también aporta una de las mejores formas del control de contaminación en el hospital: minimiza el ingreso de personas y equipo a las zonas controladas; se minimiza la generación de desechos radioactivos en el hospital, y si bien en esta modalidad los desechos se generan en la casa del paciente, la cantidad es mucho menor y el paciente mismo es quien se encarga de la segregación y manejo adecuado de los desechos de acuerdo a las instrucciones que recibe. Los resultados de la sección 3.2 presentan los inconvenientes no resueltos que existen en el manejo de los desechos debido a las grandes cantidades generadas y el tiempo necesario para segregar los desechos. El sistema de egreso usado actualmente en



el país hace impráctico el adecuado manejo de los desechos radioactivos (Ver sección 3.2), reteniendo y concentrando los residuos en el hospital, lo que aumenta la probabilidad y el grado de la contaminación.

b) Categorías de exposición pública y médica

La dosis recibida por un individuo, por exposición a un paciente, está gobernada por la distribución del yodo-131 en el cuerpo del paciente, por la rapidez con la que el paciente excreta el radioyodo y por el tiempo que pasa el individuo en la cercanía del paciente [24], [6], [10]. El sistema de egreso basado únicamente en la actividad retenida sólo considera la rapidez con la que el paciente excreta el radioyodo. No existe razón justificada para la omisión de la distribución del radionúclido y el tiempo de permanencia, en el diseño de la situación planeada de exposición del tratamiento con I-131, sin embargo sí se sabe que esta omisión lleva a medidas de protección no óptimas que se traducen en sobrecarga para el hospital y la familia del paciente [10], [24].

La sobrecarga en los hospitales tiene consecuencias importantes en la salud pública. En la Tabla 3.20 se muestran las altas tasas de sobrevida para el caso de cáncer de tiroides, el aumento en los últimos años, en el mundo, se debe al diagnóstico temprano y tratamiento efectivo. El tiempo es una variable importante en el tratamiento efectivo del cáncer de tiroides y su buen pronóstico no es el mismo para todas las etapas de la enfermedad, de ahí la importancia de recibir la terapia oportunamente con ayuda de un sistema de egreso ambulatorio, de este modo se maximiza el beneficio del uso del radioyodo.

**Tabla 3.20** Tasa de sobrevida relativa a 5 años por etapa de la enfermedad en el momento del diagnóstico.

Todas las etapas	Local	Regional	Distante
96.7%	99.7%	96.9%	56%

Basados en los resultados discutidos en las secciones 3.2.1 y 3.2.2, los pacientes que reciben terapia con I-131 para el tratamiento de cáncer diferenciado de tiroides en México podrían ser tratados en una modalidad ambulatoria siempre y cuando se cumplan las condiciones discutidas en este trabajo, y el personal médico encargado del tratamiento reciba un entrenamiento adecuado sobre esta modalidad de egreso. Las instrucciones juegan un papel primordial como requisito para el tratamiento de pacientes en forma externa, el médico nuclear responsable debe asegurarse de que el paciente y sus familiares que estarán en la cercanía del mismo, comprenden clara y adecuadamente la importancia de las restricciones en la conducta de ellos. Los pacientes que conviven con niños menores de **20 años** [10] que no puedan hacer los arreglos para enviar a sus hijos con otros familiares durante los tiempos de restricción enlistados en la Tabla 1.1 o evitar el contacto con **mujeres embarazadas o en período de lactancia**, no son candidatos a la modalidad externa.

La correcta implementación de un protocolo de egreso ambulatorio permitiría: (a) disminuir la probabilidad de contaminación interna y la magnitud de la dosis por exposición externa que de forma crónica recibe el personal ocupacionalmente expuesto encargado del tratamiento; (b) evitar la concentración y retención de los desechos radioactivos generados en el hospital, favoreciendo su dilución y dispersión en forma significativa; (c) promover la buena práctica médica, administrando la terapia en el tiempo correcto para el control de la enfermedad, una vez diagnosticada, y con las actividades de I-131 adecuadas para cada tratamiento; (d) ampliar la cobertura del servicio para la terapia del cáncer de tiroides; (e) reducir el tiempo de espera para recibir la terapia (que depende de la disponibilidad de camas de hospitalización) y (f) reducir los gastos de hospitalización.

Por último se resume una lista de pasos propuestos para llevar a cabo un egreso de paciente en la modalidad ambulatoria:

1. Entrevista personal con el paciente para evaluar sus condiciones de vida y trabajo, para determinar si el paciente puede o no puede ser egresado inmediatamente después de recibir la terapia. Los principales aspectos a evaluar en la entrevista son los siguientes:
  - Personas con las que vive (convivencia con niños, mujeres embarazadas o en lactancia)
  - Circunstancias culturales, socioeconómicas, actividades que realiza en convivencia cercana con personas y actividades propias de su edad.
  - Condiciones de su vivienda (número de habitaciones y baños, suministro de agua potable regular, tipo de vivienda)
  - Tipo de trabajo, condiciones laborales y convivencia con niños o mujeres embarazadas en sus actividades de trabajo
2. Definir la persona o personas al cuidado del paciente (mayor de 20 años)
3. Verificar que se cumplen todas las condiciones requeridas para estimar una dosis prospectiva para el familiar al cuidado del paciente a partir ecuación (5)
4. Estimar la dosis prospectiva que recibiría el familiar al cuidado del paciente de acuerdo a la información recabada en la entrevista. Este cálculo no aplica a infantes, adolescentes (menores de 20 años) y mujeres embarazadas
5. Proveer de instrucciones simples en forma oral y escrita sobre su conducta en los días siguientes a la terapia con los periodos de restricción de acuerdo a la Tabla 1.1. Esto requiere de educar al paciente en la importancia del periodo de restricción y sobre los siguientes puntos:
  - No permanecer en la proximidad de personas durante varios días (Ver Tabla 1.1)
  - Recibir instrucciones para minimizar la contaminación de objetos y personas en su cercanía
  - No convivir con niños por el periodo establecido en la Tabla 1.1
6. Preguntar al paciente si tiene algún inconveniente en llevar a cabo las instrucciones
7. Participar, junto con la persona a su cuidado, en un taller práctico sobre los hábitos de higiene que deberá tener en su casa durante el periodo de restricción programado
  - Limpieza de manos
  - Comportamiento en el baño para evitar contaminación
  - Higiene bucal y los utensilios usados (no compartirlos y separarlos)
  - Uso de utensilios de cocina
  - Dieta recomendada
  - Uso correcto de guantes es caso necesario
  - Manejo de desechos en casa
  - Incontinencia urinaria
8. Evaluar toda la información recopilada en los puntos anteriores y escoger la modalidad de egreso

## CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha realizado un análisis de la protección radiológica en la terapia con I-131 para pacientes con cáncer diferenciado de tiroides que se realiza en el INCan. Los resultados permiten extraer las siguientes conclusiones principales.

- A) Se elaboró una serie de recomendaciones enlistadas en la tabla 3.16 que contribuyó a optimizar la protección radiológica en el proceso de administración de I-131 a pacientes con CDT en el INCan. Actualmente en el INCan se ha implementado un esquema de protección que de acuerdo a nuestros cálculos es posible disminuir la dosis efectiva anual que recibe el personal encargado de administrar la terapia en más de 1 mSv.
- B) Los datos aportados en esta evaluación permitieron mejorar el control de la contaminación con I-131 en la sala de hospitalización, por ejemplo, se reportó a la radiofarmacia proveedora del material la contaminación removible cuantificada en los contenedores de plomo usados para transportar el radioyodo, el proveedor actualmente ha tomado medidas para controlar esta contaminación.
- C) Sobre la segregación de la ropa usada por los pacientes hospitalizados para recibir terapia con I-131, se determinó que la atenuación de la radiación en un bulto de desechos que contiene la ropa usada por el paciente no es despreciable y en consecuencia se requiere de un criterio mejor que la simple medición de la rapidez de exposición.
- D) Con base en los registros de rapidez de exposición medidos durante los días siguientes a la administración de 5,550MBq (150 mCi) de I-131 a pacientes en el hospital, se calculó que la dosis que un individuo al cuidado del paciente pudiera recibir durante ese periodo es del orden de 1.7 mSv, bajo las condiciones estipuladas en este trabajo.
- E) El uso de la actividad retenida como único criterio de egreso establecido en la norma mexicana tiene varias deficiencias que se han discutido en el capítulo III. En particular, basar las medidas de protección únicamente en la actividad retenida, puede tener muy poca relación con el comportamiento posterior del paciente y con la dosis última a familiares y miembros del público.

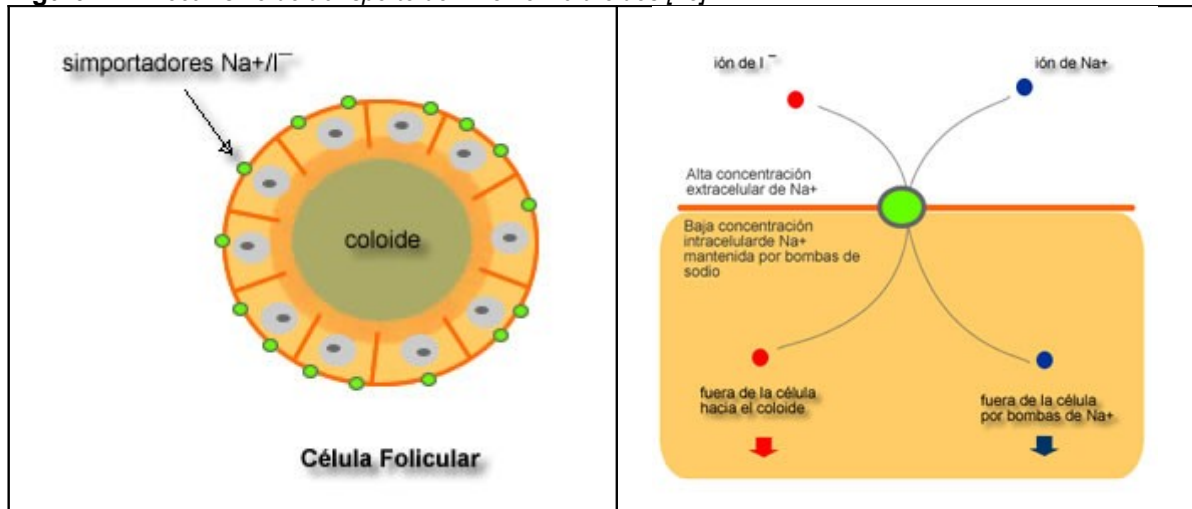
Respecto a este último punto, no existen datos actuales que respalden las sugerencias de la norma mexicana que recomienda solo tres días de restricciones después de la hospitalización para minimizar la probabilidad de un episodio de contaminación de mujeres embarazadas, infantes y personas menores de 20 años, o de exceder el límite de dosis para este grupo, de 1 mSv/año. Otra deficiencia importante es la omisión de la categoría de exposición ocupacional en el diseño de la situación planeada de exposición de un egreso. La norma mexicana [11] que regula el egreso de pacientes tratados con radioterapia dirigida requiere de una actualización y enmienda.

Finalmente, este trabajo aporta el diseño preliminar de un protocolo que permita aplicar la terapia ambulatoria, dentro de los límites y restricciones de dosis sugeridos por la ICRP. El siguiente paso en la implementación de una modalidad ambulatoria es un estudio piloto que permita además la formación adecuada de personal en esta técnica.

## Apéndice 1

El yodo que proviene de alimentos y bebidas es absorbido en forma iónica (i.e. yoduro) por el intestino delgado (500 microgramos diarios aproximadamente). Desde el intestino el yoduro se traslada a dos órganos principales: el riñón y la tiroides. Una vez en la sangre, en su paso por la tiroides, iones de yoduro son transportados desde la sangre hasta las células foliculares de manera indirecta por medio de una proteína transportadora llamada simportador sodio-yodo (NIS). Este mecanismo de transporte opera por un gradiente electroquímico de iones de sodio en la membrana plásmica basal; el gradiente se mantiene por una bomba de sodio encargada de sacar iones de sodio del folículo, se genera el gradiente, y el simportador ingresa iones de sodio y de manera indirecta, ingresa iones de yoduro (Ver Figura A.1).

**Figura A.1** Mecanismo de transporte del I-131 en la tiroides [25]



El simportador Na<sup>+</sup>/I<sup>-</sup> (NIS) está expresado principalmente en las células foliculares. Menores niveles de expresión pueden ser detectados en la glándula mamaria, glándulas salivales, estómago, y colon. La presencia del simportador en la glándula mamaria conlleva a la secreción de yodo en la leche materna [25].

### *La organificación del yodo. Yodación*

El yodo captado en su forma iónica en la tiroides, antes de combinarse en una forma orgánica, es oxidado por medio de una enzima peroxidasa (conversión en yodo reactivo). Una vez oxidado, es liberado en la interfase entre la célula folicular y el coloide donde se lleva a cabo la unión del yodo oxidado con residuos de tirosina, que están unidos a las moléculas de la tiroglobulina, para formar monoyodotirosina y diyodotirosina. El acoplamiento de ambas da lugar a la síntesis de las hormonas tiroideas, la triyodotironina (T3) y la tetrayodotironina o tiroxina (T4).

### *Regulación de la función tiroidea*

La tiroides es una glándula endocrina cuya función (captación de yodo, organificación, producción de hormonas tiroideas, etc.) está bajo el control de la hormona tirotrópica de la hipófisis anterior (TSH), La TSH a su vez está regulada por la hormona liberadora de Tirotrópica (TRH). Existe un segundo mecanismo que regula la función tiroidea independiente de la hormona TSH: la autorregulación tiroidea (efecto Wolff-Chenokoff), la cual opera dependiendo de la cantidad de yodo disponible en la sangre. Este mecanismo altera la captación de yodo para mantener la concentración intratiroidea de yodo dentro de ciertos niveles.

## Apéndice 2

### El algoritmo de cálculo de la rapidez de exposición para una fuente puntual

Puesto que hasta antes de su administración el radioyodo se encuentra confinado en un volumen pequeño (dentro de una cápsula de celulosa), y la distancia entre esta cápsula y el punto de interés será mayor por más de un factor de 10, se puede considerar como fuente puntual. Sabemos que la tasa de exposición debida a una fuente A puntual gamma es directamente proporcional a la actividad de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r, junto con un factor de proporcionalidad  $\Gamma$  que depende del emisor gamma y se le denomina constante específica de emisión gamma cuyo valor para el caso del I-131 es  $0.22 \text{ (R m}^2\text{) / (h Ci)}$ .

$$(dX / dt) = \Gamma(A/r^2) \quad (\text{A 2.1})$$

Una vez conocida la tasa de exposición podremos estimar la tasa de dosis de acuerdo a lo descrito en la sección 1.4.1. El uso del monitor para conocer la tasa de exposición de una fuente y/o el uso del activímetro para conocer la actividad de la fuente nos permitirá disponer de los datos necesarios para los cálculos o para comparar indirectamente los resultados del cálculo.

Algunos de los cálculos deberán realizarse tomando en cuenta los distintos grosores de blindaje utilizados durante la manipulación de la fuente, por ejemplo uso de distintas mamparas, mandiles plomados etc., otros se realizarán sin tomar en cuenta blindaje alguno porque el procedimiento mismo requiere de la manipulación de la fuente sin blindaje, por ejemplo en el momento que un paciente extrae la fuente de su blindaje para ingerirla. Estas distintas condiciones del blindaje se introducirán en nuestros cálculos a través de los siguientes esquemas para modelar el blindaje.

**Geometría ideal de haz ancho** (*supone que la fuente y el detector no están colimados*)

$$I = I_0 e^{-\mu(\text{en})x} \quad (\text{A 2.2})$$

El coeficiente lineal de absorción de energía se relaciona con la fracción de energía absorbida en el medio por la interacción con los fotones. En esta geometría se supone que todos los fotones dispersados alcanzan el detector, sobreestimando el blindaje requerido.

**Geometría ideal de haz angosto** (*supone que la fuente y el detector están colimados y alejados y que el espesor del medio es delgado*)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{A 2.3})$$

El coeficiente lineal de atenuación se relaciona con la cantidad de fotones que interaccionan con el medio. En esta geometría se ignora los fotones dispersos. Subestima el blindaje requerido.

**Atenuación con uso del factor BUILDUP o Factor de Incremento.** (*Corrección a la fórmula de atenuación A 2.3 anterior para tomar en cuenta los fotones dispersos*)

El factor B, -Buildup o incremento- nos indica cuantas veces es mayor la tasa de exposición generada por el haz transmitido; cuando el haz es ancho respecto de lo que sería con un haz angosto, este factor depende del material, de la energía de los fotones y el espesor del blindaje.

$$I = I_0 B e^{-\mu x} \quad (\text{A 2.4})$$

$B = (\text{tasa de exposición debida a radiación primaria + dispersada y secundaria}) / \text{tasa de exposición debida únicamente a radiación primaria}$

Los valores específicos para energías y espesores intermedios de blindaje se pueden obtener por interpolación de tablas reportadas en la literatura [26].

**Caso para un haz de fotones polienergético discreto.** (*Corrección por factor de incremento*)

$$I = I_0 (B_1 F_1 e^{-\mu_1 x} + B_2 F_2 e^{-\mu_2 x} + B_3 F_3 e^{-\mu_3 x} + \dots + B_n F_n e^{-\mu_n x})$$

$F_n = \text{fracción de } I_0 \text{ que corresponde a la energía } n \text{ del haz (MeV)} - (E_n Y_n) / \sum E_i Y_i$

$Y_i = \text{probabilidad de emisión por cada decaimiento atómico para cada energía}$

## Apéndice 3

### *Aspectos relacionados con la Exposición Interna*

Regularmente un paciente permanece unas 48h en la sala de hospitalización para cumplir con el criterio de egreso de la norma mexicana [11]. Durante estas 48h promedio que el paciente estará eliminando I-131 de su cuerpo a través de diversas vías, generará desechos radioactivos derivados de la contaminación de objetos con el I-131 excretado por el paciente en la sala de hospitalización. En la tabla A 3.1 y A 3.2 se presentan los datos reportados relacionados con la eliminación de I-131 y con la contaminación debida a esta eliminación del paciente los días posteriores a la administración de la terapia.

### *Las vías de eliminación del I-131*

El I-131 usado en la terapia del cáncer de tiroides *viene en una sal (INa) que sirve de estabilizador químico y biológico para su uso en humanos* (yoduro de sodio). El radioyodo puede ingresar al cuerpo a través de inhalación, absorción por piel o ingestión. Usualmente es administrado al paciente para el tratamiento de hipertiroidismo o cáncer de tiroides en forma oral en cápsula o en solución líquida. Una vez que entra al cuerpo es absorbido en poco tiempo del tracto gastrointestinal al torrente sanguíneo y de ahí pasa al proceso de captación por parte del órgano blanco: el tejido tiroideo funcional (diferenciado). Una vez organificado por el tejido tiroideo funcional, las hormonas tiroideas producidas quedan marcadas con radioyodo que de manera natural son liberadas al torrente sanguíneo y que son metabolizadas por el hígado y músculos. Algo del radioyodo es combinado en el hígado y excretado al lumen intestinal. Las glándulas salivales, estómago, y el tejido mamario contienen epitelio que es capaz de mantener una concentración de yodo inorgánico aproximadamente 1500 veces mayor que el encontrado en plasma. El radioyodo es principalmente excretado de manera natural por medio de la orina y en menores cantidades por la saliva, sudor, secreciones nasales, heces fecales y exhalación. En caso de presentarse en las primeras horas después de la administración del radioyodo, el vómito es una forma no deseable de eliminación de radioyodo.

La rapidez con que se elimina el radioyodo del cuerpo varía de persona en persona, de su hidratación y función renal, pero es bien conocido que influye el tipo de terapia (cáncer de tiroides o hipertiroidismo), de la cantidad de tejido tiroideo funcional en el cuerpo del paciente y si es una terapia ablativa (por primera vez) o terapia de seguimiento (recurrencia del cáncer).

En la Tabla A 3.1 se presenta el porcentaje de la actividad administrada que se descarga por orina en el sistema de alcantarillado debido a pacientes que han recibido terapia con I-131 por carcinoma de tiroides.

**Tabla A 3.1** *Porcentaje excretado de la actividad administrada de I-131 por medio de la orina*

<b>% excretado de la actividad administrada (acumulado)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>
55 %	24
77 %	48
83%	72

La actividad en varios fluidos corporales medida por diferentes autores se presenta en la Tabla A 3.2

**Tabla A 3.2** Porcentaje excretado de la actividad administrada de I-131 en varios fluidos corporales. Los datos fueron tomados de la referencia [10]

Excreción	Tratamiento (actividad administrada)	Actividad medida	Tiempo transcurrido desde la administración de la terapia	máxima excreción al tiempo:
Saliva	Hipertirodismo (200-600 MBq)	0.6-208 Bq/g/MBq	24 h	24 h
		27 Bq/g/MBq	72 h	
	Hipertiroidismo (25 mCi)	10 $\mu$ Ci/ml		
		11 GBq	4 MBq/ml	
Sudor, palma de la mano		13-1,027 Bq/cm <sup>2</sup>	24 h	
Sudor	Hipertiroidismo (25 mCi)	0.01 $\mu$ Ci/ml		
Sangre	Hipertiroidismo (25 mCi)	0.5 $\mu$ Ci/ml		
Exhalación		0.1% de la actividad administrada		
	Mayor en hipertiroidismo que en cáncer de tiroides	0.008% - 0.03 %		
	Cáncer de tiroides	20-190 Bq/l		1-48h
	Cáncer de tiroides	2.2-4.9 MBq (promedio: 0.08-0.44 Bq/l)*		Total para 4 pacientes

\*190 cambios/día en la sala donde se hicieron las medidas. En USA, la concentración máxima permisible para un área restringida es de 0.33 Bq/l



## Referencias

- 1) The American Thyroid Association. Management Guidelines for Patients with Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer. THYROID, Vol. 16, No.2, 2006.
- 2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION. UNSCEAR 2000 Vol.1 Report to the General Assembly. Annex E. Occupational Radiation Exposures. 2000;1:1-158. <http://www.unscear.org/docs/reports/annexe.pdf>
- 3) Pierzo JA, Estrada EL, García FO, et al. Radioterapia Molecular. Revisión de las tres modalidades más frecuentes de la terapia con radionúclidos. Sociedad Mexicana de Medicina Nuclear e Imagen Molecular 2009;1(2):59-75.
- 4) Richard J. Robbins, Martin J. Schlumberger. The evolving role of I-131 for the treatment of differentiated thyroid carcinoma. J Nucl Med 2005; 46(1):28S-37S.
- 5) Klain M, Ricard M, Leboulleux S, Baudin E, Schlumberger. Radioiodine therapy for papillary and follicular thyroid carcinoma. EJNM 2002;29(2):479S-485S.
- 6) Barrington SF, Kettle AG, O'Doherty MJ, et al. Radiation Dose Rates from Patients Receiving Iodine-131 Therapy for Carcinoma of the Thyroid. Eur J Nucl Med 1996;23:123-130.
- 7) Barrington SF, O'Doherty MJ, Kettle AG, et al. Radiation Exposure of the Families of Outpatients Treated with Radioiodine (iodine-131) for Hyperthyroidism. Eur J Nucl Med 1999;26:686-692.
- 8) Barrington SF, Anderson P, Kettle AG, et al. Measurement of the Internal Dose to the Families of Outpatients Treated with <sup>131</sup>I for Hyperthyroidism. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2008;35:2097-2104.
- 9) ICRP Publication 105. Radiological Protection in Medicine. Ann ICRP 2008;37(5):1-108.
- 10) ICRP Publication 94. Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides. Ann ICRP 2004;34(2):1-79.
- 11) Norma Oficial Mexicana NOM-013-NUCL-1995, requerimientos de seguridad radiológica para egresar a pacientes a quienes se les ha administrado material radiactivo. CNSNS, [http://www.cnsns.gob.mx/acerca\\_de/marco/normas\\_oficiales.aspx](http://www.cnsns.gob.mx/acerca_de/marco/normas_oficiales.aspx)
- 12) Radiation Oncology Physics: A handbook for teachers and students /Editor Podgorsak EB. IAEA 2005;45-60.
- 13) Stabin MG. Radiation Protection and Dosimetry, An introduction to health physics. Springer 2007;67-74.
- 14) Iturbe F, Gamboa de Buen I. Protección Radiológica. Curso para personal ocupacionalmente expuesto. Apuntes. ICN-UNAM 2007. Anexo y pág. 32.
- 15) ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP 2007;37(2-4):1-332.
- 16) Parthasarathy KL, Crawford ES. Treatment of Thyroid Carcinoma: Emphasis on High-Dose <sup>131</sup>I Outpatient Therapy. J Nucl Med Tech 2002;30:165-171.
- 17) Pierzo JA, Herrera JA. Recomendaciones al proyecto RLA/9/067 de la IAEA 2009 por la sociedad mexicana de medicina nuclear e imagen molecular (SMMNIM) 2009.
- 18) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. 2006;1-322.
- 19) Norma Oficial Mexicana NOM-008-NUCL-2003, control de la contaminación radiactiva.
- 20) Rodríguez A. Diseño de un protocolo para la vigilancia de incorporaciones de material radioactivo en el personal ocupacionalmente expuesto de un departamento de medicina nuclear. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias Físicas, UNAM 2008.

- 21) IAEA Training Material on Radiation Protection in Nuclear Medicine. Lectures Part 5-Occupational Protection, 8-Optimization of medical exposure. Therapeutic Procedures IAEA 2007. (<http://rpop.iaea.org>)
- 22) Smart R. Task-Specific Monitoring of Nuclear Medicine technologists' radiation exposure. Radiation Protection Dosimetry. 2004;109(3):201-209
- 23) Cherry SR. Physics in nuclear medicine. 3<sup>rd</sup> Ed. Elsevier 2003. Págs. 135-140.
- 24) Carol S. Marcus, Jeffrey A. Siegel, Michael G. Stabin. Considerations for release of patients administered radiopharmaceuticals. <http://www.doseinfo-radar.com/radar-int-nm-release.html>
- 25) Pocock G, Richards C, Burgh D. Human Physiology, the basis of medicine. Oxford University Press, 2<sup>nd</sup> Edition. 2004
- 26) Radiological Health Handbook. U.S. Department of Health, Education and Welfare, FDA 1970. Pág. 146.